

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΛΕΙΒΑΔΙΩΤΗΣ

Πειραματική Διερεύνηση  
Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών  
Δασικών Πυρκαγιών σε Διάταξη  
Μικρής Κλίμακας

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Διονύσιος Κολαΐτης, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Αθήνα 2021



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ANASTASIOS LEIVADIOTIS**

**Experimental Study of  
Geometrical Characteristics of  
Wildland Fires using a Small Scale  
Test Rig**

**Section: Thermal Engineering**

**Supervisor: Dionysios Kolaitis, Special Teaching Staff NTUA**

**Athens 2021**



**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

**Αναστάσιος Λειβαδιώτης**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Διονύση Κολαΐτη, όχι μόνο για τις στοχευμένες συμβουλές του και τις πολύτιμες παρεμβάσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και για το γεγονός ότι οι γνώσεις και η μεταδοτικότητα του με ενέπνευσαν και διέγειραν το ενδιαφέρον μου για τα φαινόμενα της καύσης στα τελευταία έτη των σπουδών μου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Παλλικαράκη, ο οποίος αποτέλεσε τον συνοδοιπόρο μου στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας, από το ξεκίνημα της και τη συλλογή του καυσίμου έως την υλοποίηση των πειραμάτων και τις ανιδιοτελείς συμβουλές του στις συνεχόμενες απορίες μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι αποτέλεσαν τον σύμμαχο μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου, από το νωχελικό ξεκίνημα μου ως φοιτητής έως το τέλος. Σε αυτούς είναι αφιερωμένη η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, στην Κατερίνα και το Γιώργο.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση διάφορων παραγόντων στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών. Ειδικότερα, ερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας κλίσης του εδάφους, της ποσότητας καυσίμου και της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου στο ύψος, το μήκος και τη γωνία κλίσης της φλόγας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραματικών δοκιμών σε διάταξη κλίνης καυσίμου μικρής κλίμακας, η οποία κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης. Για την εξαγωγή και σύγκριση των αποτελεσμάτων μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές γωνίες κλίσης εδάφους (0, 10, 20, 30 μοίρες) σε συνδυασμό με δύο διαφορετικές ποσότητες καυσίμου (0.5, 1 kg/m<sup>2</sup>) και δύο διαφορετικές ποσότητες περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου (1, 8%). Με τη χρήση δύο ψηφιακών καμερών, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε καθορισμένες θέσεις, ελήφθησαν video για κάθε πειραματική δοκιμή. Έπειτα, μέσω κατάλληλης ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας και χρήσης λογισμικού (image processing) προσδιοριστήκαν τα εξεταζόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 10 πειραματικές δοκιμές φωτιάς και οι μετρούμενες τιμές που προέκυψαν μαζί με πειραματικές τιμές διάφορων επιστημονικών ερευνών συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες εξισώσεις της βιβλιογραφίας.

## **ABSTRACT**

The main subject of this diploma thesis is the study of the effect of various factors on the geometrical characteristics of wildland fires. More specifically, an extensive parametric study was performed in order to evaluate the impact of the surface slope, the fuel load and the content of fuel moisture on the height, the length and the inclination angle of the flame. A series of experimental tests was conducted using a small scale test rig, which was constructed in the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems. Fire tests were done at four different surface slope angles (0, 10, 20, 30 degrees) using two different fuel loads (0.5, 1 kg/m<sup>2</sup>) and two different fuel moisture contents (1, 8%). Then, using two digital cameras, placed at defined spots, videos were captured for each fire test performed. By using specific image processing techniques and software, the flame geometry results were determined. In total, 10 experimental cases were performed and the results obtained with the experimental results from other scientific studies were compared to the corresponding correlations of bibliography.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT .....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Δασικές Πυρκαγιές.....	11
1.1.1 Συστατικά Στοιχεία της Δασικής Βιομάζας.....	11
1.1.2 Κατάταξη Δασικών Καυσίμων και Πυρκαγιών .....	12
1.1.3 Αιτίες Πρόκλησης Δασικών Πυρκαγιών.....	14
1.1.4 Επιπτώσεις Δασικών Πυρκαγιών στο Περιβάλλον.....	15
1.1.5 Επιπτώσεις Δασικών Πυρκαγιών στον Άνθρωπο .....	15
1.2 Βασικές Παράμετροι Επίδρασης στη Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών .....	16
1.2.1 Τοπογραφία .....	17
1.2.2 Δασική Βλάστηση.....	18
1.2.3 Μετεωρολογία .....	19
1.3 Πυρκαγιές στην Ελλάδα .....	20
1.3.1 Αιτίες Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών στην Ελλάδα.....	21
1.3.2 Χάρτες Επικινδυνότητας Έναρξης Πυρκαγιάς στην Ελλάδα.....	22
1.3.3 Πυρκαγιές στη Ζώνη Μείξης Δασών – Οικισμών .....	25
1.3.4 Χαρακτηριστικά της Βλάστησης στην Ελλάδα.....	26
1.3.5 Καιρικές Συνθήκες στην Ελλάδα.....	27
1.3.6 Μελλοντική Εξέλιξη του Κινδύνου Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών .....	30
1.4 Σκοπός της Εργασίας.....	30
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ .....	31
2.1 Στάδια της Καύσης στις Δασικές Πυρκαγιές.....	31
2.1.1 Προθέρμανση .....	31
2.1.2 Πυρόλυση .....	32
2.1.3 Έναυση και Δημιουργία Φλόγας .....	32
2.1.4 Δημιουργία και Καύση Εξανθρακώματος .....	32
2.1.5 Επίδραση της Τύρβης στις Δασικές Πυρκαγιές .....	33
2.2 Μηχανισμοί Διάδοσης Δασικής Φωτιάς.....	33
2.2.1 Αγωγή.....	34
2.2.2 Συναγωγή .....	34
2.2.3 Ακτινοβολία .....	34
2.2.4 Κηλίδωση .....	35
2.3 Χρονική και Χωρική Κλίμακα στις Δασικές Πυρκαγιές .....	36
2.4 Ποσοτικά Χαρακτηριστικά της Δασικής Φωτιάς .....	37
2.4.1 Ρυθμός Εξάπλωσης της Φωτιάς .....	37
2.4.2 Ένταση της Φωτιάς .....	39
2.4.3 Μήκος και Ύψος της Φλόγας .....	42
2.5 Πειραματικές Μελέτες.....	43
2.5.1 Μελέτες Μικρής Κλίμακας (Fuel Beds).....	44
2.5.2 Μελέτες Μεγάλης Κλίμακας.....	46
2.6 Σχέσεις Προσδιορισμού Γεωμετρικών Μεγεθών .....	48

2.6.1 Σχέσεις Μήκους Φλόγας.....	49
2.6.2 Σχέσεις Γωνίας Κλίσης της Φλόγας.....	52
2.6.3 Σχέσεις Ύψους Φλόγας .....	54
3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ .....	55
3.1 Μήκος Φλόγας .....	55
3.1.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων .....	56
3.1.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων.....	61
3.1.3 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Κλίση του Εδάφους..	64
3.1.4 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Ταχύτητα του Ανέμου	69
3.1.5 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Περιεχόμενη Υγρασία του Καυσίμου .....	72
3.1.6 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Ποσότητα του Καυσίμου	75
3.1.7 Συγκεντρωτική Παρουσίαση των Εξισώσεων του Μήκους της Φλόγας .....	78
3.2 Γωνία Κλίσης Φλόγας.....	80
3.2.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων .....	81
3.2.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων.....	84
3.3 Ύψος φλόγας .....	86
3.3.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων .....	87
3.3.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων.....	89
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....	92
4.1 Κλίση Καυσίμου .....	92
4.2 Οπτικές Κάμερες .....	93
4.3 Ανάπτυξη Λογισμικού Αναγνώρισης Ορίων Φλόγας.....	95
4.3.1 Προεργασία Βίντεο και Φωτογραφιών .....	95
4.3.2 Χρωματικό Μοντέλο .....	97
4.3.3 Λογισμικό MATLAB .....	99
4.3.4 Αλγόριθμος Επεξεργασίας Εικόνας στο MATLAB .....	100
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ .....	105
5.1 Παραμετρικές Μελέτες .....	105
5.1.1 Σφάλματα Τεχνικών Μετρήσεων .....	107
5.1.2 Επαναληψιμότητα .....	111
5.1.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Κλίσης Καυσίμου.....	117
5.1.4 Ποιοτική Περιγραφή Εξέλιξης του Φαινομένου.....	118
5.2 Μετρήσεις Ύψους Φλόγας .....	119
5.2.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίσης Καυσίμου .....	120
5.2.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου .....	121
5.3 Μετρήσεις Μήκους Φλόγας .....	123
5.3.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίσης Καυσίμου .....	123
5.3.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου .....	125
5.4 Μετρήσεις Γωνίας Κλίσης της Φλόγας .....	125
5.4.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίσης Καυσίμου .....	125
5.4.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου .....	127
5.5 Μετρήσεις Ρυθμού Εξάπλωσης της Φλόγας .....	128
5.5.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίσης Καυσίμου .....	129



