



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πυρκαγιά στη Βορειοανατολική Αττική της 23^{ης}
Ιουλίου 2018: Χωρική αποτύπωση των οικιών,
κατηγοριοποίηση και μελέτη των δομικών
υλικών τους ως καύσιμη ύλη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΡΚΟΥ Ι. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέποντες: Κωνσταντίνος Συνολάκης

Χανιά, Ιούλιος 2019



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πυρκαγιά στη Βορειοανατολική Αττική της 23^{ης}
Ιουλίου 2018: Χωρική αποτύπωση των οικιών,
κατηγοριοποίηση και μελέτη των δομικών
υλικών τους ως καύσιμη ύλη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΑΡΚΟΥ Ι. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέποντες: Κωνσταντίνος Συνολάκης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15 Ιουλίου 2019.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Συνολάκης
Καθηγητής

.....
Ελευθερία Ψυλλάκη
Καθηγήτρια

.....
Νικόλαος Καλογεράκης
Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2019



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Copyright ©–All rights reserved Μάρκος Ι. Αλεξόπουλος, 2019.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

(Υπογραφή)

.....

Μάρκος Ι. Αλεξόπουλος

Περίληψη

Αναμφισβήτητη συνιστώσα της κλιματικής αλλαγής είναι η παγκόσμια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, η οποία ευνοεί την συχνότερη πρόκληση πυρκαγιών. Έρευνες επικεντρώνονται κυρίως στην καύσιμη ύλη πυρκαγιών υπαίθρου, με απόρροια την απουσία στοιχείων για την περίπτωση φωτιάς σε αστικές περιοχές. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην επιρροή των κατασκευαστικών υλικών των κτιρίων κατά την καταστροφή παράκτιων περιοχών της Βορειοανατολικής Αττικής, τον Ιούλιο του 2018. Τρεις χιλιάδες τριακόσιες τέσσερις κατασκευές αποτυπώθηκαν σε χάρτη, με κύρια περιγραφικά στοιχεία τα δομικά υλικά και τον βαθμό ζημιάς. Ακολούθησε επεξεργασία των παραμέτρων με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της πυρκαγιάς για την εκτίμηση της έντασης της. Κατόπιν εξαγωγής των δεδομένων, έγινε συσχέτιση μεταξύ τους με τη χρήση στατιστικών μεθόδων και ανάλυσης ευαισθησίας. Από τα χίλια εκατόν σαράντα τέσσερα κτίρια που υπέστησαν ζημιά, σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνουν οι προκατασκευασμένες οικίες, δηλαδή κατασκευές που αποτελούνται από συναρμολογούμενα μέλη. Αντιθέτως, οι περισσότερες κατασκευές που κτίστηκαν εφαρμόζοντας τα πρότυπα πυρασφάλειας του Ευρωκώδικα, δεν υπέστησαν σημαντικές λειτουργικές βλάβες. Με την ολοκλήρωση της μελέτης επιβεβαιώθηκε ότι οι περιβαλλοντικές παράμετροι είναι πάντοτε καθοριστικές στην εξέλιξη μιας πυρκαγιάς. Ωστόσο, η κατασκευή κτιρίων με πυράντοχα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφές μικρότερου μεγέθους και μείωση ανθρώπινων απωλειών.

Λέξεις Κλειδιά

Μάτι, Νέος Βουτζάς, Πυρκαγιά, Δομικά υλικά, Χωρική αποτύπωση, Μοντελοποίηση, Ανάλυση ευαισθησίας, ArcGIS, Farsite

Abstract

A strong component of climate change is an increase in average global temperature, leading to a rise in fire frequency. Research is mainly addressing wildland fire fuel, causing a lack of evidence regarding fires in urban areas. This study aims to reveal how structural materials influenced the destruction of the coastal areas in the Northeast region of Attica, in July 2018. Three thousand three hundred and four structures were spatially documented during the survey, while concomitantly registering their damage state and construction materials. The collected data was processed using Geographic Information Systems in concurrence with fire modelling to determine fire intensity. After completion, statistical methods and sensitivity analysis were conducted in order to assess the correlation between fire intensity and building damage state. Out of one thousand one hundred and forty four damaged structures, a large percentage were prefabricated buildings. Conversely, most structures implementing Eurocode standards did not suffer significant damage. Overall, the study confirmed that environmental factors determine fire magnitude to a great extent. However, implementation of non-flammable structural material could contribute to lower fire magnitude and a reduction in casualties.

Keywords

Mati, Neos Voutzas, Fire, Construction material, Spatial documentation, Modelling, Sensitivity analysis, ArcGIS, Farsite

à Alexandra, Théodore et Nicole

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κώστα Συνολάκη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική μου εργασία στο εργαστήριο Φυσικών Καταστροφών, Τσουνάμιας και Παράκτιας Μηχανικής, και για την ευκαιρία να συμμετάσχω σε μία έρευνα παγκόσμιας εμβέλειας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα: Τον Βασίλη Σκαναβή, που με έκανε να νιώσω μέλος της ομάδας, και για τις σημαντικές γνώσεις που μου προσέφερε σε μεθόδους έρευνας και επίλυσης προβλημάτων. Τον Νίκο Καλλιγέρη, για την σημαντική συμβολή του στην πρόοδο της μελέτης και για τις ιδέες του σε κρίσιμα ζητήματα. Τον Γιώργο Καραγιάννη, για τις προτάσεις του στο αντικείμενο της έρευνας και την θερμή υποστήριξη του στην εκπόνηση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πάυλο για τις ιδέες του στην επεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	i
Ευχαριστίες	iii
Περιεχόμενα	vi
Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κατάλογος Πινάκων	ix
1 Εισαγωγή	1
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1 Ανατομία πυρκαγιών	3
2.1.1 Το φαινόμενο της καύσης	3
2.1.2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών	4
2.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά πυρκαγιών	4
2.1.3.1 Καύσιμη ύλη	4
2.1.3.2 Τοπογραφία	8
2.1.3.3 Μετεωρολογικές συνθήκες	8
2.1.3.4 Πολεοδομικός σχεδιασμός	8
2.1.3.5 Δομικά υλικά κατασκευών	9
2.2 Γεωχωρική μοντελοποίηση με τη χρήση ΓΣΠ	10
2.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα	10
2.2.2 Περιγραφικά δεδομένα	11
2.2.3 Εισαγωγή δεδομένων - Γεωγραφικά συστήματα αναφοράς	11
2.3 Μοντελοποίηση πυρκαγιών	12
2.3.1 Κατηγορίες μοντέλων πυρκαγιάς	12
2.3.2 Μοντέλο Rothermel	13
2.3.3 Μοντέλα προσομοίωσης δύο διαστάσεων	13
2.4 Μοντέλο Farsite	14

2.4.1	Προσομοίωση πυρκαγιάς σύμφωνα με την αρχή του Huygens	14
2.4.1.1	Μετατροπή για επιφάνειες με κλίση	15
2.4.1.2	Διανύσματα ανέμου και κλίσης	16
2.4.1.3	Ελλειψοειδείς διαστάσεις	17
2.4.1.4	Πυρκαγιές επιφανείας	17
2.4.1.5	Πυρκαγιές κόμης	18
2.4.1.6	Επιτάχυνση φλόγας	20
2.4.1.7	Μετάδοση καύτρας	21
2.5	Ανάλυση ευαισθησίας - Fragility curves	24
2.5.1	Ανάλυση ευαισθησίας σε πυρκαγιές	25
3	Περιοχή μελέτης	26
3.1	Συμβάντα της 23 ^{ης} Ιουλίου 2018	27
3.2	Καύσιμη ύλη	28
3.3	Τοπογραφία	29
3.4	Μετεωρολογικά δεδομένα	29
3.5	Πολεοδομικός σχεδιασμός	31
3.6	Δομικά υλικά κατασκευών	31
4	Μεθοδολογία	32
4.1	Μέθοδος δειγματοληψίας	32
4.1.1	Στοιχεία που καταγράφηκαν εντός του λογισμικού Magnet Field	33
4.1.1.1	Κατηγορίες κτιρίων βάσει της ζημιάς που δέχτηκαν	33
4.1.1.2	Κατηγορίες κτιρίων βάσει των δομικών υλικών	35
4.2	Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων	37
4.2.1	Χωρική μελέτη δεδομένων του πεδίου	37
4.2.2	Μοντελοποίηση πυρκαγιάς	38
4.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας	39
5	Αποτελέσματα	41
5.1	Δειγματοληψία δεδομένων	41
5.2	Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων	44
5.2.1	Γεωχωρική επεξεργασία - ArcGIS	44
5.2.1.1	Δυτικά της Λεωφόρου Μαραθώνος	47
5.2.1.2	Ανατολικά της Λεωφόρου Μαραθώνος	49
5.2.2	Μοντελοποίηση πυρκαγιάς - Farsite	51
5.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας	52
6	Συζήτηση	53
6.1	Πόρισμα	53
6.2	Αδυναμίες ερευνητικής μεθόδου	53
6.3	Μελλοντικές επεκτάσεις	54

7 Συμπεράσματα

55

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ποσοστά αύξησης καμένων εκτάσεων (σε σχέση με την περίοδο 1950-2003) στη Δυτική Ακτή της Αμερικής με την αύξηση 1 °C (National Climatic Data Center: Καταχώρηση κλιματικών δεδομένων και δεδομένων καμένων εκτάσεων, με μεθόδους όπως αναπτύχθηκαν από τους Littell και συν.(2009))[61, 48]	1
2.1	Τρίγωνο της Φωτιάς	3
2.2	Διαστάσεις ελλειψοειδών κυμάτων a , b , c , που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ανάπτυξης πυρκαγιάς, βάσει των σχέσεων 2.1 & 2.2.	15
2.3	Κάυσιμα κόμης δέντρων που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό Farsite	20
2.4	Διάγραμμα ευαισθησίας	24
3.1	Περιοχή μελέτης	26
3.2	Συνολική καμένη έκταση (12.7 km ²)	27
3.3	Κάυσιμη ύλη περιοχής μελέτης	28
3.4	Τοπογραφία περιοχής μελέτης	29
4.1	PDA που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία	32
4.2	Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηρισμένο ως άσπρο. Περιοχή: Νέος Βουτζάς	33
4.3	Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηρισμένο ως πράσινο. Περιοχή: Νέος Βουτζάς	34
4.4	Προκατασκευασμένο κτίριο, χαρακτηρισμένο ως κίτρινο. Περιοχή: Μάτι	34
4.5	Προκατασκευασμένο κτίριο, χαρακτηρισμένο ως κόκκινο. Περιοχή: Μάτι . . .	35
4.6	Κατασκευή ιδεατού διαγράμματος ευαισθησίας	39
4.7	Τελικό ιδεατό διάγραμμα ευαισθησίας	40
5.1	Σημεία κατόπιν ολοκλήρωσης της δειγματοληψίας	41
5.2	Ποσοστό κτιρίων βάσει καταλληλότητας χρήσης	42
5.3	Ποσοστό κτιρίων βάσει οροφής	43
5.4	Οικόπεδα με χαρακτηρισμό καταλληλότητας χρήσης	44
5.5	Ποσοστό κτιρίων βάσει καταλληλότητας χρήσης	45
5.6	Ποσοστό κτιρίων βάσει δομικής κατηγορίας	45
5.7	Ποσοστό κατεστραμμένων κτιρίων βάσει δομικής κατηγορίας	46

5.8 Ποσοστό κατεστραμμένων κτιρίων βάσει οροφής	46
5.9 Ποσοστό καταστροφής ανάλογα την περιοχή	47
5.10 Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στον Νέο Βουτζά	47
5.11 Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στον Νέο Βουτζά, βάσει είδους οροφής	48
5.12 Ποσοστό προκατασκευασμένων κτιρίων στον Νέο Βουτζά, βάσει είδους οροφής	48
5.13 Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι	49
5.14 Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι, βάσει είδους οροφής	49
5.15 Ποσοστό προκατασκευασμένων κτιρίων στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι, βάσει είδους οροφής	50
5.16 Εξέλιξη της πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης	51
5.17 Δριμύτητα πυρκαγιάς σε όρους εκλυόμενης ενέργειας στον χώρο (kWm^{-1}) . .	51
5.18 Διαγράμματα ευαισθησίας	52

Κατάλογος Πινάκων

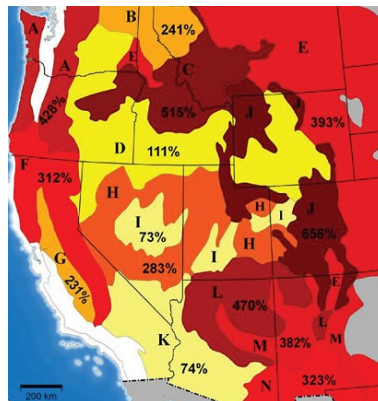
2.1	13 μοντέλα καύσιμης ύλης από τους Andrews & Kalabokidis	6
2.2	Επτά μοντέλα καύσιμης ύλης από τον Dimitrakopoulos	7
2.3	13 μοντέλα καύσιμης ύλης από τους Scott & Burgan	7
3.1	Μετεωρολογικά δεδομένα Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών - Σταθμός Πεντέλης	30
4.1	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης	33
4.2	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικών υλικών	35
4.3	Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης	38
5.1	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης	42
5.2	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικών υλικών	42
5.3	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει της οροφής τους	43
5.4	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης	45
5.5	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας	45
5.6	Ταξινόμηση κατεστραμμένων κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας	46
5.7	Ταξινόμηση κατεστραμμένων κατασκευών βάσει οροφής	46
5.8	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας	47
5.9	Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας	49

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι πυρκαγιές υπαίθρου αποτελούν σημαντικές φυσικές καταστροφές και οι επιπτώσεις τους μπορεί να είναι παγκόσμιας κλίμακας. Αποτελούν σημαντική συνιστώσα των προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης Γη, όπως η αλλαγή κλίματος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συνιστούν εκδήλωση του τρόπου με τον οποίο η φύση λειτουργεί σε ένα περιβάλλον πυριγενές όσον αφορά τη βλάστηση και τις μετεωρολογικές συνθήκες, με καταστροφικές συνέπειες που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία και εξέλιξη των φυσικών και ανθρωπογενών οικοσυστημάτων.

Κύρια συνιστώσα της αλλαγής κλίματος είναι η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Απόρροια αυτής της αύξησης είναι η συχνότερη παρουσία πυρκαγιών. Πράγματι, στις ΗΠΑ οι πυρκαγιές υπαίθρου καταλαμβάνουν την διπλάσια έκταση που καταλάμβαναν το 1970 και η ετήσια περίοδος διάρκειας τους είναι μεγαλύτερη κατά 78 ημέρες. Βάσει προβλέψεων[89], μία μέση ετήσια αύξηση 1 °C οδηγεί στην αύξηση καμένων δασικών περιοχών έως και 600%.



Σχήμα 1.1: Ποσοστά αύξησης καμένων εκτάσεων (σε σχέση με την περίοδο 1950-2003) στη Δυτική Ακτή της Αμερικής με την αύξηση 1 °C (National Climatic Data Center: Καταχώρηση κλιματικών δεδομένων και δεδομένων καμένων εκτάσεων, με μεθόδους όπως αναπτύχθηκαν από τους Littell και συν.(2009))[61, 48]

Τον 21ο αιώνα έχουν προκληθεί πυρκαγιές σε περιοχές σε όλες τις ηπείρους, με αποτέλεσμα την καταστροφή χλωρίδας και πανίδας, την πρόκληση υλικών ζημιών και την απώλεια ανθρώπινων ζώων. Ανάμεσα σ' αυτές, η Πορτογαλία (2017) είχε 64 θύματα, 250 τραυματίες και 460,000 καμένα στρέμματα δάσους, η Αυστραλία (2009) 173 θύματα και ισοπέδωση 2,000 κατοικιών, η Ρωσία (2015) 34 θύματα και καύση 10,000,000 στρεμμάτων, και η Αμερική (2018), όπου στην πολιτεία της Καλιφόρνια έχασαν την ζωή τους 103 άνθρωποι, τραυματίστηκαν 80 και κάηκαν 7600 στρέμματα γης.

Στην Ελλάδα έχουν σημειωθεί πυρκαγιές μεγάλου μεγέθους, όπως στην Εύβοια (2007) με 78 θύματα, 2,700,000 στρέμματα καμένων εκτάσεων και την ισοπέδωση 1,500 κατοικιών. Επισημαίνονται επίσης οι πυρκαγιές στον Κοκκινάρη Κηφισιάς (1981) με 6,000, στη Βαρυμπόμπη (1986) με 40,000, στον Αυλώνα (1992) με 55,000 και στη Πεντέλη (1995, 1998, 2000, 2007) με 200,000 στρέμματα καμένης γης.

Από τα παραπάνω γεγονότα συνάγεται πως πρόκειται για φαινόμενο που παρουσιάζεται με μεγάλη συχνότητα στα δύο ημισφαίρια της Γης. Αφήνει στο διάβα του οικολογικά και τεχνολογικά συντρίμια, ενώ παράλληλα θίγει την κοινωνική και οικονομική ισορροπία της χώρας που προσβάλλεται απ' αυτό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πυρκαγιά που ξέσπασε βορειοανατολικά της Αττικής στους Δήμους Μαραθώνα και Ραφήνας, στις περιοχές Μάτι/Νέος Βουτζάς/Κόκκινο Λιμανάκι, την 23^η Ιουλίου 2018. Η εξέλιξη της στο σύντομο χρονικό διάστημα τριών ωρών προκάλεσε τον θάνατο 102 και τον τραυματισμό 148 ανθρώπων. Η συνολική έκταση που καταστράφηκε ανέρχεται στα 12,800 στρέμματα, εκ των οποίων τα 6,900 αντιστοιχούν σε οικιστική περιοχή, ενώ τα υπόλοιπα σε δασικές εκτάσεις.

Κίνητρο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των κτιρίων που ανήκουν στην οικιστική περιοχή απ' όπου πέρασε το φλέγον μέτωπο. Πιο συγκεκριμένα, γίνονται αντικείμενο έρευνας ως παράμετρος στην συμπεριφορά της φωτιάς και εξετάζεται ο βαθμός επιρροής των δομικών υλικών τους στην εξάπλωση της. Αναλύονται ποσοτικά και ποιοτικά, όπου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατασκευή τους, με τον χαρακτηρισμό του βαθμού καταστροφής τους, ενώ τέλος γίνεται συσχέτιση μεταξύ αυτών, έτσι ώστε να εξαχθεί ένα τεκμηριωμένο πόρισμα που δείχνει την σχέση αιτίου-αποτελέσματος με τη χρήση επιστημονικών μεθόδων.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα είδη των πυρκαγιών και τους παράγοντες εξάπλωσης τους. Παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

2.1 Ανατομία πυρκαγιών

2.1.1 Το φαινόμενο της καύσης

Η καύση απαιτεί τρία στοιχεία τα οποία συνθέτουν το 'τρίγωνο της φωτιάς'[67, 62]:

1. Καύσιμη ύλη
2. Θερμότητα, για την έναρξη και διατήρηση της
3. Οξυγόνο, για τις φλόγες



Σχήμα 2.1: Τρίγωνο της Φωτιάς

Η καύση αποτελεί ειδική μορφή οξείδωσης κατά την οποία μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας απελευθερώνονται με μεγάλη ταχύτητα από τα καύσιμα. Άλλες αντιδράσεις οξείδωσης πραγματοποιούνται σταδιακά σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο οι χημικές αλλαγές που προκύπτουν δεν ακολουθούνται από σημαντικές αλλαγές της θερμοκρασίας[27].

Όταν ένα εύφλεκτο ή καύσιμο υλικό βρεθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία παρουσία οξειδωτικού παράγοντα, τότε ξεκινάει η φωτιά. Αυτή η κατάλληλη θερμοκρασία ονομάζεται θερμοκρασία ανάφλεξης ή σημείο ανάφλεξης και είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Μία σπύθα, κάποια άλλη φωτιά και πηγές έντονης θερμικής ακτινοβολίας (όπως ο ήλιος και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως) είναι οι κύριες πηγές φωτιάς. Όταν δεν υπάρχει κάποια εξωτερική πηγή θερμότητας μπορεί να συμβεί ανάφλεξη, η οποία ονομάζεται αυτανάφλεξη[77].

2.1.2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών

Η συμπεριφορά της πυρκαγιάς χαρακτηρίζεται βάσει των παρακάτω στοιχείων[82]:

1. Την ταχύτητα εξάπλωσης της (kmh^{-1})
2. Το μήκος της φλόγας (m), το οποίο μετράται από το μέσον της βάσης της ως την κορυφή της. Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί στην ένταση της φωτιάς, δηλαδή στο θερμικό φορτίο ανά δευτερόλεπτο, ανά μέτρο μετώπου (kWm^{-1})
3. Το μήκος της περιμέτρου της πυρκαγιάς (m) και ο ρυθμός αύξησης του

2.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά πυρκαγιών

Το περιβάλλον στο οποίο εκτυλίσσεται η πυρκαγιά χαρακτηρίζει την εξάπλωση της. Το είδος της καύσιμης ύλης χαρακτηρίζει την έκταση που μπορεί να έχει ένα μέτωπο φωτιάς. Ανάλογα με φυσικές παραμέτρους όπως το ανάγλυφο της περιοχής και η διεύθυνση του ανέμου, η ταχύτητα και ο προσανατολισμός της εξάπλωσης αλλάζουν ραγδαία. Σε αστικές περιοχές η ρυμοτομία και τα υλικά των σπιτιών αποτελούν καθοριστικό στοιχείο για το μέγεθος της ζημιάς.

