



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ  
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2017-18  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ  
(ΠΔ 97 /2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

ΑΝΔΡΟ Μ Α Χ Η Κ Ρ Α Β Β Α Ρ Η

Α.Μ.: 2016018020

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της Κας Ανδρομάχης Κράββαρη εγκρίνεται:

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Καθηγητής Δρ. Νικόλαος Ιω. Δάρας (Επιβλέπων),



.....

Καθηγητής Δρ. Απόστολος Μπουρνέτας,

.....



.....

Καθηγητής Ευάγγελος Γρηγορούδης,.....



,.....

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό .....

Έτος 2020



ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Αφιερώσεις

Αυτή η εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου, Δημήτρη και Ιωάννα, στις αδερφές μου  
Χριστίνα –Μαρία και Αχιλλεία και στον σύζυγο μου Παναγιώτη.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Ιω. Δάρα για την τεράστια συμβολή του και καθοδήγηση του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και τους καθηγητές του τμήματος για τις γνώσεις που μας μετέδωσαν ανοίγοντας νέους γνωστικούς ορίζοντες για την μετέπειτα πορεία μας.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

# Περιεχόμενα

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>XV</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>XV</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>	<b>XV</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι.....</b>	<b>5</b>
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....</b>	<b>5</b>
I.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ .....	5
I.1.1. Ορισμός της πυρκαγιάς.....	5
I.1.2. Μορφολογία δασικής πυρκαγιάς.....	6
I.1.3. Η σχετική κατεύθυνση της διάδοσης .....	8
I.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ .....	9
I.2.1. Ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς (ROS).....	9
I.2.2. Θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (HPA).....	10
I.2.3. Ένταση πυρκαγιάς (Fireline Intensity – FLI).....	10
I.2.4. Μέγεθος φλόγας .....	11
I.2.5. Επιπτώσεις στις προσομοιώσεις συμπεριφοράς της φωτιάς.....	11
I.2.6. Καύσιμο επιφάνειας.....	12
I.2.7. Καύσιμο δασικού θόλου.....	12
I.2.8. Περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ .....</b>	<b>14</b>
<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....</b>	<b>14</b>
II.1. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΝΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΤΩΝ ΔΑΣΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	14
II.1.1. Μεθοδολογία.....	16
II.1.2. Συντελεστής βεβαιότητας (Certainty Factor – CF).....	16
II.1.3. Το ενισχυμένο δέντρο παλινδρόμησης (BRT) .....	17
II.1.4. Το γενικευμένο additive μοντέλο (GAM) .....	17
II.1.5. Το τυχαίο δάσος (RF) .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ.....</b>	<b>20</b>

<b>Η ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΒΕΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....</b>	<b>20</b>
III.1. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ UAV ΚΑΙ ΣΜΗΝΟΥΣ UAV .....	20
III.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ .....	21
III.2.1. Προσέγγιση: μοντέλο δικτυωμένου σμήνους .....	22
III.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ UAV .....	24
III.4. ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΛΛΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ .....	26
III.4.1. Μοντέλο επέκτασης πυρκαγιάς (Fire Spread Model).....	27
III.4.2. Ανασυγκρότηση σχηματισμού UAV με βάση το SMC.....	27
III.4.3. Ανασυγκρότηση σχηματισμού από διάφορες Ομάδες UAV - Αντιμετώπιση πολλών σημείων πυρκαγιάς .....	35
III.4.4. Παρακολούθηση δασών και ανίχνευση πυρκαγιάς με συνθήκες εκτεταμένου ανεφοδιασμού.....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV.....</b>	<b>40</b>
<b>ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ</b>	<b>40</b>
IV.1. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΘΑΜΝΩΔΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ	40
IV.1.1. Ελλειπτικό μοντέλο για τη Μοντελοποίηση και Προσομοίωση των Δασικών Πυρκαγιών.....	42
IV.1.2. Η προσέγγιση Richards.....	43
IV.1.3. Εφαρμογή της θεωρίας του περιγράμματος (Envelope Theory) .....	47
IV.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	52
IV.2.1. Μοντέλο κυτταρικού αυτοματοποιημένου συστήματος (Cellular Automated Model System) για την πρόβλεψη της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών .....	52
IV.2.1.i. Ορισμός του πλέγματος .....	53
IV.2.1.ii. Κατάσταση των κυττάρων .....	53
IV.2.1.iii. Κανόνες εξέλιξης .....	54
IV.2.1.iv. Μεταβλητές που επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς .....	55
IV.2.1.v. Επίδραση του τύπου και της πυκνότητας της βλάστησης.....	56
IV.2.1.vi. Επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου.....	56
IV.2.1.vii. Επίδραση της κλίσης του εδάφους.....	57
IV.2.1.viii. Επίδραση κηλίδας πυρκαγιάς.....	58
IV.3. ΠΡΩΤΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (CELLULAR AUTOMATED SYSTEMS) ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑΤΟΣ (FILTRATION THRESHOLD ANALYSIS).....	60
IV.3.1. Αναπαράσταση των πιθανολογικών κυτταρικών αυτομάτων (Probabilistic Cellular Automata).....	60
IV.3.1.i. Πολλαπλές καταστάσεις πιθανολογικών κυτταρικών αυτομάτων .....	60
IV.3.1.ii. Θεωρία διήθησης .....	62
IV.3.1.iii. Κρίσιμη πιθανότητα για τη διάδοση της πυρκαγιάς - Μέθοδος προσέγγισης μέσου πεδίου στα PCA.....	62

IV.3.1.iv. Παραγωγή κρίσιμων πιθανοτήτων.....	65
IV.4. ΔΕΥΤΕΡΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (CELLULAR AUTOMATED SYSTEMS), ΕΝΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΥΤΤΑΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ .....	65
IV.4.1. Μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς.....	65
IV.4.2. Επέκταση πυρκαγιάς μέσω κυτταρικών αυτομάτων .....	66
IV.4.3. Τροποποίηση των εξισώσεων διάδοσης πυρκαγιάς.....	67
IV.4.4. Ορισμός των τιμών συντελεστών διόρθωσης.....	68
IV.4.5. Αξιολόγηση μοντέλου.....	68
IV.5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΤΤΑΡΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ.....	69
IV.5.1. Δημιουργία προσέγγισης με χρήση μοντέλου: ένα νέο κυτταρικό αυτόματο .....	69
IV.5.1.i. Το κύτταρο και ο ορισμός των καταστάσεών του .....	69
IV.5.1.ii. Κανόνες μετάβασης.....	69
IV.5.1.iii. Το φαινόμενο του γειτονικού ανέμου $\Omega(i, j)t$ .....	72
IV.6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ .....	72
IV.6.1. Μαθηματική Μοντελοποίηση .....	72
IV.6.2. Αριθμητική Λύση .....	73
IV.6.2.i. Διάκριση χώρου και χρόνου.....	73
IV.6.2.ii. Σταθεροποίηση .....	74
IV.7. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ .....	76
IV.7.1. Απόδοση συμβόλων – Ονοματολογία.....	76
IV.7.2. Το μακροσκοπικό μοντέλο καύσης.....	78
IV.7.2.i. Ακτινοβολία από τη φλόγα .....	80
IV.7.2.ii. Απώλειες ακτινοβολίας.....	81
IV.7.2.iii. Διάδοση.....	82
IV.7.3. Παράμετροι εισαγωγής του μοντέλου διάδοσης .....	82
IV.7.3.i. Ιδιότητες φλόγας .....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ V .....</b>	<b>85</b>
<b>ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>85</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>87</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Γραφική αποτύπωση δασικής πυρκαγιάς .....	7
Σχήμα 2. Γραφική αποτύπωση επέκτασης δασικής πυρκαγιάς .....	8
Σχήμα 3. Το μέγεθος της φλόγας .....	11
Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας στη χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών .....	15
Σχήμα 5. Εικόνα του ελλειπτικού μοντέλου φωτιάς .....	33

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Χρονική επίδοση του σμήνους UAV .....	25
Πίνακας 2. Τροποποιήσεις προσαρμογής της ταχύτητας προσπέλασης .....	67

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Η πυρκαγιά που καίει υπό ομοιογενείς συνθήκες .....	6
---	---



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, στο πρώτο κεφάλαιο, αναφερόμαστε στη συμπεριφορά των πυρκαγιών. Η δασική πυρκαγιά είναι ταυτόχρονα ένας φυσικός παράγοντας για την οικολογική αλλαγή και ένα δυνητικά καταστροφικό φυσικό φαινόμενο παρόμοιο με τους σεισμούς και τις πλημμύρες (Scott, 2012). Σε αυτή την ενότητα, η πυρκαγιά διακρίνεται από άλλες μορφές φωτιάς, ορίζουμε τη μορφολογία της πυρκαγιάς και τα τέσσερα πρωταρχικά ποσοτικά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς της και εισάγουμε τις πέντε κύριες επιρροές στις προσομοιώσεις συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Επίσης, αναφέρουμε το ρυθμό επέκτασης του μετώπου της φωτιάς (Rate of Spread – RoS), τη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (Heat per Unit Area – HPA) και το μέγεθος της φλόγας (Flame Size – FL) (Scott, 2012).

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι μια επισκόπηση των μοντέλων συμπεριφοράς των καυσίμων της πυρκαγιάς, όπως χρησιμοποιείται στα συστήματα μοντελοποίησης συμπεριφοράς πυρκαγιάς, με περιγραφή των απαιτούμενων παραμέτρων μοντέλου καυσίμου. Στη συνέχεια περιγράφονται τα τυποποιημένα μοντέλα συμπεριφοράς που αναδείχθηκαν από προσπάθειες μοντελοποίησης της δασικής πυρκαγιάς και παρουσιάζουμε τα πέντε χαρακτηριστικά μιας δασικής περιοχής που επηρεάζουν τις προσομοιώσεις επιφάνειας της συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς. Τα μοντέλα BRT, GAM, GAM, χρησιμοποιήθηκαν για τη διάκριση μεταξύ παρουσίας και απουσίας δασικών πυρκαγιών και της χαρτογράφησης τους (Scott, 2012, Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano & Semeraro, 2016).

Στο τρίτο μέρος, αναλύονται τα αυτόνομα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aircraft Vehicles – UAVs) και τα πιθανά προβλήματα που ανακύπτουν από τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού μοντέλου κίνησης σμήνους και μιας τοπολογίας δικτύου μεταξύ ενός δικτύου UAV, τα οποία αναπτύσσονται ειδικά για το σενάριο της υψηλής ποιότητας της δασικής χαρτογράφησης (Brust & Strimbu, 2015).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης ενός μοντέλου κυψελοειδούς αυτοματοποίησης που περιγράφει τη δυναμική της δασικής πυρκαγιάς σε ένα ορεινό τοπίο λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ο τύπος και η πυκνότητα της βλάστησης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και το φαινόμενο των κηλίδων. Τα πολλαπλών πιθανοτικών συστήματα κυτταρικών αυτομάτων αναπτύσσονται για τη μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών. Προτείνεται ένα μοντέλο δυναμικής δασικής πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψη τις εντάσεις των πυρκαγιών ως πολλαπλές καταστάσεις και έχοντας την πιθανότητα η εξάπλωση της φωτιάς να εξαρτάται από τις καταστάσεις των γειτονικών

κυττάρων της επιφάνειας. Επιπλέον, εισάγεται η ιδέα του ορίου διάχυσης για να χαρακτηρίσει τη δύναμη της διάδοσης της φωτιάς (Alexandridis, Vakalis, Siettos & Bafas, 2008).

Χρησιμοποιείται μια προσέγγιση αριθμητικής βελτιστοποίησης για να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές για τους διορθωτικούς συντελεστές. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που παρέχουν δύο πολύ γνωστοί προσομοιωτές κυτταρικής αυτοματοποίησης. Η ποσοτική προσομοίωση της κατανομής των δασικών πυρκαγιών παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό της ταχείας διαχείρισης κινδύνων και στην εφαρμογή αποτελεσματικών πολιτικών αντιμετώπισης των πυρκαγιών. Ως προτιμώμενη προσέγγιση μοντελοποίησης, το κυψελοειδές αυτόματο (Cellular Automaton – CA) έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των σύνθετων μηχανισμών διάδοσης πυρκαγιάς. Ωστόσο, σε παραδοσιακά μοντέλα CA, απαιτούνται περιεκτικές μελέτες για τις φυσικές καταστάσεις των δασικών πυρκαγιών, προκειμένου να καθοριστούν οι τοπικοί κανόνες μετάβασης (Pak & Hayakawa, 2011, Ghisu, Arca, Pellizzaro & Duce, 2015).

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, αναφέρονται τα γραφικά πλεονεκτήματα των GPU που μπορούν να αξιοποιηθούν μέσα από την αλληλεπικάλυψη της κατεύθυνσης του ανέμου, καθώς και με χάρτες βλάστησης, κλίσης και όψης, λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά χαρακτηριστικά του τοπίου για τη διάδοση της φωτιάς. Η στοχαστική διάδοση της φωτιάς πραγματοποιήθηκε με ένα μοντέλο πιθανότητας που εξαρτάται από την όψη, την κλίση, την κατεύθυνση του ανέμου και τη βλάστηση (Denham & Laneri, 2018).

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο μέρος αυτής της εργασίας θα αναφέρουμε τα μαθηματικά μοντέλα και τα συστήματα που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς σε μια δασική περιοχή, παρέχοντας επίσης μια σύντομη επισκόπηση των σχετικών εργαλείων λογισμικού.

Πρώτα απ' όλα, προς αυτή την κατεύθυνση, θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο σχεδιασμένο για την προσομοίωση μοντέλων επέκτασης φωτιάς σε ετερογενείς περιοχές και θα γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που ελέγχουν τη διάδοση της φωτιάς. Επίσης, θα γίνει μια προσέγγιση για την κατασκευή ενός μοντέλου σταθερής επέκτασης της δασικής πυρκαγιάς με τη μορφή ελλείψεως.

Συγκεκριμένα, θα μελετήσουμε τα μοντέλα που βασίζονται των κυτταρικών αυτομάτων και στα οποία η χρησιμοποιούμενη εξίσωση μπορεί να τροποποιηθεί μέσω ενός αριθμού διορθωτικών παραγόντων. Ειδικότερα, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης ενός κυτταρικού αυτομάτου που περιγράφει τη δυναμική της δασικής πυρκαγιάς σε μια ορεινή περιοχή λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ο τύπος της βλάστησης και η πυκνότητα, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και του φαινομένου.

Σε αυτή την περίπτωση, η στοχαστική μελέτη της διάδοσης της φωτιάς πραγματοποιείται μέσω ενός υποδείγματος που εξαρτάται από την εμφάνιση, την κλίση, την κατεύθυνση του ανέμου και τον τύπο της βλάστησης. Εφαρμόζοντας μια στρατηγική αναζήτησης γενετικού αλγορίθμου και χρησιμοποιώντας προσομοιωμένες πυρκαγιές, απορρέουν πέντε τιμές παραμέτρων οι οποίες χαρακτηρίζουν την επέκταση της φωτιάς. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας προσομοίωσης πυρκαγιάς επιτρέπει τον υπολογισμό του σημείου ανάφλεξης της φωτιάς (όταν αυτό είναι άγνωστο ή σχετικά αβέβαιο) καθιστώντας την προσέγγιση αυτή κατάλληλη για την ανάλυση της κατανομής πυρκαγιάς χωρίς να είναι γνωστό, τόσο το σημείο προέλευσης, όσο και ο τρόπος εξάπλωσής της.

Στο τέλος αυτού του πρώτου μέρους, η διάδοση πυρκαγιάς θα προσομοιώνεται αριθμητικά με την ανάλυση του συστήματος που διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη τα στερεά αντικείμενα, που αντιπροσωπεύουν τη βλάστηση και το περιβάλλον αέριο μίγμα. Η βλάστηση αντιπροσωπεύεται από μια συλλογή σωματιδίων που αποτελείται από ένα μίγμα ξηρής ύλης (ξύλου), νερού, άνθρακα συν ένα υπόλειμμα ορυκτών (τέφρα). Οι φυσικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα διάφορα στάδια της

θερμικής αποσύνθεσης της βλάστησης (ξήρανση, πυρόλυση, ετερογενής καύση) αξιολογούνται με πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται με θερμοβαρυμετρική ανάλυση.

Το μοντέλο που περιγράφει την αποσύνθεση των σωματιδίων συνδυάζεται με τον υπολογισμό της αντιδραστικής στροβιλώδους ροής που προκύπτει από την καύση των προϊόντων πυρόλυσης με τον αέρα του περιβάλλοντος. Η σύζευξη σωματιδίων / αερίων εξασφαλίζεται όσον αφορά την παραγωγή ή την καταστροφή στις εξισώσεις χημικής διατήρησης. Η δύναμη έλξης που προκαλείται από τα σωματίδια, καθώς και οι μετατοπίσεις και οι ακτινοβολίες λαμβάνονται επίσης υπόψη. Η παρουσία σωματιδίων αιθάλης στη φλόγα και η σύνθεση του μείγματος αερίων λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση του συντελεστή απορρόφησης και της έντασης της ακτινοβολίας.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται αλγόριθμοι δασικής παρακολούθησης και ανίχνευσης πυρκαγιάς από ένα σύμπλεγμα μη επανδρωμένων οχημάτων (Unmanned Aircraft Vehicles – UAV's). Μαζί με εξελεγμένους αισθητήρες, τα UAVs μπορούν να εξοπλιστούν με συστήματα επικοινωνίας σχεδιασμένα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Αν και αυτή η ενδοεπικοινωνία θέτει ερωτήματα σχετικά με το πώς θα πραγματοποιείται η διαχείριση της δομής επικοινωνίας σε συνδυασμό με την ευελιξία κίνησης, στην εργασία αυτή θα εξετάσουμε το πρόβλημα του σχεδιασμού ενός αποτελεσματικού μοντέλου κυκλοφορίας και χωροταξικής εφαρμογής μεταξύ των UAV's με σκοπό την επιτυχημένη και αποτελεσματική παρακολούθηση των δασών.

Τέλος, θα προταθεί μια υβριδική μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης για τη χωρική μοντελοποίηση της ευαισθησίας των δασικών πυρκαγιών με σκοπό να καταστεί δυνατή η διερεύνηση των καλύτερων τιμών για τις παραμέτρους του υποδείγματος. Επιπλέον, θα προταθούν και θα κατασκευαστούν αριθμητικοί δείκτες που επηρεάζουν τη δασική πυρκαγιά για να γίνει σύγκριση μεταξύ των σχετικών χαρτών ευαισθησίας σε ότι αφορά τις δασικές πυρκαγιές. Ακόμη, θα προταθεί ένα υπόδειγμα δυναμικής περιγραφή της δασικής πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση της φωτιάς και το χαρακτηρισμό της δύναμης, σε ότι αφορά τις δασικές πυρκαγιές. Αυτή η μέθοδος θα παράσχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της κρίσιμης πιθανότητας υπό την οποία οι δασικές πυρκαγιές περιορίζουν την επέκτασή τους σε απείρως μεγάλη έκταση.

# Κεφάλαιο I

## Προσομοίωση και χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς

### I.1. Προσομοίωση της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς

Η δασική πυρκαγιά είναι ταυτόχρονα ένας φυσικός παράγοντας που προκαλεί οικολογικές αλλαγές και ένα δυνητικά καταστροφικό φυσικό φαινόμενο. Καθώς η συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιών αυξήθηκε σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για τον (μαθηματικό) υπολογισμό της συμπεριφοράς των πυρκαγιών.

Στην πρώτη ενότητα δίνουμε τον ορισμό της δασικής πυρκαγιάς, που τη διακρίνει από άλλες μορφές καύσης και άλλους τύπους πυρκαγιάς. Στο δεύτερο μέρος συζητάμε δύο τρόπους περιγραφής της μορφολογίας ενός τύπου πυρκαγιάς. Στο τρίτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε σε τέσσερα βασικά, ποσοτικά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς της φωτιάς: το ρυθμό μετάδοσης, τη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας, την ένταση φωτιάς και το μέγεθος φλόγας. Τέλος, στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι πέντε κύριες επιρροές κατά την προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτιάς: τη δομή του καυσίμου, την περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου, τα χαρακτηριστικά διαβάθμισης, τα χαρακτηριστικά ανέμου και σχετική κατεύθυνση διάδοσης της φωτιάς.

#### I.1.1. Ορισμός της πυρκαγιάς

Πριν αναφερθούμε στο μοντέλο συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς, θα πρέπει να εξηγήσουμε ορισμένους βασικούς ορισμούς: Η καύση είναι μια περίπλοκη διαδικασία κατά την οποία το καύσιμο θερμαίνεται, αναφλέγεται και οξειδώνεται γρήγορα, αποδίδοντας θερμότητα κατά τη διαδικασία. Η πυρκαγιά είναι μια ειδική περίπτωση καύσης με αυτοματισμό ανάφλεξης μέσω της εκπομπής θερμότητας και συνοδεύεται από φλόγα ή / και καπνό. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς η παροχή καυσίμου ελέγχεται από τη θερμότητα που εκπέμπεται κατά την καύση (Scott, 2012).

Τα σωματίδια στερεού καυσίμου μετατρέπονται σε εύφλεκτα αέρια μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται *πυρόλυση* - η διάσπαση των σύνθετων υλικών κυτταρίνης και λιγνίνης σε ένα απλούστερο εύφλεκτο υλικό μέσω της εφαρμογής θερμότητας (Scott, 2012).

Οι τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την παρουσία πυρκαγιάς και δημιουργούν το λεγόμενο «*τρίγωνο της πυρκαγιάς*» είναι η *φωτιά*, η *θερμότητα* και το *οξυγόνο*. Εάν λείπει ένας από αυτούς τους παράγοντες, η φωτιά θα σβήσει. Πρέπει να υπάρχει μια πηγή καυσίμου για καύση, μια πηγή θερμότητας για την προώθηση της αντίδρασης και το οξυγόνο σε επαρκή συγκέντρωση για να διατηρηθεί η αντίδραση.

Ανάλογα με τη θέση της φωτιάς και τη φύση της πηγής καυσίμου, οι τύποι πυρκαγιάς που δημιουργούνται διαφέρουν. Ο όρος «*πεδίο της φωτιάς*», αναφέρεται σε ένα σημαντικό χαρακτηριστικό μιας πυρκαγιάς: την (οποιαδήποτε) περιοχή στην οποία μπορεί να εξαπλωθεί μια πυρκαγιά. Η δασική πυρκαγιά είναι αυτοσυντηρούμενο σύστημα σε ότι αφορά το καύσιμο, που έχει τη δυνατότητα να κάψει από τη βλάστηση έως ένα ολόκληρο τμήμα μιας περιοχής (Scott, 2012).

### Ι.1.2. Μορφολογία δασικής πυρκαγιάς

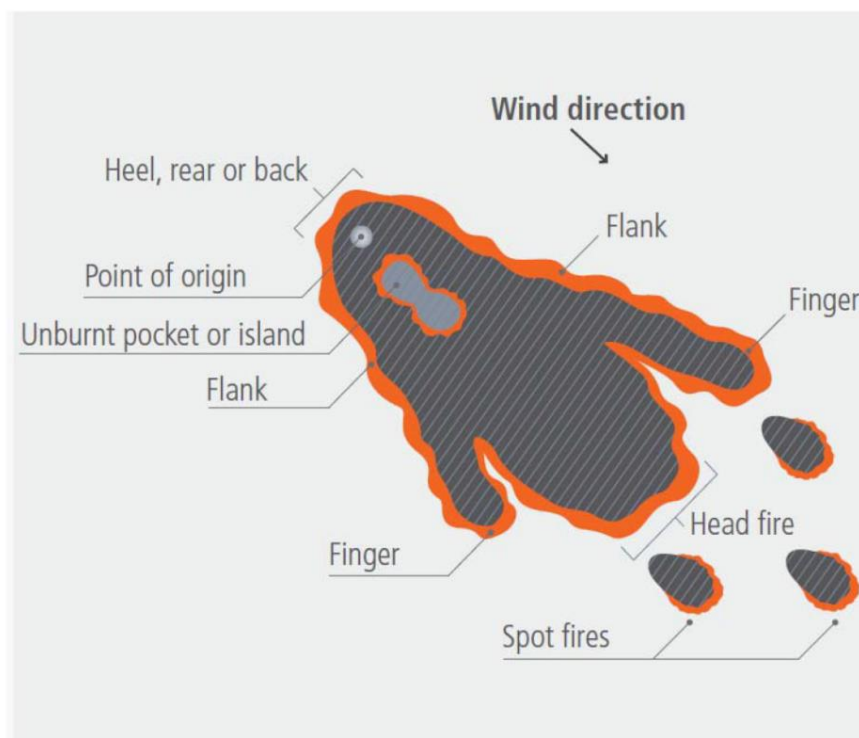
Η μορφολογία της πυρκαγιάς περιγράφεται με δύο διαφορετικούς τρόπους: από τα διαφορετικά σχήματα, όπου οι καμένες και μη καμένες περιοχές δασικής πυρκαγιάς μπορούν να σχηματιστούν από τον προσανατολισμό του εύφλεκτου μέσου σε σχέση με την κατεύθυνση της μέγιστης εξάπλωσης, τη λεγόμενη «*σχετική κατεύθυνση διάδοσης*» (Scott, 2012).



Εικόνα 1. Η πυρκαγιά που καίει υπό ομοιογενείς συνθήκες

(Πηγή: azfamily.com)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, μια πυρκαγιά που καίει με συνεχείς ανέμους και συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες σε ένα ομοιόμορφο περιβάλλον φωτιάς παίρνει τη μορφή ελλειπτικού σχήματος.



**Σχήμα 1. Γραφική αποτύπωση δασικής πυρκαγιάς**

(Πηγή: Penney, G.; Richardson, S. Modelling of the Radiant Heat Flux and Rate of Spread of Wildfire within the Urban Environment. Fire 2019, 2, 4.)

Τα διάφορα σημεία της πυρκαγιάς καίγονται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με τις διαφορές στη σύσταση του περιβάλλοντος, όπως είναι η διαφορετική δομή καυσίμου, η απότομη κλίση, η περιεκτικότητα σε υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου κλπ. Η επίδραση αυτής της ετερογένειας στο περιβάλλον της πυρκαγιάς σημαίνει ότι παρόλο που το μέτωπο φωτιάς φαίνεται να απλώνεται σαν απλή ολίσθηση, το γενικό μοτίβο της πυρκαγιάς μπορεί να είναι πολύ περίπλοκο. Το «δάχτυλο» (finger) είναι μια μακριά, στενή επέκταση της πυρκαγιάς που εκτείνεται από το κύριο σώμα (Σχήμα 1). Η «τσέπη» (rocket) (Σχήμα 1) είναι μια μη καιόμενη εσοχή της περιμέτρου φωτιάς που περιβάλλεται από τρεις πλευρές από τη φωτιά. Συχνά οι δύο πλευρές μιας τσέπης είναι «δάχτυλα». Ένα

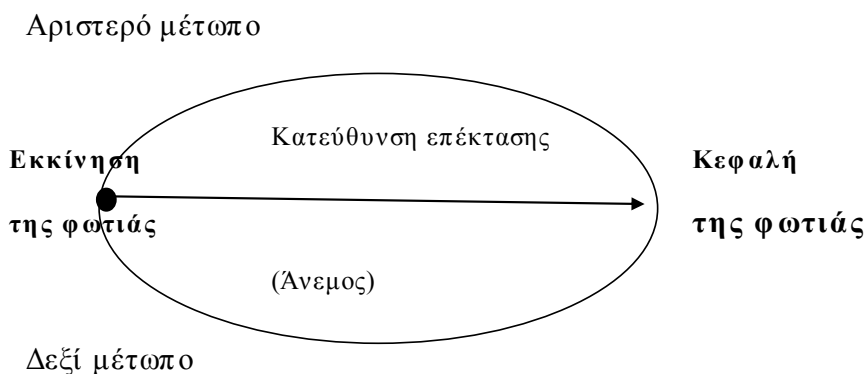
«νησί» (island) (Σχήμα 1) είναι μια μη καιόμενη περιοχή μέσα σε μια φωτιά που περιβάλλεται εντελώς από μια καμένη περιοχή (Scott, 2012).

Τα μη καμένα «νησιά» μέσα σε μια πυρκαγιά μπορούν να προκύψουν για διάφορους λόγους. Ένα «νησί» δεν μπορεί να καλυφθεί με επαρκή ποσότητα καυσίμου για τη φωτιά κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, ενώ άλλες φορές σχηματίζεται ένα νησί επειδή οι προδιαγραφές για τη διάδοση φωτιάς δεν πληρούνταν τη στιγμή που έφτασε η φωτιά (Scott, 2012). Οι σημειακές φωτιές αναπτύσσονται μόνες τους και μερικές φορές είναι μεγαλύτερες στην κύρια πυρκαγιά.

Το «δάχτυλο» είναι μια μακριά και στενή επέκταση του κύριου σώματος της φωτιάς. Μια «τσέπη» είναι μια άκαμπτη εσοχή της περιμέτρου της πυρκαγιάς, που περιβάλλεται από τρεις πλευρές από τη φωτιά. Ένα «νησί» είναι μια άκαμπτη περιοχή μέσα σε μια φωτιά που περιβάλλεται από την εντελώς καμένη περιοχή. Ένα «δάχτυλο» μπορεί να έχει έκταση από λίγα μόνο μέτρα έως περισσότερο από ένα μίλι μακριά. Μπορεί να παρατηρηθούν δάχτυλα δάχτυλων και φωτιά από φωτιά. Ωστόσο, οι μορφολογικές περιγραφές που βασίζονται στα σχήματα δεν χρησιμοποιούνται σε συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιάς (Scott, 2012).

### Ι.1.3. Η σχετική κατεύθυνση της διάδοσης

Κάτω από ένα ομοιόμορφο περιβάλλον δασικής πυρκαγιάς, η περίμετρος της φωτιάς παίρνει το σχήμα μιας απλής ελλείψεως με τον μακρύ άξονα του ελλειπτικού σχήματος να είναι προσανατολισμένο προς τη μέγιστη εξάπλωση της φωτιάς, η οποία είναι η και κύρια κατεύθυνση (Scott, 2012). Στο Σχήμα 2 η μαύρη κουκίδα αντιπροσωπεύει την πηγή της φωτιάς και βρίσκεται στο πίσω μέρος της ελλείψεως.



Σχήμα 2. Γραφική αποτύπωση επέκτασης δασικής πυρκαγιάς

Η σχετική κατεύθυνση της εξάπλωσης ποικίλει γύρω από την περίμετρο της φωτιάς. Στην κεφαλή της φωτιάς, το φλεγόμενο μέτωπο προσανατολίζεται ακριβώς στην κύρια κατεύθυνση, οπότε η σχετική διεύθυνση διάδοσης είναι 0 μοίρες, ενώ στο τέλος της φωτιάς, στο σημείο εκκίνησης, η σχετική κατεύθυνση διάδοσης είναι 180 μοίρες δεξιόστροφα από την κύρια κατεύθυνση. Τα ευρύτερα τμήματα της ελλείψεως ονομάζονται πλευρές της φωτιάς και η σχετική κατεύθυνση της διάδοσης είναι 90 και 270 μοίρες δεξιόστροφα από τη μέγιστη διεύθυνση διάδοσης, όπου η φλεγόμενη όψη είναι προσανατολισμένη κατά 45 μοίρες από την κατεύθυνση της μέγιστης εξάπλωσης (Scott, 2012).

## **I.2. Χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της δασικής πυρκαγιάς**

Αυτή η ενότητα περιγράφει τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά ποιοτικής συμπεριφοράς κατά την πυρκαγιά: Ταχύτητα διάδοσης του μετώπου της φωτιάς (ROS), απελευθερούμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (HPA), ένταση φλόγας (FLI) και μέγεθος φλόγας, ή μήκος φλόγας (FL). Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μιας πυρκαγιάς, όπως είναι η διάρκεια και το μέγεθος της πυρκαγιάς. Αυτές τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς φωτιάς περιγράφονται παρακάτω (Scott, 2012).