5.5.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου .....	130
6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	132
6.1 Μήκος Φλόγας .....	132
6.1.1 Αξιολόγηση Εξισώσεων ως προς την Γωνία Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου...	134
6.1.2 Αξιολόγηση Εξισώσεων ως προς την Περιεχόμενη Υγρασία και την Ποσότητα του Καυσίμου .....	135
6.1.3 Γενική Αξιολόγηση Εξισώσεων και Σύγκριση Αποτελεσμάτων με το Κεφάλαιο 3	137
7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΕΛΛΗΝΙΚΗ) .....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΞΕΝΗ).....	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Α .....	148

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
$A$	Γωνία φλόγας	degrees
$A_T$	Γωνία κλίσης φλόγας	degrees
$B_T$	Συστηματική πηγή σφάλματος	-
$D$	Βάθος ενεργής οριζόντιας φλόγας	m
$d$	Διάμετρος στοιχείων καύσιμης ύλης	cm
$FMC$	Περιεχόμενη υγρασία καυσίμου	%
$g$	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s <sup>2</sup>
$H_u$	Κατώτερη θερμογόνο δύναμη καυσίμου	kJ/kg
$h_F$	Ύψος φλόγας	m
$I$	Ένταση φωτιάς	kW/m
$I_R$	Ένταση αντίδρασης καύσης	kW/m <sup>2</sup>
$L$	Μήκος φλόγας	m
$N$	Μέγεθος δείγματος	-
$q$	Δυναμική πίεση ροής αέρα	kg/m <sup>2</sup>
$r$	Ρυθμός εξάπλωσης φλόγας	m/s
$S$	Γωνία κλίσης κλίνης καυσίμου	degrees
$S_T$	Τυχαία πηγή σφάλματος	-
$s$	Τυπική απόκλιση	-
$s_t$	Στοιχειομετρική σταθερά	-
$T$	Θερμοκρασία φλόγας	K
$T_\alpha$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	K
$t$	Χρόνος εξέλιξης του φαινομένου της πυρκαγιάς	s
$t_r$	Χρόνος παραμονής φλόγας	s
$U$	Ταχύτητα αέρα	m/s
$U_{95}$	Συνολική αβεβαιότητα	-
$u_o$	Κατακόρυφη ταχύτητα καυσαερίων σε επίπεδη κλίση	m/s
$w$	Μάζα καταναλισκόμενου καυσίμου	kg/m <sup>2</sup>
$w_o$	Φορτίο καυσίμου στην κλίση διαθέσιμο προς καύση	kg/m <sup>2</sup>
$\alpha$	Πορώδες κλίνης καυσίμου	-
$\beta$	Βαθμός συμπίεσης κλίνης καυσίμου	-
$\delta$	Ύψος κλίνης καυσίμου	m
$\rho_\alpha$	Πυκνότητα αέρα	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_\nu$	Πυκνότητα καυσίμου	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Αναλογία επιφάνειας προς όγκο ενός στοιχείου καυσίμου	m <sup>-1</sup>
$\sigma_\chi$	Τυπική απόκλιση μέσης τιμής	-
$\tau_o$	Χρονική σταθερά κατά Anderson	-

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Δασικές Πυρκαγιές

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο, έντονα καταστροφικό με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην απώλεια περιουσιών και κυρίως, ανθρωπίνων ζωών.

Οι προσπάθειες διαχείρισης και καταπολέμησης των δασικών πυρκαγιών παρουσιάζουν ιδιαίτερη δυσκολία και πρόκληση εξαιτίας της πολυπλοκότητας των διεργασιών που συντελούνται, του ευρύ φάσματος ευμετάβλητων και αστάθμητων παραγόντων που υπεισέρχονται, καθώς και της μεταβλητότητας των χρονικών και χωρικών κλιμάκων στις οποίες συμβαίνουν οι φυσικές και χημικές διαδικασίες.

Η αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφορά μιας φωτιάς αποτελεί το κύριο ζητούμενο για την αποτελεσματική και ασφαλή κατάσβεση της. Η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών μιας φλόγας καθώς και η γνώση των παραγόντων που τους επηρεάζουν συνιστούν τον ακρογωνιαίο λίθο αντιμετώπισης της δασικής πυρκαγιάς.



**Σχήμα 1.1** Στιγμιότυπο από τις δασικές πυρκαγιές στη Πελοπόννησο το καλοκαίρι του 2007.

### 1.1.1 Συστατικά Στοιχεία της Δασικής Βιομάζας

Στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών, η καύσιμη ύλη αποτελείται από τους ζωντανούς ή νεκρούς ιστούς των φυτών (Καϊλίδης και Καρανικόλα 2004). Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, μιας σημαντικής και πολύπλοκης βιολογικής διεργασίας, οι φυτικοί οργανισμοί μετατρέπουν τη φωτεινή ενέργεια σε χημική ενέργεια. Ειδικότερα, οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί δεσμεύουν την ενέργεια του ηλιακού φωτός, διοξείδιο του άνθρακα και νερό παράγοντας συστατικά απαραίτητα για τη θρέψη, την ανάπτυξη και τη συντήρησή τους, όπως οξυγόνο και πλούσιες οργανικές ενώσεις, κυρίως τη γλυκόζη ( $C_6H_{12}O_6$ ). Έπειτα, πολλά μόρια γλυκόζης συνδυάζονται και παράγουν το άμυλο, το οποίο

αποτελεί βασικό απόθεμα υδατανθράκων για τα φυτά και την κυτταρίνη. Η κυτταρίνη ((C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>) ενεργεί στα φυτά ως δομικό συστατικό και υπάρχει στο κυτταρικό τοίχωμα, ειδικά στους κορμούς και στην ξυλώδη περιοχή των φυτών. Η κυτταρίνη είναι ο πολυσακχαρίτης που αποτελείται από πολυάριθμες μονάδες γλυκόζης και απαντάται σε ποσοστό 33% έως 50% στη μάζα των φυτικών οργανισμών. Επίσης, ένα άλλος σημαντικός πολυσακχαρίτης που απαντάται σε ποσοστό 17% έως 42% στο κυτταρικό τοίχωμα, πάντα μαζί με την κυτταρίνη, είναι οι ημικυτταρίνες. Τέλος, η λιγνίνη αποτελεί μια αρωματική ένωση που συναντάται σε ποσοστό 17% έως 35% τόσο στο ξύλο όσο και στους φυτικούς οργανισμούς και παίζει το ρόλο της συγκολλητικής ουσίας και της ενίσχυσης της μηχανικής αντοχής των κυτταρικών τοιχωμάτων. Επομένως, η κυτταρίνη, οι ημικυτταρίνες και η λιγνίνη αποτελούν τα βασικά συστατικά του καυσίμου της βιομάζας. Επίσης, μια μεγάλη ποικιλία άλλων στοιχείων και ενώσεων παρατηρείται στη σύσταση της δασικής βιομάζας σε μικρότερες αναλογίες, όπως για παράδειγμα, ανόργανα στοιχεία και ιχνοστοιχεία (N, P, K, Ca, Mg), νερό, άλατα, λιπαρά και λιπαρά οξέα. Μερικά από αυτά, μετά την καύση, ειδικά τα ανόργανα στοιχεία, εμφανίζονται ως στάχτη (Sullivan 2017a).

### *1.1.2 Κατάταξη Δασικών Καυσίμων και Πυρκαγιών*

Η δασική καύσιμη ύλη χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη θέση που αυτή κατέχει στο δάσος:

α) Υπεδάφια καύσιμη ύλη, που περιλαμβάνει όλα τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως βαθύ χούμου, τύρφη, ρίζες, θαμμένοι κορμοί, αποσυντεθειμένα φύλλα και βελόνες .