2.1.3.1 Καύσιμη ύλη

Η καύσιμη ύλη αποτελεί το κύριο στοιχείο του τριγώνου της φωτιάς. Η ποιότητα, η ποσότητα και η κατανομή της βλάστησης καθορίζουν το μέγεθος και την ένταση της καταστροφής. Η καύσιμη ύλη διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες[83]:

1. Υποεδάφια καύσιμη ύλη

Περιλαμβάνονται τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της Γης, δηλαδή οργανικά υλικά (χούμος), ρίζες κορμών δέντρων και κομμάτια χλωρίδας που έχουν απορροφηθεί από το υπέδαφος. Η καύσιμη αυτή ύλη καίγεται, αλλά με αργούς ρυθμούς λόγω της έλλειψης απαραίτητου οξυγόνου. Επομένως η συνεισφορά της στην εξάπλωση της φωτιάς είναι μικρή.

2. Επιεδάφια καύσιμη ύλη

Περιλαμβάνονται τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται στο έδαφος ή ακριβώς πάνω από αυτό. Χόρτα, θάμνοι, μικρά δενδρύλλια και νεκρή καύσιμη ύλη που χαρακτηρίζεται από μικρά ποσοστά υγρασίας αποτελούν την κύρια πηγή ανάφλεξης. Η πληθώρα οξυγόνου

στην επιφάνεια διευκολύνει την διαρκή καύση τους, η οποία χαρακτηρίζει την διεύθυνση και ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς.

3. Εναέρια καύσιμη ύλη

Περιλαμβάνονται αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται στην κόμη¹. Τα κλαδιά και τα φύλλα των δέντρων, οι υψηλοί θάμνοι και η βιομάζα που εντοπίζεται στην κόμη συμβάλλουν σημαντικά στο μήκος της φωτιάς, διότι επιτρέπουν την μετάδοση από καύτρες σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι εξαπλώνεται ακόμα και σε περιοχές στο διάβα της όπου υπάρχουν διάκενα καύσιμης ύλης.

Σημαντικό στοιχείο που χαρακτηρίζει την αναφλεξιμότητα ενός καυσίμου είναι η περιεκτικότητά του σε υγρασία. Η θερμοκρασία για την ανάφλεξη είναι 300 °C. Πρέπει όμως αρχικά να εξατμιστεί το νερό που περιέχει στους 100 °C. Η θέρμανση και η εξάτμιση του νερού απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Επομένως όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα σε νερό εντός του υλικού, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας απαιτείται για την ανάφλεξή του[83].

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Υπάρχουν τρία μοντέλα καύσιμης ύλης που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση στους προσομοιωτές συμπεριφοράς των πυρκαγιών υπαίθρου. Η πρώτη κατηγοριοποίηση έγινε από τον Andrews (1986)[60] και προσαρμόστηκε το 2002 από τον Kalabokidis[39] για μεσογειακή βλάστηση. Η δεύτερη κατηγοριοποίηση σχηματίστηκε από τον Dimitrakopoulos (2002)[9]. Η τρίτη κατηγοριοποίηση αναπτύχθηκε το 2005 από τους Scott & Burgan[70]. Αναπτύχθηκαν με σκοπό την προσαρμογή τους στις προσομοιώσεις πυρκαγιών βάσει των εξισώσεων του Rothermel (1972)[64].

¹Ως κόμη χαρακτηρίζεται το σύνολο των κλαδιών και της φυλλωσιάς ενός δέντρου

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Andrews & Kalabokidis			
Μοντέλο Ύλης	Καύσιμης	Περιγραφή Andrews	Περιγραφή Kalabokidis
1		Short grasses (30 cm)	Ποολίβαδα
2		Timber (grass and under- story)	Δασολίβαδα
3		Tall grass (76 cm)	Λιβάδια (υψηλή βλάστηση)
4		Chaparral (18 cm)	Θαμνώνες (αείφυλλα- σκληρόφυλλα)
5		Brush (61 cm)	Θαμνολίβαδα (φυλλοβόλα)
6		Dormant brush, hardwood slash	Θαμνότοποι (ξηροφυτικοί)
7		Southern rough	Θαμνότοποι (Μερικώς δασο- σκεπείς)
8		Closed timber litter	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
9		Hardwood litter	Φυλλοβόλα δάση (ξηροτάπη- τας)
10		Timber (litter and understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
11		Light logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μικρή ποσότητα)
12		Medium logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μέτρια ποσότητα)
13		Heavy logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (με- γάλη ποσότητα)

Πίνακας 2.1: 13 μοντέλα καύσιμης ύλης από τους Andrews & Kalabokidis

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Dimitrakopoulos	
Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Περιγραφή
1	Χαμηλά μακί (έως 1.5 m) - Evergreen schlerophyllous shrublands (up to 1.5 m)
2	Υψηλά μακί (1.5-3 m) - Evergreen schlerophyllous shrublands (1.5-3 m)
3	Πρινώνες (έως 2.0 m) - Quercus coccifera (up to 2.0 m)
4	Φρύγανα I (Ασφάκα) - Phrygana I (Phlomis fruticosa)
5	Φρύγανα II (Αστοιβίδα) - Phrygana II (Sarcopoterium spinosum)
6	Μεσογειακά χορτολιβάδα - Mediterranean grasslands
7	Ξηροβελονοτάπητας σε μεσογειακά δάση πεύκης-Mediterranean pine needle litter

Πίνακας 2.2: Επτά μοντέλα καύσιμης ύλης από τον Dimitrakopoulos

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Scott & Burgan		
Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Περιγραφή Scott & Burgan	Απόδοση στην νεοελληνική
GR1, GR2, GR3, GR4, GR5, GR6, GR7, GR8, GR9	Nearly pure grass/or forb type (grass)	Ποολίβαδα
GS1, GS2, GS3, GS4	Mixture of grass and shrub up to 50 shrub coverage (grass-shrub)	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον 50% κάλυψη θάμνων)
SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9	Shrub cover at least 50 shrub coverage (shrub)	Θαμνότοποι
TU1, TU2, TU3, TU4, TU5	Grass or shrubs mixed with litter from forest canopy (timber-understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6, TL7, TL8, TL9	Dead and down woody fuel (litter) beneath a forest canopy (timber-litter)	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
SB1, SB2, SB3, SB4	Activity fuels (slash) or debris from wind damage (slash-blowdown)	Υπολείμματα υλοτομιών
NB1, NB2, NB3, NB8, NB9	Insufficient wildland fuel (non-burnable)	Υλικά που δεν επιδέχονται καύση

Πίνακας 2.3: 13 μοντέλα καύσιμης ύλης από τους Scott & Burgan

2.1.3.2 Τοπογραφία

Η κλίση επηρεάζει άμεσα τον τρόπο εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η απότομη υψομετρική διαφορά δημιουργεί στην περιοχή ένα εύρος τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε μεγαλύτερο υψόμετρο η ένταση της είναι μεγαλύτερη, με μικρότερη θερμοκρασία και απώλεια υγρασίας[54], με αποτέλεσμα την δημιουργία σημείων με χαμηλότερη πίεση, όπου οι άνεμοι πνέουν προς αυτά. Όταν ο άνεμος συναντά ορεινό εμπόδιο, επιταχύνεται στην κορυφή του και επιβραδύνεται στους πρόποδες[20]. Ειδικότερα, στην περίπτωση που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευστάθεια και πνέει κάθετα σε αυτό, προκαλεί στην υπήνεμη πλευρά του εμποδίου ισχυρές αναταράξεις και στροβιλισμούς. Έτσι, η ταχύτητα εξάπλωσης είναι μεγαλύτερη προς τα ανάντη και μικρότερη προς τα κατόντη. Επίσης, σε μεσογειακό ανάγλυφο, στις νότιες/νοτιοδυτικές/δυτικές πλαγιές, η βλάστηση ξεραίνεται πιο γρήγορα απ' ό τι σε πραγματική διαφορετικού προσανατολισμού, αλλά βρίσκεται ταυτόχρονα σε μικρότερη ποσότητα, με αποτέλεσμα το μέγεθος των πυρκαγιών να είναι και αυτό μικρότερο[54].

2.1.3.3 Μετεωρολογικές συνθήκες

Αποτελούν την πιο ασταθή μεταβλητή στο υπό μελέτη περιβάλλον λόγω της τυχαιότητας τους και της δυσκολίας πρόβλεψής τους. Θεωρώντας τους υπόλοιπους παράγοντες σταθερούς, το μέγεθος της καταστροφής αλλάζει σημαντικά ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Το κλίμα της εποχής, τα χαρακτηριστικά του ανέμου και η σύσταση της ατμόσφαιρας τη δεδομένη στιγμή αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην έκταση του φαινομένου. Οι κύριες παράμετροι του καιρού που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πυρκαγιών υπαίθρου είναι[84]:

- **Ο άνεμος**

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο περισσότερο οι φλόγες αποκτούν κλίση προς την κατεύθυνση του ανέμου. Επομένως αυξάνεται η μεταφορά της θερμότητας και προθερμαίνεται η καύσιμη ύλη που βρίσκεται εμπρός, με την διάδοση της φωτιάς να γίνεται αποδοτικότερη και τα διάκενα της καύσιμης ύλης να μην αποτελούν πλέον εμπόδιο. Ανάλογα τον τύπο της καύσιμης ύλης ο αέρας επιδρά διαφορετικά. Όσο πιο λεπτά και ασυμπίεστα είναι τα καύσιμα, τόσο μικρότερη ταχύτητα ανέμου απαιτείται.

- **Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας**

Αν το πεδίο της θερμοκρασίας επιτρέπει την κάθετη κίνηση του ανέμου και επικρατούν γενικότερα συνθήκες αστάθειας, το περιβάλλον ανανεώνεται και τροφοδοτείται με μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου, ενώ παράλληλα μειώνεται το ποσοστό υγρασίας.

Η ύπαρξη νεφώσεων, τα κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα επιδρούν κυρίως στην περιεκτικότητα υγρασίας της καύσιμης ύλης.

2.1.3.4 Πολεοδομικός σχεδιασμός

Οι πυρκαγιές αλληλεπιδρούν με όλα τα στοιχεία του οικοσυστήματος της Γης, με την ένταση, έκταση και την συχνότητά τους να αυξάνεται διαχρονικά[91, 11, 40, 58]. Απώλειες

παρατηρούνται όμως και σε κοινότητες εντός χωροταξικού σχεδίου, παρά τις προσπάθειες για την προσεγμένη αναδάσωση καύσιμης ύλης στην υπαίθρο γύρω από οικιστικές περιοχές, την εφαρμογή πρότυπων σχεδίων (Ευρωκώδικας) στην κατασκευή κτιρίων και την ανάπτυξη μεθόδων καταστολής πυρκαγιών. Η χωροθέτηση αποτελεί βασική παράμετρο επιδείνωσης των επιπτώσεων[59]. Πιθανή εξήγηση αυτού του γεγονότος είναι η επιρροή που έχουν τα ανθρώπινα έργα υποδομής στην ανάφλεξη και την συχνότητα των πυρκαγιών[74, 75, 45].

Γενικά, η συχνότερη αιτία τους είναι ο άνθρωπος[74, 75, 45, 41], ενώ η αύξηση του πληθυσμού και η αστική ανάπτυξη ταυτίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα τους. Πυκνοκατοικημένες περιοχές συμβάλλουν στην εξάπλωση της από κτίριο σε κτίριο, ανάλογα με το πόσο εύφλεκτα είναι τα δομικά τους υλικά[55, 72]. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες ζημιές καταγράφονται σε οικισμούς μικρότερης πυκνότητας που παρεμβάλλονται από βλάστηση[63], και όταν η πρόσβαση της πυροσβεστικής σε απομονωμένες κατοικίες είναι δυσκολότερη[73].

2.1.3.5 Δομικά υλικά κατασκευών

Τα δομικά υλικά κατατάσσονται σύμφωνα με το βαθμό της αναφλεξιμότητάς τους σε κατηγορίες. Η συμπεριφορά των δομικών τμημάτων στην πυρκαγιά αξιολογείται ανάλογα με την αντίστασή τους σε φωτιά. Παράμετροι που συμβάλλουν σε αυτή είναι η πυκνότητα τους και η χημική τους σύσταση. Οι κατηγορίες τους είναι[85]:

1. Άφλεκτα υλικά (A), εκ των οποίων αναφέρονται:

- (A_1) Μπετόν, μέταλλα, φυσικοί λίθοι, γυαλί, κεραμικά, δομικές ορυκτές πλάκες, πλάκες από ίνες ορυκτών, γλουτίνη και επιχρίσματα
- (A_2) Γυψοσανίδες, πλάκες ινοτσιμέντου, υαλόμαλλα, μπετόν διογκωμένης πολυστερίνης και παράγωγα που αναφέρονται στην κατηγορία (A_1)

2. Δύσκολα αναφλεγόμενα υλικά (B_1), εκ των οποίων αναφέρονται: Μονωτικά συνθετικά υλικά, ίνες ορυκτών, σύνθετα μονωτικά υλικά, συστήματα σύνθετων θερμομονωτικών υλικών, μονωτικά επιχρίσματα, πυροπροστατευτικές επικαλύψεις για υφάσματα και ξύλα, επικαλύψεις πατωμάτων

3. Κανονικά αναφλεγόμενα υλικά (B_2), εκ των οποίων αναφέρονται: Ξύλο και πλάκες από προϊόντα ξυλείας με πυκνότητα πάνω από 400 kgm^{-3} και πάχος μεγαλύτερο από 2 mm, διακοσμητικές ινσανίδες με επικάλυψη από συνθετικό υλικό (μελαμίνη, φορμικά), σωλήνες και μονωτικές λωρίδες, τα υπόλοιπα δομικά και σύνθετα υλικά ανάμεσα στα οποία και διάφορα προϊόντα αναφερόμενα στην κατηγορία (B_1) με ή χωρίς πυροπροστατευτική ενίσχυση

Συνάγεται επομένως πως η επιλογή των δομικών στοιχείων συμβάλλει στην ενίσχυση ή την παρεμπόδιση εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς. Η αναφλεξιμότητα και η ικανότητα των υλικών να άγουν την θερμότητα αυξάνουν το μέγεθος της καταστροφής και τον κίνδυνο της ανθρώπινης απώλειας.

2.2 Γεωχωρική μοντελοποίηση με τη χρήση ΓΣΠ

Για την οπτικοποίηση και την περαιτέρω ανάλυση χωρικών δεδομένων χρησιμοποιούνται Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Πρόκειται για οργανωμένη συλλογή υπολογιστικών συστημάτων, λογισμικού και χωρικών δεδομένων. Πραγματοποιείται καταχώρηση, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά το γεωγραφικό περιβάλλον[79, 56, 47]. Δημιουργούν μοντέλα που δομούν ρεαλιστικά τον πραγματικό κόσμο και προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων που σχετίζονται με χωρικά προβλήματα[38]. Τα δεδομένα σε ένα ΓΣΠ αναπαρίστανται μέσω επιπέδων πληροφορίας, τα οποία μπορούν να παρομοιαστούν με διαφανείς σελίδες που περιέχουν διαφορετικό είδος πληροφορίας[78].

2.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα χαρτογραφικά στοιχεία χωρίζονται ανάλογα τον τρόπο καταχώρησης και επεξεργασίας σε Raster (εικονοκυτταρικά) και Vector (διανυσματικά)[80].

1. Διανυσματικό μοντέλο (Vector)

Τα δεδομένα αντιπροσωπεύονται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες πάνω σε ένα ή παραπάνω επίπεδα πληροφορίας.

- **Σημεία**

Η διάσταση τους είναι μηδενική και η θέση τους στο χώρο προσδιορίζεται με τη χρήση απόλυτων ή σχετικών συντεταγμένων. Απεικονίζουν τη θέση γεωτρήσεων, πηγών, πυροσβεστικών κρουνών κοκ.

- **Γραμμές**

Οι γραμμές (σύνδεσμοι) που εισάγονται σε ένα γεωγραφικό σύστημα ενώνονται μεταξύ τους μέσω κόμβων[80]. Χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση οδών, ακτογραμμών, δικτύων ύδρευσης κοκ.

- **Επιφάνειες**

Οι επιφάνειες (πολύγωνα) απεικονίζονται με διάφορες μεθόδους. Το απλούστερο μοντέλο είναι το Spaghetti, όπου δημιουργείται ένα αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται οι συντεταγμένες των σημείων εντός της επιφάνειας[80]. Επιφάνειες μπορούν να αναπαριστούν ιδιωτικά οικόπεδα, δασικές εκτάσεις, αρχαιολογικούς χώρους κοκ.

2. Εικονοκυτταρικό μοντέλο (Raster)

Εκφράζονται με τη μορφή στοιχειωδών εικονοστοιχείων (pixels). Κάθε Raster μοντέλο αποτελείται από μία σειρά χωρικών ενοτήτων, κάθε μία από τις οποίες έχει το σύνολο των ιδιοτήτων του αντικειμένου που καθορίζει. Τέτοια αρχεία αποτελούν ορθοφωτογραφίες, εικόνες που έχουν ληφθεί με drone, ψηφιοποιημένοι χάρτες κοκ.

2.2.2 Περιγραφικά δεδομένα

Για κάθε στοιχείο στο θεματικό επίπεδο που παρουσιάζεται γραφικά, μπορούν να κατασκευαστούν περιγραφικοί πίνακες που περιέχουν δεδομένα. Σε διανυσματικό μοντέλο μπορούν να περιέχουν πληροφορίες όπως συντεταγμένες, μεγέθη, χαρακτηρισμό. Σε εικονοκυτταρικό μοντέλο κάθε pixel αναπαριστά την τιμή ενός μεγέθους που περιλαμβάνεται.

2.2.3 Εισαγωγή δεδομένων - Γεωγραφικά συστήματα αναφοράς

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ΓΣΠ είναι η δυνατότητα τους να απεικονίζουν τα χωρικά δεδομένα στη σωστή τους θέση στο χώρο[78]. Αυτό πραγματοποιείται με τον ορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων, στο οποίο κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό ζεύγος πραγματικών αριθμών. Το σύστημα αναφοράς ορίζεται από ένα σημείο που είναι η αρχή του συστήματος, από έναν ή περισσότερους άξονες που διέρχονται από το σημείο και από την αντίστοιχη μονάδα μέτρησης κατά μήκος κάθε άξονα[78]. Τα συστήματα αναφοράς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Πρώτη κατηγορία είναι τα Γεωγραφικά, τα οποία ορίζουν τις θέσεις των σημείων σε ένα σφαιροειδές μοντέλο της Γης και χρησιμοποιούν ως συντεταγμένες το γεωγραφικό μήκος και πλάτος[78]. Δεύτερη κατηγορία είναι τα Προβολικά, τα οποία ορίζουν τις θέσεις των σημείων σε μια αναπτυκτική επιφάνεια χρησιμοποιώντας ως συντεταγμένες μονάδες απόστασης[78].

2.3 Μοντελοποίηση πυρκαγιών

Στην περίπτωση πυρκαγιάς είναι απαραίτητο να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς της άμεσα και με ικανοποιητική ακρίβεια. Έτσι μπορούν να εφαρμοστούν πιο αποτελεσματικά τα σχέδια εκκένωσης των πολιτών και να μειωθεί ο αριθμός των θυμάτων. Με μοντέλα προσομοίωσης που υπολογίζουν την εξέλιξη της φωτιάς πιο γρήγορα από τον πραγματικό χρόνο, μπορούν να δημιουργηθούν πιο αποτελεσματικά σχέδια πυρόσβεσης. Επίσης είναι σημαντικό στο στάδιο της πρόληψης να υπάρχει γνώση του πιθανού τρόπου εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς και του βαθμού επιρροής του στην ισορροπία των οικοσυστημάτων σε μια δεδομένη περιοχή.

Στη μοντελοποίηση πυρκαγιάς λαμβάνονται υπ' όψη παράμετροι όπως αυτές που προαναφέρθηκαν στην ενότητα 2.1.3. Επίσης σημαντικοί παράγοντες όπως η ένταση της φωτιάς και ο ρυθμός εξάπλωσης της είναι απαραίτητο να υπολογιστούν με ακρίβεια. Η ένταση της φωτιάς καθορίζει το ύψος στο οποίο η ύλη καίγεται (scorch height), άρα και την ποσότητα του ανόροφου² που έχει καεί. Ο ρυθμός εξάπλωσης καθορίζει τα χρονικά διαστήματα για τα οποία η χλωρίδα και η πανίδα βρίσκονται σε συνθήκες με θανατηφόρες θερμοκρασίες[57].