### **I.2.1. Ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς (ROS)**

Το φλεγόμενο μπροστινό μέρος της φωτιάς είναι η αιχμή της, όπου εξαπλώνεται στα σημεία που εντοπίζονται νέα καύσιμα.

Στο πλαίσιο της πυρκαγιάς, το φλεγόμενο μέτωπο μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε θέση γύρω από την περίμετρο φωτιάς: την κεφαλή, τις πλευρές ή το πίσω μέρος. Το φλεγόμενο μέτωπο είναι το τμήμα του εμπρόσθιου σημείου φωτιάς όπου κυριαρχεί η φλεγόμενη καύση, η οποία συμβαίνει μόνο όταν τα σωματίδια τέφρας και αιθάλης είναι πάνω από μια θερμοκρασία 977 °F ή 525 °C. Έτσι, η άκρη της φλόγας ορίζεται ως η θέση όπου τα σωματίδια έχουν θερμοκρασία στους 977 °F ή χαμηλότερη (Scott, 2012).

Η ROS ποικίλλει γύρω από την περίμετρο της φωτιάς. Ο ρυθμός διάδοσης των επιφανειακών πυρκαγιών προβλέπεται με τη χρήση του μοντέλου επέκτασης της φωτιάς του Rothemel, (Rothermel 1972).

### Ι.2.2. Θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (HPA)

Η θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (HPA) είναι η συνολική ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται ανά μονάδα επιφάνειας καθώς περνάει το φλεγόμενο μέτωπο της φωτιάς, εκφρασμένο σε BTU ανά τετραγωνικό πόδι (ή μέτρο). Είναι ένας τρόπος μέτρησης της συνολικής ποσότητας θερμότητας που απελευθερώνεται από τις φλόγες.

### Ι.2.3. Ένταση πυρκαγιάς (Fireline Intensity – FLI)

Η ένταση της πυρκαγιάς (που ονομάζεται επίσης ένταση πυρκαγιάς Byram ή ένταση μετωπικής πυρκαγιάς) είναι η τιμή θερμότητας που απελευθερώνεται ανά μονάδα μήκους του μέσου φωτιάς (Byram, 1959), το οποίο ορίζεται από τον τύπο:

$$FLI = H * W * ROS$$

Όπου το H είναι περιεκτικότητα σε θερμότητα και το W είναι το φορτίο καυσίμου που καταναλώνεται στο φλεγόμενο μέτωπο. Όπως ορίσαμε προηγουμένως, το HPA = H \* W. Μπορεί επίσης να οριστεί ως: FLI = HPA \* ROS, όπου το HPA μετριέται σε MJ/m<sup>2</sup>, το ROS σε m/min και ως εκ τούτου η ακόλουθη εξίσωση εκφράζεται σε KW/m, στις περισσότερες τεχνικές εκθέσεις και άρθρα (Scott, 2012).

$$FLI = (1000 * HPA) * \left(\frac{ROS}{60}\right)$$

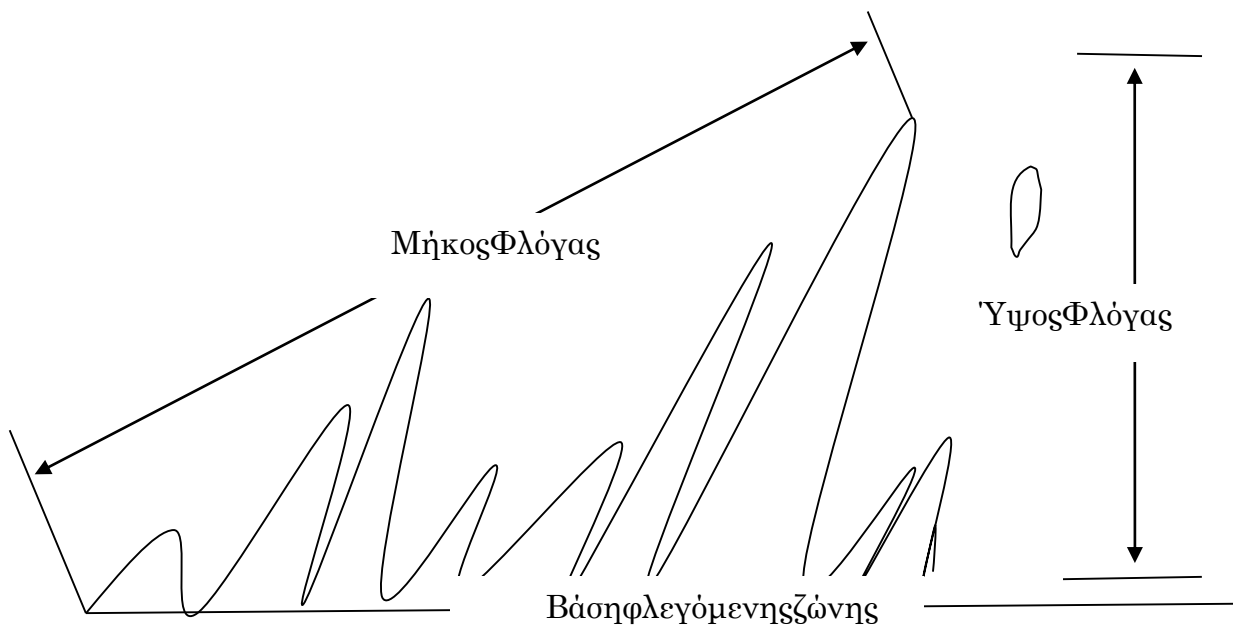
Το φάσμα των τιμών έντασης πυρκαγιάς κυμαίνεται μεταξύ 10 KW/m έως 100.000 KW/m, ένα μεγάλο εύρος των ορίων, που προκαλεί δυσκολίες στην κατανόησή του. Το FIS (Fire Intensity Scale), δηλαδή η κλίμακα έντασης της πυρκαγιάς, χρησιμοποιήθηκε από τον Scott (2006) για την αντιμετώπιση αυτών των μεγάλων τιμών, με την αξιοποίηση λογαρίθμου.

$$FIS = \log_{10}(FLI)$$

Το FIS, θεωρείται ότι είναι μια λογαριθμική κλίμακα παρόμοια με την κλίμακα Richter. Κάθε μονάδα απεικονίζει μια 10-πλάσια αύξηση της έντασης φωτιάς.

### Ι.2.4. Μέγεθος φλόγας

Οι φλόγες είναι η ορατή εκδήλωση της ταχύτητας της καύσης. Χρησιμοποιούμε τα μέτρα της φλόγας, δηλαδή το μέγεθος και το ύψος της φλόγας, για να μετρήσουμε τη φυσική διάσταση. Το μήκος φλόγας χρησιμοποιείται συνηθέστερα λόγω της στενής σχέσης με την ένταση της φωτιάς, σε αντίθεση με το ύψος της φλόγας. Το μήκος της φλόγας είναι η απόσταση από τη βάση της ζώνης μέχρι την άκρη συνεχούς φλόγας (Scott, 2012).



Σχήμα 3. Το μέγεθος της φλόγας

### Ι.2.5. Επιπτώσεις στις προσομοιώσεις συμπεριφοράς της φωτιάς

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά κατά την πυρκαγιά είναι: τα καύσιμα, ο καιρός και η τοπογραφία. Η δομή του καυσίμου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για τη διάρκεια οποιασδήποτε μονής προσομοίωσης συμπεριφοράς στη φωτιά. Το πρόγραμμα LANDFIRE ([www.landfire.gov](http://www.landfire.gov)) διαθέτει δεδομένα δομής καυσίμου, τα οποία και ενημερώνει τακτικά (Scott, 2012).

### I.2.6. Καύσιμο επιφάνειας

Όλα τα συστήματα μοντελοποίησης συμπεριφοράς κατά την πυρκαγιά χρησιμοποιούν το μοντέλο εξάπλωσης της επιφάνειας πυρκαγιάς του Rothermel (1972). Οι κύριοι συντελεστές επιφάνειας καυσίμου σε αυτό το μοντέλο είναι: το φορτίο, το βάθος, η αναλογία επιφάνειας προς όγκο (SAV), η περιεκτικότητα σε υγρασία απόσβεσης και περιεκτικότητα σε θερμότητα (Scott, 2012).

### I.2.7. Καύσιμο δασικού θόλου

Η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου, η ταχύτητα και η θερμοκρασία του ανέμου είναι απαραίτητες για τη δημιουργία της φωτιάς. Τα συστήματα προσομοίωσης της δασικής πυρκαγιάς χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό των μοντέλων οριακής εκδήλωσης πυρκαγιάς του VanWagner (1977) και του μοντέλου του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιάς Rothermel's (1991) για την προσομοίωση της εκκίνησης της πυρκαγιάς και της εξάπλωσής της.

Πρέπει να υπάρχουν δύο παράγοντες για την ενεργοποίηση μιας πυρκαγιάς σε μια δασική γη: το ύψος βάσης του δασικού θόλου (CBH) και η πυκνότητα του δασικού θόλου (CBD). Η CBH είναι ένας τρόπος μετατροπής των καυσίμων δασικού θόλου σε επιφανειακά καύσιμα, ενώ το CBD είναι ένα μέτρο για το πόσο κοντά είναι τοποθετημένα τα καύσιμα. Επιπλέον, η προσομοίωση της έντασης πυρκαγιάς και του μήκους της φλόγας απαιτεί εκτίμηση του όγκου του δασικού θόλου (CFL). Επίσης, το ύψος (SH) και το κάλυμμα του δασικού θόλου (CC) χαρακτηρίζονται έμμεσα από την επίδραση της φωτιάς σε επιφάνεια ή σε δασικό θόλο, επηρεάζοντας την υγρασία του στεγνού καυσίμου και την ταχύτητα του ανέμου που εισέρχεται στη φλόγα (Scott, 2012).

### I.2.8. Περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου

Η συμπεριφορά της άγριας ζωής επηρεάζεται από τα νεκρά σωματίδια καυσίμου και την περιεκτικότητα σε υγρασία και ζωτικότητα. Για τα συστήματα μοντελοποίησης πυρκαγιάς, η υγρασία του καυσίμου μετριέται ως «βαρυμετρική» περιεκτικότητα σε υγρασία στη βάση ξηράς μάζας, διότι αντιπροσωπεύει την αναλογία της ψύξης προς την πηγή θερμότητας. Η μάζα υγρασίας αντιπροσωπεύει

έναν ψύκτη θερμότητας και η ξηρή μάζα καυσίμων αντιπροσωπεύει την πηγή θερμότητας που είναι διαθέσιμη για καύση (Scott, 2012).

$$\frac{\text{ψύξη}}{\text{πηγή θερμότητας}} = \frac{\text{μάζαυγρασίας}}{\text{ξηρή μάζακαυσίμου}}$$

## Κεφάλαιο II

# Μοντελοποίηση του Κινδύνου

## Ανάφλεξης Περιοχής

### II.1. Διερεύνηση γενικών δεικτών που επηρεάζουν τις πυρκαγιές των δασών και μοντελοποίηση του κινδύνου ανάφλεξης περιοχής με τεχνικές εξόρυξης δεδομένων

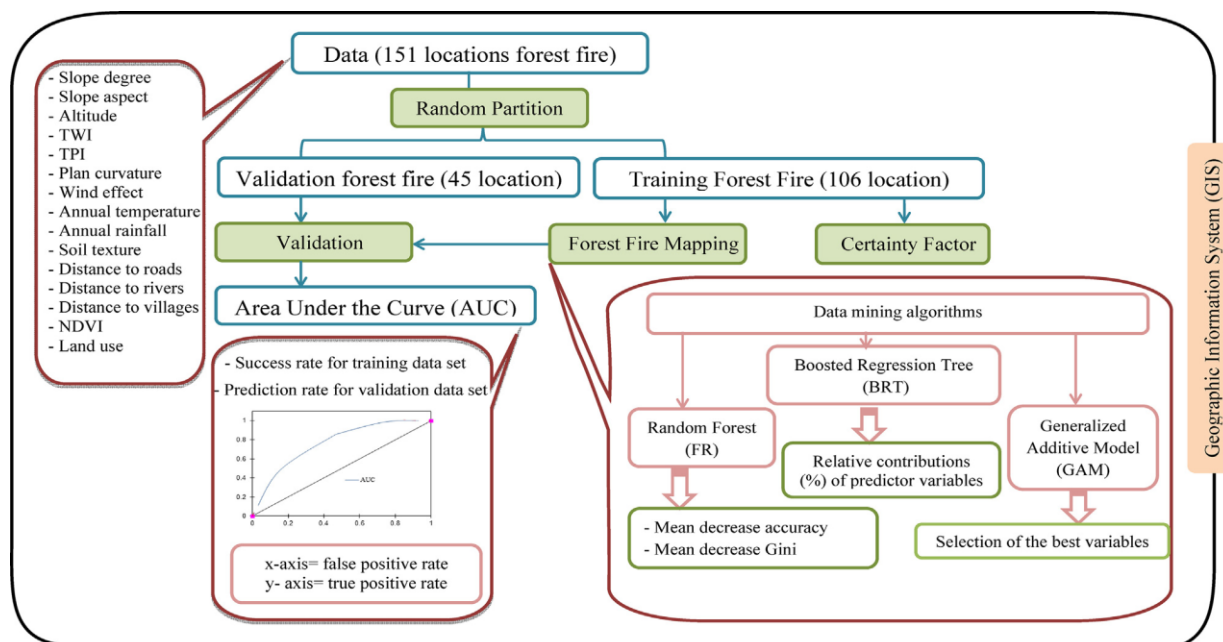
Τα δάση είναι ζωντανά δυναμικά συστήματα που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση ζωτικών διεργασιών στο περιβάλλον, όπως η προσαρμογή του καιρού και η διατήρηση του άνθρακα (Aleemahmoodi et al., 2013). Για την αποφυγή όλων των ζημιών που προκαλούνται από την ανθρώπινη παρέμβαση ή τη φυσική δράση, όσον αφορά τα δασικά οικοσυστήματα, δημιουργήθηκαν χάρτες πυρκαγιάς για να ελαχιστοποιηθεί η εμφάνιση πυρκαγιάς, μέσω των οποίων οι εμπειρογνώμονες μπορούν να αξιολογήσουν τα προβλήματα των δασικών πυρκαγιών. Επιπλέον, η συμπεριφορά πυρκαγιάς στο δασικό περιβάλλον εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες, οι οποίοι είναι: η τοπογραφία, ο καιρός και τα καύσιμα. Επομένως, είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί η συμπεριφορά της φωτιάς, να προβλεφθεί η δυνατότητα εξάπλωσης και να υπάρξει η απαραίτητη προετοιμασία για το πιθανό μέγεθος της φωτιάς.

Ειδικότερα αναφέρουμε ότι, προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος δασικής πυρκαγιάς, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη βασικοί παράγοντες όπως η τοπογραφία, η βλάστηση, η κλιματολογία και το ιστορικό των πυρκαγιών. Ιδιαίτερως, προς αυτή την κατεύθυνση, μία βασική παράμετρος για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοροποιημένης βλάστησης (Normalized Differential Vegetation Index – NDVI) (Chen et al., 2011, Pourtaghi et al., 2012).

Σημειώνεται ότι για τους σκοπούς της προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς, προτιμάται συνήθως η μέθοδος των *2D Cellular Automata* (CA) (Aleemahmoodi et al., 2013), ενώ ήδη τα συστήματα τηλεπισκόπησης (Remote sensing – RS), καθώς και τα γεωπεριφερειακά πληροφοριακά συστήματα (Geospatial Information System – GIS), έχουν εμπλουτιστεί με πολυάριθμους αλγορίθμους και μεθόδους για την αναγνώριση ζωνών κινδύνου πυρκαγιάς (Chuvieco & Congalton, 1989; Prosper-Laget et al., 1995;

Jaiswal et al., 2002; Erten et al., 2004; Chubey, Franklin & Wulder, 2006; Chuvieco et al., 2010; Eskandari & Chuvieco, 2015; Salvatia & Ferrara, 2015; Aretano et al., 2015). Ωστόσο, πέραν της βασικής μεθόδου, μια εναλλακτική και υποσχόμενη προσέγγιση προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος του κινδύνου πυρκαγιάς, είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνική η οποία βασίζεται στην εξόρυξη δεδομένων (data mining). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής μπορεί προσέτι να εξυπηρετήσει στην ανάλυση πολύπλοκων προβλημάτων πολλών μεταβλητών, αποδίδοντας ταυτόχρονα προγνωστικά μοντέλα από μεγάλο σύνολο δεδομένων (Sweeney, Beebe & Cooper, 2007).

Μερικές από τις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προγνωστικών μοντέλων όσον αφορά στην πρόβλεψη της πιθανής χωρικής κατανομής μιας επικείμενης πυρκαγιάς είναι: το γενικευμένο γραμμικό μοντέλο (Generalized Linear Model – GLM), η λογαριθμική πολλαπλή παλινδρόμηση (Logistic Multiple Regression – LMR), το γενικευμένο προσθετικό μοντέλο (Generalized Additive Model – GAM), η δένδροειδής ταξινόμηση και παλινδρόμηση (Classification and Regression Trees– CART), καθώς και τεχνητό δίκτυο νευρώνων (Artificial Neural Network– ANN). Ιδιαίτερως, το μοντέλο του τυχαίου δάσους (Random Forest– RF) συνιστά μια ανάπτυξη των μεθόδων CART. Επίσης, ως επέκταση της μεθόδου CART είναι το ενισχυμένο δέντρο παλινδρόμησης (Boosted Regression Tree–BRT) το οποίο αποτελεί συνδυασμό τεχνικών στατιστικής και μηχανικής μάθησης και το οποίο συνιστά μία υποσχόμενη τεχνική που χρησιμοποιείται στην οικολογική μοντελοποίηση (Breiman, 2001, Mohammadi, Shataee & Babanezhad, 2011).



Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας στη χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών

(Πηγή: Pourtaghi et al., 2012)

### II.1.1. Μεθοδολογία

Στο παραπάνω Σχήμα 4 απεικονίζεται ένα διάγραμμα ροής που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο αυτές οι μεθοδολογίες θα ήταν δυνατόν να απεικονιστούν μέσω ενός διαγράμματος ροής. Το Σχήμα παρουσιάζει τους παράγοντες και τις διαδικασίες που πρέπει να υπεισέρχονται στη σχετική μελέτη. Το πρώτο μέρος αφορά στη συλλογή δεδομένων, την εφαρμογή των μεθόδων BRT, GAM και RF. Όσον αφορά στη βάση δεδομένων, αυτή διαδραματίζει τον σημαντικότερο ρόλο στη διαδικασία.

Οι κατηγορίες χαρακτηρισμού της γης ταξινομούνται ως εξής: *αρδευτική καλλιέργεια* (Irrigation Farming – IF), *πυκνό δάσος* (Dense Forest – DF), *αραιά δάση* (Sparse Forest – SF), *αρδευόμενη και βροχερή ανάμικτη καλλιέργεια* (Irrigated and Rained Mixed Farming – IRMF), *καλλιέργεια με βροχή* (Rainfed Farming – RF), *καλό εύρος* (Good Range – GR), *μέτριο εύρος* (Moderate Range– MR), *μέτρια δασική έκταση* (Moderate Forest – MF), *δασικές εκτάσεις και θάμνοι* (Woodland and Shrubbery – WS) και *αστικές περιοχές* (Urban– U) (Pourtaghi et al., 2012).

### II.1.2. Συντελεστής βεβαιότητας (Certainty Factor – CF)

Για τις ανάγκες πληρότητας μιας επί τούτου μελέτης, ο *συντελεστής βεβαιότητας* (CF) χρησιμοποιήθηκε για να συμβολίσει τη χωρική σχέση μεταξύ κατανομών πυρκαγιών και παραγόντων ρύθμισης. Η συναφής μέθοδος *Certainty Factor* (CF) είναι μία από τις συναρτήσεις ευνοϊκότητας (Favorability Functions– FF) για την εφαρμογή του προβλήματος του συνδυασμού διαφορετικών στοιβάδων δεδομένων και την ετερογένεια και αβεβαιότητα των δεδομένων εισόδου (Chung & Fabbri, 2003; Binaghi et al., 1998; Pourghasemi et al., 2013). Το μοντέλο CF εφαρμόστηκε αρχικά από τους Shortliffe & Buchanan (1975) και μεταγενέστερα τροποποιήθηκε από τον Heckerman (1986). Σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_F = \begin{cases} ppb - ppd / ppb(1 - ppd), & \text{if } ppb \geq ppd \\ ppb - \frac{ppd}{ppd(1 - ppb)}, & \text{if } ppb < ppd \end{cases},$$

όπου το  $ppb$  είναι η δεσμευμένη πιθανότητα να εμφανιστούν κάποια γεγονότα δασικής πυρκαγιάς κατηγορίας  $a$  και  $ppd$  είναι η υπολειπόμενη πιθανότητα των συμβάντων δασικής πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης. Το εύρος διακύμανσης του  $C_F$  είναι το κλειστό διάστημα  $[-1,1]$  (Kanungo et al., 2011).

### II.1.3. Το ενισχυμένο δέντρο παλινδρόμησης (BRT)

Το αναφερθέν στη σελίδα 15 *ενισχυμένο δέντρο παλινδρόμησης* (Boosted Regression Tree - BRT) στοχεύει στην αύξηση της απόδοσης ενός μόνο μοντέλου πρόβλεψης, προσαρμόζοντας και συνδυάζοντας πολλά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ίδια πρόβλεψη (Elith, Leathwick & Hastie, 2008).

Θυμίζουμε ότι σε μία *δενδροειδή ταξινόμηση και παλινδρόμηση* (Classification and Regression Trees- CART), ένα δέντρο παλινδρόμησης είναι ένα τμήμα του γραμμικού εκτιμητή μιας συνάρτησης παλινδρόμησης (Loh, 2002; Carty, 2011). Τα σύγχρονα δέντρα απόφασης εκφράστηκαν στατιστικά από τους Chambers & Hastie (1992) και τον Breiman (2017) και αναπτύχθηκαν για οικολογικές εφαρμογές (De'ath & Fabricius, 2000; Elith et al., 2008). Η ενίσχυση της εκτίμησης είναι παρόμοια με την αξιοποίηση του μέσου όρου διαφορετικών μοντέλων (model averaging), που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της πρόβλεψης των δέντρων παλινδρόμησης, όπου συγχωνεύονται τα αποτελέσματα πολλών διαφορετικών μοντέλων παλινδρόμησης. Υπάρχουν δύο σημαντικές παράμετροι για τον προσδιορισμό του αριθμού των δέντρων αποφάσεων που απαιτούνται για τη βέλτιστη πρόβλεψη :ο *ρυθμός διόρθωσης του σφάλματος* από το ένα δέντρο στο επόμενο (learning rate) και η *πολυπλοκότητα των δέντρων* (tree complexity) (Elith et al., 2008).

### II.1.4. Το γενικευμένο προσθετικό μοντέλο (GAM)

Το αναφερθέν στη σελίδα 15 *γενικευμένο προσθετικό μοντέλο* (Generalized Additive Model – GAM) είναι ένα ημιπαραμετρικό μοντέλο παλινδρόμησης (Hastie & Tibshirani, 1990; Chambers & Hastie, 1992; Maggini et al., 2006). Στο εν λόγω μοντέλο, κατασκευάζεται μία καμπύλη απόκρισης χρησιμοποιώντας εξισώσεις στις οποίες συμμετέχουν λείες (συνεχώς διαφορίσιμες) συναρτήσεις και επιτρέποντας ευρέος φάσματος καμπυλών απόκρισης (Yee & Mitchell, 1991; Maggini et al., 2006). Η δομή αυτού του μοντέλου αποδίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$g(\mu_i) = k_i^* \theta + f_1(k_{1,i}) + f_2(k_{2,i}) + f_3(k_{3,i}, k_{4,i}) + \dots$$

όπου  $\mu_i = E(Y_i)$  και  $Y_i$  είναι μία μεταβλητή που πρέπει να εκτιμηθεί και ακολουθεί εκθετική κατανομή,  $k_i^*$  είναι μια γραμμή της μήτρας του μοντέλου για κάθε αυστηρά καθορισμένα στοιχεία της παραμέτρου

του μοντέλου, θ είναι το αντίστοιχο διάνυσμα των παραμέτρων και οι  $f_j$  είναι λείες συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών  $k_n$ .

Τα GAM είναι ευεργετικά στην διερευνητική ανάλυση, καθώς μελετούν το σχήμα της εξίσωσης εκτίμησης. Τα GAM είναι πιο περίπλοκα στην εφαρμογή τους και είναι δυνατό εμφανίσουν στοιχεία υπέρμετρης εφαρμογής για τα δεδομένα σε σύγκριση με το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Τελικά, ακόμη και με χωρικά ανεξάρτητα δεδομένα αξιολόγησης, το δυναμικό πρόβλεψης των GAM είναι γενικά υψηλότερο σε σύγκριση με τις παραμετρικές τεχνικές (Hjort & Luoto, 2013).

## II.1.5. Το τυχαίο δάσος (RF)

Το μοντέλο του τυχαίου δάσους (Random Forest– RF) βασίζεται σε δέντρα αποφάσεων, τα οποία αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά από τον Breiman (2001) (Breiman, 2001; Catani et al., 2013; Micheletti et al., 2014). Το γενικό πλαίσιο εργασίας του αλγορίθμου συνοψίζεται ως εξής: από το αρχικό σύνολο δεδομένων γίνεται δειγματοληψία με τυχαία επιλογή δεδομένων κατάρτισης, η οποία ακολούθως χρησιμοποιείται για την κατασκευή του μοντέλου. Τα δεδομένα που δεν περιλαμβάνονται αναφέρονται ως «out-of-bag» (OOB) (Breiman, 2001; Catani et al., 2013). Επισημαίνεται ότι κατά την εφαρμογή του μοντέλου RF, το αποτέλεσμα της χρήσης του στατιστικού πακέτου R αποδίδει την πιθανότητα χαρακτηρισμού και συνεπακόλουθης ένταξης της πυρκαγιάς σε μία από τις δύο πιθανές κατηγορίες «δασική πυρκαγιά» και «μη δασική πυρκαγιά», ως επίσης και ότι το μοντέλο RF χρειάζεται δύο παραμέτρους που πρέπει να καθοριστούν από τον χρήστη: τον αριθμό των δένδρων  $T$  και τον αριθμό των μεταβλητών  $m$  που πρέπει να επιλεγούν στοχαστικά από το διαθέσιμο σύνολο χαρακτηριστικών. Σε κάθε περίπτωση συνιστάται όπως ο χρήστης να διαλέξει ένα μεγάλο αριθμό δένδρων (Breiman, 2001; Micheletti et al., 2014) και την τετραγωνική ρίζα των διαστάσεων του χώρου εισόδου για το  $m$  (Micheletti et al., 2014).

Η δομή της συγκέντρωσης των απαραίτητων δεδομένων που δείχνουν τη σχετική επίδραση βασικών υπεισερχομένων παραγόντων ρύθμισης στο μοντέλο RF (0 =μη δασική πυρκαγιά, 1 =δασική πυρκαγιά) δίνεται από έναν ενδεικτικό πίνακα της ακόλουθης μορφής (Pourtaghi et al., 2012).

Factor	01	Mean decrease accuracy	Mean decrease Gini
Slope degree	....	....	....
Slope aspect	....	....	....
Altitude	....	....	....
TPI	....	....	....

Soil NDVI	....	....	....	....
NDVI	....	....	....	....
Distance to villages (m)	....	....	....	....
Distance to rivers (m)	....	....	....	....
Distance to roads (m)	....	....	....	....
TWI	....	....	....	....
Plan curvature (100/m)	....	....	....	....
Wind effect	....	....	....	....
Land use	....	....	....	....
Annual temperature (°C)	....	....	....	....
Annual rainfall (mm)	....	....	....	....

Το μοντέλο RF και το μοντέλο που βασίζεται στο ενισχυμένο δέντρο παλινδρόμησης (Boosted Regression Tree - BRT) είναι παρόμοια στη χρήση δέντρων παλινδρόμησης για να εκτιμήσουν μια εξαρτημένη μεταβλητή και να την υπολογίσουν κατά μέσο όρο ως τελική πρόβλεψη. Ωστόσο, η τεχνική που μετέρχεται το μοντέλο RF δεν χρειάζεται υποθέσεις για τη κατανομή των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επίσης, επιτρέπει τη μικτή χρήση κατηγορικών και αριθμητικών μεταβλητών χωρίς να επαναλαμβάνεται η χρήση δεικτών ως μεταβλητές και είναι σε θέση να εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις και τη μη γραμμικότητα μεταξύ των μεταβλητών.

## Κεφάλαιο III

# Η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών για ανίχνευση και κατάσβεση δασικών πυρκαγιών

### III.1. Διάκριση μεταξύ αυτόνομου UAV και Σμήνους UAV

Τα αυτόνομα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV's) έχουν κερδίσει δημοτικότητα λόγω των πολλών δυνατών πεδίων εφαρμογής τους. Στην παρούσα εργασία, αναδεικνύουμε την πρόκληση της δημιουργίας ενός αποτελεσματικού μοντέλου κίνησης σμήνους και μιας τοπολογίας δικτύου μεταξύ διαφορετικών UAV, τα οποία αναπτύσσονται ειδικά για το σενάριο της χαρτογράφησης υψηλής ποιότητας των δασών. Το δασικό περιβάλλον, με την εξαιρετικά ετερογενή κατανομή του, απαιτεί από το σμήνος να αποφεύγει συνεχώς τις πιθανές συγκρούσεις με δέντρα, να αλλάζει αυτόνομα την τροχιά της πτήσης του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνδεση από το σμήνος και να επανασυνδέεται με το σμήνος μετά το πέρασμα του εμποδίου (Brust & Strimbu, 2015).

Σε σύγκριση με ένα UAV, το σμήνος UAV που αποτελείται από αρκετά αεροσκάφη είναι σε θέση όχι μόνο να επιλύσει περισσότερες εργασίες, αλλά και να μειώσει το χρόνο εκτέλεσης διαφόρων δραστηριοτήτων, καθώς και να αυξήσει την ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων. Ένα σμήνος UAV μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα και την ακρίβεια των δεδομένων που περιγράφουν το δάσος ως σύνολο τρισδιάστατων αντικειμένων. Τα αεροσκάφη UAV προσαρμόζονται στο άγνωστο περιβάλλον, παρακάμπτουν τα εμπόδια και χαρτογραφούν το δάσος με διάφορους αισθητήρες. Στη συνέχεια, το αεροσκάφος UAV που ηγείται του σμήνους μεταδίδει τα συλλεχθέντα και συγκεντρωτικά δεδομένα στον σταθμό βάσης ή τον χειριστή για ανάλυση δεδομένων. Το σύνολο των UAV θα πρέπει να παρουσιάζει μια συμπεριφορά που μοιάζει με σμήνος και παρέχει μια προσαρμοστική και αξιόπιστη δομή δικτύου, ενώ εκπληρώνει τα απαιτούμενα καθήκοντα για την εκτίμηση του περιβάλλοντος. Το παράδειγμά μας, εδώ, εφαρμόζει έναν αλγόριθμο επιλογής ηγετικού αεροσκάφους σε ένα σύνολο αυτόνομων μικρών UAV. Το ηγετικό αεροσκάφος θα έχει καθήκοντα όπως η συλλογή πληροφοριών από το συλλογικό σμήνος και την καθοδήγηση του σμήνους στον προορισμό του (Brust & Strimbu, 2015). Το

ηγετικό αεροσκάφος είναι επιπλέον υπεύθυνο να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης. Ο σχηματισμός, ο συντονισμός και ο έλεγχος ενός σμήνους UAV που περιέχει πολλαπλά αεροσκάφη UAV μπορεί να προκαλέσει πρόσθετες προκλήσεις, όπως οι τρισδιάστατες κινήσεις, οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολες. Για τη δισδιάστατη περίπτωση, το πρόβλημα έχει μια πολυωνυμική λύση χρόνου (Brust & Strimbu, 2015).