β) Επιεδάφια καύσιμη ύλη, που περιλαμβάνει όλα τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται στο έδαφος και μέχρι ύψους 2 μέτρων από αυτό, όπως χούμου (δηλαδή τη νεκρή καύσιμη ύλη που έχει αποσυντεθεί όπως βελόνες, φύλλα κλαδάκια), ξηροφυλλοτάπητα (δηλαδή τα νεκρά κατακείμενα χόρτα, βελόνες φύλλα, κλαδιά που δεν έχει προχωρήσει η αποσύνθεση τους), χόρτα, πρέμνα, πώδη βλάστηση, μικροί θάμνοι, πεσμένα ή νεαρά δέντρα, σπασμένα κλαδιά κ.λπ.

γ) Εναέρια καύσιμη ύλη, που περιλαμβάνει το σύνολο της καύσιμης ύλης που βρίσκεται σε ύψος 2 m από το έδαφος και ψηλότερα, όπως το φύλλωμα και τα κλαδιά των δένδρων, υψηλοί θάμνοι, αναρριχώμενα φυτά, λειχήνες, βρύα, όρθια νεκρά δένδρα κ.λπ. (Κατσάνος 1970).

Επομένως, οι δασικές πυρκαγιές, ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσης τους διακρίνονται, αντίστοιχα με την κατάταξη των καυσίμων, σε εδάφους ή υπόγειες, σε επιφάνειας ή έρπουσες, σε κόμης ή επικόρυφες.

Στις πυρκαγιές εδάφους (ground fires) καίγεται η οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια του φυλλοστρώματος του εδάφους. Χαρακτηρίζονται από βραδεία καύση λόγω έλλειψης του απαραίτητου οξυγόνου και είναι δυνατό να μην υπάρχει παραγωγή καπνού, οπότε γίνονται δύσκολα αντιληπτές. Η φωτιά μπορεί να διατηρηθεί για ώρες αποτελώντας συχνά πηγή αναζωπυρώσεων και πρόκλησης της επόμενης κατηγορίας πυρκαγιών, των επιφανειακών. Επίσης, έχουν την δυνατότητα να διεισδύσουν βαθύτερα στο έδαφος έως και 2 m. Εξαπλώνονται αργά και δύσκολα κατασβήνονται (Σχήμα 1.2).



**Σχήμα 1.2** Πυρκαγιά εδάφους σε δασική έκταση.

Οι πυρκαγιές επιφάνειας (surface fires) εξαπλώνονται στα επιφανειακά καύσιμα. Η αρχική ανάφλεξη των περισσότερων πυρκαγιών γίνεται με την καύσιμη ύλη επί του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς επιφάνειας εξαρτώνται άμεσα από τις υπάρχουσες καιρικές συνθήκες και την τοπογραφία. Μπορούν να αποκτήσουν επικίνδυνη συμπεριφορά και ταχεία εξάπλωση εφόσον το επιτρέψουν οι συνθήκες. Η ποσότητα οξυγόνου υπάρχει σε περίσσεια επάρκεια, σε αντίθεση με τις πυρκαγιές εδάφους. Συνήθως προκαλούν τις πυρκαγιές κόμης (Σχήμα 1.3).



**Σχήμα 1.3** Πυρκαγιά επιφάνειας χαμηλής έντασης σε ξηροβελονοτάπητα.

Στις πυρκαγιές κόμης (crown fires) καίγεται η εναέρια καύσιμη ύλη. Η ανάφλεξη της οφείλεται συνήθως στις πυρκαγιές επιφάνειας και παρατηρείται έντονη αύξηση του

μήκους και της έντασης της φλόγας. Είναι οι πλέον επικίνδυνες καθώς εξαπλώνονται ταχύτερα, καταστέλλονται δυσκολότερα και συντελείται μεγάλη καταστροφή δασών (Καϊλίδης και Καρανικόλα 2004) (Σχήμα 1.4).

Ο Van Wagner (1977) αναγνώρισε τρεις κατηγορίες πυρκαγιών κόμης σε κωνοφόρα, ανάλογα με τον βαθμό εξάρτησης τους από τους πυρκαγιές επιφανείας: α) η παθητική πυρκαγιά κόμης (passive crown fire) είναι η δασική πυρκαγιά κατά την οποία ένα μέρος της κόμης ή όλη η κόμη του δένδρου καίγεται, αλλά η συμπεριφορά της φωτιάς εξαρτάται από τη συμπεριφορά της φωτιάς στην επιφανειακή βλάστηση, β) η ενεργή πυρκαγιά κόμης (active crown fire) είναι η δασική πυρκαγιά η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως και πάνω από τον ανώροφο της κόμης των δέντρων. Οι δύο φάσεις των πυρκαγιών (επιφάνειας και κόμης) διαδίδονται σαν μια ενότητα. Ωστόσο, η συμπεριφορά της φωτιάς στην κόμη εξαρτάται από τη φάση της φωτιάς στη κόμη. Σε αυτή τη κατηγορία παρατηρούνται υψηλής έντασης και έντονα καταστροφικές φωτιές με ταχεία εξάπλωση και γ) η ανεξάρτητη πυρκαγιά κόμης (independent crown fire), η οποία διαδίδεται από κόμη σε κόμη χωρίς ταυτόχρονη και άμεση κατανάλωση της υποκείμενης επιφανειακής βλάστησης. Εξαπλώνεται στον ανώροφο των δέντρων χωρίς να εξαρτάται από την πυρκαγιά επιφανείας.



**Σχήμα 1.4** Καθοδηγούμενη από τον άνεμο ενεργή πυρκαγιά κόμης.

### **1.1.3 Αιτίες Πρόκλησης Δασικών Πυρκαγιών**

Τα αίτια έναρξης των δασικών πυρκαγιών διακρίνονται σε “φυσικά”, που αποτελούν απόρροια φυσικών φαινομένων και “ανθρωπογενή”, που οφείλονται στην εκούσια ή ακούσια δράση του ανθρώπου.

Πιο συγκεκριμένα, τα φυσικά αίτια αναφέρονται σε πυρκαγιές που δεν οφείλονται σε ανθρώπινη δράση αλλά, σχεδόν, αποκλειστικά σε κεραυνούς. Στη συνέχεια, τα ανθρωπογενή αίτια διακρίνονται στους εμπρησμούς, όπου οι πυρκαγιές οφείλονται στην εκούσια δράση του ανθρώπου για οποιοδήποτε λόγο και στις αμέλειες. Οι αμέλειες αναφέρονται σε πυρκαγιές που προκαλούνται από την ακούσια δράση του ανθρώπου όπως αναμμένα τσιγάρα, καύση απορριμμάτων, εργαζόμενοι στο ύπαιθρο, εκδρομείς – κυνηγοί, ανήλικα άτομα, άτομα μειωμένης αντίληψης πλην πυρομανών, βολές στρατού, χρήση εκρηκτικών υλών κατά την οδοποιία, βραχυκυκλώματα ηλεκτροφόρων καλωδίων,



σπινθήρες από σιδηροδρομικούς σταθμούς, αυτοκίνητα και μηχανές και διάφορες άλλες αιτίες που οφείλονται σε ακούσια ή τυχαία γεγονότα.

Τέλος, υπάρχουν και τα άγνωστα αίτια πρόκλησης πυρκαγιών των οποίων η έναρξη δεν έχει εξακριβωθεί με βεβαιότητα (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

#### ***1.1.4 Επιπτώσεις Δασικών Πυρκαγιών στο Περιβάλλον***

Οι πυρκαγιές των δασών αποτελούν διαχρονικά σημαντικές συνιστώσες των μεγαλύτερων παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ειδικότερα, η καταστροφή των δασών από πυρκαγιές έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο την απώλεια των κυριότερων χερσαίων δεσμευτών του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, αλλά και τη μαζική απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>x</sub>O<sub>x</sub>) που προκύπτουν ως προϊόντα της καύσης της δασικής και φυτικής βιομάζας.