2.3.1 Κατηγορίες μοντέλων πυρκαγιάς

O Sullivan[3, 4] έχει κάνει λεπτομερή επισκόπηση (1990-2007) για τις διάφορες μεθόδους πρόβλεψης του ρυθμού εξάπλωσης[57]. Σύμφωνα με αυτή, τα μοντέλα πυρκαγιάς διακρίνονται στις παρακάτω τρεις γενικές κατηγορίες[3, 4, 5]:

1. Φυσικά και εν μέρει φυσικά μοντέλα (Physical & quasi-physical models)

Στα φυσικά μοντέλα γίνεται δοκιμή αναπαράστασης της πυρκαγιάς μέσω των φυσικών και χημικών νόμων της καύσης. Βασίζονται σε διαφορικές εξισώσεις, εισάγεται μεγάλος αριθμός παραμέτρων και η χρήση τους σε πραγματικό χρόνο καθίσταται αδύνατη. Τα εν μέρει φυσικά μοντέλα δεν λαμβάνουν υπ' όψη την καύση ως χημικό φαινόμενο, και η εφαρμογή τους είναι κυρίως εργαστηριακής κλίμακας[57].

2. Εμπειρικά και εν μέρει εμπειρικά μοντέλα (Empirical & quasi-empirical models)

Τα εμπειρικά μοντέλα δεν βασίζονται στη θεωρία της καύσης και χρησιμοποιούν κυρίως προσεγγιστικές μεθόδους. Πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση βάσει πειραματικών ή προηγούμενων πυρκαγιών. Λόγω της πρακτικότητας τους εφαρμόζονται σε πραγματικές συνθήκες (επιχειρησιακά μοντέλα) όπου υπάρχει ανάγκη ταχείας αναπροσαρμογής των τακτικών[86]. Στα αποτελέσματα που εξάγονται γίνεται προσαρμογή των εισαγόμενων παραμέτρων με συντελεστή ασφαλείας.

Τα εν μέρει εμπειρικά μοντέλα αναπτύσσονται βάσει δεδομένων εργαστηριακών πυρκαγιών. Η κλίμακα στην οποία διεξάγονται τα πειράματα στο εργαστήριο δεν μπορεί

²Ανόροφος ορίζεται το κομμάτι της φυλλωσιάς και των κλαδιών που εξέχουν υψομετρικά σε σχέση με την φυλλωσιά του συνολικού δάσους

να αναπαραστήσει τις ροές ενέργειας και μάζας και τις σχετικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση της φωτιάς στις πραγματικές πυρκαγιές[15]. Η ένταση των πραγματικών πυρκαγιών μπορεί να είναι μεγαλύτερη των $100,000 \text{ kWh}^{-1}$ ενώ σε μια εργαστηριακή πυρκαγιά δεν μπορεί να προσεγγίσει ούτε το επίπεδο μερικών εκατοντάδων kWh^{-1} [15].

3. Μαθηματικά μοντέλα και μοντέλα προσομοίωσης (Simulation and mathematical analogue models)

Γίνεται χρήση Η/Υ για την οπτική αναπαράσταση της επέκτασης της φωτιάς σε ένα χάρτη. Τα λογισμικά χρησιμοποιούν μοντέλα δύο ή τριών διαστάσεων που προβλέπουν τους ρυθμούς εξάπλωσης λαμβάνοντας υπ' όψη την αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών[57].

2.3.2 Μοντέλο Rothermel

Το μοντέλο του Rothermel αποτελεί το πιο δημοφιλές εν μέρει εμπειρικό μοντέλο. Για την κατασκευή του αξιοποιήθηκαν[1]:

- Δεδομένα από εργαστηριακά πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα, σε ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών της καύσης, και
- Δεδομένα από μελέτες πεδίου που είχαν διεξαχθεί στην Αυστραλία σε ποικίλες συνθήκες ανέμου

Στο μοντέλο βασίζονται διαδεδομένοι προσομοιωτές διάδοσης της φωτιάς[50] (Farsite, Behave, Prometheus). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς πυρκαγιών επιφάνειας σε οποιονδήποτε τύπο δασικής βλάστησης, αρκεί αυτός να περιγραφεί με τη μορφή αντιπροσωπευτικού μοντέλου καύσιμης ύλης[64, 81, 76]. Στηρίζεται σε αυτό το Εθνικό Σύστημα Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών των ΗΠΑ (NFDRS)[18].

2.3.3 Μοντέλα προσομοίωσης δύο διαστάσεων

Οι τοπικές συνθήκες (τοπογραφία, καύσιμα και μετεωρολογικά δεδομένα σε κάθε pixel) αλλάζουν στο χάρτη. Λόγω της χρήσης αρχείων ανέμου και μετεωρολογικών συνθηκών σε συνδυασμό με χωρική πληροφορία, οι προσομοιωτές βασίζονται στα ΓΣΠ[19]. Οι δύο πιο διαδεδομένοι προσομοιωτές πυρκαγιών (Farsite και Prometheus) έχουν τις εξής λειτουργίες[19]:

- Χρησιμοποιούν διανυσματικά αρχεία (σημεία, γραμμές και πολύγωνα) ως σημεία ανάφλεξης
- Υπολογίζουν αυτόματα την εξέλιξη και συμπεριφορά της πυρκαγιάς για μεγάλες χρονικές περιόδους
- Εξάγουν δεδομένα συμβατά με λογισμικά ΓΣΠ
- Βασίζονται σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης

- Είναι διαδραστικά με τον χρήστη και επιτρέπουν την τροποποίηση παραμέτρων (είδη καυσίμων, μετεωρολογικά δεδομένα)

Οι προσομοιωτές αποτελούν επιχειρησιακά μοντέλα λόγω της ταχείας εξαγωγής αποτελεσμάτων. Για τους υπολογισμούς τους βασίζονται στην αρχή του Huygens για την μετάδοση των ακτινοβολούμενων κυμάτων. Σύμφωνα με αυτή, κάθε σημείο του μετώπου ενός κύματος συμπεριφέρεται σαν δευτερεύουσα πηγή κύματος. Το συνολικό μέτωπο είναι εφραπτόμενο στα επιμέρους μέτωπα που δημιουργεί κάθε σημείο. Η μετάδοση του μετώπου της φωτιάς είναι ελλειψοειδής κατά μήκος του χάρτη[28] και παρουσιάζεται ως ένα συνεχώς διευρυνόμενο πολύγωνο[6].

2.4 Μοντέλο Farsite

Το μοντέλο βασίζεται στις σχέσεις του Rothermel και διάφορες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς πυρκαγιών. Οι εξισώσεις περιγράφονται παρακάτω όπως ακριβώς αποδίδονται από τον Finney (2004)[50].

2.4.1 Προσομοίωση πυρκαγιάς σύμφωνα με την αρχή του Huygens

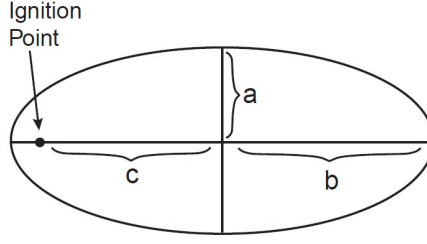
Μεγάλος αριθμός υπολογιστικών εφαρμογών έχουν χρησιμοποιήσει την αρχή του Huygens για την προσομοίωση πυρκαγιών[17, 49, 43, 66]. Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται περιγραφή:

- Της ελλειψοειδούς αποτύπωσης συμπεριλαμβάνοντας πρόσθετα μοντέλα πυρκαγιών κόμης, μετάδοσης καύτρας από την κόμη, επιτάχυνσης του μετώπου και της υγρασίας
- Των χωρικών μοτίβων της εξάπλωσης πυρκαγιών ανάλογα με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες

Η μέθοδος εφαρμογής της αρχής του Huygens αναπτύχθηκε από τον Richards (1990, 1995)[28, 29]. Οι διαφορικές του εξισώσεις περιγράφουν την εξάπλωση ελλειψοειδούς μετώπου κύματος με σειρά κορυφών που περιγράφουν την περίμετρο της φωτιάς. Κάθε κορυφή αποτελεί πηγή ελλειψοειδούς εξάπλωσης. Για την κάθε κορυφή απαιτούνται: Ο προσανατολισμός της κορυφής που βρίσκεται στο μέτωπο εκφραζόμενος με διαφορικές παραμέτρους (m), x_s , y_s , η διεύθυνση του μέγιστου ρυθμού φωτιάς θ , και το σχήμα ελλειψοειδούς φωτιάς που προκύπτει από τις συνθήκες που επικρατούν εγγενώς της κορυφής, εκφραζόμενες με διαστάσεις a , b , c .

$$X_t = \frac{\alpha^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - (b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta))}{\sqrt{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2}} + c \sin \theta \quad (2.1)$$

$$Y_t = \frac{-\alpha^2 \sin \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - (b^2 \cos \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta))}{\sqrt{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2}} + c \cos \theta \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.2: Διαστάσεις ελλειψοειδών κυμάτων a , b , c , που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ανάπτυξης πυρκαγιάς, βάσει των σχέσεων 2.1 & 2.2.

2.4.1.1 Μετατροπή για επιφάνειες με κλίση

Οι εξισώσεις του Richards (1990, 1995)[28, 29] αναπτύχθηκαν αρχικά για επίπεδο έδαφος. Σε επίπεδο έδαφος ένα οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων δεν μετατοπίζεται όταν προβάλλεται πάνω σε αυτό. Σε κεκλιμένο επίπεδο όμως δεν ισχύει. Είναι απαραίτητο για όλες τις εισαγόμενες και εξαγόμενες παραμέτρους που σχετίζονται με τις σχέσεις 2.1 και 2.2, να αναφέρονται σύμφωνα με τις συντεταγμένες του επιπέδου που βρίσκεται εγγενώς κάθε κορυφής. Ωστόσο, οι κορυφές όλων των πολύγωνων της πυρκαγιάς αποθηκεύονται από τον Η/Υ σε οριζόντιο επίπεδο. Συνάγεται επομένως πως κάθε παράμετρος που εισάγεται στις σχέσεις 2.1 και 2.2 (x_s , y_s , θ) πρέπει να μετατρέπεται σύμφωνα με το επίπεδο λίαν της κορυφής και κάθε παράμετρος που εξάγεται (X_t , Y_t) να μετατρέπεται σύμφωνα με το οριζόντιο επίπεδο.

Οι γωνιακές διαφορικές παράμετροι x_s , y_s καθορίζουν την κατεύθυνση των κορυφών του μετώπου (x_i , y_i) σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο του εδάφους. Οι αρχικές τους τιμές μετατρέπονται από το οριζόντιο επίπεδο με την προσθαφαίρεση συντελεστή διόρθωσης D_i , ανάλογα την κλίση ω_i της κορυφής i .

$$x_s = (x_{i-1} - x_{i+1}) \pm D_i \sin \omega_i \quad (2.3)$$

$$y_s = (y_{i-1} - y_{i+1}) \pm D_i \cos \omega_i \quad (2.4)$$

όπου D_i είναι η διαφορά μεταξύ των αποστάσεων των επιπέδων της πλαγιάς και της οριζόντιας διεύθυνσης που υπολογίζονται για το τμήμα της περιμέτρου $(x_{i-1}, y_{i-1}) - (x_{i+1}, y_{i+1})$ για την κορυφή i :

$$D_i = \left[(x_{i-1} - x_{i+1})^2 + (y_{i-1} - y_{i+1})^2 \right]^{1/2} \cos \delta_i (1 - \cos \phi_i) \quad (2.5)$$

όπου ϕ_i είναι η γωνιά του εδάφους με διεύθυνση ω_i , δ_i είναι η διαφορά μεταξύ της γωνίας ω_i και της γωνίας προσανατολισμού του τμήματος της περιμέτρου όπως αναφέρθηκε στο σύστημα συντεταγμένων του επιπέδου του εδάφους:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\omega_i - \alpha_i)}{\cos \phi_i} \right) \quad (2.6)$$

όπου α_i είναι η γωνία προσανατολισμού του τμήματος της περιμέτρου στο οριζόντιο επίπεδο:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_{i-1} - y_{i+1}}{x_{i-1} - x_{i+1}} \right) \quad (2.7)$$

Αυτά τα μεγέθη αποτελούν προσεγγίσεις της κλίσης του μετώπου της φωτιάς, διότι οι γωνίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παραμέτρου ενδέχεται να βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο ετερογενούς τοπογραφίας.

Μία παρόμοια αλλά αντίθετη διαδικασία πραγματοποιείται για την μετατροπή των διαφορικών παραμέτρων του ρυθμού εξάπλωσης (X_t, Y_t) στο οριζόντιο επίπεδο (X_t', Y_t').

$$X_t' = X_t \pm D_r \sin \omega_i \quad (2.8)$$

$$Y_t' = Y_t \pm D_r \cos \omega_i \quad (2.9)$$

όπου D_r είναι η διαφορά μεταξύ των ρυθμών εξάπλωσης μεταξύ του οριζοντίου επιπέδου και του επιπέδου του εδάφους, λύνοντας:

$$D_r = [X_t^2 + Y_t^2]^{1/2} \cos(\omega - \tan^{-1}(Y_t/X_t))(1 - \cos \phi_i) \quad (2.10)$$

Μία τιμή η οποία προστίθεται ή αφαιρείται από τις παραμέτρους εξάπλωσης ανάλογα με την κλίση του εδάφους. Έτσι, οι νέες οριζόντιες συντεταγμένες για την κορυφή i είναι προϊόντα του χρονικού βήματος $X_t' & Y_t'$. Η οριζόντια απόσταση εξάπλωσης σε αυτό το χρονικό βήμα υπολογίζεται με το πυθαγόρειο θεώρημα.

2.4.1.2 Διανύσματα ανέμου και κλίσης

Το σύμβολο θ στις σχέσεις 2.1 και 2.2 αναπαριστά την γωνία του διανύσματος ανέμου-κλίσης στην κατεύθυνση της μέγιστης εξάπλωσης ($0 \leq \theta \leq 2\pi$), στο επίπεδο του εδάφους που βρίσκεται η κορυφή. Το διάνυσμα αυτό υπολογίστηκε για επιφανειακές πυρκαγιές, χρησιμοποιώντας τις αδιάστατες σταθερές Φ_w, Φ_s για την ταχύτητα ανέμου που επικρατεί στην μέση του ύψους της φλόγας (midflame windspeed)[64, 68]:

$$\Phi_s = 5.275 \beta^{-0.3} \tan \phi^2 \quad (2.11)$$

$$\Phi_w = C(3.281U)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E} \quad (2.12)$$

όπου β είναι ο λόγος της στρώσης καυσίμων και ϕ η κλίση (ακτίνα), U είναι η ταχύτητα του ανέμου στο μέσο ύψος της φλόγας (ms^{-1}), και οι σταθερές C, B, E είναι συναρτήσεις του μεγέθους των σωματιδίων της στρώσης καυσίμων[64, 12].

Τα διανύσματα που χρησιμοποιούνται για την διεύθυνση εξάπλωσης εξαρτώνται άμεσα από χαρακτηριστικά της επιφανειακής στρώσης καυσίμων, επομένως δεν εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης ενεργών πυρκαγιών κόμης. Ωστόσο, επειδή ο ρυθμός εξάπλωσης ενεργητικών πυρκαγιών κόμης που χρησιμοποιείται εντός του λογισμικού Farsite πηγάζει από τον επιφανειακό ρυθμό εξάπλωσης για το μοντέλο καυσίμου 10 [ενότητα 2.4.1.5][65], η παρούσα διαμόρφωση χρησιμοποιεί το διάνυσμα ανέμου-κλίσης για την εξάπλωση πυρκαγιών κόμης που υπολογίζεται από τις σταθερές κλίσης και ανέμου (Συντελεστής μείωσης του ανέμου

0.4). Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής μείωσης του ανέμου δεν διαφέρει σημαντικά από την ταχύτητα ανέμου στο μέσο ύψος της φλόγας, που θεωρείται 0.5 για πυρκαγιές κόμης.

2.4.1.3 Ελλειψοειδείς διαστάσεις

Οι διαστάσεις a , b , c για τις εξισώσεις 2.1 και 2.2 περιγράφουν το σχήμα ελλειψοειδούς φωτιάς, παραγόμενο από μία κορυφή. Σύμφωνα με τον Alexander (1985)[51], η επίδραση του ανέμου και της κλίσης στο σχήμα της φωτιάς είναι ανάλογη με την επίδραση στον ρυθμό εξάπλωσης του μετώπου. Ωστόσο αυτή η υπόθεση δεν έχει επαληθευτεί. Το σχήμα των πυρκαγιών έχει προσδιοριστεί αποκλειστικά με εμπειρικές μεθόδους, βάσει της μετρούμενης ταχύτητας ανέμου. Το σχήμα μπορεί να επηρεαστεί διαφορετικά από τον άνεμο και την κλίση λόγω της διαφορετικής κατανομής της ακτινοβολίας που μεταφέρεται μέσω αγωγιμότητας και ακτινοβολίας.

Στη βιβλιογραφία οι διαστάσεις ελλειψοειδών πυρκαγιών έχουν συσχετιστεί με την ταχύτητα ανέμου βάσει εμπειρικών τύπων[51, 60, 10, 33, 65]. Ωστόσο, κάθε τύπος εξάγει διαφορετικά σχήματα για μια δεδομένη τιμή ταχύτητας ανέμου λόγω χαωδών παραμέτρων όπως η δομή της δασικής περιοχής και το εδάφος της. Στο παρόν μοντέλο γίνεται χρήση του τύπου όπως αναπτύχθηκε από τον Anderson (1983)[36] για τον λόγο Μήκους/Πλάτους, με την υπόθεση ότι η φωτιά εξάπλώνεται ως μονή και όχι διπλή έλλειψη:

$$LB = 0.936e^{0.2566U} + 0.461e^{-0.1548U} - 0.397 \quad (2.13)$$

Η αφαίρεση του αριθμού 0.397 είναι απαραίτητη έτσι ώστε να ισχύει σε επίπεδο έδαφος χωρίς άνεμο ($LB=1.0$).

Για την εξάπλωση του οπίσθιου μετώπου χρησιμοποιείται η σχέση:

$$HB = \frac{LB + \sqrt{(LB^2 - 1)}}{LB - \sqrt{(LB^2 - 1)}} \quad (2.14)$$

από την οποία οι διαστάσεις a , b , c μετατρέπονται σε μονάδες ρυθμού εξάπλωσης για πυρκαγιές κόμης ή επιφανείας:

$$\alpha = \frac{0.5(R + \frac{R}{HB})}{LB} \quad (2.15)$$

$$b = \frac{R + \frac{R}{HB}}{2.0} \quad (2.16)$$

$$c = b - \frac{R}{HB} \quad (2.17)$$

2.4.1.4 Πυρκαγιές επιφανείας

Το μοντέλο πυρκαγιάς επιφανείας που χρησιμοποιείται στο λογισμικό Farsite είναι η εξίσωση εξάπλωσης του Rothermel[26, 64]. Υπολογίζει τον ρυθμό εξάπλωσης σε σταθερές συνθήκες (mmmin^{-1}) σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο του εδάφους για κάθε κορυφή:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad (2.18)$$

όπου:

R : ο ρυθμός εξάπλωσης σε σταθερές συνθήκες (mmin^{-1})

I_R : η ένταση λόγω αντίδρασης ($\text{kJmin}^{-1}\text{m}^{-2}$)

ξ : ο λόγος ροής που παράγεται

ρ_b : η ξηρή πυκνότητα (kgm^{-3})

ϵ : η σταθερά θερμότητας (αδιάστατο μέγεθος)

Q_{ig} : η θερμότητα πριν την ανάφλεξη (kJkg^{-1})

Η ένταση της πύρινης ζώνης περιγράφει τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας ανά μονάδα μήκους του μετώπου της φωτιάς (kWm^{-1})[32]:

$$I_b = \frac{hwR}{60} \quad (2.19)$$

όπου h αναπαριστά την θερμότητα λόγω καυσίμου, w είναι το βάρος του καυσίμου ανά μονάδα επιφάνειας που καίει το μέτωπο, και $R/60$ είναι ο ρυθμός εξάπλωσης. Υπολογίζεται στο Farsite (σε μονάδες SI) από τον Wilson[68]:

$$I_b = \frac{I_R}{60} \frac{12.6R}{\sigma} \quad (2.20)$$

όπου σ είναι η επιφάνεια ανά όγκο στρώσης καυσίμου (m^{-1}). Τα μετωπιαία χαρακτηριστικά (ρυθμός εξάπλωσης, ένταση φωτιάς) σε σταθερές συνθήκες εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν.