Όταν εξετάζουμε τρεις διαστάσεις, η ερώτηση για τη βέλτιστη τοποθέτηση κόμβου ονομάζεται πρόβλημα στοίβαξης σφαιρών. Οι ιδιότητες των τοπολογιών του δικτύου που προκύπτουν από την τυχαία ανάπτυξη κόμβων σε μια τρισδιάστατη περιοχή μελετώνται από τον Ravelomanana (2004). Ο Ravelomanana θεωρεί το πρόβλημα  $k$ -συνδεσιμότητας, το οποίο αναζητά το κατώτερο όριο της εμβέλειας μετάδοσης  $r$ , έτσι ώστε κάθε κόμβος να έχει τουλάχιστον  $k$  άμεσους γείτονες. Οι Schleich et al. (2013) προτείνουν μια αποκεντρωμένη και τοπική προσέγγιση για τον έλεγχο κινητικότητας UAV, η οποία βελτιστοποιεί τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Μία σημαντική μείωση του κόστους απόκτησης δεδομένων με ταυτόχρονη αύξηση της ακρίβειας, προκύπτει όταν αντί για ένα ηγετικό αεροσκάφος που συγκεντρώνει τις πληροφορίες όλων χρησιμοποιούνται πολλαπλά ηγετικά UAV. Ενώ οι προσεγγίσεις σμήνους UAV είναι δημοφιλείς στις στρατιωτικές, επικοινωνιακές και θαλάσσιες εφαρμογές, μόνο λίγες εφαρμογές επικεντρώνονται στη δασοκομία, κυρίως στην παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών (Brust & Strimbu, 2015).

### III.2. Σύστημα Μοντέλου Σμήνους

Σε αυτή την ενότητα, αναφερόμαστε σε ένα βασικό μοντέλο σμήνους:

#### UAV Σύστημα Μοντέλου Σμήνους

Το δίκτυο επικοινωνίας ενός σμήνους UAV αντιπροσωπεύεται από ένα συμμετρικό ευκλείδειο γράφημα  $G = (V, E)$  που κατασκευάζεται έτσι ώστε το  $V \in \mathbb{R}^3$  να είναι ένα σύνολο κόμβων UAV σε μια τρισδιάστατη οριοθετημένη περιοχή με μήκος πλευράς  $l$ . Οι κόμβοι UAV αναπτύσσονται σύμφωνα με ένα μοντέλο ανάπτυξης  $D$ . Οι συνδέσεις στο σύνολο  $E$  του γραφήματος  $G$  πληρούν την προϋπόθεση ότι για οποιοδήποτε ζεύγος  $u, v \in V$  των κόμβων, της απόστασης:  $(u, v) \leq r \Rightarrow \{u, v\} \in E$  και της απόστασης  $(u, v) > r \Rightarrow \{u, v\} \notin E$ , όπου  $r$  είναι η αποτελεσματική περιοχή μετάδοσης για κάθε  $v \in V$ . Κάθε UAV  $v \in V$  μπορεί να μεταφερθεί σε οποιαδήποτε θέση  $V \in \mathbb{R}^3$ . Για κάθε κόμβο UAV  $v \in V$ , ας υπάρχει ένας γειτονικός

κατάλογος πλήθους  $\text{Neigh}(v)_{CV}$ , ο οποίος είναι το σύνολο των UAV που συνδέονται άμεσα με τον κόμβο UAV  $v$ , έτσι ώστε  $\forall u \in \text{Neigh}(v), d(v,u) \leq r$ . Ο γειτονικός κατάλογος  $\text{Neigh}(v)$  δημιουργείται αρχικά και ενημερώνεται με συχνότητα  $f$ , από τη γειτονιά  $\text{Neigh}(v)$  ενός κόμβου  $v$  και μπορεί να υπόκειται σε αλλαγές. Υποτίθεται ότι κάθε κόμβος UAV  $v \in V$  μπορεί να επικοινωνεί αποκλειστικά με τις συσκευές που γειτονεύει άμεσα  $\text{Neigh}(v)$  (1-hop neighbors). Ένα αυτόνομο σμήνος UAV πρέπει να βασίζεται σε ένα σχετικό σύστημα εντοπισμού θέσης, όπου μόνο ένα μικρό υποσύνολο UAV's βασίζεται στο GPS, για σχεδιασμό διαδρομής ή ελιγμούς. Επομένως, αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο υποθέτει ότι για κάθε σμήνος  $S_i$  μόνο ο οδηγός UAV  $S_i$  (L) είναι υπεύθυνος για τις απόλυτες θέσεις (π.χ. δεδομένα GPS ή προεγκατεστημένους χάρτες). Ως εκ τούτου, τα ηγετικά αεροσκάφη του σμήνους έχουν εκ των προτέρων γνώση των θέσεών τους (Brust & Strimbu, 2015).

### III.2.1. Προσέγγιση: μοντέλο δικτυωμένου σμήνους

#### A. Ηγετικό UAV και δίκτυο επικοινωνίας σμήνους

Για διαδικασία σχηματισμού του σμήνους UAV πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε περιορισμένες ρυθμίσεις, το ηγετικό UAV θα έχει προκαθοριστεί λόγω των πηγών υψηλότερης ενέργειας που απαιτούνται. Η δυνατότητα εναλλαγής του ηγετικού UAV επιτρέπει στο σμήνος να αναπροσαρμόζεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες και να μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα λειτουργίας του (Brust & Strimbu, 2015).

#### B. Κίνηση σμήνους και έλεγχος του σχηματισμού

Τα πρόσθετα μέλη του σμήνους ακολουθούν τον ηγέτη με τρόπο που αποφεύγει τη σύγκρουση ρυθμίζοντας την ταχύτητά τους σύμφωνα με τις συνθήκες που περιγράφουν τη συμπεριφορά του σμήνους. Ισχύουν οι ακόλουθοι όροι για το σμήνος UAV με ένα ηγετικό αεροσκάφος (Brust & Strimbu, 2015):

- 1) Το ηγετικό UAV λαμβάνει την προδιαγεγραμμένη θέση και τον προορισμό του.
- 2) Κάθε UAV (συμπεριλαμβανομένου του ηγετικού UAV) ευθυγραμμίζεται με τους άμεσους γείτονές του.
- 3) Κάθε UAV (συμπεριλαμβανομένου του ηγετικού UAV) διατηρεί άμεση σύνδεση με τους γείτονές του.

- 4) Κάθε UAV (συμπεριλαμβανομένου του ηγετικού UAV) αποφεύγει τη σύγκρουση με οποιοδήποτε άλλο UAV.
- 5) Το ηγετικό UAV προσεγγίζει τον προορισμό.

Αυτές οι πέντε βασικές προδιαγραφές αντιπροσωπεύουν μια πλήρη περιγραφή της κίνησης ενός σμήνους UAV. Η πρώτη προϋπόθεση εξασφαλίζει ότι οι συντεταγμένες της προδιαγεγραμμένης τρέχουσας θέσης και του προορισμού είναι γνωστές από το καθορισμένο ηγετικό UAV. Η δεύτερη προϋπόθεση περιγράφει τη συμπεριφορά ενός UAV σε σχέση με τους γείτονές του καθώς και τη συμπεριφορά της τοπικής ομαδικής κίνησης. Οι συνθήκες τρία και τέσσερα περιγράφουν δύο αντιτιθέμενες συμπεριφορές: η πρώτη ενισχύει κινήσεις UAV για τη διατήρηση του σχηματισμού του σμήνους (δηλ. σχέσεις με τους άμεσα κοντινούς γείτονές του). Η πέμπτη προϋπόθεση χρησιμεύει για να κατευθυνθεί το σμήνος στον προορισμό του. Αυτή η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε σμήνη με λίγα ή πολλαπλά UAV (Brust & Strimbu, 2015).

---

Αλγόριθμος 1: Μοντέλο δικτυωμένου σμήνους (Brust & Strimbu, 2015)

---

**Εισαγωγή:** Ένα σύνολο UAV  $U$  με θέσεις  $Pos$  και ταχύτητες  $Vel$ ,  $weightLimit$ ,  $vel_{leader}$ ,  $leaderID$ ,  $d_1$ ,  $d_2$

**Εξαγωγή:** Ένα σύνολο UAV  $U$  με ρυθμιζόμενες θέσεις και ταχύτητες

```

1 Για κάθε UAV  $u \in U$  επανέλαβε
2    $u_w \leftarrow Weight(u)$ ;
3    $N(u) \leftarrow FindDirectNeighbors(u)$ ;
4   /* Δίκτυο επικοινωνίας */
5    $R_1 \leftarrow Max(\{\forall u \in N(u) : Weight(u)\})$ ;
6    $R_2 \leftarrow Min(\{\forall u \in N(u) : Weight(u)\})$ ;
7    $R_3 \leftarrow n \in N(u) \text{ if } Weight(n) = leaderID$ ;
8   Αν  $R_2 < u_w$  τότε
9      $u_w \leftarrow R_2 + 1$ ;
10    Αν  $R_1 = weightLimit$  τότε
11       $u_w \leftarrow leaderID$ ;
12      Αν  $R_2 < u_w \wedge u_w \neq leaderID$  τότε
13         $u_w \leftarrow R_2 + 1$ ;
14        Αν  $u_w = leaderID \wedge R_3 = 2$  τότε
15           $u_w \leftarrow u_w + 1$ ;
16        τέλος αν
17      τέλος αν
18    τέλος αν
19  τέλος αν
20 /* Συμπεριφορά σμήνους */
21  $newVel() = \{\}$ ;
22  $centreOfMass \leftarrow \sum_{n_i \in N(u)} Pos(n_i)$ ;
23  $newVel(1) \leftarrow (centreOfMass - Position(u)) * 0.2$ ;
24 Αν Υπάρχει γείτων  $n \in N(u)$  με
    $|Pos(n) - Pos(u)| < 100$  τότε
25    $newVel(2) \leftarrow newVel(2) - (Pos(n) - Pos(u))$ ;

```

```

26 τέλος αν
27 newVel(3) ←  $\sum n \in N(u) Vel(n) \frac{1}{|N|-1}$ ;
28 newVel(3) ← (newVel(3) - Vel(u)) * 0.2;
29 Αν Weight(u) = leaderID τότε
30     diff ← d2 - Pos(u);
31     Αν diff < 5 τότε
32         | newVel(4) ← {0,0,0};
33     αλλιώς
34         newVel(4) ← diff / Norm[diff] * velleader;
35     τέλος αν
36 τέλος αν
37 Vel(u) ← Vel(u) +  $\sum v \in newVel^v$ ;
38 Pos(u) ← Move(Pos(u), Vel(u));

τέλος

```

### III.3. Προσομοιώσεις και αποτελέσματα της χρήσης UAV

Ορίζουμε το σμήνος  $S$  των UAV με τη μορφή γραφήματος  $G=(V,E)$ , όπου  $V \in \mathbb{R}^3$  ένα σετ από κόμβους UAV σε μια τρισδιάστατη οριοθετημένη περιοχή με μήκος πλευράς  $l=200m$ . Ο αριθμός των UAV που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το παράδειγμα, είναι  $|V|=8$  και το εύρος μετάδοσης είναι  $r=55m$ . Το σετ  $E$  ακολουθεί τους περιορισμούς που περιγράφονται παραπάνω στο III.2.1, που ισχύουν για οποιοδήποτε ζεύγος κόμβων  $u, v \in V$  σε απόσταση  $(u,v) \leq r \Rightarrow \{u, v\} \in E$  και απόσταση  $(u,v) > r \Rightarrow \{u, v\} \notin E$ .

Οι κόμβοι UAV τοποθετούνται σύμφωνα με το μοντέλο ανάπτυξης  $D$  με συντεταγμένες  $d_1 = \{25, 25, 25\}$  (δηλ. ανάπτυξη) και  $d_2 = (100, 100, 100)$  (δηλ. τον προορισμό) όπου  $d_1, d_2 \in \mathbb{R}^3$ . Η ταχύτητα του ηγετικού UAV είναι  $vel_{leader} = 0.7 \text{ m/s}$ .

Η λίστα των γειτονικών αεροσκαφών  $Neigh(v)CV$  θα δημιουργηθεί αρχικά έτσι ώστε  $\forall u \in Neigh(v)$ ,  $d(v,u) \leq r$  και ενημερώνονται με συχνότητα  $f = 10 \text{ s}^{-1}$ .

Το ηγετικό UAV μετακινείται από τις συντεταγμένες ανάπτυξης  $d_1$  στις συντεταγμένες προορισμού  $d_2$  με ταχύτητα  $vel_{leader}$ . Ο αλγόριθμος 1 επαναυπολογίζει την ταχύτητα του διανύσματος για κάθε UAV έτσι ώστε ο σμήνος να διατηρεί τη συνδεδεσιμότητα, αλλά να αποφεύγει τις συγκρούσεις.

**Αξιολόγηση χρόνου:** Αν και το ηγετικό UAV κατευθύνει το σμήνος UAV από ένα υποθετικό σημείο  $d_1$  προς τον προορισμό  $d_2$ , η διαδικασία κίνησης του σμήνους στον Αλγόριθμο 1 προκαλεί καθυστέρηση στη συλλογική κίνηση ώστε να αποφευχθεί η αποσύνδεση αλλά ταυτόχρονα να αποφευχθεί και η σύγκρουση μεταξύ των UAVs (Brust & Strimbu, 2015).

Επομένως, για να συγκρίνουμε αυτή τη μέθοδο με μια ευθεία πτήση μόνο του ηγετικού UAV από  $d_1$  σε  $d_2$ , χρησιμοποιήσαμε πέντε εκτελέσεις της προσομοίωσης, κάθε μία με διαφορετικό αριθμό UAV ( $n = 4, n = 8, n = 12$ ). Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το σμήνος στον προορισμό ( $d_2$ ), μετράται και συγκρίνεται με τον θεωρητικό χρόνο, ο οποίος είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ένα UAV να πετάξει απευθείας με ταχύτητα  $vel_{leader}$  από  $d_1$  σε  $d_2$ . Αυτό το ποσοτικό μέτρο αντικατοπτρίζει την εφαρμοσιμότητα και την επεκτασιμότητα της προσέγγισης, δεδομένου ότι οι συνθήκες σμήνους έχουν επιρροή στο συνολικό έργο.

Τα αποτελέσματα στον Πίνακα 1 δείχνουν ότι ο χρόνος πτήσης από  $d_1$  σε  $d_2$  (δηλαδή ο χρόνος προσομοίωσης σε διακριτά βήματα) δε διαφέρει σημαντικά όταν αναπτύσσονται 4 ή 8 UAV (1,8% από τον χρόνο πτήσης απευθείας), δηλαδή 4,1% για  $n = 4$  και 5,9% για  $n = 8$ . Ωστόσο, για την περίπτωση  $n = 12$  παρατηρούμε σημαντική αύξηση του χρόνου (δηλ. 31%).

Πίνακας 1. Χρονική επίδοση του σμήνους UAV

Παράμετρος	Τιμή
Ευκλείδεια απόσταση προορισμού	129.9
Διάνυσμα ταχύτητας του ηγέτη "leader" UAV	0.7
Θεωρητικός χρόνος για τον προορισμό	185.57

Τρέξε	n=4	n=8	n=12
-------	-----	-----	------

1	190	190	263
2	195	199	283
3	192	199	225
4	196	194	234
5	193	201	218
Μέσος όρος	193.2	196.6	244.6

Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη λήψη αποφάσεων εντοπιότητας και, ως εκ τούτου, απαιτεί χαμηλή πολυπλοκότητα μηνυμάτων και υπολογισμών, παρέχοντας ταυτόχρονα δυνατότητα κλιμάκωσης για μεγάλο αριθμό UAV ανά σμήνος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη κίνηση σμήνους είναι σχεδόν εξίσου γρήγορη για να φτάσει στη θέση προορισμού, όπως η θεωρητική προσέγγιση που περιλαμβάνει μόνο ένα UAV (Brust & Strimbu, 2015).

### III.4. Συνεργατικός έλεγχος πολλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών με εφαρμογή στην πυρανίχνευση και τον έλεγχο πυρκαγιάς

Αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζει έναν αλγόριθμο μετατροπής σχηματισμού σχετικά με το πρόβλημα της παρακολούθησης των δασών και της εφαρμογής ανίχνευσης πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες ομάδες UAV. Οι κύριοι στόχοι των προτεινόμενων αλγορίθμων σε αυτό το κεφάλαιο μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Ghamry, 2016):

- Στη φάση αναζήτησης πυρκαγιάς, ο διαχειριστής σχηματισμού χρησιμοποιείται για να επιτύχει το κατάλληλο σχήμα του σμήνους UAV's.
- Το σχεδιασμό ενός αλγόριθμου διαμόρφωσης σχηματισμού για τον επαναπροσδιορισμό του σχηματισμού από το στάδιο της αναζήτησης πυρκαγιάς μέχρι τα στάδια επιβεβαίωσης και παρατήρησης της πυρκαγιάς, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή των UAV γύρω από τα εντοπισμένα σημεία πυρκαγιάς.
- Σε περίπτωση αποχώρησης από το σχηματισμό για ανεφοδιασμό / επαναφόρτιση ή σε περίπτωση σοβαρού σφάλματος ενός ή περισσότερων UAV, προτείνεται ένας αλγόριθμος FTCC με βάση τη θεωρία γραφημάτων και τον αλγόριθμο αναδιαμόρφωσης σχηματισμού. Στόχος του είναι να ανεχτεί το ελάττωμα στην αποστολή και να διατηρήσει την ομοιόμορφη κατανομή των υπόλοιπων λειτουργικών UAVs που περιβάλλουν το σημείο της πυρκαγιάς.
- Ένας αλγόριθμος λήψης αποφάσεων βασισμένος στη λογική πλειστηριασμού χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος της χρήσης πολλαπλών ομάδων UAVs για την παρακολούθηση ταυτόχρονων διαφορετικών πυρκαγιών.
- Εφαρμόζοντας τους προτεινόμενους αλγόριθμους συνδυάζοντας την ομάδα UAV's με μια ομάδα UGV's (Unmanned Ground Vehicles). Για την επίλυση του προβλήματος της περιορισμένης διάρκειας χρήσης των UAV's, η ομάδα UGV's χρησιμοποιείται ως πλατφόρμα απογείωσης και προσγείωσης για τη μεταφορά των UAV's στο πλησιέστερο σημείο για να ξεκινήσουν την αποστολή τους από τη μικρότερη δυνατή απόσταση.

Τα UAV's χρησιμοποιούνται για διαφορετικά σενάρια παρακολούθησης δασών και ανίχνευσης πυρκαγιάς τόσο σε προσομοιώσεις όσο και σε πειράματα σε πραγματικό χρόνο (Ghamry, 2016).

### III.4.1. Μοντέλο επέκτασης πυρκαγιάς (Fire Spread Model)

Στα μοντέλα επέκτασης πυρκαγιάς ο στόχος είναι να προβλεφθεί η ενδεχόμενη επέκταση της φωτιάς. Σε αυτή την περίπτωση έχει αποδειχθεί ότι ένα απλό ελλειπτικό μοντέλο παρέχει μια ικανοποιητική εκτίμηση της περιμέτρου μιας δασικής πυρκαγιάς ελεύθερης καύσης (Ghamry, 2016). Υπό σταθερές συνθήκες για ομοιογενή καύσιμα, είναι γενικά αποδεκτό ότι μια πυρκαγιά που αναφλέγεται σε ένα σημείο θα επεκταθεί, με σταθερό ρυθμό με τη μορφή έλλειψης (Perry, 1998):

$$\begin{aligned}x &= ct_{\text{fire}} + at_{\text{fire}}\cos\zeta \\ y &= bt_{\text{fire}}\sin\zeta \quad (1)\end{aligned}$$

όπου  $0 \leq \zeta \leq 2\pi$ ,  $t_{\text{fire}}$  είναι ο χρόνος εξάπλωσης της φωτιάς, η αρχή είναι το σημείο ανάφλεξης και ο άξονας  $x$  είναι η κατεύθυνση του ανέμου. Οι παράμετροι  $a$  και  $b$  είναι γραμμικοί ρυθμοί επέκτασης πυρκαγιάς, το  $2a$  είναι ο ρυθμός με τον οποίο το συνολικό μήκος της φωτιάς αυξάνεται προς την κατεύθυνση του ανέμου (άξονας  $x$ ) και το  $2b$  είναι η συνολική αύξηση του μήκους της φωτιάς σε ορθή γωνία με τον άνεμο (άξονας  $y$ ). Το κέντρο της έλλειψης κινείται στην κατεύθυνση του ανέμου (άξονας  $x$ ) με σταθερό ρυθμό  $c$ . Οι κύριοι και δευτερεύοντες άξονες της έλλειψης είναι  $at_{\text{fire}}$  και  $bt_{\text{fire}}$ , αντίστοιχα (Ghamry, 2016).

Ο μέγιστος ρυθμός διάδοσης  $R_{\text{max}}$  είναι αυτός για το μέτωπο της πυρκαγιάς:

$$R_{\text{max}} = a + c, \quad \zeta = 0 \quad (2)$$

και το ελάχιστο είναι ο ρυθμός σημείου εκκίνησης  $R_{\text{back}}$  της εξάπλωσης:

$$R_{\text{back}} = a - c, \quad \zeta = \pi \quad (3)$$

Το σχήμα της ελλείψεως καθορίζεται από το λόγο μήκους προς εύρος  $LB$ :

$$LB = a/b \quad (4)$$

### III.4.2. Ανασυγκρότηση σχηματισμού UAV με βάση το SMC

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ο έλεγχος ολίσθησης SMC (sliding mode control) έτυχε μεγάλης προσοχής στα ερευνητικά έργα, αλλά και στη βιομηχανία ως μια σημαντική προσέγγιση ελέγχου. Ο έλεγχος ολίσθησης, SMC, ο οποίος είναι ένας συγκεκριμένος τύπος συστημάτων ελέγχου

μεταβλητής δομής (variable structure control system – VSCS), έδωσε τη δυνατότητα αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και των παραλλαγών των παραμέτρων. Οι συμπαγείς ελεγκτές διαφέρουν από τις άλλες προσεγγίσεις ελέγχου (Bandyopadhyay et al., 2009).

Η βασική ιδέα του SMC είναι να επιτύχει τις επιθυμητές επιδόσεις ελέγχου κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας και / ή όταν αντιμετωπίζουμε εξωτερικές διαταραχές ή ανακρίβειες στη μοντελοποίηση, σχεδιάζοντας μια επιφάνεια που ονομάζεται ολισθαίνουσα επιφάνεια. Η ολισθαίνουσα επιφάνεια είναι μια επιφάνεια στο χώρο κατάστασης που θα πρέπει να αντιμετωπίζει όλους τους περιορισμούς του συστήματος και τις απαιτούμενες προδιαγραφές, δηλαδή να περιέχει το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του συστήματος (Bandyopadhyay et al., 2009). Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός ελέγχου ολίσθησης SMC μπορεί να είναι χωρισμένος σε δύο κύρια μέρη.

- 1) Σχεδιασμός μιας σταθερής επιφάνειας ολίσθησης και
- 2) Σχεδιασμός ενός κανόνα ελέγχου που αναγκάζει το σύστημα να κινείται σε ένα συγκεκριμένο εύρος προς αυτή την επιφάνεια, που ονομάζεται *φάση προσέγγισης* και να παραμένει σε αυτή.

Γενικά, τα συστήματα ελέγχου που βασίζονται στο SMC συνήθως λειτουργούν μέσα σε αυτές τις δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι αυτή της προσέγγισης, στην οποία οι καταστάσεις του συστήματος αναγκάζονται να μετακινηθούν από τις αρχικές τους συνθήκες στην ολισθαίνουσα επιφάνεια. Ενώ στη δεύτερη φάση που αποκαλείται η φάση ολίσθησης, οι καταστάσεις συστήματος κινούνται κατά μήκος της ολισθαίνουσας επιφάνειας στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας για να διατηρήσουν την επιθυμητή απόδοση. Επομένως, το SMC που λειτουργεί ως σύστημα ελέγχου μεταγωγής υψηλής ταχύτητας προσπαθεί να διατηρήσει τις καταστάσεις του συστήματος καθ' όλη την έκταση της ολισθαίνουσας επιφάνειας, μέσω ασυνεχούς όρου που προστίθεται στον κανόνα ελέγχου αλλάζοντας το σύμβολό του αν η τροχιά διασχίζει την επιφάνεια σύμφωνα με τις εξισώσεις (19).

Ο έλεγχος ολίσθησης(SMC) λειτουργεί όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Θεωρούμε ένα μη γραμμικό σύστημα ως εξής :

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + G(x,t)u(t) \quad (5)$$

όπου το διάνυσμα  $x(t) \in \mathcal{R}^n$ , το διάνυσμα ελέγχου  $u(t) \in \mathcal{R}^m$  και το  $G(x,t) \in \mathcal{R}^{n \times m}$ .

Κάθε είσοδος  $u_i(t)$  του διανύσματος ελέγχου  $u(t) \in \mathcal{R}^m$  στον έλεγχο ολίσθησης SMC συναντάται με τη μορφή:

$$u_i(x,t) = \begin{cases} u_i(x,t)^+ \\ u_i(x,t)^- \end{cases} \quad \text{με } S_i(x) > 0 \text{ για τον πρώτο κλάδο και } S_i(x) < 0 \text{ για τον δεύτερο } \forall i=1,2,\dots,m(6),$$

όπου το  $S_i(x)=0$  για την  $i^{\text{στη}}$  επιφάνεια ολίσθησης σύμφωνα με την  $(n-m)$ -διαστάσεων επιφάνεια ολίσθησης, ορίζεται ως παρακάτω:

$$S_l(x) = [S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x)]^T = 0 \quad (7)$$

Το πρώτο από τα δύο στάδια λειτουργίας του SMC (ελέγχου ολίσθησης), είναι ο σχεδιασμός του ολισθαίνοντος επιπέδου, ενώ ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου που καθοδηγεί το σύστημα να κινηθεί προς την ολισθαίνουσα επιφάνεια. Μόλις οδηγηθεί εκεί, το σύστημα ελέγχου κλειστού-δακτυλίου είναι ανθεκτικό σε συνθήκες αβεβαιότητας, όπου ορίζονται ως οι αβεβαιότητες εντός του εύρους περιοχής του πίνακα εισόδου  $G(x,t)$ . Το κλειστού – δακτυλίου σύστημα ελέγχου συμπεριφέρεται σαν ένα μειωμένης-τάξης σύστημα με κίνηση ανεξάρτητη του ελέγχου. Οι αβεβαιότητες της εξίσωσης (5) μπορούν να θεωρηθούν ως:

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + \Delta f(x,t) + G(x,t)u(t) + d(t) \quad (8)$$

όπου το  $\Delta f(x,t)$  αναπαριστά τις ανακρίβειες της μοντελοποίησης, καθώς και τα λάθη, ενώ το  $d(t)$  αναπαριστά τις εξωτερικές ενοχλήσεις, το  $\Delta \bar{f}(x,t)$  και το  $\bar{d}t$  αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες αβεβαιότητες, τέτοιες ώστε:

$$\Delta f(x,t) = G(x,t) \Delta \bar{f}(x,t) \quad d(t) = G(x,t) \bar{d}t \quad (9)$$

Η επιλογή της επιφάνειας ολίσθησης εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας του συστήματος και την επιθυμητή απόδοση, το ασυνεχές τμήμα είναι υπεύθυνο για την καθοδήγηση των καταστάσεων του συστήματος προς την επιφάνεια, παρουσία αβεβαιότητας της μοντελοποίησης, η οποία εγγυάται την ευρωστία του συστήματος. Καθώς οι συνθήκες είναι στην επιφάνεια, το συνεχές τμήμα του SMC, κυριαρχεί και οδηγεί το σύστημα σε σταθερή κατάσταση.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ανίχνευση χρησιμοποιώντας μία διακριτού χρόνου μεταβλητή  $u$ , η αρχική επιθυμητή κατάσταση  $x_d(0)$ , πρέπει να ισοδυναμεί με τη θέση  $x(0)$  του συστήματος:

$$x_d(0) = x(0) \quad (10)$$

Για οποιοδήποτε σύστημα δεύτερης τάξης, οποιαδήποτε επιθυμητή δυνατή τροχιά θα πρέπει να ξεκινά από την ίδια θέση και έχοντας την ίδια ταχύτητα. Προφανώς το σύστημα δεν γίνεται να μεταπηδήσει κατευθείαν για να πετύχει αυτή την επιθυμητή κατάσταση. Αν συμβεί αυτό το σύστημα θα συγκλίνει μετά από κάποια μεταβατική περίοδο στην πρότερη κατάσταση (Slotine & Li, 1991).

Έστω  $x_d(t)$  μία επιθυμητή πορεία και το σφάλμα εντοπισμού του ορίζεται ως:  $\bar{x} = x - x_d$ . Μία χρονικά-μεταβαλλόμενη επιφάνεια  $S(t) \in \mathcal{R}^n$  ορίζεται ως:

$$s = \dot{\bar{x}} + \lambda \bar{x} \quad (11)$$

Σύμφωνα με την αρχική συνθήκη της εξίσωσης (10), το πρόβλημα αναζήτησης  $x = x_d$ , ισοδυναμεί με την προσπάθεια του συστήματος να κρατήσει τις επιθυμητές καταστάσεις στην επιφάνεια  $s(t)$ , για κάθε  $t > 0$ . Προφανώς το  $\bar{x} = 0$ , αποτελεί μοναδική λύση της γραμμικής διαφορικής εξίσωσης  $s = 0$ .

Ωστόσο, το πρόβλημα αναζήτησης του  $n$ -διάστατου διανύσματος  $x_d$  μπορεί να μειωθεί ώστε να διατηρηθεί η ποσοτική διαβάθμιση του  $s$  στο 0.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (11) στην (5) η είσοδος συνεχούς ελέγχου που προκύπτει:

$$\hat{u} = -f + \ddot{x}_d - \lambda \dot{\bar{x}} \quad (12)$$

όπου  $\lambda$  μία θετική σταθερά, ενώ το  $f$  αντιπροσωπεύει την  $f(x, t)$ , χάριν ευκολίας. Ένας ασυνεχής όρος προστίθεται κατά μήκος της επιφάνειας  $s = 0$ , ώστε:

$$u = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (13)$$

$$\text{όπου, } \operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{αν } s > 0 \\ -1 & \text{αν } s < 0 \end{cases}$$

$k$  είναι μια θετική σταθερά και είναι αρκετά μεγάλη για να επιτύχει την κατάσταση στην εξίσωση (13).

Υποθέτοντας ότι η εξίσωση (5), μπορεί να μετατραπεί σε γραμμικό σύστημα (Slotine & Li, 1991), στη μορφή των:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x, t) + G_2(x, t)u \end{aligned} \quad (14)$$

όπου  $x_1 \in \mathcal{R}^{n-m}$ ,  $x_2 \in \mathcal{R}^m$  και  $G_2(x, t)$  ένας μονοδιάστατος πίνακας.

Μία γραμμική ολισθαίνουσα επιφάνεια, μπορεί να θεωρηθεί ως:

$$s(x) = [S_1 \ S_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{δηλαδή, } S_1 x_1 + S_2 x_2 = 0 \quad (16)$$

όπου χωρίς απώλεια της γενικότητας, το  $S_2$  θεωρείται να είναι μη μοναδικό. Έτσι σε μια λειτουργία ολίσθησης:

$$x_2 = -S_2^{-1} S_1 x_1 \quad (17)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (14) προκύπτει:

$$\dot{x}_1 = f_1(x, t) = f_1(x_1, -S_2^{-1} S_1 x_1, t) \quad (18)$$

Η εξίσωση (18) αναπαριστά τη δυναμική μειωμένης τάξης που αντιπροσωπεύει την απόδοση του κλειστού-δακτυλίου. Η σχεδίαση της ολισθαίνουσας επιφάνειας  $s(x)$  εξαρτάται από την επιλογή των  $S_1$  και  $S_2$ , ώστε η δυναμική μειωμένης τάξης να ικανοποιεί την επιθυμητή απόδοση.