Επίσης, αύξηση των συγκεντρώσεων αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται μεγαλύτερη δέσμευση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα το κλίμα της Γης να γίνεται προοδευτικά θερμότερο, ξηρότερο και ως εκ τούτου, περισσότερο ευνοϊκό για την έναρξη και εξάπλωση πυρκαγιών στα δάση. Επιπρόσθετα, οι πυρκαγιές συμβάλλουν στις συνθήκες που ευνοούν την κλιματική αλλαγή, αποδεσμεύοντας τα αποθέματα άνθρακα που δεσμεύονται εδώ και αιώνες, μέσω της φωτοσύνθεσης, στη φυτική βιομάζα. Δέκα στρέμματα δάσους παράγουν 4 τόνους οξυγόνο το χρόνο, ενώ αντίθετα η καύση των δασών συνεισφέρει κατά 8% στο συνολικά εκπεμπόμενο στην ατμόσφαιρα CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> και κατά 13% σε N<sub>x</sub>O<sub>x</sub>, παγκοσμίως (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

#### ***1.1.5 Επιπτώσεις Δασικών Πυρκαγιών στον Άνθρωπο***

Οι πυρκαγιές δασών προξενούν άμεσες καταστροφές και ζημιές που συνεπάγονται αντίστοιχες απώλειες στον άνθρωπο και τις ανθρώπινες οικονομικές δραστηριότητες. Η πιο σημαντική επίπτωση είναι η απώλεια ανθρωπίνων ζώων. Τέτοιες απώλειες αφορούν τόσο το προσωπικό της δασοπυρόσβεσης όσο και τους απλούς πολίτες και οφείλονται κυρίως σε εγκλωβισμό από τη φωτιά, καθώς οι πυρκαγιές κινούνται με ταχύτητα που σε ορισμένα καύσιμα (π.χ. χαμηλά χόρτα, χαμηλοί θάμνοι) ή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρός άνεμος, χαμηλή υγρασία), ξεπερνά την ταχύτητα του ανθρώπου (>5 km/h). Καταλυτικό ρόλο στους εγκλωβισμούς παίζει συχνά η τοπογραφία (μεγάλες κλίσεις, κλειστά φαράγγια), η χωροταξία και οι συνθήκες που δημιουργεί η ίδια η πυρκαγιά (πυκνός καπνός που περιορίζει την ορατότητα, εισπνοή θερμών και τοξικών αερίων). Σημαντικοί παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στον εγκλωβισμό είναι ο πανικός και η απώλεια προσανατολισμού που επιδεινώνουν σημαντικά τις συνθήκες μετακίνησης είτε αυτή γίνεται με όχημα είτε πεζή. Πολλά από τα θύματα των πυρκαγιών χάνουν τη ζωή τους στην προσπάθεια να απομακρυνθούν μέσα σε οχήματα σε μπλοκαρισμένους ή αδιέξοδους δρόμους. Επιπλέον, δεν είναι σπάνια η απώλεια ζώων ή σοβαροί τραυματισμοί κατά τη διάρκεια των προσπαθειών δασοπυρόσβεσης που οφείλονται στις αντίξοες περιβαλλοντικές και εργασιακές συνθήκες που διεξάγεται το έργο καταστολής (οδικά ατυχήματα, αλυσοπρίονα, θερμοπληξία, εισπνοή μονοξειδίου, πτώση βράχων και δέντρων). Πρέπει να αναφερθεί, επίσης, η επικινδυνότητα του έργου της αεροπυρόσβεσης,

καθώς και το τίμημα σε ζωές και τραυματισμούς πιλότων ελικοπτέρων και πυροσβεστικών αεροσκαφών λόγω των εξαιρετικά δύσκολων συνθηκών.

Στη συνέχεια, σημαντικές είναι οι απώλειες σε κτίρια και δίκτυα υποδομών ζωτικής σημασίας, όπως δρόμοι, ηλεκτρικό δίκτυο, δίκτυο τηλεπικοινωνιών, δίκτυο ύδρευσης. Πρέπει να τονισθεί ότι μεγάλη σημασία για την πιθανότητα καταστροφής έχει το είδος και η ποιότητα των υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για τις κατασκευές σε εκτάσεις με δασική βλάστηση. Έτσι, σε χώρες όπως οι Η.Π.Α, ο Καναδάς και η Αυστραλία οι καταστροφές κατοικιών, που κατά κανόνα είναι κατασκευασμένες από ξύλο, συχνά φθάνουν τις εκατοντάδες σε μια πυρκαγιά. Αντίθετα, σε περιοχές όπου οι κατοικίες κατασκευάζονται από αδρανή υλικά, όπως στην Ελλάδα, οι απώλειες είναι, κατά κανόνα, πολύ μικρότερες.

Επιπρόσθετα, η πυρκαγιά επιφέρει εκτεταμένες καταστροφές στις γεωργικές καλλιέργειες καθώς και στο κτηνοτροφικό κεφάλαιο. Σε μερικές περιπτώσεις, η οικονομική ζημιά που συνεπάγεται περιορίζεται στην σοδειά μιας χρονιάς, όπως σε περιοχές που έχουν τη μορφή εκτεταμένου σιτοβολώνα ιδίως όταν εκδηλωθεί πυρκαγιά πριν το θερισμό. Αντίθετα, καταστροφές πολυετών καλλιεργειών, όπως οπωροφόρα δέντρα και ιδίως τα ελαιόδεντρα είναι οικονομικά πολύ μεγαλύτερες γιατί έχουν οικονομικές επιπτώσεις για περισσότερα χρόνια. Επίσης, παρατηρούνται καταστροφές στο ζωικό κεφάλαιο στην περίπτωση που οι πυρκαγιές φθάνουν και καίνε εγκαταστάσεις ενσταβλισμένης κτηνοτροφίας ή φύλαξης ζώων, εάν δεν καταστεί δυνατή η απομάκρυνση τους, ενώ σπανιότερη είναι η απώλεια ζώων που βόσκουν ελεύθερα.

Μια ακόμα αρνητική συνέπεια των δασικών πυρκαγιών είναι η απώλεια και η υποβάθμιση των δασικών προϊόντων (π.χ. ξυλεία, ρετσίνα, καρποί κ.λπ.).

Τέλος, θα πρέπει να τονισθούν οι έμμεσες επιπτώσεις των πυρκαγιών στις περιοχές που εκδηλώνονται. Ειδικότερα, αυτές συνδέονται με τη διαταραχή του ρυθμού της κοινωνικής και οικονομικής ζωής κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την πυρκαγιά (π.χ. δημιουργία αστέγων). Επίσης, συντελείται υποβάθμιση του αισθητικού και τουριστικού προϊόντος μετά από μεγάλες πυρκαγιές κοντά σε κατοικημένες περιοχές και τουριστικά θέρετρα. Σημαντική είναι η επίπτωση στην απώλεια των οικοσυστημικών υπηρεσιών του δάσους (έλεγχος διάβρωσης, πλημμυρών, παραγωγή νερού). Η πιο προφανής δευτερογενής επίπτωση είναι η κατακόρυφη αύξηση του κινδύνου των πλημμυρών στις καμένες περιοχές καθώς και σε περιοχές που βρίσκονται στα κατάντι (χαμηλότερα) των καμένων περιοχών. Η καταστροφή της εδαφικής κάλυψης από τη βλάστηση που καίγεται έχει σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη και ανεμπόδιστη κίνηση του νερού των καταιγίδων, που ακολουθούν την περίοδο των πυρκαγιών, με αποτέλεσμα την παράσυρση του εδάφους (λάσπη, πέτρες, υπολείμματα βλάστησης) στην κοίτη χειμάρρων και ρεμάτων, το στένεμα ή το κλείσιμο της κοίτης με αποτέλεσμα την υπερχειλίση αυτών και την πρόκληση καταστροφικών πλημμυρών. Τέλος, πρέπει να τονισθεί η επίδραση του καπνού και των τοξικών προϊόντων που παράγει η καύση για την υγεία και τη ζωή των περιοχών που πλήττονται (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

## **1.2 Βασικές Παράμετροι Επίδρασης στη Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών**

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών προϋποθέτει την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων της φωτιάς με το περιβάλλον της (Countryman 1972), το οποίο



συνίσταται σε 3 ομάδες παραγόντων (Σχήμα 1.5): α) την τοπογραφία (η κλίση, η έκθεση, το υψόμετρο, τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά), β) τη δασική βλάστηση (η ποσότητα της βιομάζας, η περιεχόμενη υγρασία, οι διαστάσεις, ο βαθμός συμπίεσης, η θερμοκρασία), και γ) τις μετεωρολογικές συνθήκες (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα, ένταση και διεύθυνση ανέμου, αστάθεια ή ευστάθεια της ατμόσφαιρας).



Σχήμα 1.5 Το τρίγωνο της φωτιάς στις δασικές πυρκαγιές.

### 1.2.1 Τοπογραφία

Η τοπογραφική διαμόρφωση μπορεί να προκαλέσει δραματικές αλλαγές στη συμπεριφορά μιας φωτιάς (Καϊλίδης και Καρανικόλα 2004). Αρχικά, η κλίση του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επέκταση της φωτιάς. Η πυρκαγιά, κατά κανόνα, εξαπλώνεται προς τα υψηλότερα σημεία κάθε πλαγιάς, εκτός αν υπάρχει ισχυρός αντίθετος άνεμος. Η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης. Εξαιτίας της κλίσης οι φλόγες πλησιάζουν την καύσιμη ύλη μπροστά τους συντελώντας στην ταχύτερη προθέρμανση της λόγω της αυξανόμενης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που προσπίπτει στην βιομάζα. Επίσης, η έντονη κλίση αυξάνει τη συνεισφορά του μηχανισμού της συναγωγής στην προθέρμανση του καυσίμου συνεπάγοντας την επιτάχυνση της ανάφλεξης του.