2.4.1.5 Πυρκαγιές κόμης

Το μοντέλο πυρκαγιάς κόμης που χρησιμοποιείται στο Farsite αναπτύχθηκε από τον Van Wagner (1977, 1993)[13, 14]. Προσδιορίζει εάν τα υπολείμματα της φωτιάς καίνε καύσιμα επιφάνειας ή κόμης και εάν τα δέντρα καίγονται λόγω της μετάδοσης της φωτιάς μέσω της κόμης. Το μοντέλο υποθέτει ότι το όριο για μετάβαση της πυρκαγιάς στην κόμη εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία σε αυτή και το ύψος της βάσης της[16]:

$$I_o = (0.010 CBH (460 + 25.9M))^{3/2} \quad (2.21)$$

Το ύψος της βάσης είναι το κάθετο ύψος της επιφάνειας του εδάφους με την βάση της καύσιμης ύλης στην κόμη. Ο τύπος της πυρκαγιάς κόμης εξαρτάται από το όριο ρυθμού εξάπλωσης[52]:

$$RAC = \frac{3.0}{CBD} \quad (2.22)$$

όπου CBD είναι η πυκνότητα της κόμης (kgm^{-3}) και 3.0 το προϊόν ενός συντελεστή μετατροπής ($0.05 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) και μιας εμπειρικής σταθεράς (60 smin^{-1}) που προσδιορίζει την κρίσιμη ροή συνεχούς φλόγας στην κόμη. Ο Van Wagner[13] θεωρεί τρεις τύπους πυρκαγιών κόμης που προσδιορίζονται από τις παραμέτρους I_o & RAC :

- Παθητικές πυρκαγιές κόμης ($I_b \geq I_o$, $R_{Cactual} < RAC$)
- Ενεργητικές πυρκαγιές κόμης ($I_b \geq I_o$, $R_{Cactual} \geq RAC$, $E < E_o$)
- Ανεξάρτητες πυρκαγιές κόμης ($I_b \geq I_o$, $R_{Cactual} \geq RAC$, $E > E_o$)

όπου E και E_o είναι η πραγματική και κρίσιμη ροή αντίστοιχα.

Ο ρυθμός εξάπλωσης μιας παθητικής πυρκαγιάς κόμης θεωρείται ίσος με τον ρυθμό πυρκαγιάς επιφανείας. Ο πραγματικός ρυθμός εξάπλωσης $R_{Cactual}$ ($mm \cdot min^{-1}$) στην κορυφή i προσδιορίζεται από τον μέγιστο ρυθμό εξάπλωσης R_{Cmax} ως:

$$R_{Cactual} = R + CFB(R_{Cmax} - R) \quad (2.23)$$

όπου αν $R_{Cactual} \geq RAC$:

$$R_{Cmax} = 3.34R_{10}E_i \quad (2.24)$$

και $3.34R_{10}$ είναι ο ρυθμός εξάπλωσης ενεργητικής πυρκαγιάς κόμης, προσδιορισμένος βάσει του μετωπιαίου ρυθμού εξάπλωσης χρησιμοποιώντας συντελεστή μείωσης ανέμου 0.4[65]. Η παράμετρος E_i είναι μέρος του μετωπιαίου ρυθμού εξάπλωσης ($E_i < 1.0$) που επιτυγχάνεται στην κορυφή της περιμέτρου i , λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό της κορυφής σε σχέση με την διεύθυνση του μέγιστου ρυθμού εξάπλωσης και των ελλειψοειδών διαστάσεων της πυρκαγιάς κόμης. CFB είναι το μέρος της κόμης που έχει καεί[33, 14]:

$$CFB = 1 - e^{-\alpha_c(R-R_o)} \quad (2.25)$$

Η παράμετρος CFB εξαρτάται από τον εκθέτη α_c . Ισούται με 0.9 όταν ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς γίνεται 90% της διαφοράς μεταξύ RAC & R_o .

$$\alpha_c = \frac{-\ln(0.1)}{0.9(RAC - R_o)} \quad (2.26)$$

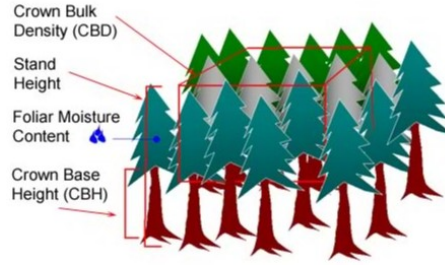
$$R_o = I_o \frac{R}{I_b} \quad (2.27)$$

Η παράμετρος R_o έχει υπολογιστεί από την I_o χρησιμοποιώντας τον λόγο των επιφανειακών καυσίμων που έχουν καταναλωθεί από το μέτωπο προς την συνολική ποσότητα καυσίμων που έχει καταναλωθεί[33, 14].

Η ένταση I_c ($kW \cdot m^{-1}$) μιας πυρκαγιάς κόμης υπολογίζεται για δεδομένη κορυφή τροποποιώντας την σχέση 2.19, έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει το φορτίο των καυσίμων επιφανείας και κόμης που έχουν καταναλωθεί, και τον ρυθμό εξάπλωσης πυρκαγιών κόμης $R_{Cactual}$:

$$I_c = 300 \left(\frac{I_b}{300R} + CFB CBD(H - CBH) \right) R_{Cactual} \quad (2.28)$$

όπου H είναι το ύψος της κόμης (m), ενώ το ποσό θερμότητας που περιλαμβάνεται στα καύσιμα θεωρείται 18000 kJ kg^{-1} .



Σχήμα 2.3: Καύσιμα κόμης δέντρων που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό Farsite

2.4.1.6 Επιτάχυνση φλόγας

Η επιτάχυνση φλόγας ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης του ρυθμού εξάπλωσης για δεδομένο σημείο ανάφλεξης, με την υπόθεση πως όλες οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Ενσωματώθηκε στους υπολογισμούς του Farsite για την απαλοιφή απότομων αλλαγών σε μεγαλύτερους ρυθμούς λόγω των αλλαγών κλίσης, ταχύτητας ανέμου και καυσίμων. Ο ρυθμός εξάπλωσης R_t σε χρόνο t εξαρτάται από το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η μέγιστη επιτάχυνση στις δεδομένες συνθήκες:

$$R_t = R(1 - e^{-\alpha_a t}) \quad (2.29)$$

όπου R είναι ο ρυθμός εξάπλωσης (mmmin^{-1}), t ο χρόνος που έχει περάσει (min) και α_a σταθερά προσδιορισμού του ρυθμού επιτάχυνσης. Οι ρυθμοί επιτάχυνσης θεωρούνται ανεξάρτητοι της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Η τιμή της παραμέτρου προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος του καυσίμου. Οι ρυθμοί επιτάχυνσης σε πυρκαγιές κόμης προσδιορίζονται από[33]:

$$\alpha_a = \alpha_a - 18.8CFB^{2.5}e^{(-8CFB)} \quad (2.30)$$

για σημειακές ή γραμμικές πηγές ανάφλεξης. Η εξίσωση 2.29 μετατρέπεται για τον υπολογισμό της παραμέτρου D με πεπερασμένο χρόνο t [33]:

$$D = \left(t + \frac{e^{-\alpha_a t}}{\alpha_a} - \frac{1}{\alpha_a} \right) \quad (2.31)$$

Με την επανάληψη των συναρτήσεων 2.29 και 2.31 για κάθε κορυφή, υπολογίζεται ο χρόνος εξάπλωσης της φωτιάς για συγκεκριμένη απόσταση βάσει του ρυθμού εξάπλωσης. Έτσι ελέγχεται η χωρική και χρονική ανάλυση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Για κάθε επανάληψη, ο χρόνος εξάπλωσης μειώνεται κατά $(D-D_t)/R$ έως ότου φτάσει το όριο 10^{-6} . D_t είναι η απόσταση εξάπλωσης που απαιτείται για να επιτευχθεί ο τρέχων ρυθμός εξάπλωσης συν την επιθυμητή νέα απόσταση εξάπλωσης στο χρονικό διάστημα D_{t+1} .

$$D_t = R \left(T_t + \frac{e^{-\alpha_a T_t}}{\alpha_a} - \frac{1}{\alpha_a} \right) + D_{t+1} \quad (2.32)$$

όπου T_t ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί ο τρέχων ρυθμός εξάπλωσης:

$$T_t = \frac{\ln\left(\frac{1-R_t}{R}\right)}{\alpha_\alpha} \quad (2.33)$$

Οι πυρκαγιές επιβραδύνονται άμεσα όταν συναντούν νέες περιβαλλοντικές συνθήκες που οδηγούν σε μικρότερο ρυθμό καύσης.

2.4.1.7 Μετάδοση καύτρας

Η μετάδοση καύτρας προκαλεί νέα σημεία ανάφλεξης μπροστά από το κύριο μέτωπο της πυρκαγιάς. Φλεγόμενα κλαδιά μεταφέρονται λόγω ανέμου και φτάνουν έως και μερικά χιλιόμετρα από την περίμετρο της φλόγας. Στο Farsite χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Albini[26]. Σε ανομοιογενές έδαφος, η απόσταση που ταξιδεύουν οι καύτρες εξαρτάται από το μέγεθος τους, την ταχύτητα των κάθετων ανέμων και την τοπογραφία στην διεύθυνση μετάδοσης τους. Καύτρες μεγαλύτερου μεγέθους διατηρούν τη φλόγα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αλλά μεταδίδονται σε μικρότερο υψόμετρο. Επίσης αποκτούν μεγαλύτερη τελική ταχύτητα με αποτέλεσμα να καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους συντομότερα. Το μοντέλο του Albini υπολογίζει το ύψος στο οποίο το σωματίδιο έχει εξυψωθεί με την υπόθεση ότι ο χρόνος για τον οποίο παράγεται πλούμιο ισούται με τον χρόνο που το σωματίδιο ταξιδεύει ανοδικά.

$$t_f = t_o + 1.2 + \frac{\alpha_x}{3} \left(\left(\frac{b_x + \frac{z}{z_f}}{\alpha_x} \right)^{3/2} - 1 \right) \quad (2.34)$$

όπου:

z : Το ύψος του σωματιδίου (m)

z_f : Το ύψος της φλόγας (m)

Οι σταθερές a και b σχετίζονται με τη δομή της φωτιάς:

$$a_x = 5.963$$

$$b_x = 4.563$$

και

$$t_o = t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.35)$$

t_o είναι ο χρόνος σταθερής καύσης του ανόροφου.

Οι z_f και t_o προσδιορίζονται ανάλογα την διάμετρο των δέντρων, τα χαρακτηριστικά τους και τον αριθμό φλεγόμενων δέντρων σε μία περιοχή.

t_1 είναι ο χρόνος που απαιτείται για το σωματίδιο να ταξιδέψει από την αρχική του θέση στην κορυφή της φλόγας:

$$t_1 = 1 - \left(\frac{z_o}{z_f} \right)^{1/2} + \frac{v_o}{w_f} \ln \left(\frac{1 - \frac{v_o}{w_f}}{\left(\frac{z_o}{z_f} \right)^{1/2} - \frac{v_o}{w_f}} \right) \quad (2.36)$$

t_2 είναι ο χρόνος που απαιτείται για το σωματίδιο να ταξιδέψει από την κορυφή της φλόγας μέχρι το πλούμιο:

$$t_2 = 0.2 + B \left(\frac{D_p}{z_f} \right)^{1/2} \left(1 + B \left(\frac{D_p}{z_f} \right)^{1/2} \ln \left(1 + \frac{1}{1 - \left(\frac{D_p}{z_f} \right)^{1/2}} \right) \right) \quad (2.37)$$

t_3 είναι ο χρόνος που το σωματίδιο ταξιδεύει στο πλούμιο:

$$t_3 = \frac{\alpha_x}{0.8 \frac{v_o}{w_f}} \left(\ln \left(\frac{1 - 0.8 \frac{v_o}{w_f}}{1 - 0.8 r \frac{v_o}{w_f}} \right) - 0.8 \frac{v_o}{w_f} (r - 1) - \frac{1}{2} \left(\frac{0.8 v_o}{w_f} \right)^2 (r - 1)^2 \right) \quad (2.38)$$

όπου:

u_o : Τελική ταχύτητα σωματιδίου (ms^{-1})

w_f : Ταχύτητα απ-αερίων (ms^{-1})

D_p : Διάμετρος σωματιδίου (m)

B : 40

$\frac{u_o}{w_f}$: $B \left(\frac{D}{z_f} \right)^{1/2}$

r : $\left(\frac{b + \frac{z}{z_f}}{\alpha} \right)^{1/2}$

Για τον υπολογισμό εξύψωσης σωματιδίων δεδομένης διαμέτρου θεωρείται πως:

- Τα σωματίδια βρίσκονται στην κορυφή του ανόροφου
- Το μήκος βάσης της φλόγας ισούται με το μισό ύψος της
- Τα σωματίδια έχουν σχήμα κυλίνδρου με συντελεστή τριβής C_D
- Τα σωματίδια εξυψώνονται κάθετα στο φλέγον δέντρο

Μόλις τα σωματίδια έχουν φτάσει στο υψηλότερο σημείο, αρχίζουν να χάνουν ύψος. Το διάλυμα της ταχύτητας του ανέμου θεωρείται οριζόντιο και αυξάνεται λογαριθμικά. Ως αρχική τιμή έχει την τιμή που εισάγεται για ύψος 6.1 m πάνω από την βλάστηση, η οποία καταχωρείται πριν αρχίσει η προσομοίωση. Το σωματίδιο όσο πέφτει επιβραδύνεται διότι ο όγκος και η πυκνότητα του μειώνονται με την καύση. Για υψόμετρο z σε χρόνο t :

$$z(t) = z(0) - v_o(0) \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 \right) \quad (2.39)$$

όπου:

$$\tau = \frac{4C_D v_o(0)}{K \pi g} \quad (2.40)$$

με K : 0.0064 και g : 9.8 ms^{-2} .

Η τελική ταχύτητα v_o (ms^{-1}) είναι:

$$v_o = \left(\frac{\pi g \rho D_p}{2 C_D \rho_\alpha} \right)^{1/2} \quad (2.41)$$

όπου:

ρ_s : είναι η πυκνότητα καρβουνιασμένου ξύλινου κυλίνδρου (0.3 gcm^{-3})

ρ_a : είναι η πυκνότητα αέρα (0.0012 gcm^{-3})

C_D : είναι ο συντελεστής τριβής κυλινδρικού σωματιδίου (1.2)

Όσο το σωματίδιο χάνει ύψος, ο ρυθμός με τον οποίο ταξιδεύει στην οριζόντια διεύθυνση προσδιορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος που βρίσκεται, το οποίο μειώνεται λογαριθμικά (H, m):

$$\frac{dX}{dt} = U_H \frac{\ln \frac{z}{z_o}}{\ln \frac{H}{z_o}} \quad (2.42)$$

όπου:

z_o : είναι η απόσταση τριβής ($0.4306 H, m$)

H : είναι το ύψος ανόροφου

και (ms^{-1}) είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H (Albini & Baughman, 1979)[2]:

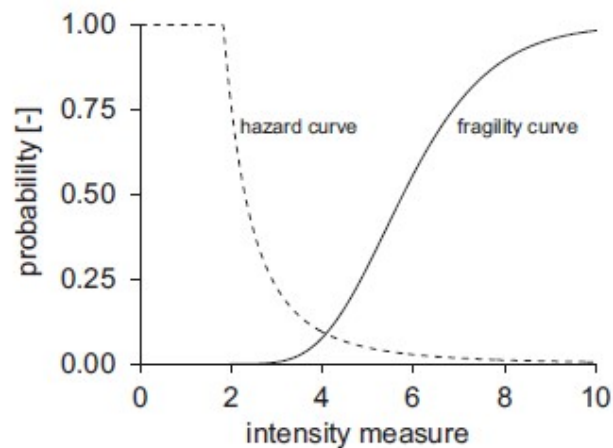
$$U_H = \frac{U_{20+H}}{\ln \frac{20+1.18H}{0.43H}} \quad (2.43)$$

Μόλις η καύτρα έρθει σε επαφή με το έδαφος, μπορεί να προκαλέσει νέα ανάφλεξη εάν:

- Προσγειωθεί σε μη καμένη έκταση
- Προσγειωθεί σε αναφλέξιμο υπόστρωμα

2.5 Ανάλυση ευαισθησίας - Fragility curves

Για την πρόβλεψη του βαθμού ζημιάς κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμό γίνεται χρήση διαγραμμάτων ευαισθησίας (fragility curves). Αναπτύσσονται ανάλογα με τη δομική κατηγορία της κατασκευής υπό έρευνα. Ουσιαστικά γίνεται μια συσχέτιση της έντασης της καταστροφής με τον βαθμό ζημιάς που θα δεχτεί μία κατασκευή. Η μέθοδος προκύπτει βάσει στοχαστικής ανάλυσης σε πρωτότυπα χτίρια που αντιπροσωπεύουν μία δομική κατηγορία[30]. Σύμφωνα με τον Porter (2015)[44]: Εκφράζουν την πιθανότητα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος ως συνάρτηση της τιμής μιας (πιθανώς άγνωστης) περιβαλλοντικής διέγερσης.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ευαισθησίας

Το διάγραμμα ευαισθησίας προσδιορίζεται συνήθως από μία συνάρτηση λογαριθμοκανονικής κατανομής[34]:

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln a - \ln A_m}{\beta}\right) \quad (2.44)$$

για τιμή έντασης a , με διάμεσο A_m και λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση β . Το διάγραμμα αποτελείται από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα. Στον οριζόντιο αναγράφονται οι τιμές της έντασης του φαινομένου και στον κατακόρυφο αναγράφεται η πιθανότητα να συμβεί το ανεπιθύμητο γεγονός (τιμές 0-1).

Η ένταση υπολογίζεται από ένα χαρακτηριστικό μέγεθος της καταστροφής, το οποίο για τους σεισμούς είναι η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση. Ωστόσο η μεθοδολογία βρίσκει εφαρμογή και σε έρευνες ρίσκου διαφορετικού τύπου φυσικών καταστροφών. Το χαρακτηριστικό μέγεθος για τις πλημμύρες είναι το βάθος νερού, για τις καταιγίδες είναι η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου και για τις πυρκαγιές είναι η τιμή της ακτινοβολούμενης θερμότητας.

2.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας σε πυρκαγιές

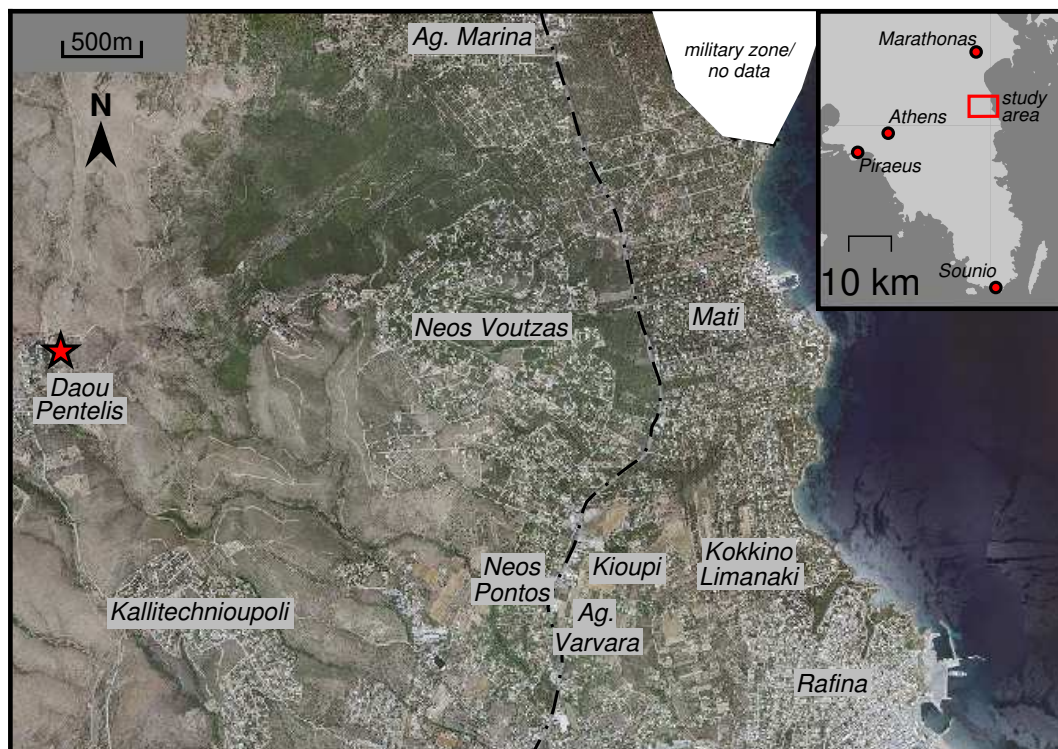
Η εφαρμογή της μεθόδου στις πυρκαγιές είναι πρόσφατη. Η έρευνα που πραγματοποιείται στην μηχανική πυρασφάλειας γίνεται με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων μικρής αβεβαιότητας[88, 69, 7, 53, 87]. Οι έρευνες αφορούν εξατομικευμένα υλικά υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Εξετάζεται κυρίως η μεμονωμένη αντοχή των υλικών σε συνθήκες φλόγας. Γίνεται πιθανολογική ανάλυση σε πλάκες[71] και σε δοκούς κατασκευασμένες από χάλυβα[22, 35, 24] και σκυρόδεμα[21, 8, 42, 90, 37].

Μελέτες όπου μελετούνται τα υλικά ως ενιαίο σύστημα κατασκευής έχουν διεξαχθεί από τους Gernay και συν.(2016)[31]. Οι Lange και συν.(2014)[46] έχουν καθιερώσει μέθοδο για την ανάλυση κατασκευών βάσει του πλαισίου σεισμικής μηχανικής που αναπτύχθηκε στο Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center[30]. Ωστόσο απαιτείται εξέλιξη της μεθόδου, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις πιθανές αβεβαιότητες σε παραμέτρους όπως η μεταφορά θερμότητας και η συμπεριφορά των κατασκευών. Επίσης, η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται και για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας μιας πόλης σε συνθήκες πυρκαγιάς[23, 25].