Ο κανόνας ελέγχου της SMC σχεδιάστηκε για να διασφαλίσει ότι οι καταστάσεις του συστήματος μπορούν να προσεγγίσουν και να διατηρήσουν την κίνηση τους στην ολισθαίνουσα επιφάνεια, χωρίς να φτάσουν την επιθυμητή απόδοση του συστήματος. Αυτό ονομάζεται *συνθήκη προσέγγισης*, πράγμα που σημαίνει ότι η τροχιά των καταστάσεων του συστήματος πρέπει να στρέφεται πάντα προς την ολισθαίνουσα επιφάνεια. Επομένως στην περίπτωση μιας μόνο εισόδου στο σύστημα, έχουμε:

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \quad (19)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0$$

ή

$$\dot{s} s < 0 \quad (20)$$

Η κατάσταση προσέγγισης γύρω από το  $s(t)=0$  μπορεί να επιτευχθεί, πράγμα που διασφαλίζει ότι η ολισθαίνουσα επιφάνεια επιτυγχάνεται σε διακριτό χρόνο, παρά την ύπαρξη αβεβαιότητας. Έτσι, η κατάσταση προσέγγισης δίνεται από τον εξής τύπο:

$$s^T \dot{s} \leq -\eta \|s\| \quad (21)$$

όπου  $\eta$  μια μικρή θετική σταθερά. Η εξίσωση (21), ονομάζεται *η-κατάσταση προσέγγισης* (Slotine & Li, 1991).

Όμως καμιά μεθοδολογία δεν είναι ιδανική. Το SMC ίσως και να μην είναι τόσο ιδανικό στην πράξη εξαιτίας της εφαρμογής ελέγχου σε άπειρη συχνότητα. Τα περισσότερα συστήματα πραγματικού χρόνου, ειδικά τα εξαρτώμενα από την κίνηση, όπως τα μηχανικά συστήματα, παρουσιάζουν κάποιες καθυστερήσεις. Ωστόσο, η εναλλαγή ελέγχου, μπορεί να επιφέρει περισσότερες καθυστερήσεις στους ενεργοποιητές μηχανικών συστημάτων. Ως εκ τούτου, η ασυνέχεια στον έλεγχο ανάδρασης παράγει μια ιδιαίτερη δυναμική συμπεριφορά στις γειτονικές περιοχές της επιφάνειας ελέγχου (Fridman & Levant, 2002). Αυτό το φαινόμενο αποκαλείται συνήθως *chattering effect*.

Το φαινόμενο αυτό αποτελεί βασικό μειονέκτημα του SMC και ανάλογα με τη συχνότητα εμφάνισής του μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια εξαιρετικά ασύμμετρη δυναμική συχνότητας που μειώνει την απόδοση του συστήματος, ενώ ορισμένες φορές μπορεί να οδηγήσει σε ασταθές σύστημα (Slotine & Li, 1991). Λόγω του φαινομένου αυτού πολλά μηχανικά κινούμενα εξαρτήματα, υποβάλλονται σε φθορά και υψηλές θερμοκρασίες λόγω της υψηλής τριβής. Γι' αυτό το λόγο οι ερευνητές προσπάθησαν να λύσουν αυτό το πρόβλημα προσαρμόζοντας την εξίσωση (13) με προσέγγιση συνέχειας γύρω από την ολισθαίνουσα επιφάνεια με υψηλή ενίσχυση γύρω από τα όρια, το οποίο ονομάζεται *λειτουργία κορεσμού* (Fridman & Levant, 2002):

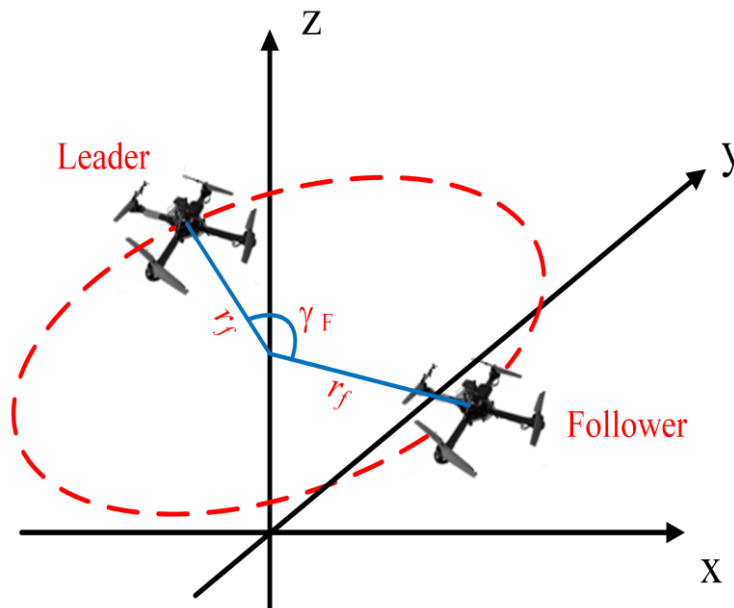
$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s), & \text{αν } |s| > \rho \\ \frac{s}{\rho} \text{αν } |s| \leq \rho \end{cases} \quad (22)$$

όπου  $\rho$  είναι ένα λεπτό οριακό στρώμα γύρω από την ολισθαίνουσα επιφάνεια και μπορεί να επιλεγεί ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να μειωθεί το *chattering effect*.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, μόλις ανιχνευτεί πυρκαγιά, ο δέκτης εντοπισμού των UAV's δημιουργεί συναγερμό πυρκαγιάς στα υπόλοιπα μέλη της ομάδας και το Γεωπεριβαλλοντικό Σύστημα πληροφοριών (GS). Επιπρόσθετα, τα αισθητήρια δεδομένα θα σταλούν στο GS και το GS στέλνει νέα τροχιά περιμέτρου

πυρκαγιάς στο ηγετικό UAV βασισμένο σε ένα μοντέλο πυρκαγιάς σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης φωτιάς (Ghamry, 2016).

Στη συνέχεια, το ηγετικό UAV στέλνει νέες εντολές διαμόρφωσης σχηματισμού. Ως εκ τούτου, ολόκληρη η ομάδα θα αλλάξει το σχηματισμό σύμφωνα με τα νέα στοιχεία μετά την ελλειπτική τροχιά της πυρκαγιάς που παρουσιάζεται στην εξίσωση (1) διατηρώντας τις ελλειπτικές ακτίνες  $\gamma_F$  όπως στην εξίσωση (30) και ορισμένη γωνία διαχωρισμού  $F$  μεταξύ του οδηγού και των ακολούθων UAV, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, δηλαδή ο σχηματισμός θα πρέπει να αναδιαμορφωθεί από τις καρτεσιανές συντεταγμένες  $d_d$  και  $\alpha_d$  σε πολικό με συντεταγμένες  $r_{fd}$  και  $\gamma_d$ .



Σχήμα 5. Διαμόρφωση σχηματισμού UAV κατά τη διάρκεια των φάσεων διαμόρφωσης και παρατήρησης.

(Πηγή: Ghamry, 2016)

Επίσης, κάθε σημείο πυρκαγιάς θα εκπροσωπείται στον δισδιάστατο καρτεσιανό χώρο ως εξίσωση (1) και αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα κατάστασης (Ghamry, 2016):

$$\vec{p}_j(t) = \begin{bmatrix} x_j t \\ y_j t \end{bmatrix} \quad (27)$$

Ένα μετασχηματισμένο διάνυσμα κατάστασης που κατευθύνεται στην ελλειπτική τροχιά της πυρκαγιάς αποτυπώνεται ως εξής (Sharma et al., 2010):

$$\vec{p}_{i,j}(t) = \begin{bmatrix} \overline{x_{i,j}}(t) \\ \overline{y_{i,j}}(t) \end{bmatrix} = \vec{p}_i(t) - \vec{p}_j(t) \quad (28)$$

Ένα νέο διάνυσμα κατάστασης για κάθε UAV ορίζεται από την αλλαγή της θέσης του, από το δυσδιάστατο καρτεσιανό πλαίσιο αναφοράς στο πολικό πλαίσιο αναφοράς με κέντρο την ελλειπτική τροχιά πυρκαγιάς και δίνεται από το (Ghamry, 2016):

$$\begin{matrix} \rightarrow \\ q_{i,j} \end{matrix} (t) = \begin{bmatrix} r_{f_{i,j}}(t) \\ \gamma_{i,j}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left\| \begin{matrix} \rightarrow \\ p_{i,j} \end{matrix} (t) \right\| \\ \angle \begin{matrix} \rightarrow \\ p_{i,j} \end{matrix} (t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Όπου το  $\gamma_i(t)$  αντιπροσωπεύει τη γωνία μεταξύ των ηγετικών και των ακολούθων UAV's και το  $r_{fi}(t)$  αντιπροσωπεύει την απόσταση του i-οστού UAV από το κέντρο της ελλειπτικής τροχιάς στο χρόνο t, και αναπαρίσταται ως εξής (Ghamry, 2016):

$$r_{fi}(t) = \frac{A*B}{\sqrt{B\cos\gamma_i^2 + A\sin\gamma_i^2}} \quad (30)$$

Όπου  $A = a*t_{fire}$  και  $B = b*t_{fire}$  είναι οι ελλειπτικοί κύριοι και δευτερεύοντες άξονες που αλλάζουν με το χρόνο εξάπλωσης της φωτιάς. Ο κύριος στόχος του διαχειριστή είναι να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες συνθήκες ως εξής:

$$C_1) \lim_{t \rightarrow \infty} |r_i(t) - r_d| = 0 \quad \forall i \leq N \quad (31)$$

$$C_2) \lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{\gamma}_i(t) - \dot{\gamma}_d| = 0 \quad \forall i \leq N \quad (32)$$

$$C_3) \lim_{t \rightarrow \infty} |\gamma_{i+1}(t) - \gamma_i(t)| = \frac{2\pi}{N} \quad \forall i \leq N \quad (33)$$

όπου η συνθήκη  $C_1$  δηλώνει ότι το i-οστό UAV θα πρέπει να διατηρεί την επιθυμητή απόσταση από το σημείο πυρκαγιάς, ενώ η κατάσταση  $C_2$  δηλώνει ότι κάθε i-οστό UAV θα πρέπει να διατηρεί την επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον στόχο. Τέλος, η κατάσταση  $C_3$  δηλώνει ότι όλα τα UAV πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα ελλειπτικό σχηματισμό γύρω από το σημείο πυρκαγιάς (Kawakami & Namerikawa, 2009).

Αρχικά, μια μεταβαλλόμενη στο χρόνο επιφάνεια  $S(t)$  στο χώρο  $R^n$  ορίζεται από την κλιμακωτή εξίσωση  $s(e,t) = 0$ , όπως έδειξαν οι Slotine & Li (1991):

$$s(e,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (34)$$

όπου  $\lambda$  είναι μια θετική σταθερά και αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμής ολίσθησης, αν  $n = 2$  για SMC πρώτης τάξης, το  $s$  θα είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα του σφάλματος θέσης  $e$  και του σφάλματος ταχύτητας έ έτσι ώστε:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (35)$$

Τότε, το νέο πρόβλημα ελλειψοειδούς σχηματισμού λύνεται για κάθε ακόλουθο αεροσκάφος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (31), (32) και (33) ως εξής:

$$\begin{aligned} \ddot{r}_i &= \ddot{r}_d + \lambda_r (\dot{r}_d - \dot{r}_i) \\ \ddot{\gamma}_i &= \ddot{\gamma}_d + \lambda_r (\dot{\gamma}_d - \dot{\gamma}_i) \end{aligned} \quad (36)$$

Όπου  $\lambda_r, \lambda_{\dot{r}}, \lambda_{\dot{\gamma}}$  είναι η ένταση ελέγχου  $\geq 0$ . Η συνθήκη (32) δεν θα χρησιμοποιηθεί, δεδομένου ότι η ταχύτητα εισόδου του ηγετικού UAV καθορίζεται από το μοντέλο κατανομής πυρκαγιάς που απεικονίζεται στο παραπάνω τμήμα.

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η συνθήκη ολίσθησης, ένας όρος προστίθεται στην επιφάνεια  $s=0$  έτσι ώστε:

$$U = \hat{U} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (37)$$

$$\text{όπου, } \operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{αν } s > 0 \\ -1 & \text{αν } s < 0 \end{cases}$$

$k$  είναι μια θετική σταθερά και είναι αρκετά μεγάλη για να επιτύχει την κατάσταση στην εξίσωση (37). Στο SMC, η μεταγωγή υψηλής συχνότητας στην επιφάνεια προκαλεί ταλαντώσεις εντός της γειτονιάς της. Προκειμένου να μειωθούν αυτές οι ταλαντώσεις οι οποίες ονομάζονται *chattering effect*, η σημειακή εξίσωση αντικαθίσταται από την εξίσωση κορεσμού όπως απεικονίζεται παρακάτω (Ghamry, 2016):

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & \text{αν } |s| > \rho \\ \frac{s}{\rho} & \text{αν } |s| \leq \rho \end{cases}$$

όπου το  $\rho$  είναι ένα λεπτό οριακό στρώμα γύρω από την ολισθαίνουσα επιφάνεια και μπορεί να επιλεγεί ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να μειώνεται το *chattering effect*.

### III.4.3. Ανασυγκρότηση σχηματισμού από διάφορες Ομάδες UAV - Αντιμετώπιση πολλών σημείων πυρκαγιάς

Για να επιτευχθούν με επιτυχία οι εργασίες ανίχνευσης και παρακολούθησης αυτόνομα, είναι πολύ σημαντικό να οριστεί ένα σημείο πυρκαγιάς για κάθε ομάδα UAV's. Αυτό γίνεται σύμφωνα με τις

σχετικές αποστάσεις μεταξύ ομάδων UAV's και των σημείων πυρόσβεσης, ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος εκτέλεσης της αποστολής.

Το πρόβλημα της ανάθεσης καθηκόντων επιλύεται εδώ χρησιμοποιώντας μια διαδικασία διαλογής με τη μορφή δημοπρασίας όπως στο έδειξαν στο έργο τους οι Sariel & Balch, 2005. Γνωρίζοντας ότι υπάρχουν  $N_T$  UAV με ανιχνευμένα σημεία πυρκαγιάς  $M_f$ , ο στόχος εδώ είναι να εκχωρηθεί κάθε εργασία (σημείο πυρκαγιάς) σε μια ομάδα UAV χωρίς επανάληψη, έτσι ώστε όλα τα σημεία να παρακολουθούνται και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των λειτουργιών. Σε αυτή την περίπτωση, το  $d_{ij}$  είναι η μεταβλητή εκχώρησης όπου (Ghamry, 2016):

$$\begin{cases} d_{ij} = 1, \text{ Αν η ομάδα UAV } j \text{ εκχωρηθεί σε σημείο πυρκαγιάς } i, \forall i = \{1, 2, \dots, M_f\}, \forall j = \{1, 2, \dots, N_T\}, \\ d_{ij} = 0, \text{ Αν η ομάδα UAV } j \text{ δεν εκχωρηθεί σε σημείο πυρκαγιάς } i, \forall i = \{1, 2, \dots, M_f\}, \forall j = \{1, 2, \dots, N_T\} \end{cases}$$

Επίσης, έστω  $p_{ij}$  να είναι το κόστος της ανάθεσης σημείου φωτιάς  $I$  στην ομάδα UAV's  $j$ , που επιλέγεται εδώ για να είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ηγετικών UAV's όλων των ομάδων και όλων των σημείων πυρκαγιάς.

Ο αλγόριθμος λήψης αποφάσεων, εκτελείται από έναν ελεγκτή υψηλού επιπέδου, ο οποίος έχει εφαρμοστεί στον επεξεργαστή του GS (Γεωπεριβαλλοντικού συστήματος πληροφοριών), ή από το ηγετικό UAV του συνόλου της αποστολής. Το GS/ηγετικό UAV της αποστολής λειτουργεί ως υπεύθυνος πλειστηριασμού και προσφέρει με μορφή δημοπρασίας τα σημεία πυρκαγιάς, σε όλα τα UAV, ώστε αυτά με τη σειρά τους να αρχίζουν να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στα μέρη που έχουν επιλέξει, μετά από τον έλεγχο εγκυρότητας. Ο έλεγχος εγκυρότητας πραγματοποιείται πριν από τη δημοπρασία. Για παράδειγμα, εάν η εργασία έχει ήδη εκτελεστεί, αποστέλλεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα για μη συμμετοχή της συγκεκριμένης εργασίας στον πλειστηριασμό. Αν δεν υπάρχει κάποια προειδοποίηση, ο υπεύθυνος του πλειστηριασμού θα δεχθεί τις πληροφορίες του απαιτούμενου κόστους σε πόρους της κάθε ομάδας UAV ως «προσφορές» ανάληψης της συγκεκριμένης εργασίας. Ο υπεύθυνος του πλειστηριασμού λειτουργεί επίσης ως πλειοδότης για τη συγκεκριμένη εργασία και αναμένει για μια προκαθορισμένη χρονική διορία να εμφανιστεί ελάχιστη «προσφορά», από άποψη πόρων που θα χρειαστούν. Αν δεν έχουν ληφθεί προσφορές από άλλες ομάδες UAV, ο δημοπράτης θα επιλέξει τον εαυτό του ως «νικητή» του πλειστηριασμού. Διαφορετικά επιλέγεται η ομάδα UAV με το ελάχιστο κόστος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις εργασίες (σημεία πυρκαγιάς), αποφεύγοντας να λαμβάνονται προσφορές από ομάδες UAV, στις οποίες έχουν ήδη ανατεθεί καθήκοντα, εκτός αν έχουν τελειώσει με τις αποστολές που είχαν αναλάβει (Sariel & Balch, 2005). Εάν δύο ομάδες UAV, έχουν

το ίδιο κόστος πόρων για μια εργασία (σημείο πυρκαγιάς), ο δημοπράτης θα επιλέξει το ηγετικό την ομάδα με το μικρότερο σειριακό αριθμό, εν είδει αλφαβητικής σειράς (Ghamry, 2016).

Η συνάρτηση ελαχιστοποίησης κόστους εκχώρησης δίνεται ως εξής:

$$\min c_{ij} = \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{M_j} p_{ij} \delta_{ij}, \quad \delta_{ij} \in 0,1, \forall i = \{1,2, \dots, M_f\}, \forall j = \{1,2, \dots, N_T\} \quad (38)$$

### III.4.4. Παρακολούθηση δασών και ανίχνευση πυρκαγιάς με συνθήκες εκτεταμένου ανεφοδιασμού

Παρακάτω, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος FTCC (Fault Tolerant Cooperative Control Algorithm- Αλγόριθμος Συνεργατικού Ελέγχου Ανθεκτικότητας Λάθους) για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής εκτέλεσης της ανατεθείσας αποστολής, ώστε να επιτυγχάνεται με επιτυχία η παρακολούθηση των δασών, η πυρανίχνευση και η παρακολούθηση της αποστολής, ενώ ένα ή περισσότερα UAVs παρουσιάζουν κάποιο σφάλμα ή αφήνουν το σχηματισμό για ανεφοδιασμό / επαναφόρτιση:

Αλγόριθμος 4.1 Ανάθεση εργασίας πολλαπλών ομάδων UAV's (αλγόριθμος βασισμένος στην δημοπρασία)

- 1: **Για** το γενικό ηγέτη UAV/GS (auctioneer) επανάλαβε
- 2:   λάβετε τις συντεταγμένες ανιχνεύσεων σημείων φωτιάς από την ομάδα ανίχνευσης
- 3:   πρόσφερε τη δημοπρασία
- 4:   **Για το**  $j^{\text{η}}$  σημείο φωτιάς επανάλαβε
- 5:     **Αν στην**  $i^{\text{η}}$  UAVs ομάδα έχει ήδη ανατεθεί η  $j^{\text{η}}$  αποστολή τότε
- 6:       παράλειψε την  $i^{\text{η}}$  UAVs ομάδα από τη δημοπρασία
- 7:     **τέλος αν**
- 8:   στείλε τις συντεταγμένες στις διαθέσιμες ομάδες UAV's
- 9:   **για τον**  $i^{\text{ο}}$  ηγέτη ομάδας UAV επανάλαβε
- 10:     υπολόγισε τη απόσταση  $p_{ij}$
- 11:     στείλε την απόσταση ως προσφορά/κόστος στον γενικό ηγέτη UAV/GS
- 12:   **τέλος για**
- 13:   **αν η προσφορά/κόστος**  $p_{ij}$  είναι της ίδιας μορφής για δύο ή περισσότερες ομάδες UAV's τότε
- 14:     διάλεξε τον  $i^{\text{ο}}$  UAV ηγέτη ομάδας με τον μικρότερο αριθμό αναγνώρισης
- 15:   **τέλος αν**
- 16:   ανάθεση στην ομάδα UAVs με τη μικρότερη προσφορά/κόστος  $p_{ij}$  το  $j^{\text{ο}}$  σημείο πυρκαγιάς
- 17: **τέλος για**
- 18: **τέλος για**

Η ομάδα σχηματισμού UAV περιγράφεται από το ζεύγος,  $(r_F, H)$ , όπου το  $r_F$  παριστάνει τη μορφή του σχηματισμού, ενώ το  $H$ , είναι το γράφημα ελέγχου που αναπαριστά τη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί καθένα από τα UAV. Έτσι παράγεται ένας  $N \times N$  γείτων πίνακας  $G$ , για να αναπαραστήσει το αρχικό γράφημα ελέγχου, όπου  $N$  ο αριθμός των UAV σε σχηματισμό. Τα στοιχεία του πίνακα  $G$  είναι είτε 0, είτε 1. Αν ένα στοιχείο  $(i, j)$  είναι 1, αντιπροσωπεύει μια εισερχόμενη άκρη από το  $i$  UAV στο  $j$  UAV, ενώ το 0 αναπαριστά καμία άκρη μεταξύ των  $i$  και  $j$  UAV, πράγμα που σημαίνει ότι η κίνηση του ενός UAV είναι ανεξάρτητη του άλλου. Παρομοίως ένας πίνακας  $H$ , αναπαριστά την τελική μορφή σχηματισμού.

Η εμφάνιση του 1 σε μια στήλη για κάθε UAV ορίζει τον ελεγκτή (controller) σχηματισμού του (Desai, Kumar & Ostrowski, 1999):

$$\sum_{\text{columns}} 1's = \begin{cases} 0 & \text{οδηγός} \\ 1 & \text{ακόλουθος με έλεγχο } d-a \\ 2 & \text{ακόλουθος με έλεγχο } d-d \end{cases}$$

Όπου ο έλεγχος  $d-a$  σημαίνει ότι ένα UAV ακολουθεί ένα άλλο, ελέγχοντας τη σχετική απόσταση και τον προσανατολισμό μεταξύ τους και ο έλεγχος  $d-d$  σημαίνει ότι ένα UAV διατηρεί μια καθορισμένη απόσταση σε σχέση με δύο UAV's. Η μετάβαση από ένα γράφημα ελέγχου σε άλλο παρουσιάζεται από μία μήτρα μετάβασης  $T$  ως εξής:

$$T = H - G \quad (39)$$

Υπάρχουν τρεις πιθανές τιμές των  $(i, j)$  στοιχείων στη μήτρα  $T$  ως εξής:

$$\begin{cases} 0 & \text{καμία σύνδεση κορυφής μεταξύ } i \text{ και } j \\ -1 & \text{η σύνδεση κορυφής πρέπει να σπάσει} \\ 1 & \text{πρέπει να δημιουργηθεί νέα σύνδεση κορυφής} \end{cases}$$

Η εξίσωση (39) δηλώνει ότι όλες οι μήτρες  $T$ ,  $H$  και  $G$  πρέπει να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Η μήτρα  $H$  αντιπροσωπεύει τη διαμόρφωση σχηματισμού των υπόλοιπων λειτουργικών UAV's. Επομένως, θεωρείται ότι κατά τη διάρκεια της αναδιαμόρφωσης του σχηματισμού τα UAV's που παρουσίασαν σφάλμα υπάρχουν ουσιαστικά, αλλά δεν υπάρχει σύνδεση κορυφής μεταξύ αυτών και των άλλων UAV's και το στοιχείο των στηλών υποδηλώνει ότι τα ελαττωματικά UAV's θα εμφανίζονται ως μηδενικά. Έτσι, ο πίνακας  $T$  μπορεί να υπολογιστεί, καθώς τα εναπομείναντα UAV's αρχίζουν να αναδιαμορφώνουν το σχήμα του σχηματισμού τους (Kamel, Yu & Zhang, 2017). Μόλις ένα UAV εγκαταλείψει το σχηματισμό για ανεφοδιασμό ή λόγω σφάλματος και σύμφωνα με τη θεωρία γραφημάτων, η σύνδεση του

ελαττωματικού αεροσκάφους θα σπάσει και στη μήτρα μετάβασης  $T$  θα εμφανιστεί (-1). Επομένως, η εξίσωση (33) μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$C_{3\text{Fault}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_{i+1}(t) - \gamma_i(t) = \frac{2\pi}{N+N_B} \quad (40)$$

όπου  $N_B$  είναι ο αριθμός των σπασμένων συνδέσεων που εμφανίστηκε στη μήτρα  $T$  ανάλογα με τον αριθμό των ελαττωματικών UAV's.

# Κεφάλαιο IV

## Μαθηματική Μοντελοποίηση - Προσομοίωση της Διάδοσης των Πυρκαγιών

### IV.1. Αριθμητική προσομοίωση εξάπλωσης επιφανειακής πυρκαγιάς σε θαμνώδη περιοχή της Μεσογείου

Το μοντέλο που αντιπροσωπεύει τη διαβάθμιση της βλάβστησης και την αλληλεπίδρασή της με το μείγμα των αερίων του περιβάλλοντος είναι ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία της διαμόρφωσης αυτού του προβλήματος. Η κατάσταση αποσύνθεσης κάθε οικογένειας (k) σωματιδίων περιγράφεται από το κλάσμα μάζας νερού ( $Y_{H_2O}^{s,k}$ ), το ξηρό υλικό (ξύλο) ( $Y_i^{s,k}$ ), τον άνθρακα ( $Y_{char}^{s,k}$ ) και τη στάχτη ( $Y_{ash}^{s,k}$ ). Η αρχική κατάσταση αντιστοιχεί σε ένα μείγμα νερού και ξηρής ύλης. Κάτω από την επίδραση της θερμότητας που απελευθερώνεται από την καύση (φλόγα, κάρβουνα), αυτά τα σωματίδια χάνουν το νερό τους και μετασχηματίζονται (πυρόλυση), διαδικασία που προκαλεί την απελευθέρωση αερίων προϊόντων ( $CH_4$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ). Αυτά τα αέρια αναφλέγονται εν μέρει όταν έρχονται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος (ομοιογενής καύση). Το υπόλοιπο ανθρακούχο μέρος των σωματιδίων (ξυλάνθρακας) επίσης αναφλέγεται (ετερογενής καύση). Στο τέλος αυτής της διεργασίας αποσύνθεσης προκύπτει ένα ορυκτό υπόλειμμα (στάχτες) αποτελούμενο από οξείδιο του πυριτίου (Morvan & Dupuy, 2003).

Κάθε οικογένεια σωματιδίων k περιγράφεται από την ακόλουθη σειρά διαφορικών εξισώσεων (Shortliffe & Buchanan, 1975):

$$\frac{d\bar{\rho}_s^k}{dt} Y_{H_2O}^{s,k} = \dot{M}_{H_2O}^k$$

$$\frac{d\bar{\rho}_k^s}{dt} Y_i^{s,k} = \dot{M}_i^k$$

$$\frac{d\rho_s^k}{dt} Y_{\text{char}}^{s,k} = \dot{M}_{\text{char}}^k = \dot{M}_{\text{char}}^{\text{pro}^k} - \dot{M}_{\text{char}}^{\text{Oxy}^k}$$

$$\overline{\rho_s^k} C_p^s \frac{dT_{s,k}}{dt} = h_c^k a_s^k \sigma_s^k (T - T^{s,k}) + \frac{\alpha_s^k}{4} \sigma_s^k (J - J^{s,k}) + \sum \dot{M}_a^k \Delta h \alpha^{s,k}$$

Με τις ακόλουθες υποσημειώσεις:

$\overline{\rho_s^k} = a_s^k \rho_s^k$  (αποτελεσματική πυκνότητα),  $a_s^k$  (κλάσμα όγκου)

$\dot{M}_k^a$  (ρυθμός παραγωγής / καταστροφής του νερού  $H_2O$ , ξηρό υλικό (i), άνθρακας (char))

$C_p^k$  (ειδική θερμότητα),  $T_{s,k}$  (θερμοκρασία),  $\sigma_s^k$  (λόγος επιφάνειας/όγκου)

$h_c^k$  (συμπαγής, συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αερίου)

$J, J^{s,k}$  (φωτεινότητα και εκπομπή ακτινοβολίας από θερμά σωματίδια).

Μεταξύ των παραδοχών που πραγματοποιήθηκαν για την καθιέρωση αυτού του μοντέλου, δεν επιβλήθηκε θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ αερίου και σωματιδίων ( $T_{s,k} \neq T$ ). Τα ποσοστά παραγωγής / καταστροφής ( $\dot{M}_k^a$ ) χαρακτηρίζουν την κινητική της θερμικής αποικοδόμησης των σωματιδίων από μια θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA) (Morvan & Dupuy, 2003).

Η εξίσωση της ακτινοβολίας μεταφοράς περιλαμβάνει δύο πηγές, την ακτινοβολία που απελευθερώνεται από τη φλόγα (η ουσία αυτής της ακτινοβολίας προέρχεται από τα σωματίδια αιθάλης που βρίσκονται στη φλόγα) και εκείνη που εκπέμπεται από τα πυρίμαχα στερεά σωματίδια στο καύσιμο στρώμα (κάρβουνα) (Morvan & Dupuy, 2003):

$$\frac{d\alpha_g I}{ds} = \alpha_g \sigma_g \left( \frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right) + \sum_k \alpha_s^k \sigma_s^k \left( \frac{\sigma T_{s,k}^4}{\pi} - I \right)$$

$$J = \int_0^{4\pi} I d\Omega$$

Το  $I$  υποδεικνύει την ένταση της ακτινοβολίας, το  $\alpha_g$  το κλάσμα όγκου της αέριας φάσης, το  $\sigma_g$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης του μείγματος αιθάλης + αερίου,  $T$  είναι η μέση θερμοκρασία του αερίου και  $s$  η κατεύθυνση διάδοσης της φωτιάς.

Για να συγκρίνουμε την επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς (ROS), μπορούμε να σχηματίσουμε έναν αριθμό Froude που αντιπροσωπεύει τον λόγο μεταξύ της δύναμης αδράνειας και της δύναμης πλευστότητας (Morvan & Dupuy, 2003):

$$Fr = \frac{U_H^2}{gY_1}, \text{ όπου } U_H \text{ η ταχύτητα του ανέμου}$$

Συμπερασματικά, η διάδοση μιας πυρκαγιάς σε μια θαμνώδη μεσογειακή περιοχή έχει εξομοιωθεί αριθμητικά χρησιμοποιώντας μια πολυφασική φόρμουλα. Για την πυρκαγιά που εκτυλίσσεται σε πετρώδεις περιοχές ( $Fr < 1$ ), η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της φλόγας και του στερεού καυσίμου ελέγχεται από ακτινοβολία που αντιπροσωπεύει έως και το 60% της ενέργειας που λαμβάνεται από το στρώμα καυσίμου. Για την πυρκαγιά που κατευθύνεται από τον αέρα ( $Fr > 10$ ), η ροή διάδοσης θερμότητας μετατρέπεται στον κύριο τρόπο μεταφοράς της θερμότητας (Morvan & Dupuy, 2003).