Στη συνέχεια, η έκθεση της πλαγιάς παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της φωτιάς καθώς συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση της περιεχόμενης υγρασίας και της θερμοκρασίας της καύσιμης ύλης. Στο Βόρειο ημισφαίριο οι νότιες εκθέσεις είναι γενικά ξηρότερες από τις βόρειες. Η δασική ύλη ξηραίνεται ταχύτερα στις νότιες, νοτιοδυτικές και δυτικές πλαγιές, παρά σε πλαγιές άλλων εκθέσεων. Όμως, στις βόρειες εκθέσεις λόγω της ύπαρξης του νερού υπάρχει έντονη υποβλάστηση, που όταν γίνει ξερή, μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιές μεγάλης έκτασης (Καϊλίδης και Καρανικόλα 2004).

Επιπρόσθετα, το υψόμετρο αποτελεί αξιοσημείωτο παράγοντα στην ανάπτυξη της φωτιάς. Ειδικότερα, όσο αυξάνεται το υψόμετρο, αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβάλλεται η διαμόρφωση της βλάστησης, ο αέρας έχει λιγότερο οξυγόνο και επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, άρα και μικρότερη απώλεια υγρασίας της

καύσιμης ύλης, λιγότερη θέρμανση της καύσιμης ύλης και μεγαλύτερη βροχόπτωση (Καλαμποκίδης κ.α. 2003).

Τέλος, ιδιαίτερα γεωγραφικά ανάγλυφα δημιουργούν ακραίες συνθήκες εξάπλωσης της φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα, σε στενά φαράγγια ή σε κλειστές κοιλάδες, δημιουργούνται απρόβλεπτες κινήσεις του αέρα με σημαντικότερη τη δημιουργία του φαινομένου της καμινάδας (Κωνσταντινίδης 2003). Όταν ο αέρας διέρχεται από ένα στενό φαράγγι η ταχύτητα του αυξάνεται σημαντικά. Επιπλέον, όταν άνεμος μεγάλης ταχύτητας προσπίπτει κάθετα σε κορυφογραμμή δημιουργούνται συχνά στροβιλισμοί, που μεταβάλλουν κατά απρόβλεπτο τρόπο τη συμπεριφορά της φωτιάς (Viegas 2006).

### 1.2.2 Δασική Βλάστηση

Η καύσιμη ύλη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην επίδραση της συμπεριφοράς της φωτιάς. Ειδικότερα, η ποσότητα της καύσιμης ύλης, μετρούμενη σε τόνους ανά στρέμμα ή σε κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο, είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης και τη θερμική ένταση της φωτιάς. Γενικά, όσο περισσότερη καύσιμη ύλη υπάρχει τόσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια προς έκλυση. Σε πειραματικές δοκιμές (Foster 1976) υπολογίστηκε ότι διπλασιασμός της καύσιμης ύλης, διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους τους πειράματος, συνεπαγόταν διπλασιασμό της ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς.

Στη συνέχεια, η περιεχόμενη υγρασία (Fuel Moisture Content ή FMC, %) στη καύσιμη ύλη επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο της καύσης και της ανάφλεξης, αλλά καθορίζει επίσης και την ποσότητα της θερμικής ενέργειας που δύναται να εκλυθεί κατά την καύση. Η περιεχόμενη υγρασία στα δασικά καύσιμα είναι η μάζα του νερού που περιέχεται σε αυτά σαν ποσοστό επί της ξηρής μάζας τους (γραμμάρια νερού/γραμμάρια ξηρής βιομάζας) και επιβραδύνει τη διάδοση της φωτιάς, διότι ένα σημαντικό κλάσμα της εκλυόμενης θερμότητας καταναλώνεται για την αύξηση της θερμοκρασίας του περιεχόμενου νερού ως το σημείο βρασμού και για την ατμοποίηση του (Drysdale 1998). Η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας της ζωντανής βιομάζας επηρεάζεται από τη φυσιολογία του φυτού και σε μικρότερο βαθμό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Αντίθετα, η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας στη νεκρή καύσιμη ύλη εξαρτάται αποκλειστικά από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Αξίζει να αναφερθεί πως το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας της νεκρής βιομάζας ξεκινά από 2% και φθάνει ως και 40% επί της ξηρής μάζας, ενώ της ζωντανής βιομάζας κυμαίνεται από 30% έως και 300% (Ταμπάκης και Καρανικόλα 2015).

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη μιας πυρκαγιάς έχουν οι διαστάσεις (πάχος) της καύσιμης ύλης και ο βαθμός συμπίεσης της. Βιομάζα με μικρές διαστάσεις καίγεται πιο εύκολα από καύσιμη ύλη μεγαλύτερων διαστάσεων. Επιπρόσθετα, καύσιμη ύλη, η οποία είναι συμπιεσμένη με λίγα διάκενα στο χώρο, έχει ως αποτέλεσμα γρηγορότερη μετάδοση της φωτιάς. Όσο περισσότερα διάκενα βλάστησης υπάρχουν τόσο περισσότερες είναι οι αλλαγές στην ταχύτητα εξάπλωσης και στην ένταση μιας πυρκαγιάς (Καλαμποκίδης κ.α. 2013).

Τέλος, σημαντικός παράγοντας στην συμπεριφορά μιας φωτιάς αποτελεί η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα και την έκθεση της βιομάζας στην ηλιακή ακτινοβολία. Όσο θερμότερα είναι τα δασικά καύσιμα τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για την ανάφλεξη τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καυσίμων εκτεθειμένων στον ήλιο και καυσίμων στη σκιά νεφών ή της κόμης των δένδρων μπορεί να ξεπεράσει τους 25°C.

### 1.2.3 Μετεωρολογία

Οι καιρικές συνθήκες έχουν καθοριστικό ρόλο στη μεταβολή της συμπεριφοράς μιας φωτιάς. Αρχικά, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, πάχνη, δροσιά) επηρεάζουν την συμπεριφορά της φωτιάς μέσω τις επίδρασης τους στην περιεχόμενη υγρασία και τη θερμοκρασία της καύσιμης ύλης. Ειδικότερα, η ποσότητα της βροχής επιδρά κατασταλτικά στη δημιουργία και στην επέκταση των δασικών πυρκαγιών. Δυνατές βροχές που διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα αποθέτουν μεγάλες ποσότητες νερού, διαβρέχουν καλά την εύφλεκτη ύλη και την κάνουν ανθεκτική στην έναρξη και επέκταση των πυρκαγιών. Σε αντίθεση, ελαφρές βροχές μικρής διάρκειας έχουν μικρότερη επίδραση. Η κόμη συγκρατεί μεγάλο μέρος της ποσότητας των βροχών. Σημαντικό ρόλο παίζει, όμως, η εποχή των βροχών και ο καιρός που ακολουθεί ύστερα από τη βροχή (Καϊλίδης και Καρανικόλα 2004). Επίσης, όταν οι θερινές βροχές συνοδεύονται από κεραυνούς δημιουργούνται σοβαροί κίνδυνοι πρόκλησης πυρκαγιάς (Κωνσταντινίδης 2003).

Η ατμοσφαιρική υγρασία είναι σημαντικός παράγοντας για τη συχνότητα των δασικών πυρκαγιών επειδή επιδρά στην περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης (Foster 1976). Ο υγρός αέρας δεν απορροφά υγρασία από την καύσιμη ύλη (Γκόφας 1992, 2001). Έτσι, η υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία λειτουργεί ανασταλτικά στην έναρξη και διάδοση του φαινομένου της πυρκαγιάς (Κωνσταντινίδης 2003).