Κεφάλαιο 3

Περιοχή μελέτης

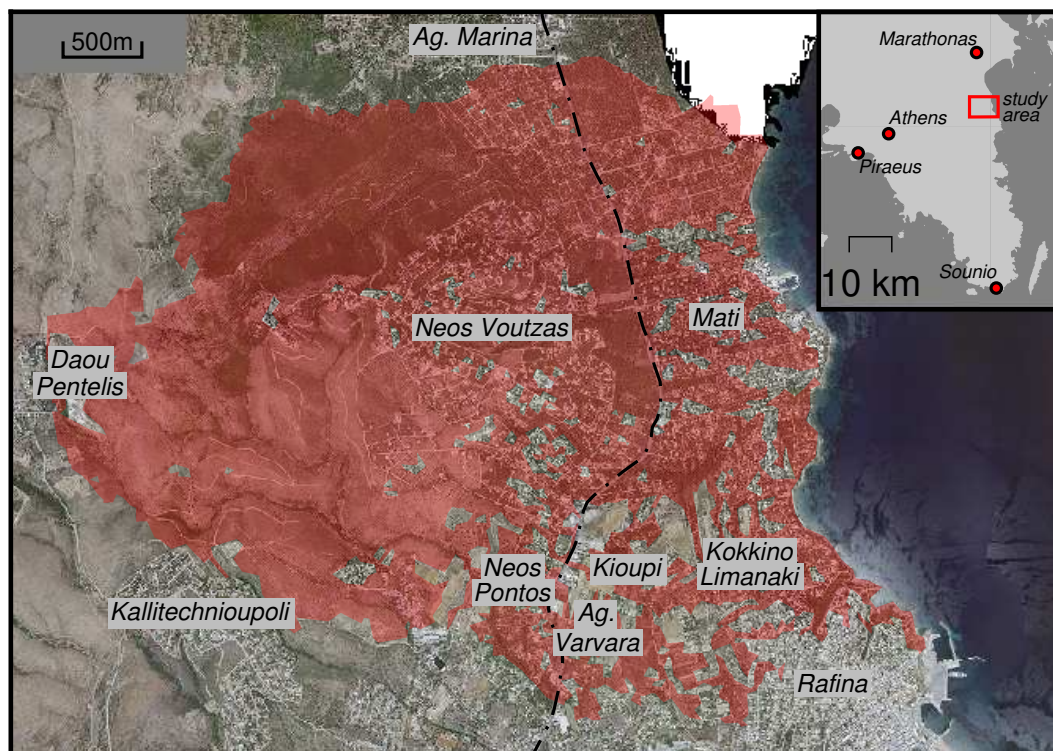
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα γεγονότα όπως συνέβησαν την 23^η Ιουλίου 2018. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2 για την περιοχή μελέτης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, η περιοχή βρίσκεται περίπου 20 km ανατολικά της Αθήνας.



Σχήμα 3.1: Περιοχή μελέτης

3.1 Συμβάντα της 23^{ης} Ιουλίου 2018

Η πυρκαγιά ξεκίνησε στις 16:49 στο Νταού Πεντέλης, στο σημείο που φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στη συνέχεια, χωρίστηκε σε δύο μέτωπα, το πρώτο με κατεύθυνση προς την Καλλιτεχνούπολη και το δεύτερο προς τον Νέο Βουτζά και το Μάτι. Στις 17:30, το μέτωπο στον Νέο Βουτζά εξαπλώθηκε λόγω μετεωρολογικών συνθηκών και κινήθηκε προς τον Άγιο Ανδρέα, το Μάτι, το Κόκκινο Λιμανάκι και τα σύνορα Ραφήνας.

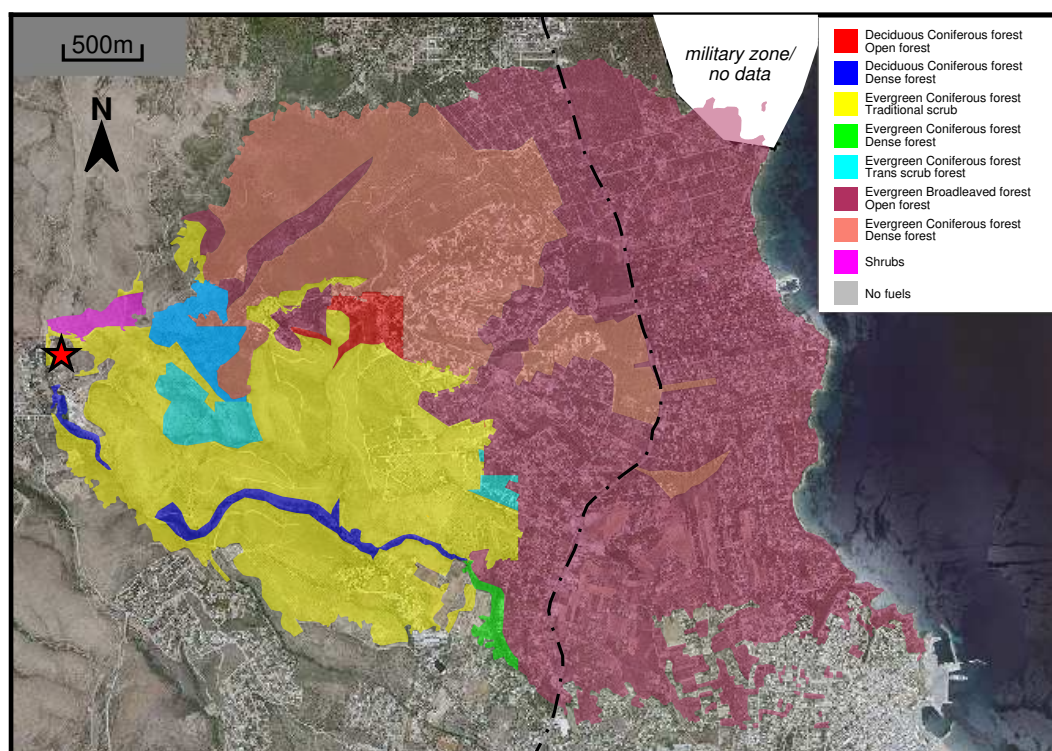


Σχήμα 3.2: Συνολική καμένη έκταση (12.7 km²)

Στις 18:15 έφτασε στη λεωφόρο Μαραθώνος. Λόγω της πυκνής υψηλής βλάστησης και της ρυμοτομίας εκτός σχεδίου πόλεως που χαρακτηρίζει το Μάτι, το μέτωπο επιταχύνθηκε. Η φωτιά έφτασε στην παραλία, περίπου στις 19:00. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, η συνολική έκταση που κάηκε είναι 12.7 km², εκ των οποίων 6.9 km² αντιστοιχούν σε έκταση καλυμμένη από χτίρια.

3.2 Καύσιμη ύλη

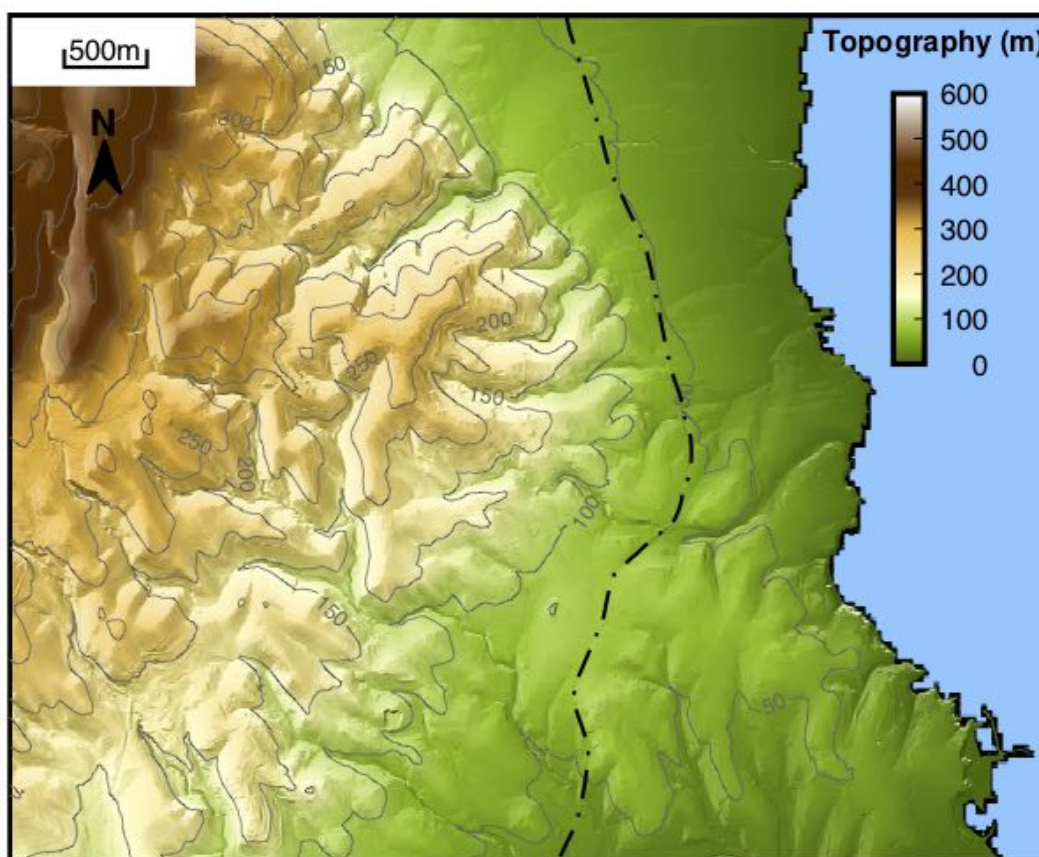
Η φωτιά άρχισε να εξαπλώνεται καίγοντας κυρίως χαμηλή βλάστηση (αιιθαλείς θάμνους). Βόρεια του Νέου Βουτζά, το μέτωπο με κατεύθυνση το Μάτι πέρασε από δάσος με κωνοφόρα φυλλοβόλα και αιιθαλή δέντρα. Το μέτωπο με κατεύθυνση την Καλλιτεχνούπολη συνέχισε να εξαπλώνεται με την κατανάλωση θαμνότοπων. Σε απόσταση 200 m δυτικά από την λεωφόρο Μαραθώνος, η φωτιά άρχισε να επιταχύνεται λόγω της παρουσίας υψηλής αιιθαλούς και φυλλοβόλου βλάστησης, κυρίως πεύκων.



Σχήμα 3.3: Καύσιμη ύλη περιοχής μελέτης

3.3 Τοπογραφία

Οι πλαγιές του Νταού Πεντέλης βρίσκονται σε υψόμετρο 300-600 m και το σημείο ανάφλεξης περίπου στα 300 m. Μεγάλη κλίση εδάφους παρατηρείται στον οικισμό του Νέου Βουτζά. Αποτελείται από ρέματα και λόφους που προκαλούν τυρβώδεις ροές με στροβιλισμούς, όταν επικρατούν δυτικοί άνεμοι. Τα άνω σύνορα του βρίσκονται σε υψόμετρο 250 m, ενώ η λεωφόρος Μαραθώνος περίπου στα 60 m. Το Μάτι και η Ραφήνα αποτελούν παραθαλάσσιους οικισμούς μικρής εδαφικής κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Τοπογραφία περιοχής μελέτης

3.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα όπως καταγράφηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον σταθμό Πεντέλης. Οι ταχύτητες αυτές είναι μάλλον μικρότερες από τις ταχύτητες που επικράτησαν. Αυτό προκύπτει από τα υψηλά ποσά θερμότητας στην περιοχή μελέτης, τα οποία οδήγησαν στην δημιουργία μικρο-κλίματος με έντονους ανέμους λόγω της έντονης θερμοκρασιακής διαφοράς με τις γύρω περιοχές. Επικράτησαν κυρίως άνεμοι δυτικής διεύθυνσης. Στο χρονικό διάστημα της ανάφλεξης, ο άνεμος ήταν περίπου 80 kmh^{-1} , δηλαδή περίπου εννέα μποφόρ (πο-

λύ θυελλώδης). Στην χρονική περίοδο μέχρι την εξάπλωση της πυρκαγιάς προς την θάλασσα στις 19:00, η ταχύτητα ανέμων ήταν φθίνουσα. Ωστόσο η κλίση του τοπίου, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και τα μικρά ποσοστά υγρασίας φαίνεται ότι διευκόλυναν την εξάπλωση του μετώπου.

Μετεωρολογικά δεδομένα					
Τοπική ώρα	Θερμοκρασία (C°)	Υγρασία %	Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου (km/h)	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου (km/h)	Διεύθυνση ανέμου
16:30	30.9	35	45.1	74	WNW
16:40	30.6	34	54.7	88.5	WNW
16:50	30.5	34	48.3	78.9	WNW
17:00	30.8	33	57.9	83.7	WNW
17:10	31.1	36	49.9	80.5	WNW
17:20	29.1	42	54.7	78.9	WNW
17:30	28.8	43	41.8	70.8	W
17:40	28.9	43	33.8	51.5	WNW
17:50	29.4	41	35.4	53.1	W
18:00	29.6	39	38.6	57.9	W
18:10	29.4	41	32.2	49.9	W
18:20	29.1	36	43.5	64.4	WNW
18:30	28.8	36	45.1	69.2	W
18:40	28.6	37	48.3	74	WNW
18:50	28.6	37	56.3	80.5	WNW
19:00	28.6	37	56.3	80.5	WNW
19:10	28.4	38	59.5	90.1	WNW
19:20	27.9	40	69.2	95	WNW
19:30	27.7	40	64.4	88.5	WNW
19:40	27.9	38	57.9	78.9	WNW
19:50	28.4	33	59.5	82.1	WNW
20:00	27.1	43	61.2	78.9	WNW
20:10	26.9	40	49.9	74	WNW
20:20	27.3	39	37	57.9	WNW
20:30	27.9	36	38.6	56.3	WNW

Πίνακας 3.1: Μετεωρολογικά δεδομένα Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών - Σταθμός Πεντέλης

3.5 Πολεοδομικός σχεδιασμός

Το Μάτι αποτελείται κυρίως από μικρά ιδιόκτητα οικόπεδα, συνήθως εμβαδού 400 m². Εντός των οικοπέδων υπάρχει πληθώρα βλάστησης με ελαιώνες και πεύκα. Οι δρόμοι είναι στενοί με πλάτος 2-6 m. Ο οικισμός χαρακτηρίζεται από την αυθαίρετη κατασκευή οικιών εκτός σχεδίου πόλεως. Εντοπίζονται σπίτια σε δασικές εκτάσεις, ρέματα και δημόσιες κτηματικές ενότητες. Λόγω της τοπογραφίας, οι πιθανότητες για υλικές καταστροφές και ανθρώπινες απώλειες αυξάνονται στην περίπτωση πυρκαγιάς.

Ο οικισμός του Νέου Βουτζά ιδρύθηκε μεταγενέστερα. Τα ιδιόκτητα οικόπεδα είναι μεγαλύτερης έκτασης σε σχέση με αυτή στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι. Οι δρόμοι έχουν πλάτος 7-14 m. Η υψομετρική διαφορά λόγω της έντονης κλίσης του εδάφους στην περιοχή εξανάγκασε την δημιουργία πολεοδομικού σχεδίου με μεγάλη απόσταση μεταξύ των οικοπέδων. Έτσι διαμορφώθηκε ένας οικισμός πιο αραιά κατοικημένος. Επίσης, οι κατοικίες βρίσκονται εντός σχεδίου πόλεως. Εδώ η μετάδοση της φλόγας δεν επηρεάζεται άμεσα από τον αστικό σχεδιασμό, αλλά διευκολύνεται κυρίως λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών της περιοχής όπως αυτά αναφέρθηκαν στα υπο-κεφάλαια 2.1.3.2 και 2.1.3.3.

3.6 Δομικά υλικά κατασκευών

Στον Νέο Βουτζά το μεγαλύτερο ποσοστό των κατασκευών ακολουθεί τα πρότυπα πυρασφάλειας του Ευρωκώδικα (τόμος 2, μέρος 1-2). Αποτελούνται κυρίως από υλικά κατηγορίας A και B₁. Τα θεμέλια των κτιρίων αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μπετόν. Γίνεται χρήση σύνθετων μονωτικών υλικών και εμποδίζεται η ροή θερμότητας μέσω αγωγής και ακτινοβολίας. Λόγω αυτού το μεγαλύτερο ποσοστό των σπιτιών δεν δέχτηκε ζημιά.

Στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι ο βαθμός καταστροφής ήταν ο μεγαλύτερος. Σημαντικός αριθμός σπιτιών χαρακτηρίστηκε με ξύλινη οροφή. Περίπου το 80% από αυτά είναι προκατασκευασμένα[4.1.1.2] και αποτελούνται από μεταλλικό σκελετό, ενώ οι πόρτες και τα παράθυρα είναι συνήθως ξύλινα ή αλουμινένια. Εσωτερικά γίνεται χρήση ινোসανίδων για διακοσμητικούς λόγους. Τα παραπάνω υλικά χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να άγουν θερμότητα και ανήκουν στην κατηγορία B₂[2.1.3.5].

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της μεθόδου καταγραφής των οικιών και της ζημιάς που υπέστησαν λόγω της φωτιάς. Παρουσιάζεται η μέθοδος χωρικής αποτύπωσης τους και ταξινόμησης των δομικών υλικών τους. Αναφέρεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την άντληση των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς και γίνεται επεξήγηση της μεθόδου συσχέτισης της καταγεγραμμένης ζημιάς με την ένταση της καταστροφής.

4.1 Μέθοδος δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία άρχισε δύο μήνες μετά το γεγονός. Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε σημειωτική καταγραφή των συντεταγμένων με την χρήση του Παγκοσμίου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS). Παράλληλα, φωτογραφήθηκε κάθε οικία αποτυπώνοντας λεπτομερώς τον βαθμό ζημιάς. Για την αποτύπωση τους έγινε χρήση επιχειρησιακού υπολογιστή (PDA). Η πλοήγηση στο πεδίο επέτρεψε την επί τόπου αποθήκευση κάθε σημείου και την



Σχήμα 4.1: PDA που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία καταγραφή των στοιχείων του, εντός του λογισμικού Magnet Field.

4.1.1 Στοιχεία που καταγράφηκαν εντός του λογισμικού Magnet Field

4.1.1.1 Κατηγορίες κτιρίων βάσει της ζημιάς που δέχτηκαν

Μετά την καταστροφή πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της ζημιάς από το Υπουργείο Υποδομών & Μεταφορών. Με έναν πρωτοβάθμιο έλεγχο η ένταση της ζημιάς αποτυπώθηκε χρωματικά:

Κτίρια βάσει βαθμού καταστροφής			
Άσπρο	Πράσινο	Κίτρινο	Κόκκινο

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης

Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται:

- **Άσπρο - Καμία ζημιά**

Κτίρια κατάλληλα για χρήση. Η κατασκευή ακολουθεί τα απαραίτητα πρότυπα πυρασφάλειας με αποτέλεσμα να μην δέχεται ζημιές και να αποτελεί ιδανική λύση διάσωσης στην περίπτωση αδυναμίας εκκένωσης του χώρου.



Σχήμα 4.2: Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηρισμένο ως άσπρο. Περιοχή: Νέος Βουτζάς

- **Πράσινο - Ζημιά μικρού μεγέθους**

Κτίρια κατάλληλα για χρήση. Καταστροφή δευτερευόντων υλικών της κατασκευής όπως τζάμια, πόρτες, παραθυρόφυλλα και χρώμα στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου. Δεν παρατηρείται σημαντική εισβολή της φλόγας στο εσωτερικό της κατασκευής και με μερικές επισκευές επαναφέρεται στην αρχική της κατάσταση.



Σχήμα 4.3: Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηρισμένο ως πράσινο. Περιοχή: Νέος Βουτζάς

- **Κίτρινο - Ζημιά μεσαίου μεγέθους**

Κτίρια προσωρινά ακατάλληλα για χρήση. Εκτενείς βλάβες σε φέροντα και μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής με κίνδυνο κατάρρευσης. Ζημιά σε βασικά λειτουργικά στοιχεία της οικίας όπως η στέγη, η περιβάλλουσα τοιχοποιία, υλικά που συγκροτούν την κατασκευή ως ενιαίο σύνολο. Παρατηρείται εισβολή της φλόγας και στο εσωτερικό της κατασκευής, με την καταστροφή οικιακών συσκευών και επίπλων. Για την επαναφορά της οικίας στην αρχική της κατάσταση απαιτείται σημαντική χρονική και οικονομική δαπάνη.



Σχήμα 4.4: Προκατασκευασμένο κτίριο, χαρακτηρισμένο ως κίτρινο. Περιοχή: Μάτι

- **Κόκκινο - Ζημιά μεγάλου μεγέθους**

Κτίρια ακατάλληλα για χρήση. Ολική καταστροφή του κτιρίου με αποτέλεσμα την συντριβή των θεμελίων. Απαιτείται η κατεδάφιση και απομάκρυνση των συντριμμιών για την δόμηση νέας κατασκευής.