#### IV.1.1.Ελλειπτικό μοντέλο για τη Μοντελοποίηση και Προσομοίωση των Δασικών Πυρκαγιών

Τα φυσικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη μία ή περισσότερες διαδικασίες μεταφοράς ενέργειας από τη ζώνη καύσης προς το άκαυστο καύσιμο. Γενικά, τα φυσικά μοντέλα οδηγούν σε συστήματα διαφορικών εξισώσεων που απαιτούν χρονοβόρους αριθμητικούς υπολογισμούς. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αναλυτική προσέγγιση της μορφής φωτιάς είναι αυτή της έλλειψης, που περιγράφεται ως ελλειπτικό μοντέλο της τοπικής εξάπλωσης της φωτιάς. Άλλες προσεγγίσεις που είναι γνωστές από τη βιβλιογραφία είναι τα «δάκρυα», «ωοειδή σχήματα» και οι «διπλές ελλείψεις». Κάθε σημείο σε ένα μέτωπο φωτιάς σε δεδομένο χρόνο  $t$  μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο ανάφλεξης μιας μικρής τοπικής φωτιάς που προκαλεί καύση σε περιοχή ελλειπτικού σχήματος σε χρόνο  $t+dt$ . Υποθέτοντας ότι κάθε τέτοια έλλειψη ορίζεται από τις συνθήκες καύσης στο σημείο δημιουργίας της ανάφλεξης, το προκύπτον μέτωπο φωτιάς στο χρόνο  $t+dt$  μπορεί να οριστεί από την κατηγορία όλων των ελλειπτικών σχημάτων (αρχή του Huygens για την επέκταση των πυρκαγιών). Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων για την περιγραφή της σταθερής διάδοσης της δασικής πυρκαγιάς σε παγκόσμια κλίμακα προέκυψε αναλυτικά από τον Richards το 1990 (Richards, 1990; Perry, 1998). Η προσέγγισή του έχει γίνει η βάση για αρκετά επιτυχημένα συστήματα λογισμικού για την προσομοίωση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών υπό πραγματικές συνθήκες (Glasa & Halada, 2008).

### IV.1.2. Η προσέγγιση Richards

Η τοπική ελλειπτική διάδοση της πυρκαγιάς σε απολύτως επίπεδο έδαφος που καλύπτεται από ένα ομοιογενές καύσιμο και έναν συνεχή άνεμο παρατηρήθηκε πειραματικά. Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο χρόνο  $dt$  το όριο της περιοχής καύσης που αναφλέγεται σε ένα σημείο έχει το σχήμα έλλειψης με ημιάξονες  $a dt$  και  $b dt$  όπου το κέντρο της ελλείψεως μετατοπίζεται από το  $c dt$  προς την κατεύθυνση του ανέμου. Στη συνέχεια, σε ένα μπροστινό μέτωπο φωτιάς στο χρόνο  $t$ , το οποίο οριοθετεί την περιοχή καύσης στον χρόνο  $t$ , αντιπροσωπεύεται παραμετρικά από μια δεδομένη κλειστή καμπύλη  $(x(\phi, t), y(\phi, t))$ , όπου  $\phi$  είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από την παραμετροποίηση της καμπύλης (Glasa & Halada, 2008). Ομοίως, το καινούργιο μέτωπο φωτιάς στο χρόνο  $t+dt$  αντιπροσωπεύεται από μια καμπύλη  $(x(\phi, t+dt), y(\phi, t+dt))$ . Όταν είναι γνωστές και οι δύο καμπύλες  $(x(\phi, t), y(\phi, t))$  και  $(x(\phi, t+dt), y(\phi, t+dt))$  η διάδοση μπορεί να υπολογιστεί για όλες τις τιμές της παραμέτρου  $\phi$  ως εξής:

$$x_t(\phi, t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{x(\phi, t+dt) - x(\phi, t)}{dt}$$

$$y_t(\phi, t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{y(\phi, t+dt) - y(\phi, t)}{dt}$$

Στη συνέχεια, έστω ότι η κατεύθυνση του ανέμου την ώρα  $t$  αλλάζει από την αρχική κατεύθυνση στον άξονα  $y$  κατά γωνία  $\theta$  δεξιόστροφα και έστω ότι είναι σταθερή σε όλη την περίοδο καύσης  $[t, t+dt]$ . Κάθε σημείο στην αρχή της φωτιάς μπορεί να θεωρηθεί ως η αρχή μιας τοπικής φωτιάς ελλειπτικού σχήματος (Glasa & Halada, 2008). Στο χρόνο  $t+dt$  αυτές οι ελλείψεις έχουν τους ημιάξονες  $a(\phi, t)dt$  και  $b(\phi, t)dt$  και η αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου περιγράφεται από  $c(\phi, t)dt$  σύμφωνα με τα σημεία ανάφλεξης τους. Έστω ότι οι συναρτήσεις  $a(\phi, t)$ ,  $b(\phi, t)$  και  $c(\phi, t)$  προκύπτουν από τις συνθήκες καύσης στα σημεία ανάφλεξης. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, το νέο μέτωπο της φωτιάς στο χρόνο  $t+dt$ , που οριοθετεί ολόκληρη την περιοχή καύσης στο χρόνο  $t+dt$ , ορίζεται από το σύνολο του συστήματος των ελλείψεων (Glasa & Halada, 2008). Για να χρησιμοποιήσουμε τις γεωμετρικές ιδιότητες των σημείων που βρίσκονται σε μια κοινή εφαπτόμενη γραμμή δύο κύκλων, ο Richards (1990) εισήγαγε τον ακόλουθο μετασχηματισμό (De'ath & Fabricius, 2000):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b/a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & -S \\ S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

Όπου τα  $X, Y$  και τα  $x, y$  είναι συντεταγμένες στο μετασχηματισμένο και αρχικό σύστημα συντεταγμένων αντίστοιχα και  $C = \sin \theta$ ,  $S = \eta \mu \theta$ . Ο μετασχηματισμός  $T$  περιστρέφει τους άξονες του συστήματος

συντεταγμένων υπό γωνία  $\theta$  και ξαναβαθμολογεί τον άξονα  $x$  με ένα πηλίκο  $b/a$ . Το πηλίκο  $a/b$  εξαρτάται μόνο από τον χρόνο και είναι χωρικά ανεξάρτητο, δηλαδή για οποιοδήποτε  $d\phi$ , ισχύει (De'ath & Fabricius, 2000):

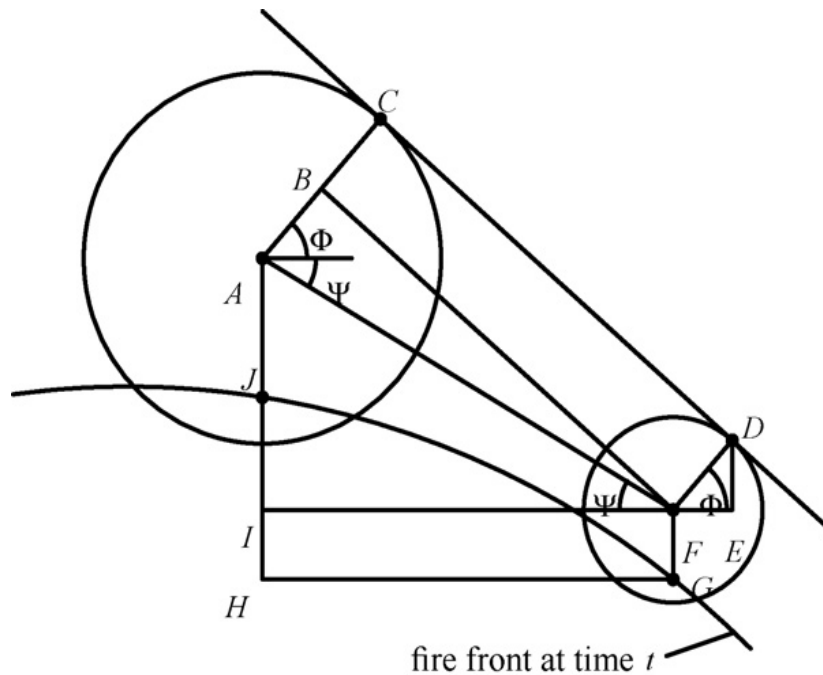
$$\frac{a(\phi,t)}{b(\phi,t)} = \frac{a(\phi+d\phi,t)}{b(\phi+d\phi,t)} \quad (41)$$

Ο μετασχηματισμός  $T$  και η παραδοχή (41) βοηθούν να βρεθεί ένα σύστημα κύκλων αντί για ελλείψεων και στη συνέχεια να υπολογιστεί το περίγραμμα των ελλειπτικών σχημάτων με τον αντίστροφο μετασχηματισμό:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a/b & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για τα σημεία και τις αποστάσεις που δίνονται στο Σχήμα 6 ως  $d\phi \rightarrow 0$ , προκύπτει (Perry, 1998):

$$\begin{aligned} G &= (X(\phi,t), Y(\phi,t)) & J &= (X(\phi+d\phi,t), Y(\phi+d\phi,t)) & C &= (X(\phi,t+dt), Y(\phi,t+dt)) \\ D &= (X(\phi+d\phi,t+dt), Y(\phi+d\phi,t+dt)) & AB &= dt + d\phi b\phi(\phi,t) & DF &= dt b(\phi,t) \\ FG &= dt c(\phi,t) & FI &= -d\phi X\phi(\phi,t) & AF &= (AI^2 + FI^2)^{1/2} = d\phi \{ [dt(d(\phi,t) + Y\phi(\phi,t))]^2 + X\phi(\phi,t)^2 \}^{1/2} \\ AJ &= dt c(\phi+d\phi,t) = dt c(\phi,t) + dt d\phi c_\phi(\phi(\phi,t)) \\ AC &= dt b(\phi+d\phi,t) = dt b(\phi,t) + dt d\phi b\phi(\phi,t) \end{aligned}$$



Σχήμα 6. Δύο κύκλοι στο μετασχηματισμένο μέτωπο φωτιάς (σε σύστημα συντεταγμένων  $(X, Y)$ )

(Πηγή: Glasa & Halada, 2008)

όπου ο χαμηλότερος δείκτης  $\phi$  υποδηλώνει τη μερική παράγωγο σε σχέση με το  $\phi$ , και

$$\begin{aligned} b(\phi+d\phi,t) &= b(\phi,t) + d\phi b_{\phi}(\phi,t) & c(\phi+d\phi,t) &= c(\phi,t) + d\phi c_{\phi}(\phi,t) \\ X(\phi+d\phi,t) &= X(\phi,t) + d\phi X_{\phi}(\phi,t) & Y(\phi+d\phi,t) &= Y(\phi,t) + d\phi Y_{\phi}(\phi,t) \end{aligned}$$

Από το Σχήμα 6 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} X[D] = X(\phi, t+dt) &= X(\phi, t) + EF = X(\phi, t) + dtb(\phi, t) \cos(\Phi + \Psi - \Psi) = X(\phi, t) + dtb(\phi, t) [\cos(\Phi + \Psi) \cos \Psi + \\ &\quad \sin(\Phi + \Psi) \sin \Psi] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} Y[D] = Y(\phi, t+dt) &= Y(\phi, t) + DE + FG = Y(\phi, t) + dtb(\phi, t) \sin(\Phi + \Psi - \\ &\quad \Psi) + dtc(\phi, t) = Y(\phi, t) + dtb(\phi, t) [\sin(\Phi + \Psi) \cos \Psi - \cos(\Phi + \Psi) \sin \Psi] + dtc(\phi, t) \end{aligned} \quad (43)$$

Εφόσον το ευθύγραμμο τμήμα  $CD$  είναι η εφαπτομένη γραμμή και στους δύο κύκλους, εάν  $d\phi \rightarrow 0$ , τότε  $C \rightarrow D$  και το ευθύγραμμο τμήμα  $CD$  προσεγγίζει το περίγραμμα και των δύο κύκλων, τότε

και οι συντεταγμένες του σημείου D πλησιάζουν τις συντεταγμένες του  $(X(\phi, t + dt), Y(\phi, t + dt))$ . Ως εκ τούτου, μετά την αντικατάσταση των σχέσεων (Glasa & Halada, 2008):

$$\begin{aligned}\cos(\Phi + \Psi) &= AB/AF & \sin(\Phi + \Psi) &= \frac{(AF^2 - AB^2)^{1/2}}{AF} \\ \cos\Psi &= FI/AF & \sin\Psi &= \frac{(AF^2 - FI^2)^{1/2}}{AF}\end{aligned}$$

που προκύπτουν από το Σχήμα 6 για την (42) και την (43), καθώς  $d\phi \rightarrow 0$  μπορούμε να υπολογίσουμε

$$X(\phi, t + dt) = X(\phi, t) + P(\phi, t, dt)$$

$$Y(\phi, t + dt) = Y(\phi, t) + Q(\phi, t, dt)$$

όπου,

$$P(\phi, t, dt) = dt b \frac{-X_\phi dt b \phi + (dt c \phi + Y_\phi)[(dt c \phi + Y_\phi)^2 + X_\phi^2 - dt^2 b_\phi^2]^{1/2}}{(dt c \phi + Y_\phi)^2 + X_\phi^2}$$

$$Q(\phi, t, dt) = dt b \frac{-[(dt c \phi + Y_\phi)^2 + X_\phi^2 - dt^2 b_\phi^2]^{1/2} X_\phi - (dt c \phi + Y_\phi) dt b \phi}{(dt c \phi + Y_\phi)^2 + X_\phi^2} + c dt$$

και οι συναρτήσεις  $b$ ,  $c$ ,  $b_\phi$ ,  $c_\phi$ ,  $X_\phi$ ,  $Y_\phi$  δίνονται στο  $(\phi, t)$ . Αυτές οι εξισώσεις διατηρούνται στο σύστημα συντεταγμένων  $(X, Y)$ . Εφόσον ισχύει ότι

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} X(\phi, t + dt) \\ Y(\phi, t + dt) \end{bmatrix} =$$

$$T^{-1} \begin{bmatrix} X(\phi, t + dt) + P(\phi, t + dt) \\ Y(\phi, t + dt) + Q(\phi, t + dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\phi, t) \\ y(\phi, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a/b & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(\phi, t + dt) \\ Q(\phi, t + dt) \end{bmatrix}$$

έχουμε

$$\begin{bmatrix} x(\phi, t + dt) \\ y(\phi, t + dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\phi, t) \\ y(\phi, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{a}{b} P(\phi, t + dt) \\ Q(\phi, t + dt) \end{bmatrix}$$

και εφαρμόζοντας το όριο για  $dt \rightarrow 0$  και για τις δύο πλευρές της εξίσωσης, παίρνουμε τις μερικές παραγώγους για το  $t$

$$\begin{bmatrix} x_1(\phi, t) \\ y_1(\phi, t) \end{bmatrix} = \lim_{dt \rightarrow 0} 1/dt \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{a}{b} P(\phi, t + dt) \\ Q(\phi, t + dt) \end{bmatrix}$$

Αυτές οι επιλύσεις μπορούν να γίνουν μόνο με την παραδοχή (2) που σημαίνει ότι το πηλίκο  $b/a$  δεν είναι συνάρτηση της παραμέτρου  $\phi$ . Εφόσον:

$$\begin{bmatrix} x_\phi \\ y_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b/a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & -S \\ S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\phi \\ y_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b/a(C_{x\phi} - S_{y\phi}) \\ S_{x\phi} - C_{y\phi} \end{bmatrix}$$

λαμβάνουμε το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων (Perry, 1998):

$$X_1(\phi, t) = \frac{a^2 \cos\theta(x_\phi \sin\theta + y_\phi \cos\theta) - b^2 \sin\theta(x_\phi \cos\theta - y_\phi \sin\theta)}{[b^2(x_\phi \cos\theta - y_\phi \sin\theta)^2 + a^2(x_\phi \sin\theta - y_\phi \cos\theta)^2]^{1/2}} + c \sin\theta \quad (44)$$

$$Y_1(\phi, t) = \frac{-a^2 \sin\theta(x_\phi \sin\theta + y_\phi \cos\theta) - b^2 \cos\theta(x_\phi \cos\theta - y_\phi \sin\theta)}{[b^2(x_\phi \cos\theta - y_\phi \sin\theta)^2 + a^2(x_\phi \sin\theta - y_\phi \cos\theta)^2]^{1/2}} + c \cos\theta \quad (45)$$

Το σύστημα (44) και (45) περιγράφει την εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς σταθερής κατάστασης σε απόλυτα επίπεδο έδαφος που καλύπτεται από συνεχές, ομοιόμορφα κατανεμημένο καύσιμο όπου η τοπική ελλειπτική επέκταση της πυρκαγιάς εξαπλώνεται και η εκκεντρότητα των ελλείψεων θεωρείται σταθερή.

#### IV.1.3. Εφαρμογή της θεωρίας του περιγράμματος (Envelope Theory)

Το περίγραμμα του συστήματος των ελλείψεων θα προκύψει άμεσα χωρίς τη χρήση του μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων. Υποθέτοντας τη (40) η σχέση μεταξύ των συναρτήσεων  $a(\phi, t)$  και  $b(\phi, t)$  και των παραγώγων τους για την περίπτωση μεταβλητών συνθηκών καύσεως, μπορούν να εκφραστούν ως εξής (Glasa & Halada, 2008):

Υποθέτοντας ότι για τιμές  $\phi$  και  $\phi + d\phi$  ισχύει:

$$\frac{a_{\phi}(\phi, t)}{b_{\phi}(\phi, t)} = \frac{a_{\phi}(\phi, t)}{b(\phi, t)} \quad (46)$$

με

$$a(\phi, t)/b(\phi, t) = m, a(\phi + d\phi, t)/b(\phi + d\phi, t) = m, \text{ για } m \in \mathbb{R} - \{0\},$$

προκύπτει

$$\begin{aligned} \alpha(\phi + d\phi, t) - \alpha(\phi, t) &= m(b(\phi + d\phi, t) - b(\phi, t)) \\ (\alpha(\phi + d\phi, t) - \alpha(\phi, t))/d\phi &= m(b(\phi + d\phi, t) - b(\phi, t))/d\phi, \quad d\phi \neq 0 \end{aligned}$$

και υπολογίζοντας το όριο για  $d\phi \rightarrow 0$  έχουμε  $a_{\phi}(\phi, t) = mb_{\phi}(\phi, t)$ , από το οποίο προκύπτει (46), αφού  $m = a(\phi, t)/b(\phi, t)$ .

Λαμβάνοντας υπόψη την τοπική φωτιά ελλειπτικού σχήματος την ώρα  $t+dt$  με τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} x_E(\phi, t + dt) \\ y_E(\phi, t + dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\phi, t)dt \cos \alpha \\ b(\phi, t)dt \sin \alpha + c(\phi, t)dt \end{bmatrix}$$

Όπου  $\alpha \in [0, 2\pi]$  είναι μια παράμετρος, το σύστημα συντεταγμένων έχει άξονα το σημείο ανάφλεξης φωτιάς και ο κύριος ημιάξονας της ελλείψεως είναι στην κατεύθυνση του ανέμου.

Το σύστημα των ελλείψεων, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\alpha$ , μπορεί να εκφράζεται με τη μορφή (Glasa & Halada, 2008):

$$\begin{bmatrix} x_1(\phi, t + dt) \\ y_1(\phi, t + dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E(\phi, t + dt) + x(\phi, t) \\ y_E(\phi, t + dt) + y(\phi, t) \end{bmatrix}, \text{ δηλαδή:}$$

$$\begin{bmatrix} x_1(\phi, t + dt) \\ y_1(\phi, t + dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\phi, t) + [a(\phi, t)dt \cos \alpha]C + [b(\phi, t)dt \sin \alpha + c(\phi, t)dt]S \\ y(\phi, t) - [a(\phi, t)dt \cos \alpha]S + [b(\phi, t)dt \sin \alpha + c(\phi, t)dt]C \end{bmatrix}$$

Όπου,  $dt$  και  $\theta$  είναι οι σταθεροί όροι,  $a(\phi, t)$ ,  $b(\phi, t)$  και  $c(\phi, t)$  είναι οι συναρτήσεις της παραμέτρου  $\phi$  για μια δεδομένη τιμή του  $t$ , οι  $\phi$  και  $\alpha$  είναι παράμετροι και  $x_i$  και  $y_i$  είναι μεταβλητές. Το σύστημα των ελλείψεων αντιπροσωπεύεται από το σύστημα των καμπυλών δύο παραμέτρων με τις παραμέτρους  $\phi$  και  $\alpha$ , από το οποίο λαμβάνουμε το σύστημα μονοπαραμετρικών καμπυλών:

$$b(\phi, t)^2 \{ [x_i(\phi, t+dt) - x(\phi, t)] C - [y_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] S \}^2 + \alpha(\phi, t)^2 \{ [x_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] C - c(\phi, t) dt \}^2 - a(\phi, t)^2 b(\phi, t)^2 dt^2 = 0 \quad (47)$$

εξαλείφοντας την παράμετρο  $\alpha$  με τυπική διαδικασία, επισήμως, η (47) μπορεί να γραφτεί ως:

$$F(x_i(\phi, t+dt), y_i(\phi, t+dt), \phi) = 0$$

όπου,  $dt$ ,  $\theta$  είναι οι σταθεροί όροι,  $a(\phi, t)$ ,  $b(\phi, t)$ ,  $c(\phi, t)$  είναι οι συναρτήσεις της παραμέτρου  $\phi$  για μια δεδομένη τιμή του  $t$ , η  $\phi$  είναι παράμετρος και οι  $x_i$ ,  $y_i$  είναι μεταβλητές.

Έστω ότι η πρώτη μερική παράγωγος της  $F$  αναφορικά με τη  $\phi$  είναι ίση με το μηδέν, τότε:

$$b(\phi, t) b_{\phi}(\phi, t) \{ [x_i(\phi, t+dt) - x(\phi, t)] C - [y_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] S \}^2 + b(\phi, t)^2 [-x_{\phi}(\phi, t) C + y_{\phi}(\phi, t) S] \times \{ [x_i(\phi, t+dt) - x(\phi, t)] C - [y_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] S \} + \alpha(\phi, t) \alpha_{\phi}(\phi, t) \times \{ [x_i(\phi, t+dt) - x(\phi, t)] S + [y_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] C - c(\phi, t) dt \}^2 + \alpha(\phi, t)^2 [-x_{\phi}(\phi, t) S - y_{\phi}(\phi, t) C - c_{\phi}(\phi, t) dt] \{ [x_i(\phi, t+dt) - x(\phi, t)] S + [y_i(\phi, t+dt) - y(\phi, t)] C - c(\phi, t) dt \} - dt^2 [\alpha(\phi, t) \alpha_{\phi}(\phi, t) b(\phi, t)^2 + b(\phi, t) b_{\phi}(\phi, t) \alpha(\phi, t)^2] = 0 \quad (48)$$

απλοποιώντας,

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x \\ y_1 - y - c dt \end{bmatrix} \quad (49)$$

Τότε, το σύστημα των εξισώσεων (47) και (48) γίνεται:

$$b^2(x_2 C - y_2 S)^2 + a^2(x_2 S + y_2 C - c dt)^2 - \alpha^2 b^2 dt^2 = 0 \quad (50)$$

$$b b_{\phi} (\chi_2 C - y_2 S)^2 + b^2 (\chi_2 C - y_2 S) (-\chi_{\phi} C + y_{\phi} S) + \alpha \alpha_{\phi} (\chi_2 S + y_2 C - c dt)^2 + \alpha^2 (\chi_2 S + y_2 C - c dt) (-\chi_{\phi} C - y_{\phi} S - C \phi dt) -$$

$$dt^2(\alpha\alpha_\phi b^2 + b b_\phi \alpha^2) = 0 \quad (51)$$

και μετά την εφαρμογή των σχέσεων (41) και (46) στο (51) έχουμε:

$$b^2(x_2 C - y_2 S)^2 + \alpha^2(x_2 S + y_2 C - cdt)^2 - \alpha^2 b^2 dt^2 = 0 \quad (52)$$

$$b b_\phi (x_2 C - y_2 S)^2 + b^2 (x_2 C - y_2 S) (-\chi_\phi C + y_\phi S) + \alpha \alpha_\phi (x_2 S + y_2 C - cdt)^2 + a^2 (x_2 S + y_2 C - cdt) (-\chi_\phi S - y_\phi C - C\phi dt) - dt^2 (\alpha \alpha_\phi b^2 + \alpha^2 b b_\phi) = 0 \quad (53)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (41), (46) και (53), έχουμε:

$$b^2(x_2 C - y_2 S)^2 + \alpha^2(x_2 S + y_2 C - cdt)^2 - \alpha^2 b^2 dt^2 = 0$$

$$b b_\phi (x_2 C - y_2 S)^2 + b^2 (x_2 C - y_2 S) (-\chi_\phi C + y_\phi S) + \frac{a^2 b_\phi}{b} (x_2 S + y_2 C - cdt)^2 + a^2 (x_2 S + y_2 C - cdt) (-\chi_\phi S - y_\phi C - C\phi dt) - 2 dt^2 a^2 b b_\phi = 0$$

Μετά από μια τέτοια απλοποίηση, το παραπάνω σύστημα έχει δύο λύσεις:

$$X_2 = dt c S + \frac{\alpha^2 b b_\phi dt^2 (C\phi dt S + x_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2 + b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 C (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi) - b^2 S (C x_\phi - S y_\phi)] [b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{\alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2 + b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2}$$

$$Y_2 = dt c C + \frac{-\alpha^2 b b_\phi dt^2 (C\phi dt C + Y_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2 + b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 S (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi) + b^2 C (C x_\phi - S y_\phi)] [b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{b^2 (C x_\phi - S y_\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + S x_\phi + C y_\phi)^2}$$

που αντιστοιχούν στο εξωτερικό και εσωτερικό περίγραμμα του συστήματος των ελλειπτικών στοιχείων.

Χρησιμοποιώντας τη (49), παίρνουμε τις εξισώσεις για τη διαχωριστική καμπύλη του συστήματος των ελλείψεων ως εξής:

$$X_1 = x + dtcS + dt^2 \frac{\alpha^2 bb\phi dt^2 (C\phi dtS + x_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 + b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 C(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi) - b^2 S(Cx_\phi - S_y\phi)][b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2} \quad (54)$$

$$Y_1 = y + dtcC + dt^2 \frac{-\alpha^2 bb\phi dt^2 (C\phi dtC + Y_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 + b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 S(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi) + b^2 C(Cx_\phi - S_y\phi)][b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2} \quad (55)$$

Η λύση των συστημάτων (52) και (53) οδηγεί στη λύση μιας εξίσωσης της τέταρτης τάξης στην οποία, εφαρμόζοντας τις σχέσεις (41) και (46), οι συντελεστές για δύο υψηλότερες δυνάμεις είναι ίσοι με μηδέν (εξαφανίζονται). Επομένως, η λυθείσα εξίσωση της τέταρτης τάξης είναι τετραγωνική που έχει δύο λύσεις. Σύμφωνα με την ανάλυση των συνθηκών για μοναδιαία σημεία, τα οποία δεν πληρούνται για οποιοδήποτε σημείο της διαχωριστικής καμπύλης (54) και (55) του συστήματος ελλείψεων, οι εξισώσεις (54) και (55) αντιπροσωπεύουν το γενικό περίγραμμα του συστήματος των ελλείψεων (De'ath & Fabricius, 2000):

$$X(\phi, t+dt) = x(\phi, t) + dtcS + dt^2 \frac{-\alpha^2 bb\phi (C\phi dtS + x_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 + b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 C(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi) - b^2 S(Cx_\phi - S_y\phi)][b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2} \quad (56)$$

$$Y(\phi, t+dt) = y(\phi, t) + dtcC + dt^2 \frac{-\alpha^2 bb\phi (C\phi dtC + Y_\phi)}{\alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 + b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2} \pm dt$$

$$\frac{[\alpha^2 C(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi) + b^2 S(Cx_\phi - S_y\phi)][b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 - \alpha^2 b^2 \phi dt^2]^{1/2}}{b^2 (Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2 (C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2} \quad (57)$$

Το σύστημα (56) και το σύστημα (57) αντιπροσωπεύουν τα εξωτερικά και εσωτερικά περιγράμματα του συστήματος των ελλείψεων, όπου το εξωτερικό περίγραμμα αντιστοιχεί στο νέο

μέτωπο φωτιάς που θα δημιουργηθεί. Οι συνθήκες ύπαρξης περιγράμματος έχουν τη μορφή (De'ath & Fabricius, 2000):

$$b^2(Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 - \alpha^2b_\phi^2dt^2 \geq 0, \quad b^2(Cx_\phi - S_y\phi)^2 + \alpha^2(C\phi dt + Sx_\phi + C_y\phi)^2 \neq 0$$

Η παράγωγος του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων από τη (56) και τη (57), που περιγράφει την ανάπτυξη της φωτιάς, απλοποιείται χρησιμοποιώντας το όριο για  $dt \rightarrow 0$ , δηλαδή:

$$X_1(\phi, t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{x(\phi, t+dt) - x(\phi, t)}{dt}$$

$$y_1(\phi, t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{y(\phi, t+dt) - y(\phi, t)}{dt}$$

Μετά την αντικατάσταση των (56) και (57) παίρνουμε τους τύπους που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (44) και (45) που προέρχονται από τον Richards το 1990, με τις αντίστοιχες, ίδιες παραδοχές (Glasa & Halada, 2008).

## IV.2. Μοντελοποίηση διάδοσης πυρκαγιάς με κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα

### IV.2.1. Μοντέλο κυτταρικού αυτοματοποιημένου συστήματος (Cellular Automated Model System) για την πρόβλεψη της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές έχουν προκαλέσει πολυάριθμες και μη αναστρέψιμες ζημιές, με βαθιές οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της διάδοσης των πυρκαγιών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που

επηρεάζουν το ρυθμό εξάπλωσης και το σχήμα του μετώπου της δασικής πυρκαγιάς είναι ο τύπος καυσίμου (τύπος βλάστησης) και η υγρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η τοπογραφία των δασών (κλίση και φυσικά εμπόδια), η τροφοδοσία καυσίμου (πάχος βλάστησης) και το φαινόμενο των κηλίδων, όπου το καύσιμο υλικό μεταφέρεται από τον άνεμο ή από άλλους παράγοντες (Alexandridis et al., 2008).

#### IV.2.1.i. Ορισμός του πλέγματος

Η μεθοδολογία χρησιμοποιεί ένα δισδιάστατο πλέγμα που σαρώνει τη δασική περιοχή σε ένα αριθμό κυττάρων. Κάθε κύτταρο αντιπροσωπεύει ένα μικρό κομμάτι γης και το σχήμα του έχει επιλεγεί ως τετράγωνο, προσφέροντας έτσι οκτώ πιθανές διευθύνσεις εξάπλωσης πυρκαγιάς (βλ. σχήμα 7). Αν και η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε εύκολα να τροποποιηθεί για να ληφθούν υπόψη τα εξαγωνικά κύτταρα, στην περίπτωση αυτή προτιμάται η περιγραφή του τετραγωνικού πλέγματος, καθώς απλοποιεί σημαντικά τους υπολογισμούς (Alexandridis et al., 2008).

#### IV.2.1.ii. Κατάσταση των κυττάρων

Κάθε κύτταρο χαρακτηρίζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων που εξελίσσονται σε διακριτό χρόνο (Alexandridis et al., 2008). Οι πιθανές καταστάσεις είναι οι εξής:

**Κατάσταση 1:** Το κύτταρο δεν περιέχει δασικά καύσιμα. Περιγράφει τα κύτταρα που αντιστοιχούν σε τμήματα της πόλης χωρίς βλάστηση, αγροτικές περιοχές χωρίς βλάστηση κλπ. Υποθέτουμε ότι τα κύτταρα που βρίσκονται σε αυτή την κατάσταση δεν μπορούν να καούν.

**Κατάσταση 2:** Το κύτταρο περιέχει δασικό καύσιμο που δεν έχει αναφλεγεί.

**Κατάσταση 3:** Το κύτταρο περιέχει δασικά καύσιμα που καίγονται.

**Κατάσταση 4:** Το κύτταρο περιείχε δασικά καύσιμα που έχουν καεί.

Η κατάσταση κάθε κυττάρου κωδικοποιείται έπειτα ως ένα στοιχείο μιας μήτρας  $S$  η οποία από εδώ και στο εξής θα ονομάζεται μήτρα κατάστασης. Το σχήμα 7 δείχνει σε μορφή μήτρας ένα παράδειγμα του πώς κωδικοποιείται μια περιοχή 16 κυττάρων με τυχαίο αριθμό καταστάσεων.