Η θερμοκρασία του αέρα, που αντιστοιχεί κάθε φορά σε ορισμένη σχετική υγρασία, επιδρά στην πορεία ξήρανσης κυρίως της νεκρής καύσιμης ύλης. Υψηλές θερμοκρασίες είναι πολύ επικίνδυνες για την έναρξη και διάδοση δασικών πυρκαγιών.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι μια από τις καταλυτικότερες μεταβλητές που επιδρούν στη συμπεριφορά της φωτιάς. Όταν σε μια περιοχή ξεσπάσει πυρκαγιά και δεν πνέει άνεμος, τότε η πυρκαγιά θα επεκταθεί ομόκεντρα γύρω από το σημείο έναρξης της. Εάν επικρατεί άνεμος, η πυρκαγιά θα επεκταθεί κυρίως προς τη διεύθυνση του ανέμου και λιγότερο στην αντίθετη διεύθυνση αυτού. Η αιφνίδια αλλαγή διεύθυνσης του ανέμου κατευθύνει την πυρκαγιά προς τη νέα αυτή διεύθυνση. Οι μεγάλες σε έκταση πυρκαγιές παρατηρούνται όταν πνέουν μέτριοι ή ισχυροί άνεμοι. Ο άνεμος παρέχει περισσότερο οξυγόνο στη φωτιά και, μεταφέροντας καύτρες, δημιουργεί νέες εστίες σε απόσταση δεκάδων μέτρων από το μέτωπο. Όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του ανέμου τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς (Foster 1976). Όταν ο άνεμος εισέρχεται σε φαράγγια που είναι κλειστά στο ένα άκρο, δημιουργούνται ακραίες συνθήκες εξάπλωσης της φωτιάς που οφείλονται στο «φαινόμενο της καμινάδας» (Viegas et al. 2004). Τυχόν πυρκαγιά που θα ξεσπάσει στην είσοδο της χαράδρας μεταδίδεται με εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες και είναι δυνατόν να εγκλωβίσει της δυνάμεις πυρόσβεσης.

Τέλος, η σταθερότητα της ατμόσφαιρας είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη εξέλιξη της φωτιάς. Η ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας δεν διευκολύνει την ανάπτυξη της πυρκαγιάς καθώς εμποδίζει την κάθετη κίνηση του αέρα και δυσκολεύει την τροφοδοσία οξυγόνου στην εξάπλωση της φλόγας. Αντίθετα, όταν οι συνθήκες της ατμόσφαιρας είναι ασταθής διευκολύνεται η παροχή οξυγόνου και ευνοείται η δημιουργία μεγάλης στήλης καπνού και η γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασιακή αναστροφή είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει συχνά σε κλειστές κοιλάδες τη νύχτα και μπορεί να «εγκλωβίσει» τον αέρα μέσα στην κοιλάδα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του και μειώνοντας την σχετική του υγρασία, έτσι ώστε η νεκρή καύσιμη ύλη να παραμένει ξηρή και τη νύχτα. Επομένως, η πυρκαγιά συνεχίζει να καίει ζωνά, αντίθετα από αυτό που

αναμενόταν. Παράλληλα η συσσώρευση καπνού μέσα στην κοιλιάδα δυσκολεύει τις προσπάθειες των δασοπυροσβεστών (Ξανθόπουλος 1993).

Συμπερασματικά, οι τρεις αυτές ομάδες παραγόντων σχηματίζουν ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, το οποίο προκαλεί μεταβολές της συμπεριφοράς της φωτιάς στο χρόνο, που πρέπει να λαμβάνεται ως τέταρτος παράγοντας (Viegas 2006). Ο ικανός δασοπυροσβέστης αντιλαμβάνεται τις αλλαγές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και ειδικά τις μη προφανείς, που προκαλούνται από τις αλλαγές στις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες (Countryman 1972). Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο θα εξαπλωθεί μια δασική πυρκαγιά και η δυνατότητα αξιόπιστης πρόβλεψης των χαρακτηριστικών της κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι αναγκαίες προϋποθέσεις για την οργάνωση της πρόληψης και την αποτελεσματική και ασφαλή καταστολή της (Ξανθόπουλος 1990).

### **1.3 Πυρκαγιές στην Ελλάδα**

Οι πυρκαγιές αποτελούν διαχρονικά το σημαντικότερο πρόβλημα των Ελληνικών δασών και ειδικότερα κατά την τελευταία τριακονταετία είναι το κύριο αντικείμενο της δασικής και πυροσβεστικής υπηρεσίας, τουλάχιστον από πλευράς δημοσίων δαπανών.

Στην Ελλάδα, αρκετές πυρκαγιές είχαν στο παρελθόν προκαλέσει, εκτός από υλικές ζημιές, σημαντικές ανθρώπινες απώλειες (Κηφισιά 1981, Γέρακας 1982, Ικαρία 1993, Σάμος 2000). Ορόσημο αποτέλεσαν οι πυρκαγιές στην Πελοπόννησο και την Εύβοια τον Αύγουστο του 2007 με το θάνατο 78 ανθρώπων, 2,700,000 στρέμματα καμένων εκτάσεων, 1500 κατεστραμμένα σπίτια, απώλεια 1.5 εκατομμυρίου ελαιόδεντρων και 60.000 κτηνοτροφικών ζώων. Το συνολικό κόστος για την αποκατάσταση του φυτικού κεφαλαίου των ελαιόδεντρων και των ενισχύσεων για τις απώλειες παραγωγής από τις πυρκαγιές της Πελοποννήσου τον Αύγουστο του 2007 έχει υπολογιστεί σε 123 εκατομμύρια ευρώ. Τον Ιούλιο του 2018, σαν αποτέλεσμα πυρκαγιάς στη μεικτή ζώνη δασικής βλάστησης και οικισμών στο Ν.Βουτζά και στο Μάτι Αττικής χάθηκαν 100 άνθρωποι και προκλήθηκαν σημαντικές οικονομικές ζημιές στην περιοχή.

Επίσης, ενδεικτικές είναι οι πυρκαγιές στη Χίο (Σχήμα 1.6) που είχαν σαν συνέπεια την καταστροφή μεγάλου μέρους των μαστιχόδεντρων με τεράστιες οικονομικές απώλειες για τους παραγωγούς του νησιού. Το 2012 υπολογίζεται ότι κάηκαν 180.000 μαστιχόδεντρα σε μια έκταση 20,000 στρεμμάτων που αντιστοιχεί στο 12% της καλλιεργήσιμης έκτασης της Χίου, ενώ η οικονομική ζημιά εκτιμήθηκε στα 4 εκατομμύρια ευρώ περίπου. Η καταστροφή στη Χίο δεν περιορίστηκε στην παραγωγή της μαστίχας, αλλά έπληξε και άλλες παραγωγικές δραστηριότητες, όπως η μελισσοκομία που υπέστη απώλεια παραγωγής σε ποσοστό της τάξης του 60%. Το 2016 οι πυρκαγιές έπληξαν και πάλι στη Χίο 35,000 μαστιχόδεντρα και προκάλεσαν ζημιές ύψους 520,000 ευρώ (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).



**Σχήμα 1.6** Στιγμιότυπο από τις πυρκαγιές στη Χίο το καλοκαίρι του 2016.

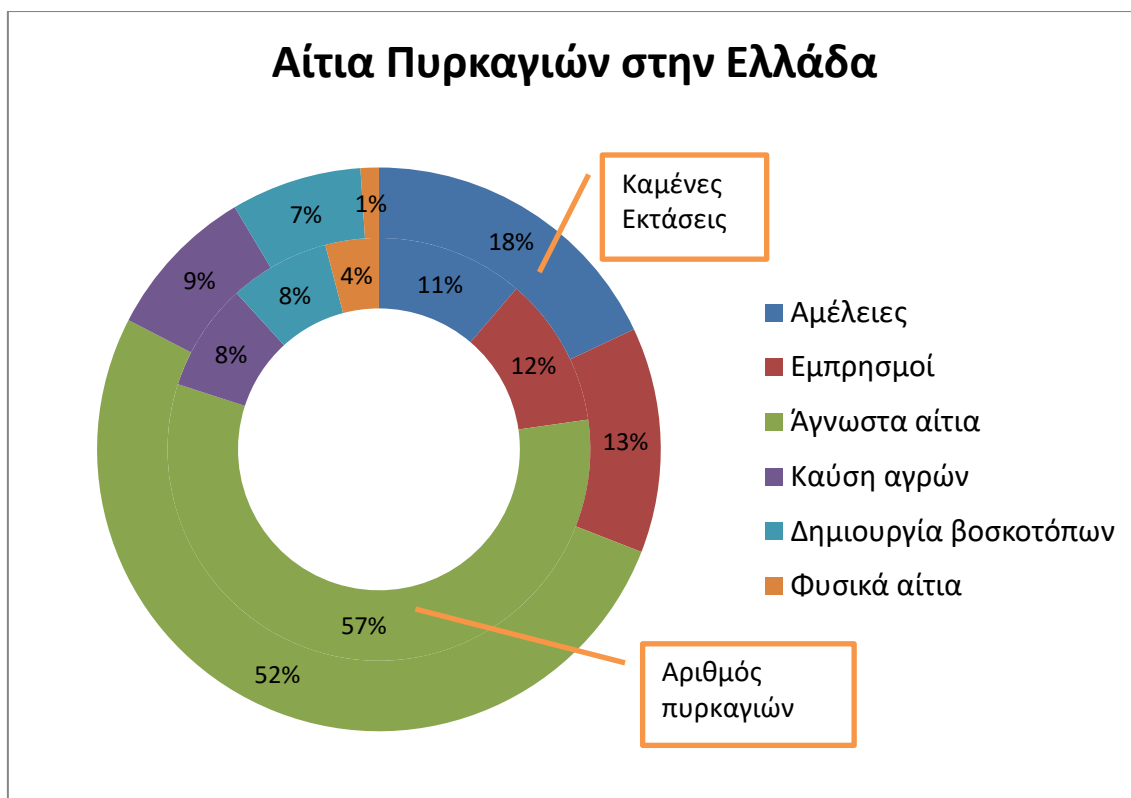
### *1.3.1 Αιτίες Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών στην Ελλάδα*