Σχήμα 4.5: Προκατασκευασμένο κτίριο, χαρακτηρισμένο ως κόκκινο. Περιοχή: Μάτι

4.1.1.2 Κατηγορίες κτιρίων βάσει των δομικών υλικών

Για την εκτίμηση της συμβολής των κτιρίων στην εξάπλωση της πυρκαγιάς καταγράφονταν τα υλικά δόμησης τους. Βάσει αυτού, οι κατασκευές χωρίστηκαν στις παρακάτω κατηγορίες:

Είδη κτιρίων				
Οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ)	Προκατασκευασμένο	Πολυκατοικία (πολυώροφη)	Πέτρινο	Εκκλησία

Πίνακας 4.2: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικών υλικών

Πιο συγκεκριμένα:

- **Ο/Σ**

Κτίρια των οποίων τα κύρια υλικά κατασκευής τους είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα¹. Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη θλιπτική αντοχή του, την αδυναμία του να καίγεται και να συντηρεί την καύση[85] και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του. Επίσης η ανάμιξή του με τσιμέντο αυξάνει την αντοχή του. Βασικό μειονέκτημά του είναι η μικρή αντοχή στον εφελκυσμό, γι' αυτό οπλίζεται. Ο οπλισμός τοποθετείται ως μείγμα ή ράβδους. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι συνήθως ο χάλυβας διότι, πέρα από την μεγάλη αντοχή του σε εφελκυστικές τάσεις, έχει τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής με το σκυρόδεμα. Στα κτίρια εφαρμόζονται τα σχεδιαστικά πρότυπα πυρασφάλειας που αναγράφονται στον Ευρωκώδικα 2, μέρος 1-2.

¹Ως Ο/Σ αναφέρεται η ανάμειξη τσιμέντου (ανόργανα στοιχεία & νερό) με άμμο και χαλίκι

- **Προκατασκευασμένο**

Κατασκευές που αποτελούνται από συναρμολογούμενα στοιχεία που τοποθετούνται σε σταθερό υπόβαθρο. Συνήθως χρησιμοποιείται μέταλλο στον σκελετό, τσιμέντο στα θεμέλια και στις πλάκες ορόφων, ενώ τα παράθυρα και οι πόρτες κατασκευάζονται από αλουμίνιο και ξύλο. Επίσης, στο πεδίο εντοπίστηκαν ως υλικό τοιχοποιίας πλάκες συγκολλητής ξυλείας τύπου κόντρα-πλακέ, για οροφές/ψευδοροφές χρησιμοποιούνταν μοριοσανίδες τύπου νοβοπάν, ενώ για σκέπαστρο παρατηρήθηκε μεγάλο ποσοστό χρήσης κυματοειδών πλακών αμιαντοτσιμέντου. Η κύρια διαφορά τους με τα συμβατικά σπίτια είναι πως δεν χρησιμοποιούνται σίδερα στα θεμέλια και τα δομικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους είτε με μηχανικά στοιχεία (βίδες), είτε με μεθόδους αυτογενούς συγκόλλησης όπως η οξυγονοκόλληση.

- **Πολυκατοικία (πολυώροφη)**

Ιδιωτικές κατασκευές με κύριο υλικό κατασκευής το Ο/Σ. Ως πολυκατοικία χαρακτηρίστηκαν επίσης τα ξενοδοχεία που βρίσκονται στην παραθαλάσσια μεριά της περιοχής μελέτης.

- **Πέτρινο**

Ιδιόκτητες οικίες που αποτελούνται από θεμέλιο κατασκευασμένο από Ο/Σ, με επιπρόσθετη επένδυση φυσικών λίθων όπως ο σχιστόλιθος.

- **Εκκλησία**

Δημόσιες κατασκευές που αποτελούνται από θεμέλιο κατασκευασμένο από Ο/Σ, με επένδυση φυσικών λίθων όπως ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης και ο βασάλτης.

Το ξύλο ως υλικό είναι εύφλεκτο[85], για το λόγο αυτό καταγράφηκαν όσα σπίτια είχαν ξύλινη οροφή.

4.2 Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων

4.2.1 Χωρική μελέτη δεδομένων του πεδίου

Μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας, τα δεδομένα περάστηκαν στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ArcGIS. Ως χάρτης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε κολάζ από ορθοφωτογραφίες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού με σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ-’87. Κάθε αποθηκευμένο σημείο μετατράπηκε στο αντίστοιχο οικόπεδο που αντιπροσωπεύει.

Εντός του λογισμικού, για κάθε οικόπεδο κατασκευάστηκε πίνακας που περιέχει:

- τις συντεταγμένες
- το εμβαδόν του οικοπέδου
- το χρώμα της οικίας
- το είδος κατασκευής της οικίας
- αν η οικία είχε ξύλινη οροφή

Κατασκευάστηκαν θεματικοί χάρτες που αποδίδουν γραφικά την πληροφορία του πίνακα. Κατόπιν αυτού, η μελέτη επικεντρώθηκε στην διεξαγωγή πορισμάτων που αφορούν τον βαθμό καταστροφής. Για τον λόγο αυτό, οι κατηγορίες της βαθμιαίας ζημιάς συγχωνεύθηκαν ως εξής:

Άσπρα & Πράσινα \longrightarrow Κτίρια χωρίς ζημιά
Κίτρινα & Κόκκινα \longrightarrow Κτίρια με ζημιά

και οι κατηγορίες δομικών υλικών συγχωνεύθηκαν ως εξής:

Ο/Σ & Πολυκατοικία & Εκκλησία \longrightarrow Κτίρια από Ο/Σ

Η κατηγορία Προκατασκευασμένο παράμεινε όπως καταγράφηκε διότι αντιπροσωπεύει διαφορετικά δομικά υλικά. Λόγω του μικρού δείγματος πέτρινων κατασκευών ($n=2$) και απουσίας επίδρασης τους στην πυρκαγιά, δεν λήφθηκαν υπ’ όψη στην περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Έπειτα δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα για την πλήρη ποιοτική και ποσοτική αποτύπωση των κτιρίων στην περιοχή μελέτης.

4.2.2 Μοντελοποίηση πυρκαγιάς

Από την Διεύθυνση Δασών Ανατολικής Αττικής αντλήθηκαν οι κύριες παράμετροι για την προσομοίωση της πυρκαγιάς. Έγινε εισαγωγή των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών υποεδάφιας, επιεδάφιας και εναέριας καύσιμης ύλης, με το ανάλογο ποσοστό υγρασίας που τους αντιστοιχεί. Για την αναπαράσταση της περιοχής επιλέχθηκαν τα ΜΚΥ των Scott & Burgan[70]:

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης			
Μοντέλο	Καύσιμης Ύλης	Περιοχή	Περιγραφή
NB1		Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Γυμνό έδαφος
NB8		Υδάτινη επιφάνεια	Υδάτινη επιφάνεια
SH2		Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση ύψους 1-2 m
SH7		Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση ύψους 1-2 m
TL2		Πλατύφυλλα	Δάσος πλατύφυλλων
TU4		Αραιά κωνοφόρα	Αραιή σύσταση κωνοφόρων 2-5 m
TU5		Πυκνά κωνοφόρα	Πυκνή σύσταση κωνοφόρων 7-10 m

Πίνακας 4.3: Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης

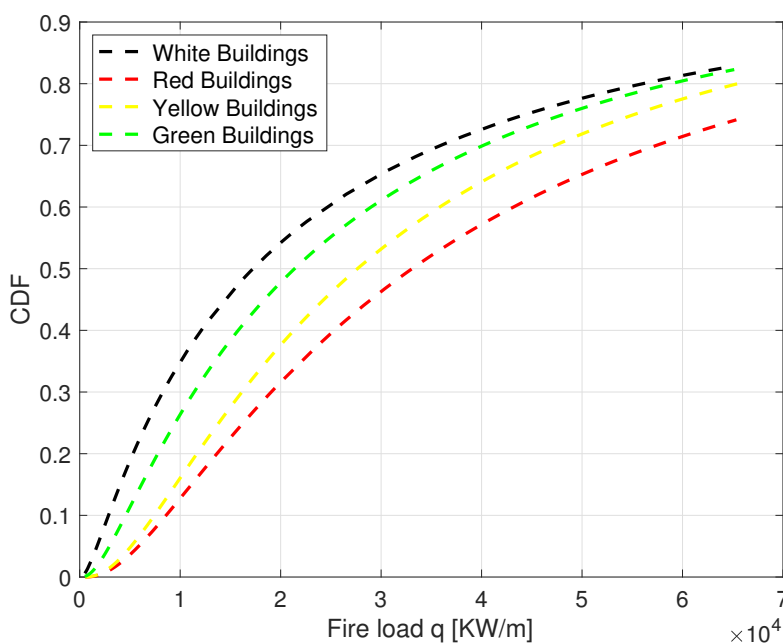
Επίσης καταχωρήθηκαν τα αρχεία των τοπογραφικών χαρακτηριστικών, των μετεωρολογικών δεδομένων και της ταχύτητας του ανέμου. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, έγινε εξαγωγή εικονοχτυταρικού χάρτη που παρουσιάζει την δριμύτητα πυρκαγιάς σε όρους εκλυόμενης θερμότητας (kWm^{-1}).

4.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Για την κατασκευή των διαγραμμάτων επιλέχθηκε η δριμύτητα πυρκαγιάς ως το χαρακτηριστικό μέγεθος της καταστροφής. Εισήχθησαν στον οριζόντιο άξονα τα δεδομένα του εικονοκυτταρικού χάρτη που προέκυψαν από την προσομοίωση πυρκαγιάς.

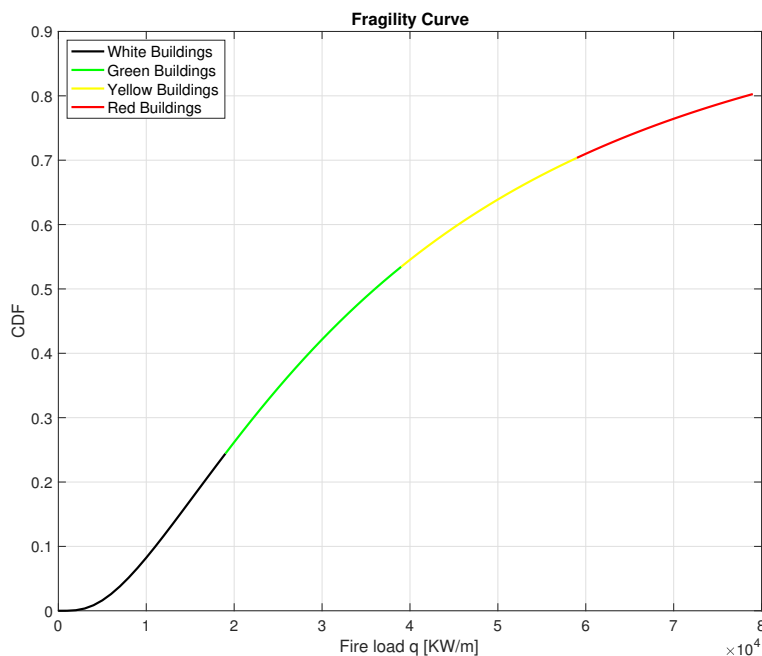
Εντός του λογισμικού Matlab κατασκευάστηκαν διαγράμματα για την ανάλυση των δομικών κατηγοριών Ο/Σ και Προκατασκευασμένο. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η πιθανότητα καταστροφής για δεδομένη τιμή έντασης, ως εξής:

- η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει κτίρια χαρακτηρισμένα ως άσπρα
- η πράσινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει κτίρια χαρακτηρισμένα ως πράσινα
- η κίτρινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει κτίρια χαρακτηρισμένα ως κίτρινα
- η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει κτίρια χαρακτηρισμένα ως κόκκινα



Σχήμα 4.6: Κατασκευή ιδεατού διαγράμματος ευαισθησίας

Κάθε χρώμα αναπαριστά την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κτίριο, ανάλογα με τις τιμές της δριμύτητας πυρκαγιάς. Βάσει των παραπάνω καμπύλων, σχεδιάστηκε η τελική καμπύλη, η οποία αναπαριστά τον βαθμό ζημιάς με κλιμακωτό τρόπο, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Τελικό ιδεατό διάγραμμα ευαισθησίας

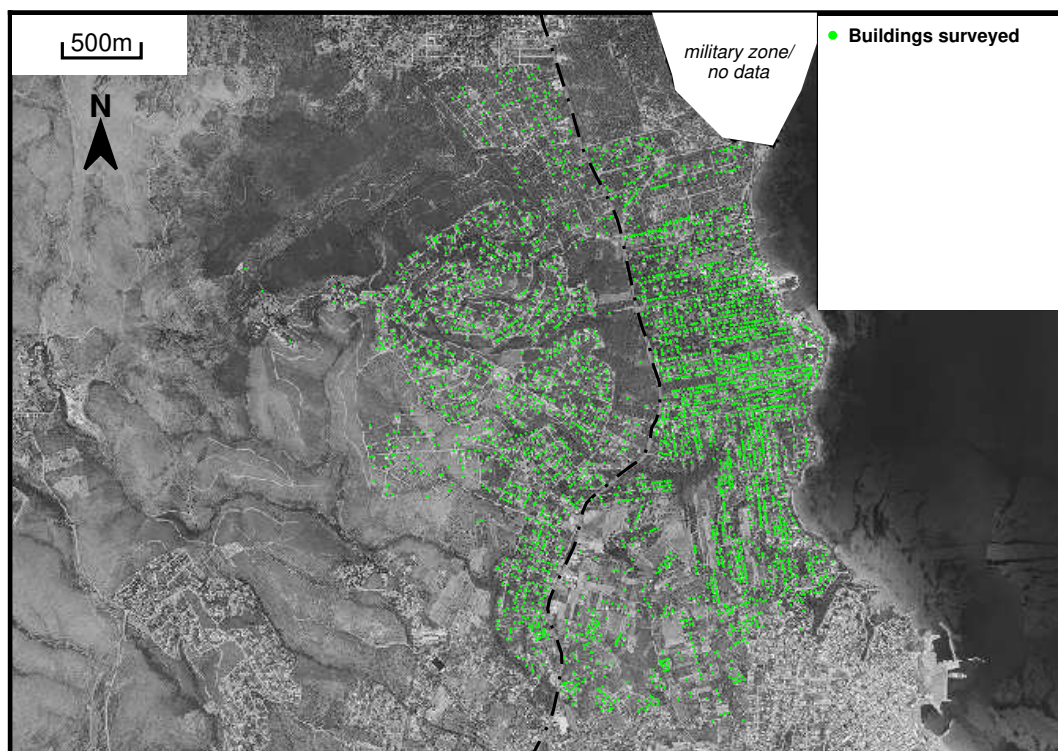
Ανάλογα την τιμή της δριμύτητας πυρκαγιάς, το διάγραμμα υπολογίζει τον βαθμό ζημιάς που θα υποστεί η κατασκευή.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

5.1 Δειγματοληψία δεδομένων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως λήφθηκαν μέσω του λογισμικού Magnet Field. Καταγράφηκε βάση δεδομένων για συνολικό αριθμό 3304 κτιρίων.

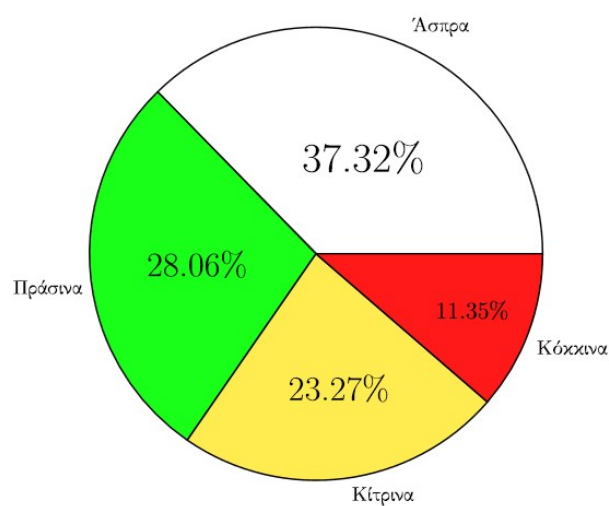


Σχήμα 5.1: Σημεία κατόπιν ολοκλήρωσης της δειγματοληψίας

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται ο αριθμός τους ανάλογα τον βαθμό καταστροφής τους όπως καταγράφηκε από το Υπουργείο Υποδομών & Μεταφορών. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα ανάλογα ποσοστά.

Κτίρια βάσει βαθμού καταστροφής			
Άσπρο	Πράσινο	Κίτρινο	Κόκκινο
1233	927	769	375

Πίνακας 5.1: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης



Σχήμα 5.2: Ποσοστό κτιρίων βάσει καταλληλότητας χρήσης

Στον πίνακα 5.2 αναγράφονται τα κτίρια βάσει των δομικών υλικών τους.

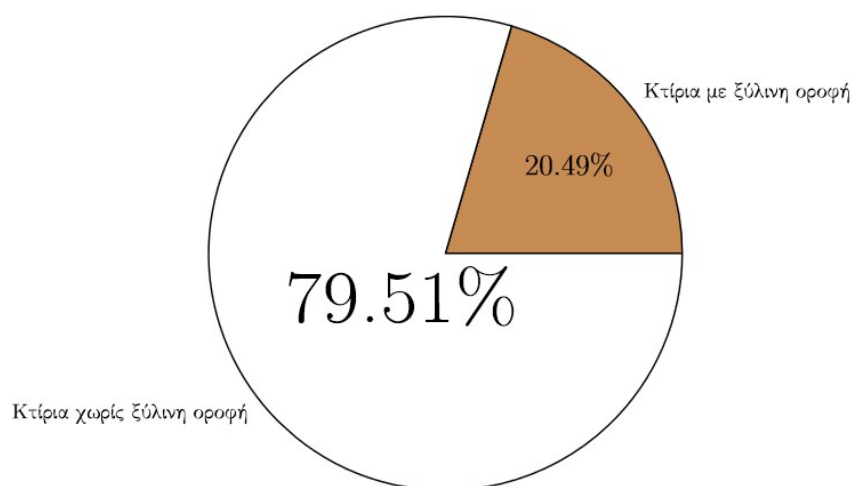
Κτίρια βάσει δομικών υλικών				
Ο/Σ	Προκατασκευασμένο	Πολυκατοικία	Πέτρινο	Εκκλησία
1772	1479	45	2	6

Πίνακας 5.2: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικών υλικών

Στον πίνακα 5.3 αναγράφονται τα κτίρια βάσει του είδους οροφής τους, παρουσιάζοντας τα ανάλογα ποσοστά στο σχήμα 5.3.

Κτίρια βάσει είδους οροφής	
Κατασκευές με ξύλινη οροφή	Κατασκευές χωρίς ξύλινη οροφή
677	2627

Πίνακας 5.3: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει της οροφής τους



Σχήμα 5.3: Ποσοστό κτιρίων βάσει οροφής

5.2 Αποτελέσματα επεξεργασίας δεδομένων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα επεξεργασίας της βάσης δεδομένων.

5.2.1 Γεωχωρική επεξεργασία - ArcGIS

Η μετατροπή των σημείων σε οικόπεδα βάσει του κτηματολογίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4.

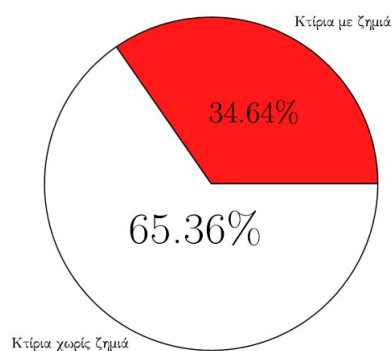


Σχήμα 5.4: Οικόπεδα με χαρακτηρισμό καταλληλότητας χρήσης

Στον πίνακα 5.4 αναγράφονται τα κτίρια βάσει της ζημιάς τους, κατόπιν συγχώνευσης των κατηγοριών. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα ανάλογα ποσοστά.

Κτίρια βάσει βαθμού καταστροφής	
Κατασκευές με ζημιά	Κατασκευές χωρίς ζημιά
1144	2158

Πίνακας 5.4: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει καταλληλότητας χρήσης

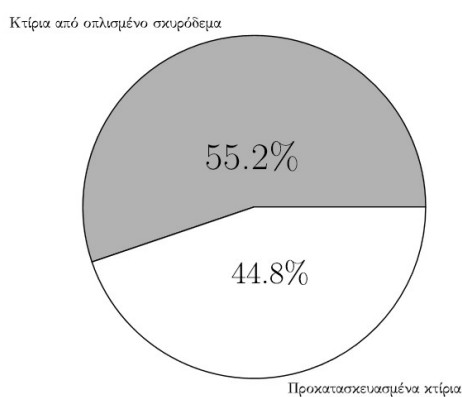


Σχήμα 5.5: Ποσοστό κτιρίων βάσει καταλληλότητας χρήσης

Στον πίνακα 5.5 αναγράφονται τα κτίρια βάσει των δομικών υλικών τους, κατόπιν συγχώνευσης των κατηγοριών. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα ανάλογα ποσοστά.