## IV.2.1.iii. Κανόνες εξέλιξης

Σε κάθε διακριτή χρονική βαθμίδα  $t$  της προσομοίωσης εφαρμόζονται οι ακόλουθοι κανόνες στα στοιχεία  $i, j$  της μήτρας κατάστασης  $S$  (και έτσι σε όλα τα κύτταρα) (Alexandridis et al., 2008):

**Κανόνας 1:** AN η κατάσταση  $(i, j, t) = 1$  TOTΕ η κατάσταση  $(i, j, t + 1) = 1$ .

Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι η κατάσταση ενός κυττάρου χωρίς δασικό καύσιμο (κενό κύτταρο) παραμένει ίδια και έτσι δεν μπορεί να πάρει φωτιά.

**Κανόνας2:** AN η κατάσταση  $(i, j, t) = 3$  TOTΕ η κατάσταση  $(i, j, t + 1) = 4$ .

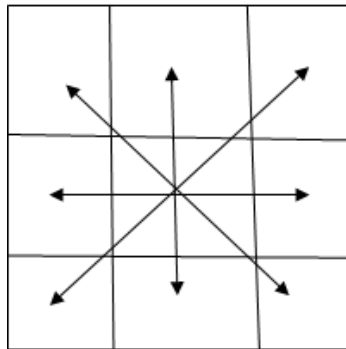
Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι ένα φλεγόμενο κύτταρο στο τρέχον βήμα θα καεί στο επόμενο βήμα.

**Κανόνας3:** AN η κατάσταση  $(i, j, t) = 4$  TOTΕ η κατάσταση  $(i, j, t + 1) = 4$ .

Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι η κατάσταση ενός κενού κελιού που έχει καεί στο προηγούμενο βήμα παραμένει ίδια.

**Κανόνας4:** AN η κατάσταση  $(i, j, t) = 3$  TOTΕ η κατάσταση  $(i \pm 1, j \pm 1, t + 1) = 3$  με μια πιθανότητα  $p_{burn}$ .

Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι όταν ένα κύτταρο συλλαμβάνει φωτιά στο τρέχον βήμα του χρόνου, η φωτιά μπορεί να μεταδοθεί στα γειτονικά κύτταρα στο επόμενο βήμα με πιθανότητα  $p_{burn}$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του τετραγωνικού πλέγματος υποθέσαμε ότι η φωτιά μπορεί να μεταδοθεί στα γειτονικά κύτταρα  $i \pm 1, j \pm 1$ ; αυτά είναι τα οκτώ κύτταρα που απεικονίζονται στο Σχήμα 7:



Σχήμα 7. Πιθανές κατευθύνσεις διάδοσης φωτιάς σε τετράγωνο πλέγμα

(Πηγή: Alexandridis et al., 2008)

Κατάσταση: Καμμένο (4)	Κατάσταση: Καμμένο (4)	Κατάσταση: Καμμένο (3)	Κατάσταση: Καμμένο (2)
Κατάσταση: Καμμένο (4)	Κατάσταση: Καμμένο (3)	Κατάσταση: Καμμένο (3)	Κατάσταση: Καμμένο (2)
Κατάσταση: Καμμένο (3)	Κατάσταση: Καμμένο (3)	Κατάσταση: Καμμένο (2)	Κατάσταση: Καμμένο (2)
Κατάσταση: Καμμένο (2)	Κατάσταση: Καμμένο (2)	Κατάσταση: Καμμένο (2)	Κατάσταση: Καμμένο (1)

$$\begin{bmatrix} 4 & 4 & 3 & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 2 \\ 3 & 3 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

#### IV.2.1.iv. Μεταβλητές που επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς

##### Μεταβλητές που επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς

Η προτεινόμενη μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη της συγκεκριμένες μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν τόσο το σχήμα του μετώπου όσο και το ρυθμό εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Αυτές είναι ο *τύπος της βλάστησης*, η *πυκνότητα της βλάστησης*, η *ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου*, η *κλίση του εδάφους* και η *επίδραση του φαινομένου της κηλίδας* (Alexandridis et al., 2008). Οι μεταβλητές αυτές αφορούν κυρίως τον *τύπο του εδάφους*.

Η πιθανότητα  $p_{\text{burn}}$  υπολογίζεται από:

$$p_{\text{burn}} = P_h(1 + P_{\text{veg}})(1 + P_{\text{den}})P_w P_s,$$

όπου  $P_h$  αφορά τη σταθερή πιθανότητα ότι ένα κύτταρο που εφάπτεται σε ένα φλεγόμενο κύτταρο που περιέχει ένα δεδομένο είδος βλάστησης και πυκνότητας θα πάρει φωτιά στο επόμενο βήμα κάτω από συνθήκες μηδενικού ανέμου και επίπεδου εδάφους. Οι  $P_{\text{den}}$ ,  $P_{\text{veg}}$ ,  $P_w$ ,  $P_s$  είναι οι πιθανότητες διάδοσης πυρκαγιάς που εξαρτώνται από την *πυκνότητα της βλάστησης*, τον *τύπο της βλάστησης*, την *ταχύτητα του ανέμου* και την *κλίση*, αντίστοιχα (Alexandridis et al., 2008).

Αυτές οι πιθανότητες πολλαπλασιάζονται με τη σταθερή πιθανότητα  $P_h$  για να προκύψει η διορθωμένη πιθανότητα που λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

## IV.2.1.v. Επίδραση του τύπου και της πυκνότητας της βλάστησης

Οι επιπτώσεις του τύπου και της πυκνότητας της βλάστησης αντιπροσωπεύονται από τις πιθανότητες  $P_{veg}$  και  $P_{den}$ , αντίστοιχα. Εδώ, ο τύπος της βλάστησης έχει κατηγοριοποιηθεί σε τρεις κατηγορίες που αριθμούνται από 1 έως 3, όπου με 1 περιγράφονται οι αγροτικές περιοχές, με 2 οι θαμνώδεις περιοχές και με 3 οι περιοχές με κωνοφόρα δένδρα, όπως τα πεύκα. Η πυκνότητα της βλάστησης έχει κλιμακωθεί σε τρεις κατηγορίες που αριθμούνται επίσης από 1 έως 3, όπου το 1 περιγράφει την αραιή βλάστηση και το 3 την πολύ πυκνή βλάστηση (Alexandridis et al., 2008). Αυτές οι περιπτώσεις είναι οργανωμένες σε δύο μήτρες, τον πίνακα περιπτώσεων βλάστησης και τον πίνακα περιπτώσεων πυκνότητας όπου για κάθε μια από τις αντίστοιχες κατηγορίες έχει οριστεί μια σταθερή τιμή για τις πιθανότητες  $P_{veg}$  και  $P_{den}$ .

## IV.2.1.vi. Επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου

Μια συνήθης εξίσωση που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την επίδραση του ανέμου είναι:

$$R_w = R_{ow} \exp(\beta \theta_f)$$

Το  $R_w$  υποδηλώνει το ποσοστό διάδοσης παρουσία ανέμου, το  $R_{ow}$  είναι η ταχύτητα διάδοσης όταν η ταχύτητα ανέμου είναι ίση με μηδέν, το  $\theta_f$  είναι η γωνία φλόγας που μετρείται από την κάθετα προς την κατεύθυνση της εξάπλωσης της φωτιάς και το  $b$  είναι μια σταθερά που συνήθως λαμβάνεται μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων από πειραματικά δεδομένα (Alexandridis et al., 2008). Όταν η κατεύθυνση της εξάπλωσης της φωτιάς είναι ίδια με την κατεύθυνση του ανέμου τότε η γωνία φλόγας είναι θετική  $\theta_f$  ενώ όταν βρίσκονται σε αντίθετες κατευθύνσεις η γωνία φλόγας τίθεται ως  $-\theta_f$  σε όλες τις άλλες κατευθύνσεις τίθεται ίση με το μηδέν. Η γωνία πυρκαγιάς υπολογίζεται ως:

$$\tan(\theta_f) = 0.4226 V,$$

όπου το  $V$  υποδηλώνει την ταχύτητα του ανέμου.

Η πιθανότητα που εμπεριέχει την επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_w = \exp(C_1 V) f_t, \quad f_t = \exp(V C_2 (\cos(\theta) - 1))$$

Όπου  $C_1$ ,  $C_2$  είναι οι σταθερές που πρέπει να προσδιοριστούν και  $h$  είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης της φωτιάς και της κατεύθυνσης του ανέμου. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον τύπο, η κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να λάβει οποιαδήποτε συνεχή τιμή μεταξύ 0 και 360°.

#### IV.2.1.vii. Επίδραση της κλίσης του εδάφους

Η επίδραση της κλίσης του εδάφους διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση, που παρουσιάστηκε από τους Weise & Biging (1996):

$$R_s = R_o \exp(\alpha \theta_s) \quad (58)$$

Όπου  $R_o$  είναι ο ρυθμός διάδοσης όταν η κλίση είναι ίση με μηδέν,  $\theta_s$  είναι η γωνία κλίσης και  $\alpha$  είναι μια σταθερά που μπορεί να τεθεί από πειραματικά δεδομένα. Σύμφωνα με την εξίσωση (58), η πιθανότητα που αναπαριστά την επίδραση της κλίσης είναι:

$$P_s = \exp(\alpha \theta_s) \quad (59)$$

Λόγω του τετραγωνικού σχήματος, η γωνία κλίσης υπολογίζεται ανάλογα με το αν τα δύο γειτονικά κύτταρα είναι δίπλα ή διαγώνια με το φλεγόμενο κύτταρο. Ειδικότερα για τα γειτονικά κύτταρα η γωνία κλίσης υπολογίζεται (Alexandridis et al., 2008):

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l}\right) \quad (60)$$

όπου  $E_1$  και  $E_2$  είναι το ύψος των δύο κυττάρων και το  $l$  είναι το μήκος της πλευράς του τετραγώνου, ενώ για τα διαγώνια κύτταρα ο τύπος γίνεται:

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l\sqrt{2}}\right) \quad (61)$$

## IV.2.1.viii. Επίδραση κηλίδας πυρκαγιάς

Οι κηλίδες είναι το φαινόμενο όπου φλεγόμενο υλικό, όπως μικρά κλαδιά και ξηροί καρποί (κουκουνάρια), μεταφέρεται από τον άνεμο ή από κάποιους άλλους παράγοντες σε σημεία που δεν είναι άμεσα δίπλα στη φωτιά (Alexandridis et al., 2008).

Ένας κλασσικός τύπος τέτοιων φλογών που είναι υπεύθυνοι για το φαινόμενο των κηλίδων είναι τα φλεγόμενα κουκουνάρια που μοιάζουν με ποπ-κορν. Η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί εύκολα να επεκταθεί ώστε να ληφθούν υπόψη τα διάφορα είδη φαινομένων κηλίδας που ακολουθούν την κατανομή  $N_p$ . Αυτή η κατανομή προέρχεται από κατανομή Poisson με μέση τιμή  $k$ .

Η κατεύθυνση προς την οποία πηγαίνει κάθε φλεγόμενη κηλίδα περιγράφεται από μια ομοιόμορφη κατανομή. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί η απόσταση της διαδρομής  $d_p$  για κάθε κουκουνάρι. Αυτή η απόσταση είναι συνάρτηση δύο συνιστωσών: το πρώτο συστατικό αντιπροσωπεύει την ώθηση ενός κουκουναριού και μπορεί να μοντελοποιηθεί μόνο με πιθανότητα, ενώ το δεύτερο συστατικό είναι η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου.

Το συνδυασμένο αποτέλεσμα αυτών των δύο συνιστωσών μπορεί να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$d_p = r_n \exp(VC_2(\cos(\theta_p) - 1))$$

όπου  $r_n$  είναι ένας τυχαίος αριθμός που προέρχεται από μια κανονική κατανομή με δεδομένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση και  $\theta_p$  είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ανέμου και της κατεύθυνσης του εκσφενδονισμένου κουκουναριού (Alexandridis et al., 2008).

Θεωρούμε μια σταθερή πιθανότητα  $p_{co}$  ότι ένα κύτταρο θα πάρει φωτιά λόγω κάποιας κηλίδας και θα διορθώσει αυτή την πιθανότητα με συντελεστή  $P_{cd}$ , όπου ο  $P_{cd}$  λαμβάνει σταθερές τιμές ανάλογα με την πυκνότητα της βλάστησης και τον τύπο του κυττάρου ως:

$$P_c = P_{co}(1 + P_{cd})$$

Ένας ακόμη κανόνας εξέλιξης έχει προστεθεί (Alexandridis et al., 2008):

**Κανόνας 5 :** ΑΝ η κατάσταση  $(i, j, t) = 3$  ΤΟΤΕ η κατάσταση  $(i \pm i_c, j \pm j_c, t + 1) = 3$  με μια πιθανότητα  $p_c$  όπου  $i_c$  και  $j_c$  είναι δείκτες που εξαρτώνται από την απόσταση  $d_p$  και την κατεύθυνση του εκσφενδονισμένου κουκουναριού. Μια τέτοια εφαρμογή αυτών των εξισώσεων, μπορούμε να εντοπίσουμε στην περίπτωση του νησιού των Σπετσών (1990).

### IV.3. Πρώτο εναλλακτικό πρότυπο διάδοσης πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα (Cellular Automated Systems) και ανάλυση οριακού φίλτραρίσματος (Filtration Threshold Analysis)

#### IV.3.1. Αναπαράσταση των πιθανολογικών κυτταρικών αυτομάτων (Probabilistic Cellular Automata)

Τα πιθανολογικά κυτταρικά αυτόματα αναπτύσσονται για τη μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών. Σε αυτό το σημείο, χρησιμοποιούνται πιθανολογικά κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα (PCA) ως μοντέλο ανάπτυξης και εξάπλωσης της δασικής πυρκαγιάς (Pak & Hayakawa, 2011). Ακολουθούμε τα δισδιάστατα πιθανολογικά κυτταρικά αυτόματα (PCA), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών. Στα δισδιάστατα PCA, θεωρείται ένα απεριόριστο τετραγωνικό πλέγμα και κάθε κομμάτι ονομάζεται κύτταρο. Θεωρούμε δύο καταστάσεις  $0$  και  $1$  που μπορεί να λαμβάνει κάθε κύτταρο. Για την περίπτωση δασικών πυρκαγιών, η κατάσταση  $0$  αντιπροσωπεύει το πράσινο (δεν υπάρχει φωτιά) και η κατάσταση  $1$  αντιπροσωπεύει τη φλεγόμενη κατάσταση. Επιπλέον, η κατάσταση κάθε κυττάρου αλλάζει ανάλογα με τις καταστάσεις των γειτονικών κυττάρων. Συγκεκριμένα, ορίζονται 4 γειτονικά κύτταρα του κυττάρου  $A$  ως γείτονες του  $A$ . Τα κύτταρα με κατάσταση  $1$  μπορούν να οδηγήσουν την κατάσταση των γειτονικών τους σε  $1$ , με πιθανότητα  $p$ .

##### IV.3.1.1. Πολλαπλές καταστάσεις πιθανολογικών κυτταρικών αυτομάτων

Χρησιμοποιούμε το δισδιάστατο πολλαπλών καταστάσεων PCA ως μοντέλο δασικής πυρκαγιάς. Θεωρούμε το δισδιάστατο τετράγωνο πλέγμα και θέτουμε τη θέση κάθε κελιού ως  $x \in \mathbb{R}^2$  με δείκτη συνεχούς χρόνος  $t$ . Στο δισδιάστατο PCA 2 καταστάσεων, η πιθανότητα  $p$  η φωτιά να εξαπλώνεται στο γειτονικό κύτταρο είναι σταθερή. Αντίθετα, η πιθανότητα εξάπλωσης της φωτιάς στην πραγματικότητα διαφέρει ανάλογα με τις πυρκαγιές (Pak & Hayakawa, 2011). Έτσι, έχουμε ως αποτέλεσμα ένα πολλαπλών καταστάσεων κυτταρικό αυτοματισμό όπου κάθε κύτταρο παίρνει μία από τις τιμές στο  $S = \{0, 1, 2, \dots, n\}$

ανάλογα με τις εντάσεις φωτιάς. Τα κύτταρα με κατάσταση 0 υποτίθεται ότι δεν καίγονται ακόμη, και οι περιπτώσεις με κατάσταση  $n$  υποτίθεται ότι έχουν καεί πλήρως, αλλιώς βρίσκονται σε διαδικασία καύσης. Έτσι, τα κύτταρα με κατάσταση  $i \in S_{\text{burn}}, \{1, 2, \dots, n-1\}$  είναι τα φλεγόμενα κύτταρα. Εδώ εξετάζουμε την κατάσταση του κυττάρου  $x$  στο χρόνο  $t$  ως  $s(x, t) \in S$ . Στη συνέχεια, ψάχνουμε για την πιθανότητα ότι η φωτιά εξαπλώνεται από αυτό κελί στα υπόλοιπα με  $s(x, t) = i$  σε άκαυστα κύτταρα σε σύντομο χρονικό διάστημα  $dt$ . Δεδομένου ότι η πιθανότητα εξάπλωσης πυρκαγιάς σε άκαυστα κύτταρα εξαρτάται από την ένταση της πυρκαγιάς, έχουμε την ακόλουθη πιθανότητα ότι η φωτιά μετακινείται από το κελί  $x$  στα γειτονικά του κατά το χρόνο  $t$  ως

$$p(s(x, t)) = \begin{cases} 0, & \text{αν } s(x, t) = 0 \text{ ή } n, \\ p_i dt, & \text{αν } s(x, t) = i, i \in S_{\text{burn}}, \end{cases} \quad (62)$$

όπου  $p_i \in [0, 1]$  είναι μια σταθερά.

Ενώ το κύτταρο με  $s(x, t) = 0$  είναι άκαυστο, η πιθανότητα να εξαπλωθεί η πυρκαγιά είναι επίσης 0. Ισοδύναμα, δεδομένου ότι το κελί  $x$  με  $s(x, t) = n$  είναι εντελώς καμένη, η πιθανότητα η πυρκαγιά να επεκταθεί είναι επίσης 0. Επιπλέον, το κελί με  $s(x, t) = 0$  γίνεται  $s(x, t+dt) = 1$  όταν μεταφέρεται φωτιά. Έτσι,  $s(x, t) = 1$  θεωρείται ότι είναι το πρώιμο στάδιο των καταστάσεων καύσης. Σαν αποτέλεσμα:

$$P\{s(x, t+dt) = 1 | s(x, t) = 0\} = \sum_{i=0}^n p(i) n_i(x, t), \quad (63)$$

$$P\{s(x, t+dt) = i | s(x, t) = 0\} = 0, i \in S \setminus \{0, 1\}, \quad (64)$$

Όπου  $P\{s(x, t+dt) = j | s(x, t) = i\}$  αντιπροσωπεύει την υπό όρους πιθανότητα ότι η κατάσταση του κυττάρου με  $s(x, t) = i$  να αλλάζει σε  $j$  σε σύντομο χρονικό διάστημα  $dt$  και  $n_i(x, t)$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γειτόνων του κελιού  $x$ , η κατάσταση των οποίων είναι  $i$  κατά τη χρονική στιγμή  $t$ . Τα κελιά με  $s(x, t) = i$  επηρεάζουν μόνο στα κύτταρα με την κατάσταση 0.

Επιπλέον, μόλις αρχίσει να καίγεται ένα κύτταρο, η ένταση φωτιάς του κυττάρου αυξομειώνεται χωρίς οποιεσδήποτε επιδράσεις από τα γειτονικά κύτταρα. Έτσι, περιγράφουμε την πιθανότητα η κατάσταση του κυττάρου σε κατάσταση  $i \in S_{\text{burn}}$  να αλλάξει σε  $j (j \neq i)$  σε σύντομο χρονικό διάστημα  $dt$ :

$$P\{s(x, t+dt) = j | s(x, t) = i\} = a_{ij} dt, i \in S_{\text{burn}}, j \in S \setminus \{0, i\}, \quad (65)$$

Όπου το  $a_{ij} \in [0, 1]$  είναι μια σταθερά.

Τέλος, καθώς η κατάσταση του κυττάρου με  $s(x, t) = n$  θα παραμείνει αμετάβλητη πια, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση

$$P\{s(x, t + dt) = i | s(x, t) = n\} = 0, i \in S \setminus \{n\}. \quad (66)$$

#### IV.3.1.ii. Θεωρία διήθησης

Η θεωρία της διήθησης είναι η θεωρία που καθορίζει εάν ένα μέσο που παρουσιάζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, όπως το νερό, εξαπλώνεται απείρως ή όχι (Hastie et al., 2005). Πρώτον, θεωρούμε το τμήμα  $C_0$  που περιέχει την πηγή. Στη συνέχεια, για μια δεδομένη πιθανότητα  $q$  θεωρούμε  $\theta(q)$ , ως

$$\theta(q) = P_q(\|C_0\| = \infty), \quad (67)$$

όπου  $\|C_0\|$  υποδηλώνει τον αριθμό των θέσεων που περιέχονται στο  $C_0$ . Η συνάρτηση  $\theta(q)$  που δίνεται από την εξίσωση (67) περιγράφει την πιθανότητα να υπάρχει το τμήμα που έχει άπειρο αριθμό τοποθεσιών.

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το  $\theta(q)$  ορίζουμε την κρίσιμη πιθανότητα ένα μέσο να απλώνεται απείρως, ως

$$q_c = \inf\{q \in [0, 1] : \theta(q) > 0\}. \quad (68)$$

Η κρίσιμη πιθανότητα  $q_c$  αντιπροσωπεύει την πιθανότητα  $q$  ως όριο πάνω από το οποίο υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης της συστάδας που έχει άπειρο αριθμό θέσεων. Δηλαδή, ένα μέσο δεν εξαπλώνεται απεριόριστα με την πιθανότητα  $q$  που ικανοποιεί  $q < q_c$ .

#### IV.3.1.iii. Κρίσιμη πιθανότητα για τη διάδοση της πυρκαγιάς - Μέθοδος προσέγγισης μέσου πεδίου στα PCA

Εφαρμόζοντας μια διαδικασία προσέγγισης μέσου πεδίου (mean-field approximation) στα PCA και αποκτώντας τη δυναμική της αναλογίας των κυττάρων με κάθε κατάσταση, είναι δυνατόν να

αντληθούν αποκρίσεις χρόνου με οποιεσδήποτε αρχικές συνθήκες (Pak & Hayakawa, 2011). Μια δυαδική μεταβλητή  $\delta i(x, t)$  ως αποτέλεσμα αυτών των συνθηκών είναι:

$$\delta i(x, t) = \begin{cases} 1, & \text{αν } s(x, t) = i \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}, \text{όπου } i \in S \quad (69)$$

Θεωρούμε επίσης ότι  $\langle f(x) \rangle$  είναι η μέση τιμή της συνάρτησης  $f(x)$  των συνολικών κυττάρων  $x$ .

Στη συνέχεια, η αναλογία των κυττάρων με την κατάσταση  $i$  περιγράφεται από το  $\langle \delta i(x, t) \rangle$ . Με άλλα λόγια, ο αριθμός των κυττάρων με κατάσταση  $i$  που περιλαμβάνονται στα κύτταρα  $k$  που επιλέγονται αυθαίρετα περιγράφεται από  $k \langle \delta i(x, t) \rangle$ . Ισοδύναμα, η αναλογία των ζευγαριών του κυττάρου με την κατάσταση  $i$  και του κυττάρου με την κατάσταση  $j$  περιγράφεται από  $\langle \delta i(x, t) \rangle \langle \delta j(x_k^{nb}, t) \rangle$ , όπου  $x_k^{nb}$ ,  $k=1, 2, 3, 4$ , αντιπροσωπεύοντας τα 4 γειτονικά κύτταρα του κυττάρου  $x$ . Επιπλέον, καθώς υποθέτουμε ότι οι καταστάσεις δύο αυθαίρετων κυττάρων είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, προκύπτει ότι

$$\sum_{k=1}^4 \langle \delta_0(x, t) \rangle \langle \delta i(x_k^{nb}, t) \rangle \cong 4 \langle \delta_0(x, t) \rangle \langle \delta i(x_k, t) \rangle \quad (70)$$

όπου ο συντελεστής 4 της δεξιάς πλευράς προέρχεται από το γεγονός ότι ο αριθμός των γειτόνων του κυττάρου  $x$  είναι ίσος με 4. Η παραπάνω προσέγγιση ονομάζεται *προσέγγιση μέσου πεδίου*.

Η εξίσωση διαφορών του  $\langle \delta i(x, t) \rangle$  δίνεται από:

$$\begin{aligned} \langle \delta i(x, t+dt) \rangle - \langle \delta i(x, t) \rangle = & \sum_{j=0, j \neq 1}^n \langle \delta j(x, t) P\{s(x, t+dt) = i | s(x, t) = j\} \rangle - \sum_{j=0, j \neq 1}^n \langle \delta i(x, t) P\{s(x, t+dt) = j | s(x, t) = i\} \rangle \end{aligned} \quad (71)$$

όπου ο πρώτος όρος της δεξιάς πλευράς υποδηλώνει τον αυξανόμενο ρυθμό των κυττάρων με κατάσταση  $i$  και ο δεύτερος όρος υποδηλώνει τη μείωση του ρυθμού των κυττάρων με κατάσταση  $i$ . Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (63) έως (66) στην (71), προκύπτει ότι:

$$\langle \delta i(x, t+dt) \rangle - \langle \delta i(x, t) \rangle = \langle \delta_0(x, t) \sum_{i=0}^n p_i n_i(x, t) \rangle + \sum_{j=2}^n (a_{j1} \langle \delta_j(x, t) \rangle - a_{1j} \langle \delta i(x, t) \rangle) dt \quad (72)$$

$$= \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ji} \langle \delta_j(x, t) \rangle - a_{ij} \langle \delta i(x, t) \rangle) dt, i \in S_{burn} \setminus 1 \quad (73)$$

$$\langle \delta_n(x, t+dt) \rangle - \langle \delta_n(x, t) \rangle = \sum_{j=1}^{n-1} a_{jn} \langle \delta_j(x, t) \rangle dt \quad (74)$$

Παραλείπουμε την εξίσωση διαφορών σε σχέση με  $\delta_0(x, t)$  δεδομένου ότι είναι ορισμένη για να ικανοποιήσει την προϋπόθεση που δίνεται από:

$$\sum_{i \in S} \langle \delta_i(x, t) \rangle = 1 \quad (75)$$

Ενώ η συνάρτηση  $n_i(x, t)$  που περιέχεται στον πρώτο όρο της δεξιάς πλευράς (72) αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γειτόνων με κατάσταση  $i$  του κυττάρου  $x$ , η συνάρτηση γράφεται ως

$$n_i(x, k) = \sum_{k=1}^4 \delta_i(x_k^{nb}, t) \quad (76)$$

και δίνεται ο πρώτος όρος της δεξιάς πλευράς (72)

$$\sum_{i=0}^n p_i \langle \delta_0(x, t) n_i(x, t) \rangle dt = \sum_{i=0}^n p_i \langle \delta_0(x, t) \sum_{k=1}^4 \delta_i(x_k^{nb}, t) \rangle dt = \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^4 p_i \langle \delta_0(x, t) \delta_i(x_k^{nb}, t) \rangle dt \quad (77)$$

Στη συνέχεια, από τις (70) και (77) προκύπτει ότι η (72) γίνεται

$$\langle \delta_i(x, t+dt) \rangle - \langle \delta_i(x, t) \rangle = \sum_{i=0}^n 4 p_i \langle \delta_0(x, t) \delta_i(x, t) \rangle dt + \sum_{j=2}^n a_{j1} \langle \delta_j(x, t) - a_{1j} \langle \delta_i(x, t) \rangle \rangle dt \quad (78)$$

Τώρα, ορίζουμε  $\langle \delta_i(x, t) \rangle = y_i(t)$  εφόσον  $\langle \delta_i(x, t) \rangle$  είναι συνάρτηση μόνο του  $t$ . Στην περίπτωση αυτή, από τις (63), (64) και (78) προκύπτει ότι:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = \sum_{i=0}^n 4 p_i y_0(t) y_i(t) + \sum_{j=2}^n (a_{j1} y_j(t) - a_{1j} y_1(t)) \quad (79)$$

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ji} y_j(t) - a_{ij} y_i(t)) dt, \quad i \in S_{burn} \setminus 1 \quad (80)$$

$$\frac{dy_n(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n-1} a_{jn} y_j(t) \quad (81)$$

## IV.3.1.iv. Παραγωγή κρίσιμων πιθανοτήτων

Σε αυτή την ενότητα, χρησιμοποιούμε την κρίσιμη πιθανότητα του PCA των τριών καταστάσεων με  $n = 3$  ως την απλούστερη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας την (75) και τις (79) έως (81), οι εξισώσεις κατάστασης σε σχέση με τα PCA 3 καταστάσεων δίνονται από

$$y_1(t) = 4p_1 y_1(t)(1 - y_1(t) - y_2(t)) - a_{12} y_1(t), \quad (82)$$

$$y_2(t) = a_{12} y_1(t), \quad (83)$$

$$y_0(t) + y_1(t) + y_2(t) = 1. \quad (84)$$

Οι μεταβλητές καταστάσεων  $y_0(t), y_1(t)$ , και  $y_2(t)$  αντιπροσωπεύουν τις αναλογίες των άκαυστων κυττάρων, των φλεγόμενων κυττάρων και των καμένων κυττάρων αντίστοιχα, στο χρόνο  $t$ . Τώρα, έστω  $y(t), [y_1(t), y_2(t)]$ . Το σημείο ισορροπίας  $y^*$  του συστήματος των (82)–(84) διαμορφώνεται ως

$$y^* = \begin{bmatrix} 1 - c \\ 0 \\ c \end{bmatrix}, \quad (85)$$

όπου  $c \in [0, 1]$  είναι μια σταθερά ανάλογα με την αρχική κατάσταση.

#### IV.4. Δεύτερο εναλλακτικό πρότυπο διάδοσης πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα (Cellular Automated Systems), ένα βελτιωμένο σύστημα κυτταρικών αυτομάτων για τη διάδοση πυρκαγιάς

## IV.4.1. Μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς

Αυτό το μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς βασίζεται στο πρότυπο διάδοσης πυρκαγιάς επιφάνειας του Rothermel (Rothermel, 1972). Το  $R_0$  αντιπροσωπεύει το ρυθμό εξάπλωσης σε επίπεδο έδαφος χωρίς άνεμο και υπολογίζεται με βάση μια σειρά παραμέτρων που περιγράφουν το καύσιμο. Παρουσία του ανέμου και της πλάγιας, το  $R_0$  πολλαπλασιάζεται με  $(1 + \phi_w + \phi_s)$ , όπου  $\phi_w$  και  $\phi_s$  είναι δύο παράγοντες

έντασης φωτιάς που εξαρτώνται από την τοπική κλίση ανέμου και εδάφους (Ghisu et al., 2015). Η αναλογία μήκους προς πλάτος της έλλειψης μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$LW = 0.936e^{50.5U_{eq}} + 0.461e^{-30.5U_{eq}} - 0.397 \quad (86)$$

Όπου η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου  $U_{eq}$  (σε  $ms^{-1}$ ) είναι η ταχύτητα του ανέμου.

Υποθέτοντας ότι η προέλευση της φωτιάς βρίσκεται στην οπίσθια εστία της έλλειψης, ο ρυθμός κατανομής πυρκαγιάς μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη γωνία  $\theta$ , που μετράται από τη διεύθυνση του μέγιστου εύρους ( $\bar{E}$  είναι η εκκεντρότητα της έλλειψης, που ορίζεται ως):

$$\sqrt{1 - \frac{1}{LW^2}}, R_{\theta} = R_o \frac{1 - \bar{E}}{1 - \bar{E} \cos \theta} \quad (87)$$

#### IV.4.2. Επέκταση πυρκαγιάς μέσω κυτταρικών αυτομάτων

Σε οποιαδήποτε στιγμή στην προσομοίωση, σε όλα τα κύτταρα στον τομέα προσομοίωσης έχουν εκχωρηθεί μία από τις τέσσερις πιθανές καταστάσεις (Ghisu et al., 2015):

- Το κύτταρο είναι άκαυστο [U].
- Το κύτταρο είναι εύφλεκτο, αλλά δεν αναφλέγεται αυτή τη στιγμή [N].
- Το κύτταρο είναι εύφλεκτο και αναφλέγεται, αλλά δεν έχει καταναλωθεί ακόμα το καύσιμο [I].
- Όλα τα καύσιμα στο κύτταρο καταναλώθηκαν από τη φωτιά [C].