Σύμφωνα με τα στοιχεία της βάσης δεδομένων της PYROSTAT του Εργαστηρίου Δασικών Πυρκαγιών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 1984-2009, τα αίτια έναρξης πυρκαγιών και δασών και υπαίθρου (Σχήμα 1.7) κατανέμονται ως εξής: αμέλειες (11.26%), εμπρησμοί (11.49%), άγνωστα αίτια (57.24%), καύση αγρών (8.25%), δημιουργία βοσκοτόπων (7.67%) και φυσικά αίτια (4.09%).

Η εξαιρετική σπουδαιότητα για τον ελληνικό χώρο επέβαλε τη διάκριση δύο ιδιαίτερων κατηγοριών (που τυπικά κατατάσσονται μεταξύ αμέλειας και εμπρησμού): α) καύση αγρών, δηλαδή αγροτικές εργασίες, που ευθύνονται για την έναρξη φυσικών πυρκαγιών, λογίζεται το κάψιμο υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών, η καύση ζιζανίων και ξηρών χόρτων και ο καθαρισμός αγρών από φυσική βλάστηση (εκχέρσωση) με ή χωρίς μέτρα πυρασφάλειας και β) δημιουργία βοσκοτόπων, δηλαδή οι εμπρησμοί που προκαλούν εκούσια οι ποιμένες με σκοπό τη βελτίωση των φυσικών βοσκοτόπων.

Αντίστοιχα, το ποσοστό των συνολικά καμένων εκτάσεων ανάλογα με το αίτιο έναρξης των πυρκαγιών κατανέμονται σε ολόκληρη την Ελλάδα ως εξής: αμέλειες (18%), εμπρησμοί (12,93%), άγνωστα αίτια (51.65%), καύση αγρών (8.87%), δημιουργία βοσκοτόπων (7.5%) και φυσικά αίτια (1.05%).

Συμπερασματικά: α) δεν έχουν διαπιστωθεί τα αίτια έναρξης για πάνω από τις μισές πυρκαγιές της περιόδου, β) οι πυρκαγιές δασών και υπαίθρου στην Ελλάδα προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα σε ποσοστό 98%, γ) οι βασικές αιτίες εκδήλωσης πυρκαγιών συνδέονται με αμέλεια ή σκοπιμότητα (εμπρησμοί και γεωργική ή κτηνοτροφική δραστηριότητα) (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).



**Σχήμα 1.7** Ποσοστό του αριθμού πυρκαγιών και καμένων εκτάσεων στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 ανάλογα με το αίτιο έναρξης (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

### 1.3.2 Χάρτες Επικινδυνότητας Έναρξης Πυρκαγιάς στην Ελλάδα

Ο βαθμός κινδύνου έναρξης πυρκαγιών (μέσος ετήσιος αριθμός σε μια περιοχή) αποτελεί κριτήριο για τη λήψη ορθολογικών αποφάσεων κατά τον προληπτικό αντιπυρικό σχεδιασμό, όσον αφορά τον επαρκή εξοπλισμό, το βαθμό ετοιμότητας και τη διασπορά των κατά τόπους δασοπυροσβεστικών δυνάμεων. Η κατάταξη των νομών με κριτήριο τις διαχρονικά καμένες εκτάσεις είναι χρήσιμη τόσο στην οικονομική και οικολογική αποτίμηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών, όσο και στον καθορισμό προτεραιοτήτων αναφορικά με την επανόρθωση των καμένων οικοσυστημάτων και την κατανομή κονδυλίων για αποζημιώσεις των πληγέντων. Η κατά μέσο όρο καμένη έκταση ανά πυρκαγιά αποτελεί δείκτη τόσο της αποτελεσματικότητας των δυνάμεων καταστολής, όσο και της σφοδρότητας της καύσης κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

Σε έξι νομούς (11.76% επί του συνόλου) παρουσιάζεται εξαιρετικά υψηλός (Ιωάννινα, Κεφαλληνίας, Ηλείας και Εύβοιας) έως και πολύ υψηλός (Αττικής και Μεσσηνίας) κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιών, εννιά νομοί (Αιτωλοακαρνανίας, Χανίων, Θεσπρωτίας, Φθιώτιδας, Γρεβενών, Κέρκυρας, Λάρισας, Αχαΐας, και Μαγνησίας, 17.65% επί του συνόλου) έχουν υψηλό κίνδυνο, ενώ οι υπόλοιποι τριάντα έξι νομοί (70.59%) εμφανίζουν μέτριο και χαμηλό κίνδυνο (Σχήμα 1.8).





**Σχήμα 1.8** Επικινδυνότητα έναρξης δασικών πυρκαγιών ανά νομό στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

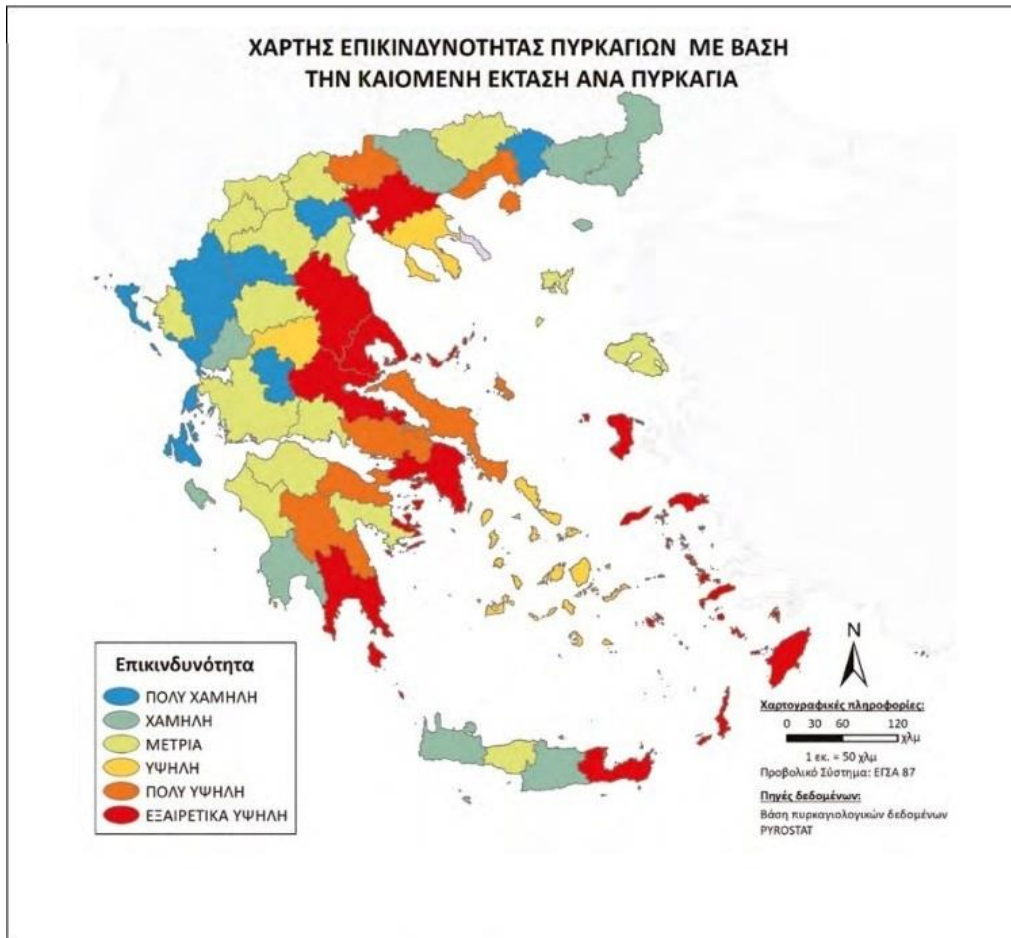
Δεκαέξι νομοί (Κέρκυρας, Χίου, Ζακύνθου, Λασιθίου, Κεφαλληνίας, Εύβοιας, Αττικής, Σάμου, Λακωνίας, Μαγνησίας, Μεσσηνίας, Κορινθίας, Θεσπρωτίας, Λάρισας και Καβάλας, 31.4% επί του συνόλου) κατατάσσονται ως εξαιρετικά ή πολύ πυρόπληκτοι, δώδεκα νομοί (Ρεθύμνου, Δωδεκανήσου, Φθιώτιδας, Κιλκίς, Φλώρινας, Θεσσαλονίκης, Βοιωτίας, Πρέβεζας, Αχαΐας, Χανίων, Καστοριάς και Ηρακλείου, 23.5% επί του συνόλου) ως πυρόπληκτοι, άλλοι δώδεκα νομοί (Αιτωλοακαρνανίας, Τρικάλων, Αρκαδίας, Αργολίδας, Κοζάνης, Λευκάδας, Πιερίας, Πέλλας, Χαλκιδικής, Καρδίτσας, Γρεβενών και Έβρου, 23.5% επί του συνόλου) ως μετρίως πυρόπληκτοι, ενώ οι υπόλοιποι ένδεκα νομοί (21.6%) ως λίγο πυρόπληκτοι ή πυρασφαλείς (Σχήμα 1.9).