Κτίρια βάσει δομικών υλικών	
Κτίρια από Ο/Σ	Προκατασκευασμένα κτίρια
1823	1479

Πίνακας 5.5: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας

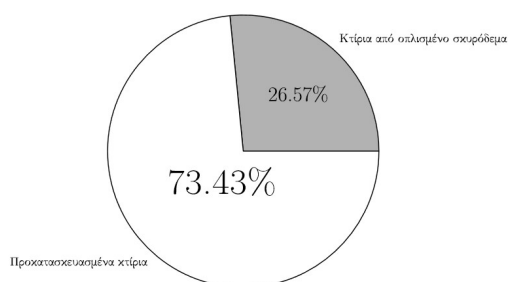


Σχήμα 5.6: Ποσοστό κτιρίων βάσει δομικής κατηγορίας

Η περαιτέρω ανάλυση των 1144 κτιρίων με ζημιά οδήγησε στην εξαγωγή των πινάκων 5.6 & 5.7, οι οποίοι παρουσιάζουν την ταξινόμηση τους ανάλογα τα δομικά υλικά και το είδος οροφής. Στα σχήματα 5.7 και 5.8 αναφέρονται τα αντίστοιχα ποσοστά τους.

Κτίρια βάσει δομικών υλικών	
Κτίρια από Ο/Σ	Προκατασκευασμένα κτίρια
304	840

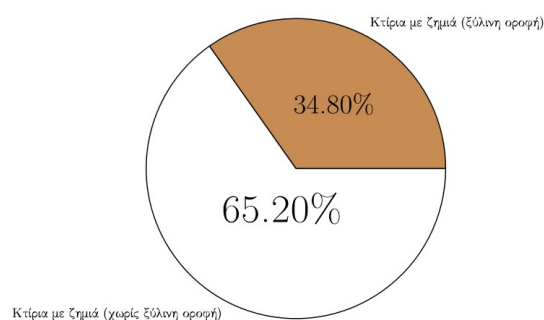
Πίνακας 5.6: Ταξινόμηση κατεστραμμένων κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας



Σχήμα 5.7: Ποσοστό κατεστραμμένων κτιρίων βάσει δομικής κατηγορίας

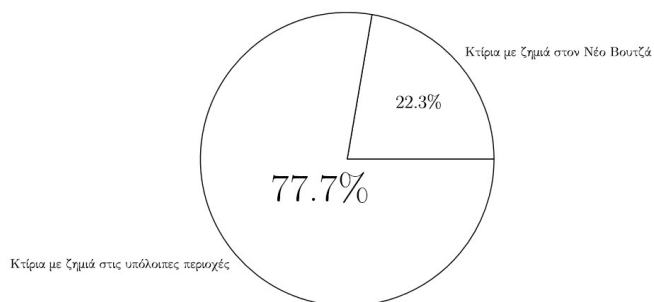
Κτίρια βάσει είδους οροφής	
Κατασκευές με ξύλινη οροφή	Κατασκευές χωρίς ξύλινη οροφή
399	745

Πίνακας 5.7: Ταξινόμηση κατεστραμμένων κατασκευών βάσει οροφής



Σχήμα 5.8: Ποσοστό κατεστραμμένων κτιρίων βάσει οροφής

Περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τις περιοχές εκατέρωθεν της λεωφόρου Μαραθώνος, διότι σημειώθηκε σημαντική διαφορά ως προς τον βαθμό καταστροφής μεταξύ τους.



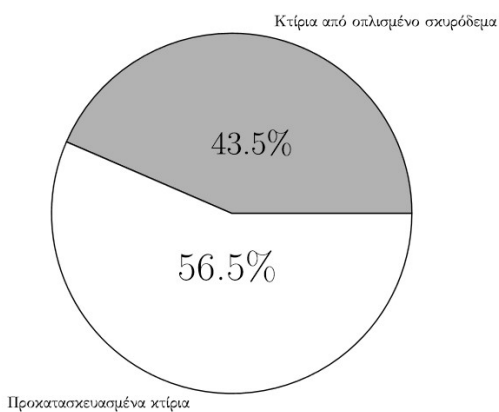
Σχήμα 5.9: Ποσοστό καταστροφής ανάλογα την περιοχή

5.2.1.1 Δυτικά της Λεωφόρου Μαραθώνος

Στον πίνακα 5.8 αναγράφονται τα κτίρια βάσει των δομικών υλικών τους, κατόπιν συγχώνευσης των κατηγοριών. Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα ανάλογα ποσοστά.

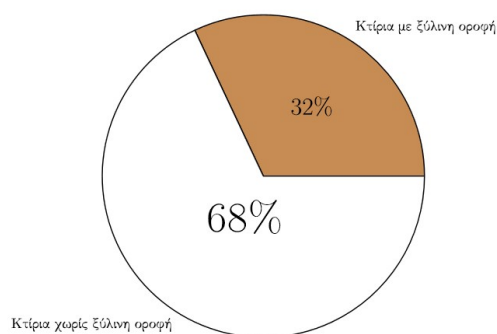
Κτίρια βάσει δομικών υλικών	
Κτίρια από Ο/Σ	Προκατασκευασμένα κτίρια
111	144

Πίνακας 5.8: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας



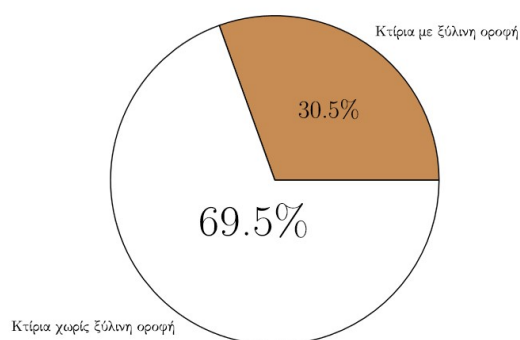
Σχήμα 5.10: Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στον Νέο Βουτζά

Από τα 111 κτίρια από Ο/Σ, 35 φέρουν ξύλινη οροφή.



Σχήμα 5.11: Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στον Νέο Βουτζά, βάσει είδους οροφής

Από τα 144 προκατασκευασμένα κτίρια, 44 φέρουν ξύλινη οροφή.



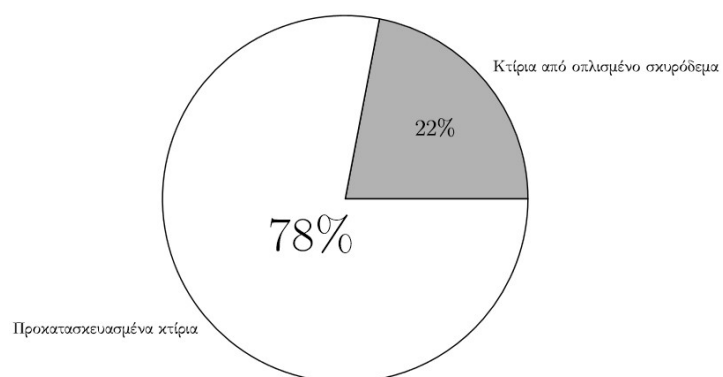
Σχήμα 5.12: Ποσοστό προκατασκευασμένων κτιρίων στον Νέο Βουτζά, βάσει είδους οροφής

5.2.1.2 Ανατολικά της Λεωφόρου Μαραθώνος

Στον πίνακα 5.9 αναγράφονται τα κτίρια βάσει των δομικών υλικών τους, κατόπιν συγχώνευσης των κατηγοριών. Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τα ανάλογα ποσοστά.

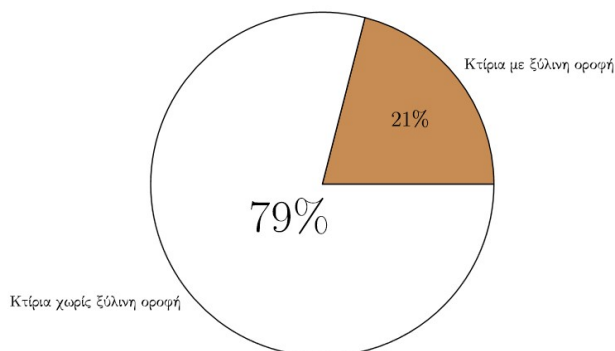
Κτίρια βάσει δομικών υλικών	
Κτίρια από Ο/Σ	Προκατασκευασμένα κτίρια
193	696

Πίνακας 5.9: Ταξινόμηση κατασκευών βάσει δομικής κατηγορίας



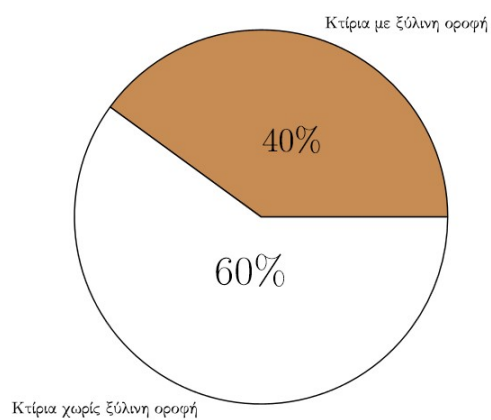
Σχήμα 5.13: Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι

Από τα 193 κτίρια από Ο/Σ, 41 φέρουν ξύλινη οροφή.



Σχήμα 5.14: Ποσοστό κτιρίων από Ο/Σ στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι, βάσει είδους οροφής

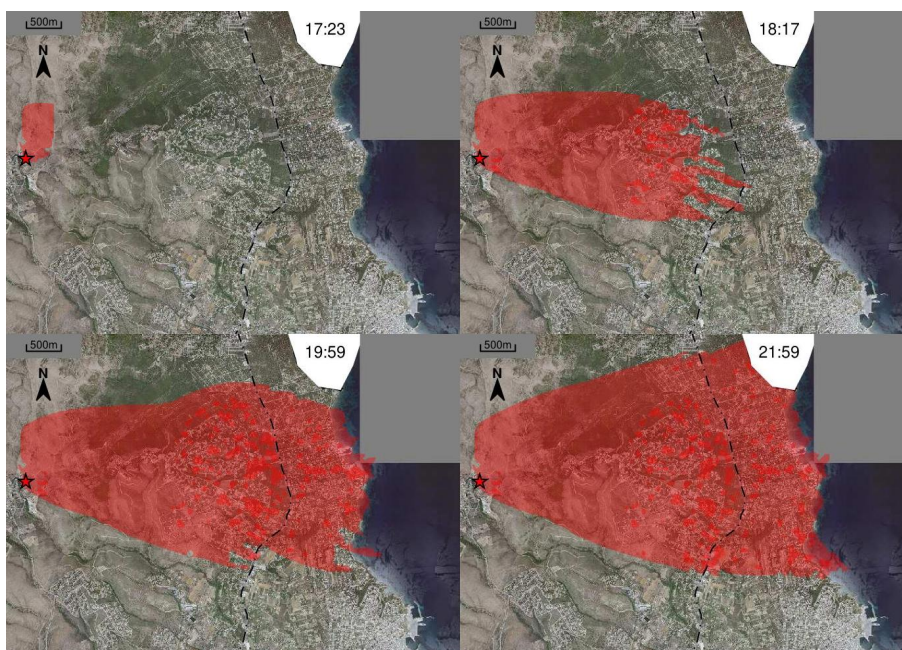
Από τα 696 προκατασκευασμένα κτίρια, 279 φέρουν ξύλινη οροφή.



Σχήμα 5.15: Ποσοστό προκατασκευασμένων κτιρίων στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι, βάσει είδους οροφής

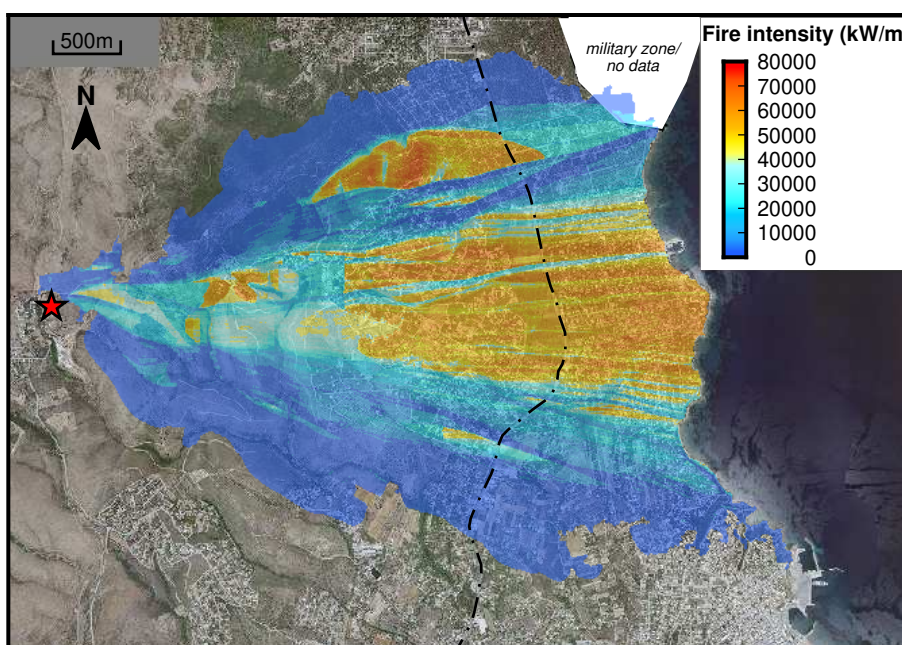
5.2.2 Μοντελοποίηση πυρκαγιάς - Farsite

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς παρουσιάζονται στο σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης

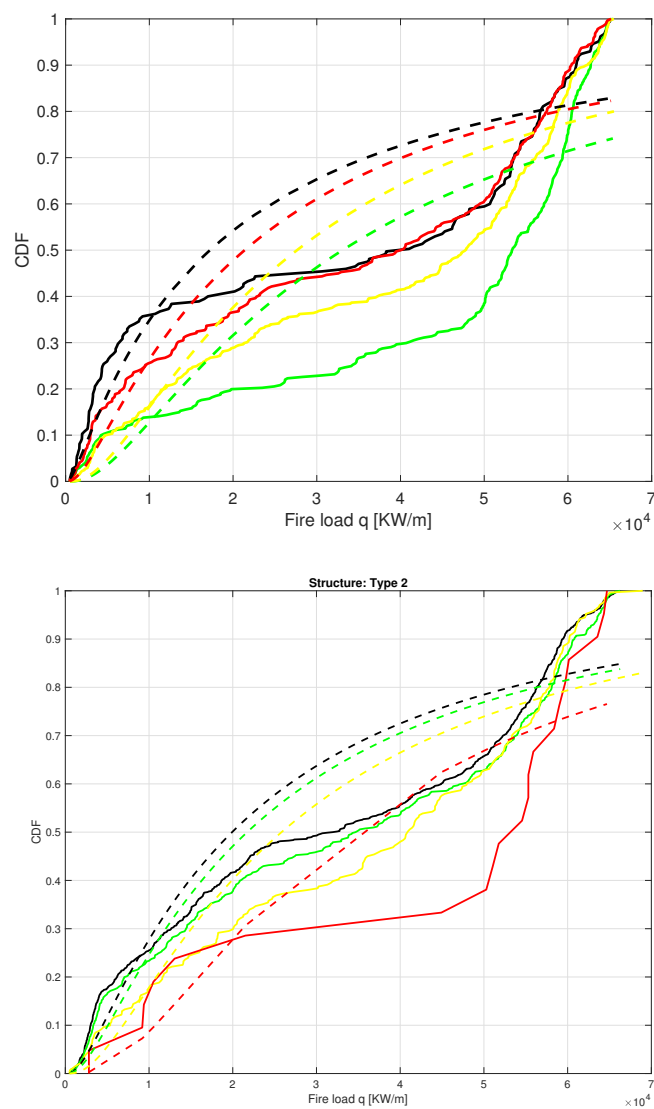
Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η δριμύτητα πυρκαγιάς σε όρους εκλυόμενης ενέργειας, για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5.17: Δριμύτητα πυρκαγιάς σε όρους εκλυόμενης ενέργειας στον χώρο (kWm^{-1})

5.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Τα διαγράμματα ευαισθησίας για προκατασκευασμένα κτίρια (Structure 1) και κτίρια από Ο/Σ (Structure 2) παρουσιάζονται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Διαγράμματα ευαισθησίας

Κεφάλαιο 6

Συζήτηση

Η παρούσα έρευνα επιβεβαιώνει την συσχέτιση μεταξύ δομικών υλικών και της πιθανής καταστροφής τους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επίσης δείχνει ότι προκατασκευασμένα κτίρια ενδέχεται να αποτελούν επιφάνειες ανάφλεξης. Σε χώρο που εκτυλίσσονται φλόγες διευκολύνεται η μετάδοση καύτρων με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του μετώπου της πυρκαγιάς.

6.1 Πόρισμα

Εκτός από την εξόντωση δασικών εκτάσεων, η πυρκαγιά προκάλεσε την καταστροφή 1144 κατασκευών, περίπου 34.64% [εικόνα 5.5] της συνολικής οικιστικής περιοχής. Βάσει της εικόνας 5.9, γίνεται αντιληπτό πως η μεγαλύτερη ζημιά προκλήθηκε στις περιοχές Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι και στα σύνορα Ραφήνας. Πράγματι, από τα κατεστραμμένα κτίρια ανατολικά της λεωφόρου Μαραθώνος, περίπου ένα ποσοστό 80% δέχτηκε ζημιές μεσαίου και μεγάλου μεγέθους [εικόνα 5.10]. Σε αντίθεση, ο Νέος Βουτζάς υπέστη μικρά ποσοστά ζημιάς [εικόνα 5.9] και αποτελείται κυρίως από κατασκευές δομημένες με Ο/Σ [εικόνα 5.10].

Η στατιστική ανάλυση που παρουσιάστηκε οδηγεί στην συσχέτιση της δομικής κατηγορίας με τον βαθμό ζημιάς. Σε αντίθεση με την αρχική υπόθεση της μελέτης, η ύπαρξη ξύλινης οροφής σε μία οικία δεν επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά της φωτιάς [εικόνες 5.8, 5.11, 5.12, 5.14, 5.15]. Παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό (40%) στα προκατασκευασμένα κτίρια ανατολικά της λεωφόρου Μαραθώνος [εικόνα 5.15]. Ωστόσο, στον Νέο Βουτζά δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο δομικών κατηγοριών με ξύλινη οροφή. Αυτό μάλλον υποδηλώνει πως η φωτιά εξαπλώθηκε κυρίως μέσω των θεμελίων κάθε κατασκευής.

6.2 Αδυναμίες ερευνητικής μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος κατασκευής των διαγραμμάτων ευαισθησίας δεν έχει επαναληφθεί. Λόγω αδυναμίας σύγκρισης με λοιπές βιβλιογραφικές πηγές, αποτελεί μία πρωτότυπη προσπάθεια υπολογισμού της πιθανότητας καταστροφής για δεδομένη τιμή έντασης, βάσει της ταξινόμησης που πραγματοποιήθηκε. Βάσει των ποσοστών που υπολογίστηκαν προηγουμένως, οι καμπύλες της δομικής κατηγορίας 1 προσδοκούνταν διαφορετικές σε σχέση με

τις καμπύλες της δομικής κατηγορίας 2. Η κάθε τιμή της πιθανότητας ανεπιθύμητου γεγονότος αναμενόταν για μικρότερες τιμές έντασης καταστροφής στα προκατασκευασμένα κτίρια, σε σχέση με κτίρια δομημένα με Ο/Σ. Έτσι τα διαγράμματα θα παρουσίαζαν μια αξιόπιστη εκτίμηση για την πιθανότητα καταστροφής ανάλογα την κατηγορία τους. Η αστοχία των διαγραμμάτων πιθανώς οφείλεται:

- στην επιλογή του μοντέλου προσομοίωσης Farsite. Το μοντέλο εφαρμόζεται κυρίως σε δασικές πυρκαγιές και δεν περιλαμβάνει την ακτινοβολούμενη θερμότητα από κατασκευές που καίγονται, διότι θεωρούνται μη αναφλέξιμες επιφάνειες.
- σε εσφαλμένη δειγματοληψία ως προς τα χαρακτηριστικά των κατασκευών λόγω δυσκολίας πρόσβασης σε συγκεκριμένο αριθμό οικοπέδων. Επίσης, η καταστροφή ορισμένων κτιρίων στο πεδίο ήταν τόσο μεγάλη, και η καταγραφή των υλικών τους ήταν πρακτικά αδύνατη.
- στην μέθοδο κατηγοριοποίησης των κτιρίων όσον αφορά τα δομικά υλικά. Οι κατασκευές ταξινομήθηκαν σε δύο γενικές κατηγορίες, χωρίς να ληφθούν αναλυτικότερα δεδομένα των υλικών τους. Βάσει παρατηρήσεων στο πεδίο, θα μπορούσαν να ληφθούν υπ' όψη τα υλικά εξωτερικής μόνωσης, η επίστρωση στο πάτωμα (πλακάκι/παρκέ) και το είδος υαλοπινάκων στα παράθυρα των κτιρίων.

Στην εξαγωγή των ποσοστιαίων αποτελεσμάτων, δεν συνυπολογίστηκε ο βαθμός επιρροής των υπόλοιπων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Στοιχεία όπως η τοπογραφία, τα μετεωρολογικά στοιχεία και η ταχύτητα του ανέμου αποτελούν αντικείμενο μελέτης ως προς την επίδραση τους σε φαινόμενα φυσικών καταστροφών. Επίσης, τα δεδομένα δείχνουν πως ο πολεοδομικός σχεδιασμός και η πυκνότητα των οικιών ήταν καθοριστικά στοιχεία για το μεγάλο ποσοστό καταστροφής στις εκτάσεις Μάτι/Κόκκινο Λιμανάκι. Ωστόσο, παρά τους περιορισμούς της μεθόδου, το μέγεθος του δείγματος είναι αρκετό για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων.