Στην αρχή της προσομοίωσης, όλα τα κύτταρα βρίσκονται στις μη αναστρέψιμες [U] ή μη αναφλεγόμενες [N] καταστάσεις. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ένα κύτταρο μπορεί να μεταβεί από την κατάσταση [N] στην κατάσταση [I] είτε μέσω ανεξάρτητης ανάφλεξης (νέας φωτιάς) είτε μέσω της εξάπλωσης φωτιάς από ένα παρακείμενο κελί (Ghisu et al., 2015).

Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης καθορίζεται για να εξασφαλιστεί ότι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη φωτιά δεν κινείται περισσότερο από την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων σε κάθε βήμα του χρόνου:

$$\max\left(\frac{R\Delta t}{\Delta x}\right) \leq 1 \quad (88)$$

Επομένως, με την παρουσία κλίσης εδάφους, η τιμή πρέπει να διορθωθεί για να αντιπροσωπεύει το ρυθμό εξάπλωσης στο οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων.

$$R_x^h = R_x \cos(\delta_x) \quad R_y^h = R_y \cos(\delta_y) \quad (89)$$

Όπου  $R_x$  και  $R_y$  είναι το ποσοστό των συντελεστών εξάπλωσης σε ένα σύστημα συντεταγμένων παράλληλα προς το έδαφος,  $R_x^h$  και  $R_y^h$  είναι το ποσοστό των συντελεστών εξάπλωσης σε ένα οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων και  $\delta_x$  και  $\delta_y$  τα στοιχεία της κλίσης.

#### IV.4.3. Τροποποίηση των εξισώσεων διάδοσης πυρκαγιάς

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει μια λίστα με τις φυσικές ποσότητες που διορθώθηκαν με αυτή τη μέθοδο και τις τροποποιημένες σχέσεις ( $\theta$  είναι η γωνία από την κατεύθυνση του ανέμου σε ακτίνια, που κυμαίνεται από  $-\pi$  έως  $\pi$ ).

Πίνακας 2. Τροποποιήσεις προσαρμογής της ταχύτητας προσπέλασης

Συντελεστής διόρθωσης	Τροποποιημένη ποσότητα	Σύμβολο	Τροποποιημένες εξισώσεις
1	μέγιστος ρυθμός διάδοσης	$R_o$	$R'_o = R_o k_i$
2	εκκεντρότητα έλλειψης	$\bar{E}$	$\bar{E}' = \sqrt{1 - \frac{1}{LW^{k_2}}}$
3	αποτελεσματική γωνία διάδοσης ( $ \theta  < \pi/2$ )	$\theta$	$\tan(\theta') = \tan(\theta) / LW^{k_3}$
4	αποτελεσματική γωνία διάδοσης ( $ \theta  < \pi/2$ )	$\theta$	$\tan(\theta') = \tan(\theta) / LW^{k_4}$
5	ρυθμός διάδοσης	$R(\theta)$	$R'(\theta) = R'^o \frac{1 - \bar{E}'}{1 - \bar{E}' \cos(\theta')} - R'^o \left( \frac{1 - \bar{E}'}{1 + \bar{E}'} - \frac{1 - E}{1 + E} \right) \left( \frac{\theta'}{p_i} \right)^{k_5}$

(Πηγή: Ghisu et al., 2015)

#### IV.4.4. Ορισμός των τιμών συντελεστών διόρθωσης

Στην εφαρμογή των Jaeggi et al. (Jaeggi et al., 2008) η τοπική φάση αναζήτησης διεξάγεται με τον αλγόριθμο των Hooke & Jeeves (H & J) (Hooke & Jeeves, 1961): επιλέγεται μια κατάλληλη αύξηση για κάθε μεταβλητή και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται στη συνέχεια για τη

$$xx'_i = x_i + \Delta_i \text{ και } x'_i = x_i - \Delta_i$$

διατηρώντας παράλληλα τις άλλες μεταβλητές στις βασικές τους τιμές.

#### IV.4.5. Αξιολόγηση μοντέλου

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες μετρήσεις:

$$\begin{aligned} \lambda_u &= |R - S| / |R| \\ \lambda_o &= |S - R| / |S| \\ \lambda_s &= |R \cup S| - |R \cap S| / |R \cup S| \end{aligned} \quad (90)$$

όπου το  $R$  αντιπροσωπεύει το σύνολο των κυττάρων που ορίζουν το αναμενόμενο σχήμα πυρκαγιάς, το  $S$  το σύνολο των κυττάρων που καθορίζουν το σχήμα προσομοίωσης πυρκαγιάς και τον χειριστή και το απόλυτο  $|\cdot|$  δίνει το μέγεθος ενός συνόλου. Συνεπώς, τα  $\lambda_u$  και  $\lambda_o$  αντιπροσωπεύουν τις αναμενόμενες και προβλεπόμενες αναλογίες της περιοχής της φωτιάς, αντίστοιχα, ενώ το  $\lambda_s$  είναι ένα μέτρο του επιπέδου διαφοράς μεταξύ των δύο προβλέψεων (Ghisu et al., 2015).

## IV.5. Μοντέλο προσομοίωσης διάδοσης πυρκαγιάς με χρήση κυτταρικού μηχανισμού με εξαιρετική μηχανική μάθηση

Όλες οι λειτουργίες της μεθοδολογίας χωρίζονται σε τρία τμήματα, στη συλλογή δεδομένων και προεπεξεργασία, στη δημιουργία προσέγγισης με χρήση μοντέλου και στην επικύρωση μοντέλου (Zheng, Huang, Li & Zeng, 2017). Αυτή η ενότητα εισάγει κυρίως την προσέγγιση της μοντελοποίησης και την επικύρωση του μοντέλου της προτεινόμενης προσεγγίσεως μοντελοποίησης του κυτταρικού αυτοματισμού.

### IV.5.1. Δημιουργία προσέγγισης με χρήση μοντέλου: ένα νέο κυτταρικό αυτόματο

#### IV.5.1.i. Το κύτταρο και ο ορισμός των καταστάσεών του

Για αυτό το μέρος επιλέχθηκε το τετράγωνο πλέγμα και τα δισδιάστατα κανονικά τετραγωνικά πλέγματα χρησιμοποιήθηκαν ως κύτταρα του πλαισίου CA, καθώς αυτό μπορεί να απλοποιήσει τους υπολογισμούς και έτσι να μειώσει σημαντικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα (Alexandridis et al., 2011).

**Κατάσταση 1:** το κύτταρο που δεν περιέχει καύσιμο δεν μπορεί να καεί.

**Κατάσταση 2:** το κύτταρο που περιέχει καύσιμο δεν έχει αναφλεγεί.

**Κατάσταση 3:** το κύτταρο που περιέχει καύσιμο καίγεται.

**Κατάσταση 4:** το κύτταρο που περιέχει καύσιμο έχει ήδη καεί.

#### IV.5.1.ii. Κανόνες μετάβασης

Στο πλαίσιο της προσέγγισης CA, η κατάσταση κάθε κυττάρου εξελίσσεται σε διακριτά βήματα βασιζόμενα σε ένα πεπερασμένο σύνολο συγκεκριμένων μεταβατικών κανόνων. Οι κανόνες αυτοί ορίζονται ως εξής (Zheng et al., 2017):

**Κανόνας 1.**

ΑΝ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  στο βήμα διακριτού χρόνου  $(t)$  είναι η άκαυστη, ΤΟΤΕ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  είναι η άκαυστη στο επόμενο βήμα διακριτού χρόνου  $(t + 1)$ . Αυτός ο κανόνας σημαίνει ότι ένα κυττάρο που δεν περιέχει καύσιμο δεν αναφλέγεται και έτσι η κατάσταση του παραμένει άκαυστη.

**Κανόνας 2.**

ΑΝ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  στο βήμα διακριτού χρόνου  $(t)$  είναι η φλεγόμενη, ΤΟΤΕ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  είναι η καμένη στο επόμενο βήμα διακριτού χρόνου  $(t + 1)$ . Αυτός ο κανόνας υποδεικνύει ότι η κατάσταση ενός φλεγόμενου κυττάρου θα ενημερωθεί ώστε να είναι η καμένη κατάσταση στο επόμενο βήμα διακριτού χρόνου.

**Κανόνας 3.**

ΑΝ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  στο βήμα διακριτού χρόνου  $(t)$  είναι η καμένη; ΤΟΤΕ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  είναι η καμένη στο επόμενο βήμα διακριτού χρόνου  $(t + 1)$ . Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι τα κύτταρα που έχουν ήδη καεί δεν μπορούν ξανά να αναζωπυρωθούν και έτσι η κατάσταση τους παραμένει η καμένη.

**Κανόνας 4.**

ΑΝ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  στο βήμα διακριτού χρόνου  $(t)$  είναι η μη αναφλεγόμενη και υπάρχει ένα ή περισσότερα από ένα κύτταρα καύσης στα γειτονικά κύτταρα του Moore  $(i \pm 1, j \pm 1)$ , ΤΟΤΕ η κατάσταση του κυττάρου  $(i, j)$  με μεγαλύτερη πιθανότητα μετάβασης (δηλαδή με  $P_{ti,j}$  που μετρά την πιθανότητα μεταβατικής κατάστασης του κυττάρου) θα καεί στο επόμενο βήμα διακριτού χρόνου  $(t + 1)$ . Αυτός ο κανόνας υποδηλώνει ότι ένα κύτταρο που περιέχει εύφλεκτο καύσιμο θα καεί, εάν υπάρχει ένα ή περισσότερα από ένα φλεγόμενα γειτονικά κύτταρα Moore και η πιθανότητα μεταβατικής κατάστασης  $P_{ti,j}$  είναι υψηλότερη από ένα τυχαίο όριο πιθανότητας  $\theta^t$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση (91):

$$\text{κύτταρο}(i,j)_{t+1} = \begin{cases} \text{φλεγόμενο, } p_{ij \geq \theta^t}^t \\ \text{μη φλεγόμενο, } p_{ij < \theta^t}^t \end{cases} \quad (91)$$

όπου  $i, j$  αντίστοιχα σημαίνει τον αριθμό σειράς και τον αριθμό στήλης του κυττάρου  $(i, j)$ .

Υπάρχουν διάφορες συναρτήσεις διαθέσιμες, αλλά το *RBF* επιλέχθηκε σε αυτή τη μελέτη.

Επίσης, η εξίσωση

$$t_i = \sum_{j=1}^M \beta_j G_j(X_i) = \sum_{j=1}^M \beta_j g_j(w_j, x_i, b_j) \quad (92)$$

μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια πίνακα ως

$$T = H \times \beta \quad (93)$$

όπου το  $B$  υποδεικνύει το διάνυσμα βαρών του σε επίπεδο αποτελέσματος, το  $T$  αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα *ELM* (Extreme Learning Machine – Μηχανή Εξαιρετικής Μάθησης) και το  $H$  αναφέρεται στον πίνακα αποτελεσμάτων κρυμμένου επιπέδου. Μπορούν να δοθούν από την εξίσωση:

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_i]_N \quad (94)$$

$$H = \begin{bmatrix} g(w_1, x_1, b_1) & g(w_2, x_1, b_2) & \dots & g(w_j, x_1, b_j) \\ g(w_1, x_2, b_1) & g(w_2, x_2, b_2) & \dots & g(w_j, x_2, b_j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(w_1, x_i, b_1) & g(w_2, x_i, b_2) & \dots & g(w_j, x_i, b_j) \end{bmatrix}_{N \times M}$$

$$B = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i]_M$$

Γενικά, ο αριθμός των διακριτών δειγμάτων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των κρυφών κόμβων (δηλαδή,  $N \gg M$ ) και η προσέγγιση μπορεί να έχει μικρά σφάλματα (Lan et al., 2010). Έτσι, η εξίσωση (93) αντικαθίσταται από την

$$T = H \times \beta + E \quad (95)$$

Όπου  $E = [e_1, e_2, \dots, e_i]_N$  αντιπροσωπεύει τα κατάλοιπα του συστήματος. Με βάση τη θεωρία των ελάχιστων τετραγώνων, η συνάρτηση κόστους του *ELM* (Μηχανή Εξαιρετικής Μάθησης) μπορεί να οριστεί ως:

$$E = (T - H \times \beta)^T \times (T - H \times \beta) \quad (96)$$

Η εκτίμηση *ELM* μπορεί στη συνέχεια να μετασχηματιστεί για να ελαχιστοποιήσει την παραπάνω συνάρτηση κόστους δηλαδή, Εξίσωση (96). Η λύση των ελάχιστων τετραγώνων του *ELM* υπολογίζεται ως:

$$\hat{\beta} = H^\dagger \times T \quad (97) \quad H^\dagger = (H^T \times H)^{-1}$$

όπου το  $H^{\dagger}$  αναφέρεται στον γενικευμένο αντίστροφο Moore-Penrose του κρυφού πίνακα  $H$ .

#### IV.5.1.iii. Το φαινόμενο του γειτονικού ανέμου $\Omega(i, j)t$

Ο αέρας είναι ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος πρέπει να εξεταστεί στην προσέγγιση προσομοίωσης CA (Zheng et al., 2017). Σε αυτή τη μελέτη, η επίδραση του ανέμου στο κύτταρο  $(i, j)$  χαρακτηρίζεται από την ακόλουθη μήτρα βαρύτητας του παράγοντα ανέμου:

$$\begin{pmatrix} W_{i-1,j-1} & W_{i-1,j} & W_{i-1,j+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{i+1,j-1} & W_{i+1,j} & W_{i+1,j+1} \end{pmatrix}$$

Αν δεν υπάρχει αέρας που φυσά πάνω στο κελί  $(i, j)$ , όλες οι τιμές βάρους των κυττάρων σε αυτή την  $3 \times 3$  μήτρα του ανέμου η τιμή είναι 1 (Encinas et al., 2007).

## IV.6. Μοντελοποίηση και προσομοίωση διάδοσης δασικής πυρκαγιάς

### IV.6.1. Μαθηματική Μοντελοποίηση

Χρησιμοποιούμε ένα παρόμοιο μοντέλο δασικής πυρκαγιάς, όπως οι Asensio & Ferragut (Asensio & Ferragut, 2002).

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= -v\nabla T + D\Delta T + A(Y \exp \frac{-B}{T-T_{\infty}}) - h(T - T_{\infty}) \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -bY \exp \left( \frac{-B}{T-T_{\infty}} \right) \end{aligned} \quad (98)$$

με θερμοκρασία καυσίμου  $T$ , χρόνο  $t$ , ταχύτητα ανέμου  $v$ , συντελεστή διάδοσης  $D$ , προεκτατικό συντελεστή αντίδρασης  $A$ , κλάσμα μάζας καυσίμου  $Y$ , συντελεστή λόγω τροποποιημένου νόμου

Arrhenius  $B$ , συντελεστή φυσικής μεταφοράς  $h$ , ποσοστό εξαφάνισης καυσίμου  $b$  και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_\infty$ .

## IV.6.2. Αριθμητική Λύση

### IV.6.2.i. Διάκριση χώρου και χρόνου

Χρησιμοποιούμε για τη διακριτοποίηση του χώρου μια μέθοδο συνεγκατάστασης με βάση τα αθροίσματα:

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^l \phi(x, z_i) u_i, \\ y &= \sum_{i=1}^l \phi(x, z_i) y_i \\ x \in X, z \in Z, l \text{ αριθμός σημείων} \end{aligned} \quad (99)$$

όπου  $\phi$  είναι η δοκιμαστική συνάρτηση,  $X$  ένα πλέγμα που αντιπροσωπεύει τα σημεία συνεγκατάστασης και  $Z$  ένα πλέγμα αποτελούμενο από τα κέντρα των δοκιμαστικών λειτουργιών (Eberle, 2014). Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε την (99) για τη θερμοκρασία  $T$  και το κλάσμα μάζας  $Y$  και τη συνδέουμε στις εξισώσεις (98):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{i=1}^l (-v \nabla \phi_i + D \nabla \phi_i - A h \phi_i) u_i + A h T_\infty + A \sum_{i=1}^l \phi_i y_i \exp\left(\frac{-B}{T - T_\infty}\right) \quad (100)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -b \sum_{i=1}^l \phi_i y_i \exp\left(\frac{-B}{T - T_\infty}\right) \quad (101)$$

Η χρονική διακριτοποίηση γίνεται με ένα σύστημα Crank-Nicolson (Eberle, 2014).

## IV.6.2.ii. Σταθεροποίηση

Το παραπάνω σύστημα εισαγωγής λύσεων αποδίδει έντονα ταλαντευόμενα αποτελέσματα στην κυριαρχούσα περίπτωση (φαινόμενο Gibbs). Έτσι, η μέθοδος πρέπει να σταθεροποιηθεί. Εδώ ακολουθείται η διαδικασία μεταφοράς των Kuzmin, Löhner & Turek (Kuzmin, Löhner & Turek, 2012):

**Βήμα (1)** Έχουμε την προσέγγιση των αρχικών συνθηκών και των συντελεστών  $u_0$ , το σύστημα που προκύπτει είναι:

$$Mu_0 = T_0 \quad (102)$$

Όπου  $M = m_{ij}$  είναι η μήτρα μάζας που δίνεται από  $m_{ij} = \phi(x_i, z_j)$ . Οι συντελεστές είναι απαραίτητοι για την διακριτοποίηση του χώρου μέσα στο χρονοδιάγραμμα.

**Βήμα(2)** Στη συνέχεια, θεωρούμε το λεγόμενο πρόβλημα «χαμηλής τάξης» και ορίζουμε τη μήτρα συγκεντρωτικής μάζας  $M_L$  από:

$$m_{ii} = \sum_j m_{ij} \quad \text{για } i = j \quad (103)$$

**Βήμα(3)** Ο χειριστής  $K^H$  δίνεται από:

$$k_{ij}^H(\phi) = -\nabla \phi(x_i, z_j) + D \nabla \phi(x_i, z_j) \quad (104)$$

και περιγράφει τη ροή και τη διάδοση.

**Βήμα(4)** Η τεχνητή διάχυση προστίθεται τώρα και έχουμε τον διαχειριστή διάχυσης με τον ίδιο τρόπο όπως και από τον Möller (2008):

$$d_{ii} = -\sum_{j \neq i} d_{i,j}, \quad d_{i,j} = d_{j,i} = \max\{0, -k_{i,j}^H, -k_{j,i}^H\} \quad \text{για } i < j \quad (105)$$

και τον χειριστή χαμηλής τάξης  $K^L = K^H + D$ .

**Βήμα(5)** Η δεξιά πλευρά του προβλήματος της μεταγωγής-διάχυσης-αντίδρασης (I) αντιπροσωπεύεται από τον όρο αντίδρασης  $q$  και ονομάζουμε τους συντελεστές του  $q_{n-1}$ .

$$q = A(Y \exp(\frac{-B}{T - T_\infty}) - h(T - T_\infty)) \quad (106)$$

**Βήμα(6)** Ακολουθώντας τη διαδικασία της (78), η προσέγγιση των συντελεστών της μεθόδου συνεγκατάστασης είναι:

$$\bar{u}=u_{n-1}-\frac{\Delta t n}{2} M_L^{-1}(K^L U_{n-1}-q_{n-1}) \quad (107)$$

**Βήμα(7)** Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο Zalesak (1979) σε αυτόν του Scott (2012) για τον οποίο πρέπει να υπολογίσουμε το κατάλοιπο  $\tau$  και τα βάρη  $\alpha$  για να πάρουμε  $q^*_{n-1}$ . Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του μόνο τους άμεσους γείτονες  $i$  κάθε σημείου συνεγκατάστασης (Eberle, 2014):

$$p_j^+=\sum_{i \neq j, i=1, \dots, N} \max\{0, r_{ij}\}, \quad p_j^-=\sum_{i \neq j, i=1, \dots, N} \min\{0, r_{ij}\} \quad (108)$$

$$Q_j^+=\max\{0, \max_{i=1, \dots, N}(\bar{u}_j - \bar{u}_i)\}, \quad Q_j^-=\min\{0, \min_{i=1, \dots, N}(\bar{u}_j - \bar{u}_i)\} \quad (109)$$

$$R_j^+=\min_{i=1, \dots, N} \left\{1, \frac{m_i Q_i^+}{p_i^+}\right\}, \quad R_j^-=\min_{i=1, \dots, N} \left\{1, \frac{m_i Q_i^-}{p_i^-}\right\} \quad (110)$$

$$a_{ij}=\min_{i=1, \dots, N} \left\{1, \frac{m_i R_i^+}{R_j^-}\right\}, \quad \text{για } r_{ij} > 0 \text{ and } a_{ij}=\min_{i=1, \dots, N} \left\{1, \frac{m_i R_i^-}{R_j^+}\right\} \text{ αλλιώς} \quad (111)$$

**Βήμα(8)** Τώρα καθορίζονται οι συντελεστές:

$$u_n=u_{n-1}-\frac{\Delta t n}{2} M_L^{-1}(K^L U_{n-1}-q_{n-1}-q^*_{n-1}) \quad (1112)$$

**Βήμα(9)** Τέλος, αυτοί οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για να αποδοθούν οι λύσεις για τη θερμοκρασία  $T$  και το κλάσμα μάζας του καυσίμου  $Y$  με τη σταθεροποιημένη μέθοδο.

## IV.7. Μοντελοποίηση εξάπλωσης πυρκαγιών μεγάλης έκτασης

### IV.7.1. Απόδοση συμβόλων – Ονοματολογία

Η ονοματολογία που ακολουθεί αποτυπώνει τη σημασία των συμβόλων που χρησιμοποιούνται (Drissi, 2014):

$V$	Έλεγχος έντασης
$D$	Διάμετρος κυττάρου
$H$	Ύψος κυττάρου (Height)
$WFF$	Καθαρό βρεγμένο καύσιμο
$DFF$	Καθαρό στεγνό καύσιμο
$T$	Θερμοκρασία
$Q$	Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας εντός της φλόγας
$n$	Αριθμός τοποθεσιών
$t$	Χρόνος
$i$	Κύτταρο σε διαδικασία καύσης
$j$	Κύτταρο σε διαδικασία μη καύσης
$p$	Στοιχειακή ισχύς που μεταφέρεται από ένα κβάντο
$n''$	Αριθμός κβάντων που εκπέμπονται από κάθε $m^2$ φλόγας
$P''$	Εκτοξευτική δύναμη της φλόγας
SNB	Small narrow-banded, Μικρά και στενά συνδεδεμένα
MCM	Monte Carlo Method, Μέθοδος Monte Carlo
SFM	Solid flame model, Μοντέλο σταθερής φλόγας
$B$	σταθερά Stefan Boltzmann
$Q$	Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας μέσα στη φλόγα
$Hf^o$	Ύψος φλόγας χωρίς άνεμο
$Hf$	Ύψος φλόγας με άνεμο
$S$	Επιφάνεια
$\Delta T_c$	Θερμότητα καύσης πτητικών αερίων
$t_c$	Χρόνος παραμονής της φλόγας

$S_b$	Ανώτερη επιφάνεια του χώρου
$U$	Ταχύτητα ανέμου
$L$	Μήκος
$d$	Απόσταση
$h$	Συντελεστής του μέσου μεταφοράς
$k$	Θερμική αγωγιμότητα
$n^{\rightarrow}$	Κανονικό προς το έδαφος (γη)
$Re$	Αριθμός Reynolds
$Pr$	Αριθμός Prandtl
$G$	Επιτάχυνση της βαρύτητας
$X$	Παράγοντας ευαισθησίας
$M$	Πίνακας επιπέδων
$Ros$	Rate of spread of fire, Ρυθμός διάδοσης φωτιάς
$M$	Μάζα
$m''$	Φορτίο μάζας
$FPPC$	Περιεκτικότητα σε προϊόντα πυρόλυσης καυσίμου
$c_p$	Ειδική θερμοχωρητικότητα
$L_{vap}$	Ειδική αλλαγή ενθαλπίας
$a$	Απορροφητικότητα
$FMC$	Περιεχόμενο υγρασίας καυσίμου

### Ελληνικά Σύμβολα

$\delta$	Διάρκεια διείσδυσης ακτινοβολίας (οπτικό μήκος)
$\delta_{eff}$	Αποτελεσματικό μήκος διείσδυσης ακτινοβολίας
$\alpha$	Κλάσμα όγκου ή βαθμός συμπαγούς κατάστασης
$\sigma$	Αναλογία επιφάνειας / όγκου
$\rho$	Πυκνότητα σωματιδίων καυσίμου
$\varepsilon$	Δυνατότητα εκπομπής
$\alpha_f$	Γωνία κλίσης της φλόγας
$\chi_R$	Ακτινοβολία από την απελευθέρωση θερμότητας μέσα στη φλόγα
$\nu$	Κινηματικό ιξώδες
$\kappa$	Συνολικός συντελεστής απορρόφησης της φλόγας

$\beta$  Μέσος συντελεστής απόσβεσης

### Δείκτες

k	Στερεά φάση
ign	Ανάφλεξη
WFF	Wet fine fuel, Καθαρό βρεγμένο καύσιμο
FDF	Fine dry fuel, Καθαρό στεγνό καύσιμο
AGL	Above ground level, Επίπεδο πάνω από το έδαφος
fb	Κλίνη καυσίμου
$\infty$	Περιβάλλον, παρούσα κατάσταση
str	Στοιβάδα
char	Άνθρακας
f	Φλόγα
ij	Μεταξύ (i) και (j)
c	Συνεχόμενη καύση

## IV.7.2. Το μακροσκοπικό μοντέλο καύσης

Το μακροσκοπικό μοντέλο βασίζεται σε ένα ενεργειακό ισοζύγιο για έναν όγκο ελέγχου γύρω από ένα παρθένο σημείο, συμπεριλαμβανομένης της ακτινοβολίας προθέρμανσης από το μπροστινό μέρος των φλογών. Κάθε καύσιμη κυψέλη έχει κυλινδρικό σχήμα με ύψος  $H$  και μια διάμετρο  $D$ . Στο παρόν μοντέλο, υποτίθεται ότι ο στοιχειώδης όγκος του καυσίμου του κυττάρου που εμπλέκεται στην προθέρμανση δεν είναι ολόκληρος ο όγκος του κυττάρου, αλλά μάλλον ένα ανώτερο στρώμα με πάχος  $\delta$  και όγκο  $=\pi D^2 \delta / 4$  ( $\delta \leq H$ ). Το πάχος  $\delta$ , το οποίο δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του  $H$ , αντιστοιχεί στη μέση ελεύθερη διαδρομή της ακτινοβολίας μέσω του μέσου βλάστησης, το  $\delta$  μπορεί να σχετίζεται με την αναλογία επιφάνειας προς όγκο των λεπτών στοιχείων καυσίμου, του  $\sigma k$ , και του κλάσματος όγκου της στερεάς φάσης,  $\alpha k$ , καταλήγοντας στο  $\delta = 4 / \sigma k \alpha k$  (Butler, 1993). Δεν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στον όγκο ελέγχου. Αυτό θεωρείται ότι ισχύει αν  $\delta$  είναι μικρότερο σε σύγκριση με το μήκος της φλόγας. Το μοντέλο καύσης υποθέτει ότι η θερμική αποικοδόμηση μέχρι την ανάφλεξη πραγματοποιείται σύμφωνα με τέσσερα στάδια: πρώτα τα υγρά στοιχεία καυσίμου (*WFF*) θερμαίνονται μέχρι το σημείο βρασμού νερού, 373K, τότε το νερό εξατμίζεται, μετά τα ξηρά σωματίδια καυσίμου (*DFF*) θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία πυρόλυσης και τελικά όταν η περιεκτικότητα των καυσίμων (*FPFC*) σε προϊόντα

πυρόλυσης φθάσει σε κάποια κρίσιμη τιμή, η χλωρή βλάστηση αναφλέγεται (Drissi, 2014). Αυτό το τελικό στάδιο θεωρείται ότι συμβαίνει στη σταθερή θερμοκρασία πυρόλυσης. Με την εφαρμογή του αποθέματος ενέργειας στον όγκο ελέγχου  $V_j$  του κυττάρου  $j$  που εκτίθεται σε  $N_{bc}$  κύτταρα που τελούν υπό καύση, προκύπτει ότι:

$$\sum_{i=1}^{N_{bc}} [q_{rad}^+(i) + q_{conv}^+(i)]$$

$$= q_{rad}^-(j) + \begin{cases} P_{WFF} C_{PWFF} a_k \frac{dT(j)}{dt}, & \text{για } T(j) < 373K \\ -P_{DFF} L_{vap} a_k \frac{dFMC(j)}{dt} & \text{για } T(j) = 373K \\ P_{DFF} C_{PDFF} a_k \frac{dT(j)}{dt}, & \text{για } 373K < T(j) < T_{pyr} \\ -P_{DFF} L_{pyr} a_k \frac{dFPPC(j)}{dt}, & \text{για } T(j) = T_{pyr} \end{cases} \quad (113)$$

όπου  $q_{rad}^+(i)$  και  $q_{conv}^+(i)$  είναι αντίστοιχα η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα χρόνου που λαμβάνεται από το στοιχείο  $j$  από τα κύτταρα που καίγονται ( $i=1$  σε  $N_{bc}$ ) εξαιτίας των μηχανισμών μεταφοράς ενέργειας που προκαλεί την προθέρμανση, όπως είναι η ακτινοβολία της φλόγας και η διάδοση μέσω του αέρα στην άνω επιφάνεια του κυττάρου-αποδέκτη.

Για τις περισσότερες μη μηδενικές ταχύτητες συνεχούς ροής, όπως συμβαίνει στην παρούσα μελέτη, οι άλλοι μηχανισμοί προθέρμανσης ενέργειας, όπως είναι η τυρβώδης διάχυση, η αγωγιμότητα σε στερεά και αέρια φάση, η συμπαγής ψύξη και η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του κυττάρου, καθώς και η ενέργεια που απορροφάται από την πυρόλυση πριν από την ανάφλεξη, μπορούν να αγνοηθούν (Pagni & Peterson, 1973). Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (91),  $q_{rad}^-(j)$ , αντιπροσωπεύει την έκλυση ακτινοβολίας από την κλίνη καυσίμου στο περιβάλλον.  $L_{vap}$  είναι η ειδική αλλαγή ενθαλπίας του νερού σε ατμό στα 373K,  $FMC(j)$  είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του κυττάρου ( $j$ ) σε ξηρή κατάσταση, δηλαδή η μάζα νερού ανά μάζα ξηρών στοιχείων καυσίμου.

Η εξάτμιση στα στοιχεία καυσίμου που δεν βρίσκονται στη θερμοκρασία βρασμού θεωρείται αμελητέα.  $T(j)$  είναι η θερμοκρασία του κυττάρου ( $j$ ),  $\rho$  και  $cp$  είναι αντίστοιχα η πυκνότητα σωματιδίων καυσίμου και η ειδική θερμότητα της στερεάς φάσης. Υποθέτουμε ότι ο όγκος των στοιχείων καυσίμου παραμένει σταθερός κατά τη διαδικασία απομάκρυνσης του νερού.  $L_{pyr}$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα πυρόλυσης και το  $FPPC$  είναι το περιεχόμενο των προϊόντων πυρόλυσης του ξηρού καυσίμου. Οι δείκτες  $DFF$  και  $WFF$  αναφέρονται σε μεταβλητές που εκτιμήθηκαν σε ξηρή ή υγρή κατάσταση. Το αρχικό  $FPPC$

σημειώνεται ως  $FPPC_o$  και ορίζεται ως:  $FPPC_o = 1 - vchar$ , όπου  $vchar$  είναι η αρχική περιεκτικότητα άνθρακα σε ξηρά στοιχεία καυσίμου. Κάθε όρος της εξίσωσης ενεργειακού ισοζυγίου αναλύεται παρακάτω.