6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Σε μελλοντικές μελέτες συνίσταται η έναρξη δειγματοληψίας όσο το δυνατόν συντομότερα μετά το τέλος της καταστροφής. Διασφαλίζεται έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τα χαρακτηριστικά κάθε δείγματος (βαθμός καταστροφής, παρουσία ξύλινης οροφής). Επίσης, για ταχύτερη και ακριβέστερη καταγραφή προτείνεται η χρήση Drone, η οποία επιτρέπει καλύτερη πρόσβαση σε δύσβατα οικόπεδα μικρής ορατότητας για την λήψη φωτογραφικού υλικού. Για τα γραφήματα πίτας, η ταξινόμηση των κατασκευών σε περισσότερες δομικές κατηγορίες οδηγεί σε αναλυτικότερη συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών που ερευνήθηκαν (δομικά υλικά-βαθμός ζημιάς). Για την βελτιστοποίηση των διαγραμμάτων ευαισθησίας, προτείνεται η χρήση μοντέλου πυρκαγιάς που συνυπολογίζει τα κτίρια ως καύσιμη ύλη.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Σκοπός της έρευνας ήταν η μελέτη των δομικών υλικών των κτιρίων ως καύσιμη ύλη, στην φωτιά που συνέβη το καλοκαίρι του 2018. Πράγματι, η μελέτη έδειξε συσχέτιση μεταξύ ζημιάς (μεσαίου και μεγάλου μεγέθους) με κτίρια που έχουν προκατασκευαστεί. Κατασκευές που αποτελούνται από συναρμολογούμενα υλικά τείνουν να είναι πιο εύφλεκτες, επιταχύνοντας τον ρυθμό εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς.

Η αποτύπωση των οικιών με τη χρήση PDA επέτρεψε τη δημιουργία θεματικών χαρτών που παρουσιάζουν την συνολική εικόνα της καταστροφής. Τα 3304 δεδομένα καταγράφηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια, θεμελιώνοντας μία έγκυρη μελέτη. Μέσω ArcGIS, η μετατροπή των σημείων σε οικόπεδα και η δημιουργία περιγραφικών πινάκων βοήθησε στην ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών τους και στην εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων όσον αφορά τους παράγοντες συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς.

Η μελέτη επιβεβαίωσε ότι ο άνθρωπος έχει την δυνατότητα να επηρεάσει την έκβαση ενός ανεπιθύμητου γεγονότος πριν συμβεί, αν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Πρόκειται για μια χρήσιμη πληροφορία, καθώς με την υπερθέρμανση του πλανήτη έρχεται μία εποχή που θα καθορίσει την καθημερινότητα. Η αύξηση στάθμης της θάλασσας θα εκθέσει περιοχές μεγάλου υψομέτρου στις δυνάμεις διάβρωσης των κυμάτων. Ο συνδυασμός μεγαλύτερης θερμοκρασίας στην ξηρά, μειωμένης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ Ισημερινού-Πόλων και αυξημένης υγρασίας θα οδηγήσει σε εντονότερους κύκλους ξηρασίας-πλημμυρών λόγω της εντονότερης βροχόπτωσης που θα πραγματοποιείται με ισχυρές τροπικές καταιγίδες.

Οι φυσικές καταστροφές προβλέπεται να εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα. Ο άνθρωπος καλείται να τις αντιμετωπίσει με την απαραίτητη εκπαίδευση και τα ανάλογα μέτρα προφύλαξης. Είναι απολύτως απαραίτητη η εξέλιξη της έρευνας στον τομέα, ειδικότερα στο στάδιο της πρόληψης.

Βιβλιογραφία

- [1] McArthur A.G. The tasmanian bushfires of 7th february, 1967, and associated fire behaviour characteristics. *In the Technical Co-operation Programme. Mass Fire Symposium*, 1969.
- [2] Baughman R.G. Albini F.A. Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior. *USDA Forest Service General Technical Report*, 221, 1979.
- [3] Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1:physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18:349–368, 2009.
- [4] Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2:empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18:369–386, 2009.
- [5] Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18:387–403, 2009.
- [6] E.A. de Mestre N.J. T.Parkes. Anderson D.H., Catchpole. Modeling the spread of grass fires. *J. Aust. Math. Soc. B*, 23:451–466, 1982.
- [7] Bostrom L. Anderson J., Lange D. Applying uncertainty quantification in modelling of a steel beam exposed to fire. Στο *International Conference on Structures in Fire*, σελίδες 925–932, Princeton, New Jersey, 2016.
- [8] Taerwe L. Annerel E., Caspeelee R. Full-probabilistic analysis of concrete beams during fire. *J. Struct. Fire Eng.*, 4:165–174, 2013.
- [9] Dimitrakopoulos A.P. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11:127–130, 2002.
- [10] Methven I.R. Bilgili E. The simple ellipse: A basic growth model. Στο *Proceedings of the 1st International Conference on Forest Fire*, σελίδες 1–14, Toledo, Spain, 1990.
- [11] Artaxo P. Bond W.J. Carlson J.M. et al. Bowman D.M.J.S., Balch J.K. Fire in the earth system. *Science*, 324:481–484, 2009.

- [12] Rothermel R.C. Burgan R.E. Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system - fuel subsystem. *USDA Forest Service General Technical Report*, INT-167, 1984.
- [13] Van Wagner C.E. Conditions for the start and spread of crownfire. *Can. J. For. Res.*, 7:23–34, 1977.
- [14] Van Wagner C.E. Conditions for the start and spread of crownfire. *Can. J. For. Res.*, 7:23–34, 1977.
- [15] Van Wagner C.E. Fire behavior modelling - how to blend art and science. Στο *Proceedings of the 8th National Conference on Fire and Forest Meteorology*, σελίδες 3–5, Princeton, New Jersey, 1985.
- [16] Van Wagner C.E. Prediction of crown fire behaviour in two stands of jack pine. *Can. J. Fore. Res.*, 23:442–449, 1993.
- [17] Sullivan A.L. Coleman J.R. A real-time computer applicatiton for the prediction of fire spread across the australian landscape. *Simulation*, 67:230–240, 1996.
- [18] Fosberg M.A. Furman R.W. Schroeder M.J. Deeming J.E., Lancaster J.W. The national fire danger rating system. *USDA Forest Service General Technical Report*, RM-84, 1972.
- [19] Alexandrian D. Dupuy J.L. Wildland fire modellin and simulation tools. In *'Towards Integrated Fire Management-Outcomes of the European project FIRE PARADOX'*, 23:62–70, 2010.
- [20] Viegas D. Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, 15:169–177, 2006.
- [21] Jensen E. Eamon C. Reliability analysis of rc beams exposed to fire. *Structural Engineering Journal*, 139:212–220, 2013.
- [22] Garlock M. Elhami Khorasani N., Gardoni P. Probabilistic fire analysis: material models and evaluation of steel structural members. *Structural Engineering Journal*, 141, 2015.
- [23] Garlock M. Elhami Khorasani N., Gernay T. Tools for measuring a city's resilience in a fire following earthquake scenario. Στο *Int. IABSE Conference on Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, σελίδες 886–889, Geneva, Switzerland, 2015.
- [24] Garlock M. Elhami Khorasani N., Gernay T. Probabilistic measures of earthquake effects on fire performance of tall buildings. Στο *Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, σελίδες 1744–1749, Cape Town, South Africa, 2016.

- [25] Garlock M. Elhami K.N., Gernay T. Data-driven probabilistic post-earthquake fire ignition model for a community. *Fire Safety J.*, 94:33–44, 2017.
- [26] Albini F.A. Estimating wildfire behavior and effects. *USDA Forest Service General Technical Report*, 30, 1976.
- [27] Charles F.R. Meteorological problems in smoke management, air quality and smoke from urban and forest fires. Στο *Proceedings of International Symposium*, Fort Collins, Colorado, 1976.
- [28] Richards G.D. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *Inte. J. Numer. Meth. Eng.*, 30:1163–1179, 1990.
- [29] Richards G.D. A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread. *International Journal Wildland Fire*, 292:63–72, 1995.
- [30] Elhami K.N. Gernay T. και Garlock M. Fire fragility functions for steel frame buildings: Sensitivity analysis and reliability framework. *Fire Technology*, 2018.
- [31] Garlock M. Gernay T., Elhami Khorasani N. Fire fragility curves for steel buildings in a community context: a methodology. *Eng. Stru. J.*, 113:259–276, 2016.
- [32] Byram G.M. Combustion of forest fuels. *Forest Fire: Control and Use*, 1959.
- [33] Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the canadian forest fire behavior prediction system. *Inf.Rep.ST-X-3*, Fo29-33/3-1992E:10–58, 1992.
- [34] Zentner I. Gundel M. Fragility analysis methods: Review of existing approaches and application. Στο *Proceedings of the 23th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, σελίδες 1–3, Manchester, UK, 2015.
- [35] Jeffers A.E. Guo Q. Finite-element reliability analysis of structures subjected to fire. *Structural Engineering Journal*, 141:04014129, 2015.
- [36] Anderson H.E. Predicting wind-driven wildland fire size and shape. *USDA Forest Service General Technical Report*, 305:73–80, 1983.
- [37] Lange D. et al. Heidari M., Robert F. Probabilistic study of the resistance of a simply-supported reinforced concrete slab according to eurocode parametric fire. *Fire technology*, 0015-2684, 2018.
- [38] Antenucci J.C. Geographic information systems: a guide to the technology. 1991.
- [39] Kalabokidis K.D. Automated forest fire and flood hazard protection system. disaster management: linking people and the environment. *Geoinformatics Magazine*, 7:14–17, 2004.

- [40] Fotheringham C.J. Franklin J. Moritz M.A. Keeley J.E., Safford H.D. The 2007 southern california wildfires: lessons in complexity. *J Forest*, 107:287–296, 2009.
- [41] Morais M. Keeley J.E., Fotheringham C.J. Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes. *Science (New York, N.Y.)*, 284:1829–32, 1999.
- [42] Lowry T.G. Kho T.S., Block F. Determining the fire rating of concrete structures, case study of using a probabilistic approach and travelling fires. *Appl. Struct. Fire Eng. J.*, 10, 2015.
- [43] Coleman J. Knight I. A fire perimeter expansion algorithm based on huygens’ wavelet propagation. *International Journal Wildland Fire*, 3:73–84, 1993.
- [44] Porter K. *Beginner’s Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*, σελίδες 235–260. 2015.
- [45] Long Fournel M. Bouillon C. Morge D. Ferrier J.P. Lampin-Maillet C., Jappiot M. Mapping wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the south of france. *Journal of Environmental Management*, 91:732–41, 2009.
- [46] Usmani A. Lange D., Devaney S. An application of the peer performance based earthquake engineering framework to structures in fire. *Eng. Stru. J.*, 66:100–115, 2014.
- [47] Hwang L. Mapping it out. geographic information systems can help administrators make enrollment and facilities decisions. *American school University*, 4:34–36, 2006.
- [48] Peterson D.L. Westerling A.L. Littell J.S., McKenzie D. Climate and wildfire area burned in western u.s. ecoprovinces, 1916-2003. *Ecological Applications*, 4, 2009.
- [49] Finney M.A. Modeling the spread and behavior of prescribed natural fires. Στο *Proceedings of the 12th Conference Fire and Forest Meteorology*, σελίδες 138–143, Jekyll Island, Georgia, 1994.
- [50] Finney M.A. Farsite: Fire area simulator-model development and evaluation. *USDA Forest Service General Technical Report*, RMRS-RP-4:47, 1998.
- [51] Alexander M.E. Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. Στο *Proceedings of the 8th Conference Fire and Forest Meteorology*, σελίδες 287–304, Detroit, Michigan, 1985.
- [52] Alexander M.E. Help with making crown fire hazard assesments. *USDA Forest Service General Technical Report*, 251:147–156, 1988.
- [53] Gernay T. Molken T., Van Coile R. Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: applied reliability-based methodology. *Eng. Struct.*, 150:969–985, 2017.

- [54] Vélez M.R. La defensa contra incendios forestales fundamentos y experiencias. 2000.
- [55] Sexton T. Murphy K, Rich T. An assesment of fuel treatment effects on fire behavior, suppression effectiveness, and structure ignition on the agora fire. *Gen. Tech. Rep.*, 25, 2007.
- [56] Burrough P.A. Are gis data structures too simple minded? *Computers Geosciences*, 18:395–400, 1992.
- [57] Pavlidou F.N. Papadopoulos G. A comparative review on wildfire simulators. 5:1–8, 2010.
- [58] Keeley J.E. Pausas J.G. A burning story: The role of fire in the history of life. *Bioscience*, 59:593–601, 2009.
- [59] DeBlasio J.C. Silver D. Scott T. et al. PincetI S., Rundel P.W. It’s the land use, not the fuels:fires and land development in southern california. *Real Estate*, 37:25–43, 2008.
- [60] Andrews P.L. Behave. fire behavior prediction and fuel modelling system. burn subsystem. *USDA Forest Service General Technical Report*, 194, 1986.
- [61] The National Academies Press. Emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia. *Ecological Applications*, 2011.
- [62] Stephen Pyne J. Introduction to wildland fire : fire management in the united states. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*, 2019.
- [63] Stewart S. Fried J. Holcomb S.S. McKeefry J.F. Radeloff V, Hammer R. The wildland urban interface in the united states. *Communications Ecological Applications*, 15:799–805, 2005.
- [64] Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *USDA Forest Service General Technical Report*, 115, 1972.
- [65] Rothermel R.C. Predicting behavior and size of crown fires in the northern rocky mountains. *USDA Forest Service General Technical Report*, 438, 1991.
- [66] Bryce R.W. Richards G.D. A computer algorithm for simulating the spread of wildland fire perimeters for heterogeneous fuel and meteorological conditions. *International Journal Wildland Fire*, 5:73–80, 1995.
- [67] Richard Rothermel C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. *USDA Forest Service General Technical Report*, 143, 1983.
- [68] Wilson R. Reformulation of forest fire spread equations in si units. *USDA Forest Service General Technical Report*, 292, 1980.

- [69] Kohler J. Faber M.H. Fontana M. Sanctis D.G., Fischer K. Combining engineering and data-driven approaches: development of a generic fire risk model facilitating calibration. *Fire Safety Journal*, 70:23–33, 2014.
- [70] Burgan R.E. Scott J.H. Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with rothermel's surface fire spread model. *USDA Forest Service General Technical Report*, 153:8–18, 2005.
- [71] Dhakal R.P. Moss P.J. Shrivastava M., Abu A.K. Efficiency of different intensity measures for probabilistic fire engineering. Στο *Proceedings of the 24th Australasian conference on mechanics of structures and materials: advancements and challenges*, σελίδες 886–889, London, UK, 2017.
- [72] Ghil M. Spyratos V., Bourgeron P.S. Development at the wildland-urban interface and the mitigation of forest-fire risk. *Proc Natl Acad Sci*, 104:14272–14276, 2007.
- [73] Bar M.A. Brennan T. Radeloff V. Syphard A., Keeley J. Housing arrangement and location determine the likelihood of housing loss due to wildfire. *PloS one*, 7:33954, 2012.
- [74] Hawbaker T. Stewart S. Syphard A., Radeloff V. Conservation threats due to human-caused increases in fire frequency in mediterranean-climate ecosystems. *Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology*, 23:758–69, 2009.
- [75] Keeley J. Hawbaker T. Clayton Murray K. Syphard A., Radeloff V. και Hammer R. Stewart S. Human influence on california fire regimes. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, 17:1388–402, 2007.
- [76] Αθανασίου Μ., Ξανθόπουλος Γ. Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα. Στα πρακτικά του 14ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, σελίδες 591–602, 2009.
- [77] Αποστολοπούλου ΝΑ. Επιδόσεις υλικών ως προς την αντίδραση στη φωτιά: Κατάταξη υλικών ως προς την αντίδραση στη φωτιά σύμφωνα με το σύστημα EUROCLASS, με βάση δοκιμές σε θερμιδόμετρο κώνου. Εφαρμογή σε μονωτικά υλικά από αφρώδες πολυαιθυλένιο. σελίδες 6–7, 2016.
- [78] Ευελπίδου Ν., Αντωνίου Βαρβάρα. Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. σελίδες 10–30, 2015.
- [79] Κουτσόπουλος Κ. Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου. 2005.
- [80] Κρασσάκης Π. Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών με τη χρήση ArcGIS 10.x. σελίδες 3–15, 2015.

- [81] Ξανθόπουλος Γ. Δυνατότητες πρόβλεψης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στα δάση της Ελλάδας. *Στα πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Δασολογικής Εταιρείας, με θέμα "Δασοπονία και Περιφερειακή Ανάπτυξη"*, σελίδες 199–203, 1990.
- [82] Ξανθόπουλος Γ. Τυποποίηση και μεθοδολογία διαχείρισης δασικών καυσίμων στην Αττική. *Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων*, Η σχέση δασικών καυσίμων και πυρκαγιών: Περιγραφή της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών: Κατηγορίες δασικών πυρκαγιών, 2007.
- [83] Ξανθόπουλος Γ. Τυποποίηση και μεθοδολογία διαχείρισης δασικών καυσίμων στην Αττική. *Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων*, Η σχέση δασικών καυσίμων και πυρκαγιών: Παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς: Καύσιμη ύλη, 2007.
- [84] Ξανθόπουλος Γ. Τυποποίηση και μεθοδολογία διαχείρισης δασικών καυσίμων στην Αττική. *Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων*, Η σχέση δασικών καυσίμων και πυρκαγιών: Παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς: Καιρικές συνθήκες, 2007.
- [85] Ρηγοπούλου - Κασελούρη Β, Φτίκος Χ, Σχίζας Α. ΟΔΗΓΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελίδα 24, 2003.
- [86] Σταμπουλίδης ΚΑ. Προσομοίωση της Εξέλιξης Δασικών Πυρκαγιών με Προσδιορισμό Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από Τηλεσκοπικά Δεδομένα. σελίδα 20, 2017.
- [87] Pandey M.D. Caspee R. Van Coile R., Balomenos G.P. An unbiased method for probabilistic fire safety engineering, requiring a limited number of model evaluations. *Fire Technology*, 53:1705–1744, 2017.
- [88] Taerwe L. Van Coile R., Caspee R. Reliability-based evaluation of the inherent safety presumptions in common fire safety design. *Eng. Struct.*, 7:181–192, 2014.
- [89] Patel Weynand T. Vose J.M., Peterson D.L. Effects of climatic variability and change on forest ecosystems: A comprehensive science synthesis for the u.s. forest sector. *USDA Forest Service General Technical Report*, 870:7–15, 2012.
- [90] Caspee R. Taerwe L. Wang L., Van Coile R. A parametric study on concrete columns exposed to biaxial bending at elevated temperatures using a probabilistic analysis. *In: High tech concrete: where technology and engineering meet*, σελίδες 1662–1670, 2018.
- [91] Cayan D.R. Swetnam T.W. Westerling A.L., Hidalgo H.G. Warming and earlier spring increase western us forest wildfire activity. *Science*, 313:940–943, 2006.

Συντομογραφίες - Ακρωνύμια

PDA	Portable Device Assistant
GPS	Global Positioning System
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research
NFDRS	National Fire Danger Rating System
n	Sample number
W	West
N	North
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΕΓΣΑ'87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
Η/Υ	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
ΜΚΥ	Μοντέλα Καύσιμης Ύλης
Ο/Σ	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
κοκ	και ούτω καθεξής

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

Εικονοκυτταρικό/Ψηφιδωτό

Καμπύλη ευαισθησίας

Πιθανότητα

Χαρακτηριστικό μέγεθος έντασης

Διανυσματικό

Εικονοστοιχείο

Τηλεκατευθυνόμενο ρομπότ

Μέγιστο ύψος καύσης

Πιθανότητα

Χαρακτηριστικό μέγεθος έντασης

Όγκος κόμης του δάσους

Περιεκτικότητα υγρασίας στη φυλλωσιά

Ύψος υπόβαθρου κόμης

Συνολικό ύψος δέντρου

Ξενόγλωσσος όρος

Raster

Fragility curve

Probability

Intensity measure

Vector

Pixel

Drone

Scorch height

Probability

Intensity measure

Crown bulk density

Foliage moisture content

Crown base height

Stand height

Απόδοση μονάδων μέτρησης

km	kilometer
m	meter
m ²	square meter
m ³	cubic meter
mm	millimeter
cm	centimeter
kW	kilo watt
kJ	kilo joule
g	gram
kg	kilo
°C	celsius
h	hour
min	minute
s	second





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πυρκαγιά στη Βορειοανατολική Αττική
της 23^{ης} Ιουλίου 2018: Χωρική αποτύπω-
ση των οικιών, κατηγοριοποίηση και μελέτη
των δομικών υλικών τους ως καύσιμη ύλη

Μάρκος Ι. Αλεξόπουλος

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2019



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πυρκαγιά στη Βορειοανατολική Αττική
της 23^{ης} Ιουλίου 2018: Χωρική αποτύπω-
ση των οικιών, κατηγοριοποίηση και μελέτη
των δομικών υλικών τους ως καύσιμη ύλη

Μάρκος Ι. Αλεξόπουλος

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2019