#### IV.7.2.i. Ακτινοβολία από τη φλόγα

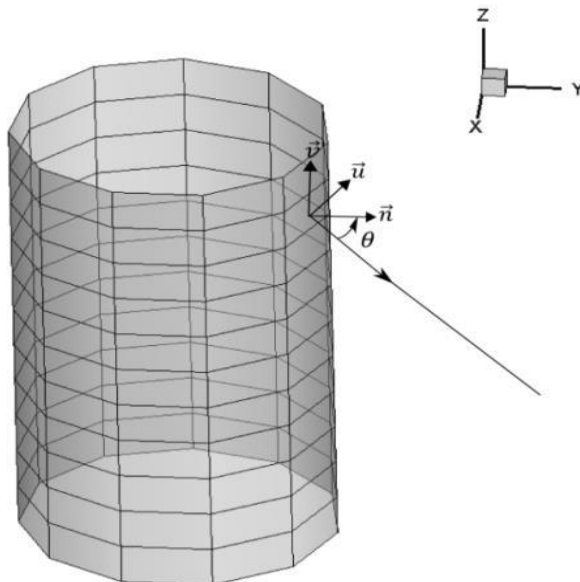
Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας που λαμβάνεται από το κελί  $j$  εξαρτάται από την εκπομπή φλόγας, την εξασθένηση από το στρώμα αέρα μεταξύ της φλόγας και του κυττάρου και την απορρόφηση από το μέσο καυσίμου (Drissi, 2014). Η υπέρυθρη ακτινοβολία φλόγας υπολογίζεται με τη μέθοδο Monte Carlo για ανίχνευση ακτινών, όπου η ορατή φλόγα θεωρείται ως ομοιόμορφα ακτινοβόλο στερεό σώμα με κυλινδρικό σχήμα και με θερμική ακτινοβολία εκπεμπόμενη από την επιφάνεια του. Τα όρια της εγκυρότητας αυτού του απλού μοντέλου ακτινοβολίας φλόγας, που αναφέρεται ως «μοντέλο σταθερής φλόγας», συζητούνται από τους Collin & Boulet (2013) όσον αφορά το οπτικό πάχος της φλόγας. Αυτό το μοντέλο ακτινοβολίας είναι σχετικά απλό, αλλά απαιτεί εκτιμήσεις ιδιοτήτων φλόγας, όπως το ύψος, το μήκος, η γωνία και η διάμετρος βάσης, και εκπεμπόμενης ισχύς (Drissi, 2014). Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του αριθμού των ποσοτήτων ενέργειας που εκτοξεύονται από το κύτταρο που καίγεται ( $i$ ) και που τελικά φθάνουν στον όγκο ελέγχου του κυττάρου υποδοχής ( $j$ ). Κάθε κβάντο φέρει στοιχειώδη ισχύ  $pi=Pi''/n''$  (σε Watt), όπου  $n''$  είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων ποσοτήτων ανά μονάδα επιφάνειας φλόγας και  $Pi''$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς της φλόγας που συνδέεται με τη θέση του κυττάρου που καίγεται ( $i$ ) (Adou et al., 2010). Το φορτίο ακτινοβολίας προς το στοιχείο  $j$  μπορεί έτσι να γραφεί ως:

$$q_{rad}^+(j) = a_{fb} p_i N_{ij} / V_j.$$

Όπου  $V_j$  είναι ο όγκος ελέγχου του κυττάρου  $j$  και  $a_{fb}$  είναι η απορροφητικότητα του καυσίμου που μεταφέρει τη φλόγα.

Η συνεισφορά του κυττάρου  $i$  που καίγεται μπορεί να τροποποιηθεί αν υπάρχει και άλλο κύτταρο που καίγεται μεταξύ των κυττάρων  $i$  και  $j$ . Η πιθανότητα ενός εκτοξευόμενου κβάντου από ένα κύτταρο  $i$  που καίγεται προς την κατεύθυνση  $ij$  να είναι διασκορπισμένο ή να απορροφηθεί, προσδιορίζεται από τον νόμο Beer-Lambert, χρησιμοποιώντας τη μετάδοση των ατμοσφαιρικών στρωμάτων  $\tau_{ij}$  (Drissi, 2014). Αυτός ο συντελεστής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της φλόγας και της κυψέλης υποδοχής, τη σχετική υγρασία ( $RH$ ) του αέρα του περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία της πηγής. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο στατιστικής στενής ζώνης (Statistical Narrow Band model) του Malkmus

(1967). Για κάθε εκπεμπόμενο κβάντο παράγεται ένας τυχαίος αριθμός  $Rs$  για να προσδιοριστεί εάν το κβάντο απορροφάται ή διασκορπίζεται ( $Rs > \tau_{ij}$ ) από το στρώμα της ατμόσφαιρας (Drissi, 2014)



**Σχήμα 8.** Μια ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της φλόγας αποτυπώνεται ως ένας κύλινδρος στο πλαίσιο μοντέλου σταθερής φλόγας

(Πηγή: Drissi, 2014)

#### IV.7.2.ii. Απώλειες ακτινοβολίας

Τα άκαυστα στοιχεία καυσίμου μέσα σε ένα κύτταρο ( $j$ ) εκλύουν θερμότητα στο περιβάλλον μέσω της απώλειας θερμότητας από την ακτινοβολία στην ανώτερη επιφάνεια του καυσίμου:

$$q_{\text{rad}}^-(j) = \varepsilon_{fb} \sigma (T_j^4 - T_{\infty}^4) / \delta$$

όπου  $\varepsilon_{fb}$  είναι η εκπομπή της κλίνης του καυσίμου,  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2/\text{K}^4$ ) και  $T_{\infty}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Drissi, 2014).

## IV.7.2.iii. Διάδοση

Όπως υπογραμμίζεται από τον Beer (1990), η φλόγα δεν αποτελεί αδιαπέραστο φράγμα και, ως αποτέλεσμα τρισδιάστατων επιδράσεων, ο άνεμος μπορεί να διεισδύσει στην περιοχή της φλόγας. Επομένως, ένα άκαυστο κύτταρο ( $j$ ) που βρίσκεται στη συνέχεια ενός κυττάρου που καίγεται ( $i$ ) μπορεί να θερμαίνεται με μια ροή μεταφοράς που οφείλεται στην παρουσία ανέμου. Αυτή η ροή εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ αυτών των δύο θέσεων,  $dij$  και μειώνεται εκθετικά με χαρακτηριστικό μήκος περίπου τριπλάσιο του μήκους της φλόγας (Pagni & Peterson, 1973):

$$q^{+conv}(i) = \frac{h}{\delta} (T_f - T_j) e^{-0.3 dij/L_f}$$

Όπου  $L_f$  και  $T_f$  είναι το μήκος και η θερμοκρασία της φλόγας και  $h$  είναι ένας μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που αξιολογείται εμπειρικά για να περιγράψει τη ροή αέρα σε επίπεδη περιοχή με μήκος  $L_f$  (Incropera & deWitt, 1985)

$$h = 0.037 k Re^{0.8} Pr^{1/3} / dij$$

Ο αριθμός Reynolds, που ορίζεται ως  $Re = U dij / \nu$ , βασίζεται στην εφαπτομένη διανυσματική συνιστώσα της τοπικής ταχύτητας ανέμου,  $U = |\vec{n} \wedge (\vec{U} \wedge \vec{n})|$ , όπου  $\vec{n}$  είναι η κανονική διεύθυνση αέρα ως προς την επιφάνεια του εδάφους.  $Pr$ ,  $\nu$  και  $k$  είναι αντίστοιχα ο αριθμός Prandtl, το κινηματικό ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα του αέρα στη μέση θερμοκρασία  $(T_f + T_\infty)/2$ .

## IV.7.3. Παράμετροι εισαγωγής του μοντέλου διάδοσης

## IV.7.3.i. Ιδιότητες φλόγας

Σύμφωνα με τον Putnam (1965), εκτιμάται ότι το ύψος της φωτεινής φλόγας υπό την επίδραση του ανέμου προκύπτει από τη σχέση:

$$H_f = H_{f0} \left( 1 + 4 \frac{U^2}{g H_{f0}} \right)^{-0.5}$$

Όπου  $H_{fo}$  είναι το ύψος φωτεινής φλόγας χωρίς άνεμο, που προκύπτει από την ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας από την καύση  $Q$  και τη διάμετρο του κυττάρου που καίγεται. Το  $D$ , δίνεται από τη συσχέτιση Heskestad's (1983):

$$H_{fo}=0.0148 Q^{2/5}-1.02 D$$

Δεδομένου ότι η καύση αντιστοιχεί στη χημική αντίδραση των πτητικών με τον αέρα, ο σχετικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας,  $Q$  (σε Watt), μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό απώλειας μάζας,  $\dot{m}_{DFF}''(in kg.m^{-2}.s^{-1})$ , θερμότητας καύσης των πτητικών  $\Delta h_c(in J.kg^{-1})$ , και της περιοχής των κυττάρων που καίγονται,

$$S_{cell}=\pi D^2/4(in m^2), \text{ως } Q=\dot{m}_{DFF}''\Delta h_c S_{cell}$$

Ως πρώτη προσέγγιση, η ταχύτητα πυρόλυσης μπορεί να σχετίζεται με την αρχική μάζα του  $DFF$  ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου διατήρησης φλόγας ως:

$$\dot{m}_{DFF}''=\dot{m}_{DFF}''t_c$$

Ο άνεμος μπορεί να επηρεάσει τη γεωμετρία της φλόγας. Κατά τον Albin (1981), η εφαιπόμενη της γωνίας φλόγας, που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του άξονα φλόγας και μιας κάθετης γραμμής, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\tan\alpha=1.22 U/\sqrt{gH_f}$$

Ωστόσο, λόγω της ασθενούς επιρροής του ανέμου στο μήκος φλόγας (Thomas & Pickard, 1961; Thomas, 1963; Nmira et al., 2010), το μήκος φλόγας  $L_f$  θεωρείται ότι είναι ίσο με το ύψος της φλόγας χωρίς άνεμο. Η εκπεμπόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας της φλόγας μπορεί να εκφραστεί με χρήση της έκτασης της επιφάνειας της φλόγας,  $S_f=\pi D L_f$ , του ακτινοβόλου κλάσματος του ποσοστού χημικής απελευθέρωσης θερμότητας που χάνεται από τη φλόγα,  $\chi_R$ , και την επιφάνεια της φλόγας  $S_f=\pi D L_f$  ως  $P_f''=\chi_R Q/S_f$ .

Έτσι, η θερμοκρασία της φλόγας υπολογίζεται με την παραδοχή ότι η φλόγα είναι ένα σώμα που εκπέμπει ακτινοβολία με εκπομπή  $\epsilon_f$  έτσι ώστε:  $T_f=(P_f''/\epsilon_f \sigma)^{1/4}$ . Η ακτινοβολία της φλόγας μπορεί να

εκφραστεί ως συνάρτηση του αποτελεσματικού συνολικού συντελεστή της φλόγας και του μήκους της φλόγας ως  $\varepsilon_f = 1 - e^{-\bar{\kappa} L f}$ . Σύμφωνα με τους Pard & Pagni (1985),  $\bar{\kappa}$  θεωρείται ίσο με  $0.6 \text{ m}^{-1}$ .

Ένα άλλο πλεονέκτημα της μελέτης ευαισθησίας είναι ότι μπορούν να καθοριστούν συσχετισμοί για την εκτίμηση των απαντήσεων ως συνάρτηση αυτών των παραμέτρων (Drissi, 2014).

Η μέθοδος συνίσταται στην προσέγγιση της απόκρισης του συστήματος, εδώ ως ποσοστό εξάπλωσης του μετώπου της πυρκαγιάς, από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$\begin{aligned}
 & ros \sim ros_0 + \sum_{i=0}^6 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \\
 & \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \\
 & \text{κύριες επιπτώσεις 1ου βαθμού αλληλεπιδράσεις 2ου βαθμού αλληλεπιδράσεις 3ου βαθμού} \\
 & + \sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \sum_{l>k} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \sum_{l>k} \sum_{m>l} \beta_{ijklm} x_i x_j x_k x_l x_m \\
 & \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \\
 & \text{αλληλεπιδράσεις 4ου βαθμού αλληλεπιδράσεις 5ου βαθμού} \\
 & + \beta_{123456} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 \\
 & \quad \downarrow \\
 & \text{αλληλεπιδράσεις 6ου βαθμού}
 \end{aligned}$$

όπου  $ros_0$  είναι το ποσοστό διάδοσης που προβλέπεται από το μοντέλο χρησιμοποιώντας τιμές αναφοράς (Το μαθηματικό σύστημα μπορεί να γραφτεί ως  $ros^* = X \cdot \vec{\beta}$ , όπου  $ros^*$  είναι το διάνυσμα απόκρισης,  $X$  ο ένας πίνακας  $64 \times 64$  και  $\beta$  το διάνυσμα των συντελεστών).

Το  $\vec{\beta}$  υπολογίζεται από το  $\vec{\beta} = X^{-1} ros^*$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αποσύνθεσης LU. Τα κύρια αποτελέσματα του  $\vec{\beta}_i$  είναι η συνολική επίδραση της παραμέτρου  $i$  επάνω στο  $ros$ , το  $\vec{\beta}_{ij}$  είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων  $i$  και  $j$ , κ.λπ.

Η παρατήρηση των αλληλεπιδράσεων δευτέρου βαθμού και άνω στην εξίσωση (113) οδηγεί στις κύριες επιπτώσεις πρώτου βαθμού της εξάπλωσης (Drissi, 2014).

## Κεφάλαιο V

# Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια αναφορά επιστημονικών ερευνών όσων αφορά κάποια μοντέλα προσομοίωσης της δασικής πυρκαγιάς, αφού πρώτα έχει γίνει αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά της δασικής πυρκαγιάς και στη διάκριση της από τις άλλες μορφές καύσης. Σημαντικά στοιχεία που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της δασικής πυρκαγιάς είναι η ταχύτητα διάδοσης πυρκαγιάς (*ROS*), η θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (*HPA*), η ένταση της πυρκαγιάς (*FLI*), και το μέγεθος της φλόγας (*FLS*).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος εξόρυξης δεδομένων (*Data Mining*), η οποία βοηθάει στην εκτίμηση του μεγέθους του κινδύνου της πυρκαγιάς και χρησιμοποιείται από τους επιστήμονες του είδους ως επιπλέον εργαλείο. Ανάμεσα των μοντέλων, αναφέρεται το *BRT*, με στόχο την αύξηση της απόδοσης ενός ενιαίου μοντέλου συνδυάζοντας πολλά είδη μοντέλων για την καλύτερη πρόβλεψη, το *GAM*, το γενικευμένο μοντέλο προσθέτων, όπου είναι ένα ημιπαραμετρικό μοντέλο παλινδρόμησης, το *RF*, τυχαίο δάσος, που βασίζονται σε δέντρα αποφάσεων, φτάνοντας στο συμπέρασμα ότι το *GAM* ανέρχεται σε υψηλότερη θέση προτίμησης σε σχέση με τις παραμετρικές τεχνικές.

Έπειτα, γίνεται διάκριση μεταξύ ενός αυτόνομου *UAV* και ενός σμήνους, καταλήγοντας στο γεγονός ότι το σμήνος *UAV* επιλύει ακόμη περισσότερες εργασίες σε λιγότερο χρόνο, αυξάνοντας την ποιότητα των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί. Γίνεται αναφορά στο σύστημα μοντέλου σμήνους, το μοντέλο δικτυομένου σμήνους(των Brust & Strimbu, 2015), όπως επίσης γίνεται και μια αξιολόγηση του χρόνου με τυχαίες τιμές κατά τη χρήση σμήνους *UAV*, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη κίνηση σμήνους ισοδυναμεί σχεδόν με τη θεωρητική προσέγγιση ενός μόνο *UAV* (Brust & Strimbu, 2015). Με τον συνεργατικό έλεγχο πολλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών, με εφαρμογή στην πυρανίχνευση και στον έλεγχο της πυρκαγιάς παρουσιάζονται οι στόχοι των προτεινόμενων αλγορίθμων σχετικά με την εφαρμογή ανίχνευσης της πυρκαγιάς. Το μοντέλο επέκτασης της πυρκαγιάς (*FSM*), που αναλύεται στοχεύει στην πρόβλεψη της ενδεχόμενης επέκτασης της φωτιάς, ενώ με βάση το *SMC*, η ανασυγκρότηση σχηματισμού *UAV*, δείχνει πως διαμορφώνεται το ελλειπτικό μοντέλο φωτιάς και ο σχηματισμός διαφόρων ομάδων *UAV*, αντιμετωπίζει πολλά μέτωπα σημείων πυρκαγιάς.

Ο αλγόριθμος ανάθεσης εργασίας πολλαπλών ομάδων UAV (βασισμένος στη δημοπρασία), εξασφαλίζει την αποτελεσματική εκτέλεση της παρακολούθησης των δασών και την πυρανίχνευση. Επιπλέον, τα ελλειπτικά μοντέλα μοντελοποίησης και προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν την προσέγγιση Richards, τα οποία δείχνουν πώς προσομοιώνεται αριθμητικά το συγκεκριμένο μοντέλο σε ένα μέτωπο φωτιάς, ενώ με την εφαρμογή θεωρίας περιγράμματος προκύπτει ένα άλλο μοντέλο, που δεν χρειάζεται τη χρήση μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων. Συνεχίζοντας, με τα μοντέλα κυτταρικού αυτοματοποιημένου συστήματος προβλέπεται η εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές που επηρεάζουν τη διάδοση της πυρκαγιάς. Γίνεται μια αναπαράσταση των πιθανολογικών κυτταρικών αυτομάτων, ο οποίος αποτελεί έναν άλλο τρόπο μοντελοποίησης των δασικών πυρκαγιών, ενώ με τη μέθοδο προσέγγισης μέσου πεδίου στα PCA, αντλούμε αποκρίσεις χρόνου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες (Pak & Hayakawa, 2011).

Κατά ένα δεύτερο εναλλακτικό πρότυπο διάδοσης πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα, σύμφωνα με το πρότυπο διάδοσης πυρκαγιάς επιφανείας του Rothermel (1972), μπορεί να προβλεφθεί η επέκταση της πυρκαγιάς μέσω κυτταρικών αυτομάτων, ενώ γίνεται αξιολόγηση μοντέλου σύμφωνα με συγκεκριμένες μετρήσεις. Εν συνεχεία, ένα μοντέλο κυτταρικού αυτομάτου παρουσιάζεται από τον Alexandridis (2011), το οποίο απλοποιεί τους υπολογισμούς και μειώνει κατά σημαντικό βαθμό την υπολογιστική πολυπλοκότητα, καθώς παρουσιάζεται και ένα παρόμοιο εναλλακτικό μοντέλο δασικής πυρκαγιάς από τους Asensio και Ferragut με χαρακτηριστικό τη χρήση της μεθόδου σταθεροποίησης, λόγω των έντονα ταλαντούμενων αποτελεσμάτων στην κυριαρχούσα περίπτωση.

Τέλος, αναφέρεται το μακροσκοπικό μοντέλο καύσης, με κύριο στοιχείο τον όγκο του κυττάρου, παρουσιάζοντας τη μελέτη του Drissi, ελέγχοντας την απώλεια ακτινοβολίας και τη διάδοση του, ενώ παρατηρείται ότι οι ιδιότητες φλόγας αποτελούν παράμετρο εισαγωγής του μοντέλου διάδοσης αναφορικά με τις αλληλεπιδράσεις και τις επιπτώσεις που προκύπτουν από το βαθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Drissi, 2014).

## Βιβλιογραφία

- Adou, J.K., Billaud, Y., Brou, D.A., Clerc, J.P., Consalvi, J.L., Fuentes, A., Kaiss, A., Nmira, F., Porterie, B., Zekri, L. and Zekri, N., 2010. Simulating wildfire patterns using a small-world network model. *Ecological Modelling*, 221(11), pp.1463-1471.
- Albini, F.A., 1981. A model for the wind-blown flame from a line fire. *Combustion and Flame*, 43, pp.155-174.
- Aleemahmoodi, S.S., Fegghi, J., Jabbarian, A.B., Danehkar, A. and Attarod, P., 2013. Applying the Regression Models to Assess the Influences of Climate Factors on Forest Fires (Case Study: Izeh).
- Alexandridis, A., Russo, L., Vakalis, D., Bafas, G.V. and Siettos, C.I., 2011. Wildland fire spread modelling using cellular automata: evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics. *International Journal of Wildland Fire*, 20(5), pp.633-647.
- Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I. and Bafas, G.V., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204(1), pp.191-201.
- Aretano, R., Semeraro, T., Petrosillo, I., De Marco, A., Pasimeni, M.R. and Zurlini, G., 2015. Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas. *Ecological modelling*, 295, pp.163-175.
- Asensio, M.I. and Ferragut, L., 2002. On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54(1), pp.137-157.
- Bandyopadhyay, B., Deepak, F. and Kim, K.S., 2009. *Sliding mode control using novel sliding surfaces* (Vol. 392). Springer.
- Beer, T., 1990. Percolation theory and fire spread. *Combustion Science and Technology*, 72(4-6), pp.297-304.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F. and Rampini, A., 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches. *Natural hazards*, 17(1), pp.77-97.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(1), pp.5-32.
- Breiman, L., 2017. *Classification and regression trees*. Routledge.

Brust, M.R. and Strimbu, B.M., 2015, April. A networked swarm model for uav deployment in the assessment of forest environments. In *2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)* (pp. 1-6). IEEE.

Butler, B.W., 1993, October. Experimental measurements of radiant heat fluxes from simulated wildfire flames. In *Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology* (p. 796).

Carty, D.M., 2011. An analysis of boosted regression trees to predict the strength properties of wood composites.

Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S. and Tofani, V., 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), pp.2815-2831.

Chambers, J.M. and Hastie, T.J. eds., 1992. *Statistical models in S* (Vol. 251). Pacific Grove, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.

Chen, X., Liu, S., Zhu, Z., Vogelmann, J., Li, Z. and Ohlen, D., 2011. Estimating aboveground forest biomass carbon and fire consumption in the US Utah High Plateaus using data from the Forest Inventory and Analysis Program, Landsat, and LANDFIRE. *Ecological Indicators*, 11(1), pp.140-148.

Chubey, M.S., Franklin, S.E. and Wulder, M.A., 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), pp.383-394.

Chung, C.J.F. and Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), pp.451-472.

Chuvieco, E. and Congalton, R.G., 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing of Environment*, 29(2), pp.147-159.

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P. and De La Riva, J., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), pp.46-58.

Collin, A. and Boulet, P., 2013. Evaluation of simple models of flame radiation in the frame of fire propagation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 59, pp.83-92.

De'ath, G. and Fabricius, K.E., 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 81(11), pp.3178-3192.

Denham, M. and Laneri, K., 2018. Using efficient parallelization in Graphic Processing Units to parameterize stochastic fire propagation models. *Journal of Computational Science*, 25, pp.76-88.

Desai, J.P., Kumar, V. and Ostrowski, J.P., 1999, May. Control of changes in formation for a team of mobile robots. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)* (Vol. 2, pp. 1556-1561). IEEE.

Drissi, M., 2014. Modelling the spreading of large-scale wildland fires. *arXiv preprint arXiv:1402.6187*.

Eberle, S., 2014. Modeling and Simulation of Forest Fire Spreading. In *Mathematics of Planet Earth* (pp. 811-814). Springer, Berlin, Heidelberg.

Elith, J., Leathwick, J.R. and Hastie, T., 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4), pp.802-813.

Encinas, A.H., Encinas, L.H., White, S.H., del Rey, A.M. and Sánchez, G.R., 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6), pp.372-378.

Erten, E., Kurgun, V. and Musaoglu, N., 2004, July. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS: a case study. In *XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey* (pp. 222-230).

Eskandari, S. and Chuvieco, E., 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, pp.57-64.

Fridman, L. and Levant, A., 2002. Higher order sliding modes. *Sliding mode control in engineering*, 11, pp.53-102.

Ghamry, K.A.S., 2016. *Cooperative Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles with Application to Forest Fire Detection and Fighting* (Doctoral dissertation, Concordia University).

Ghisu, T., Arca, B., Pellizzaro, G. and Duce, P., 2015. An improved cellular automaton for wildfire spread. *Procedia Computer Science*, 51, pp.2287-2296.

Glasa, J. and Halada, L., 2008. On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(1), pp.76-88.

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. and Franklin, J., 2005. The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. *The Mathematical Intelligencer*, 27(2), pp.83-85.

Heckerman, D., 1986. Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors. In *Machine Intelligence and Pattern Recognition* (Vol. 4, pp. 167-196). North-Holland.

Heskestad, G., 1983. Luminous heights of turbulent diffusion flames. *Fire safety journal*, 5(2), pp.103-108.

Hjort, J. and Luoto, M., 2013. 2.6 Statistical methods for geomorphic distribution modeling. *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, pp.59-73.

Hooke, R. and Jeeves, T.A., 1961. "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 8(2), pp.212-229.

Incropera, F.P. and David, P., De Witt (1985). *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Jaeggi, D.M., Parks, G.T., Kipouros, T. and Clarkson, P.J., 2008. The development of a multi-objective Tabu Search algorithm for continuous optimisation problems. *European Journal of Operational Research*, 185(3), pp.1192-1212.

Jaiswal, R.K., Mukherjee, S., Raju, K.D. and Saxena, R., 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), pp.1-10.

Kamel, M.A., Yu, X. and Zhang, Y., 2017. Fault-tolerant cooperative control design of multiple wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(2), pp.756-764.

Kanungo, D.P., Sarkar, S. and Sharma, S., 2011. Combining neural network with fuzzy, certainty factor and likelihood ratio concepts for spatial prediction of landslides. *Natural hazards*, 59(3), p.1491.

Kawakami, H. and Namerikawa, T., 2009, June. Cooperative target-capturing strategy for multi-vehicle systems with dynamic network topology. In *2009 American Control Conference* (pp. 635-640). IEEE.

Kuzmin, D., Löhner, R. and Turek, S. eds., 2012. *Flux-corrected transport: principles, algorithms, and applications*. Springer Science & Business Media.

Loh, W.Y., 2002. Regression tress with unbiased variable selection and interaction detection. *Statistica Sinica*, pp.361-386.

Maggini, R., Lehmann, A., Zimmermann, N.E. and Guisan, A., 2006. Improving generalized regression analysis for the spatial prediction of forest communities. *Journal of biogeography*, 33(10), pp.1729-1749.

Malkmus, W., 1967. Random Lorentz band model with exponential-tailed S- 1 line-intensity distribution function. *JOSA*, 57(3), pp.323-329.

Micheletti, N., Foresti, L., Robert, S., Leuenberger, M., Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M. and Kanevski, M., 2014. Machine learning feature selection methods for landslide susceptibility mapping. *Mathematical Geosciences*, 46(1), pp.33-57.

Mohammadi, J., Shataee, S. and Babanezhad, M., 2011. Estimation of forest stand volume, tree density and biodiversity using Landsat ETM+ Data, comparison of linear and regression tree analyses. *Procedia Environmental Sciences*, 7, pp.299-304.

Möller, M., 2008. *Adaptive high-resolution finite element schemes* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Dortmund University of Technology).

Morvan, D. and Dupuy, J.L., 2003. Numerical simulation of the propagation of a surface fire through a Mediterranean shrub. *Fire Safety Science*, 7, pp.557-568.

Nmira, F., Consalvi, J.L., Boulet, P. and Porterie, B., 2010. Numerical study of wind effects on the characteristics of flames from non-propagating vegetation fires. *Fire Safety Journal*, 45(2), pp.129-141.

Pagni, P.J. and Peterson, T.G., 1973, January. Flame spread through porous fuels. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 14, No. 1, pp. 1099-1107). Elsevier.

Pak, S.I. and Hayakawa, T., 2011, June. Forest fire modeling using cellular automata and percolation threshold analysis. In *Proceedings of the 2011 American Control Conference* (pp. 293-298). IEEE.

Pardo-Igúzquiza, E., Guardiola-Albert, C., Heredia, J., Moreno-Merino, L., Durán, J.J. and Vargas-Guzmán, J.A. eds., 2013. *Mathematics of Planet Earth: Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences*. Springer Science & Business Media.

Perry, G.L.W., 1998. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. *Progress in Physical Geography*, 22(2), pp.222-245.

Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., Aghda, S.F., Gokceoglu, C. and Pradhan, B., 2014. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5), pp.1857-1878.

Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R., Aretano, R. and Semeraro, T., 2016. Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological indicators*, 64, pp.72-84.

Prosper-Laget, V., Wigneron, J.P., Guinot, J.P. and Seguin, B., 1995. Utilisation du satellite NOAA pour la détection des risques d'incendies de forêts. *La Météorologie*.

Putnam, A.A., 1965, January. A model study of wind-blown free-burning fires. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 10, No. 1, pp. 1039-1046). Elsevier.

Ravelomanana, V., 2004. Extremal properties of three-dimensional sensor networks with applications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3), pp.246-257.

Richards, G.D., 1990. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(6), pp.1163-1179.

Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Res. Pap. INT-115*. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p., 115.

Salvati, L. and Ferrara, A., 2014. Do land cover changes shape sensitivity to forest fires in peri-urban areas?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), pp.571-575.

Sariel, S. and Balch, T., 2005, July. Real time auction based allocation of tasks for multi-robot exploration problem in dynamic environments. In *Proceedings of the AAAI-05 Workshop on Integrating Planning into Scheduling* (pp. 27-33). Palo Alto, CA: AAAI.

Schleich, J., Panchapakesan, A., Danoy, G. and Bouvry, P., 2013, November. UAV fleet area coverage with network connectivity constraint. In *Proceedings of the 11th ACM international symposium on Mobility management and wireless access* (pp. 131-138). ACM.

Scott, J.H., 2012. Introduction to wildfire behavior modeling. *National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer*.

Sharma, R., Kothari, M., Taylor, C.N. and Postlethwaite, I., 2010, June. Cooperative target-capturing with inaccurate target information. In *Proceedings of the 2010 American Control Conference* (pp. 5520-5525). IEEE.

Shortliffe, E.H. and Buchanan, B.G., 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical biosciences*, 23(3-4), pp.351-379.

Slotine, J.J.E. and Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control* Englewood Cliffs. NJ.

Sweeney, A.W., Beebe, N.W. and Cooper, R.D., 2007. Analysis of environmental factors influencing the range of anopheline mosquitoes in northern Australia using a genetic algorithm and data mining methods. *Ecological Modelling*, 203(3-4), pp.375-386.

Thomas, P.H. and Pickard, R.W., 1961. Fire spread in forest and heathland materials. *Reproduced from Report on Forest Research for the year ended*, pp.105-109.

Thomas, P.H., 1963. The size of flames from natural fires. In 'Ninth Symposium (International) on Combustion', 27 August-1 September 1962, Pittsburgh, PA.

Weise, D.R. and Biging, G.S., 1996. Effects of wind velocity and slope on flame properties. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(10), pp.1849-1858.

Yee, T.W. and Mitchell, N.D., 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of vegetation science*, 2(5), pp.587-602.

Zalesak, S.T., 1979. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *Journal of Computational Physics*, 31(3), pp.335-362.

Zheng, Z., Huang, W., Li, S. and Zeng, Y., 2017. Forest fire spread simulating model using cellular automaton with extreme learning machine. *Ecological Modelling*, 348, pp.33-43.

### Διαδικτυακές πηγές

- [http://www.firewords.net/definitions/flaming\\_front.htm](http://www.firewords.net/definitions/flaming_front.htm) p11
- <https://www.nwccg.gov/term/glossary/heat-per-unit-area> p11
- <http://estia.hua.gr/file/lib/default/data/3403/theFile> p80
- [https://www.firescience.gov/projects/06-3-3-13/project/06-3-3-13\\_a\\_managers\\_guide\\_to\\_canopy\\_fuels.pdf](https://www.firescience.gov/projects/06-3-3-13/project/06-3-3-13_a_managers_guide_to_canopy_fuels.pdf) p15