**Σχήμα 1.9** Επικινδυνότητα με βάση την καμένη έκταση ανά 1000 εκτάρια δασικών εκτάσεων στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984- 2009 (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

Οι νομοί Αττικής, Λασιθίου, Λακωνίας, Σάμου, Χίου, Λάρισας, Φθιώτιδας, Δωδεκανήσου, Θεσσαλονίκης και Μαγνησίας παρουσιάζουν υψηλή κατά μέσο όρο καιγόμενη έκταση ανά πυρκαγιά, ενώ πολύ χαμηλές τιμές, και κατά συνέπεια αυξημένη ετοιμότητα δασοπυροσβεστικού μηχανισμού εμφανίζουν οι νομοί Κέρκυρας, Πρέβεζας, Γρεβενών, Κεφαλληνίας, Ημαθίας, Ιωαννίνων, Ξάνθης, Λευκάδας και Ευρυτανίας (Σχήμα 1.10).





**Σχήμα 1.10** Κατάταξη της επικινδυνότητας πυρκαγιών των νομών της Ελλάδος με βάση την καμένη έκταση ανά πυρκαγιά κατά την περίοδο 1984-2009 (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

### 1.3.3 Πυρκαγιές στη Ζώνη Μείξης Δασών – Οικισμών

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών υπήρξε μεγάλη και γρήγορη ανάπτυξη των οικιστικών περιοχών γύρω από μεγαλουπόλεις, μέσα ή κοντά σε δασικές περιοχές. Ως ζώνες μείξης δασών - οικισμών ή WUI (Wildland-Urban Interface) μπορούν να ορισθούν οι ζώνες διαχωρισμού μεταξύ της βλάστησης και των ανθρώπινων κατοικιών και οποιασδήποτε άλλης ανθρώπινης ενέργειας. Οι πυρκαγιές που συμβαίνουν στη ζώνη μείξης δασών κατοικιών (Σχήμα 1.11) είναι ίσως η σοβαρότερη απειλή για τις σύγχρονες αστικές κοινωνίες με δεδομένο ότι μπορεί να είναι εξαιρετικά καταστροφικές σκοτώνοντας ανθρώπους και καταστρέφοντας περιουσίες και υποδομές, όπως συνέβη στην Ελλάδα το 2007 και 2018. Στη χώρα μας το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο σε περιοχές της Αττικής όπου έχει δημιουργηθεί ένα μωσαϊκό χρήσεων γης με οικισμούς και μεμονωμένες κατοικίες μέσα σε δασικές εκτάσεις, δάση και καλλιέργειες.



**Σχήμα 1.11** Ζώνη μείξης δασών – οικισμών (WUI).

Η αύξηση της επικινδυνότητας στις δομημένες δασικές περιοχές οφείλεται στην ύπαρξη ανθρωπίνων δραστηριοτήτων κοντά σε δασικά οικοσυστήματα (αναψυχή, εργασίες κ.λπ.) που συνδυάζονται με ελλιπή υποδομή (δίκτυο δρόμων, πυροσβεστικοί κρουνοί κ.λπ.) και έλλειψη γνώσης των κατοίκων της πόλης σχετικά με τους κινδύνους αλλά και τον τρόπο αντίδρασης σε περίπτωση πυρκαγιάς. Με δεδομένα τα παραπάνω είναι προφανές ότι η ύπαρξη ζωνών μείξης δασών - οικισμών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την εκπόνηση του αντιπυρικού σχεδιασμού (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019) .

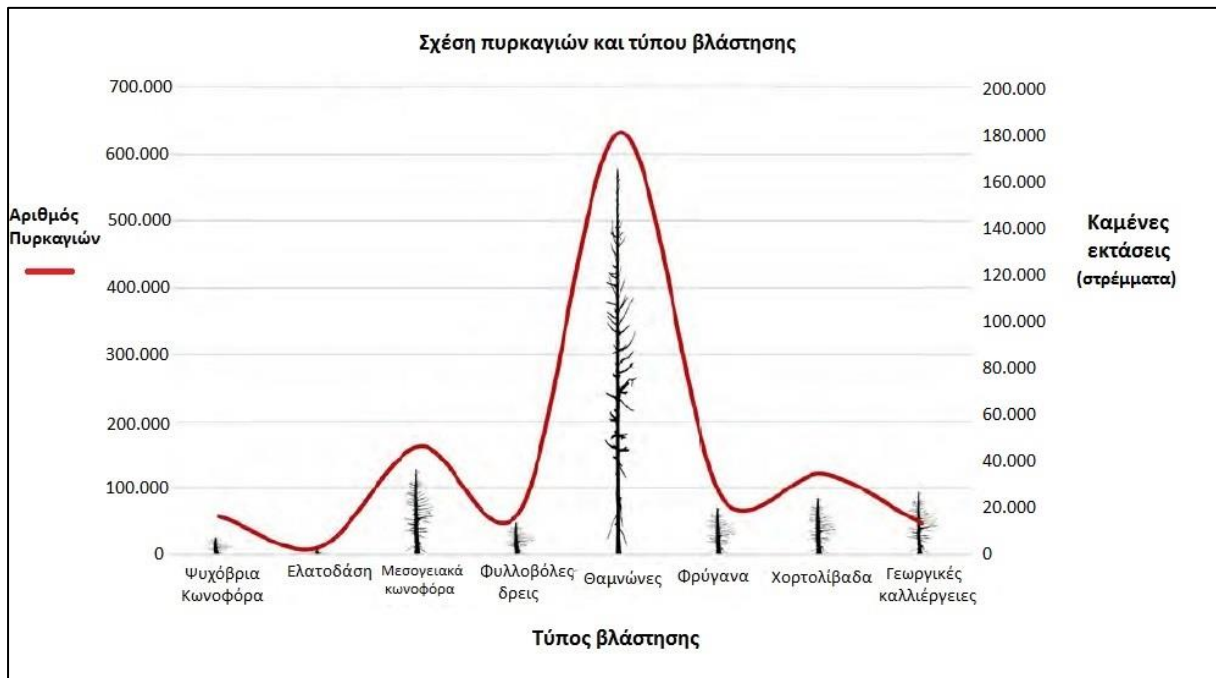
#### **1.3.4 Χαρακτηριστικά της Βλάστησης στην Ελλάδα**

Η πλειονότητα των πυρκαγιών δασών και υπαίθρου στην Ελλάδα εκδηλώνονται σε υψόμετρα χαμηλότερα των 1000 μέτρων, όπου επικρατούν οι μεσογειακοί τύποι βλάστησης και όπου ζει και δραστηριοποιείται το 80% περίπου του πληθυσμού της χώρας. Οι μεσογειακοί τύποι βλάστησης περιλαμβάνουν τους θαμνώνες αείφυλλων / σκληρόφυλλων - πλατύφυλλων, πρινώνες, μεσογειακά πευκοδάση χαλεπίου και τραχείας πεύκης με ή χωρίς υπόροφο θάμνων και τα πλέον ξηρανθεκτικά φρυγανικά οικοσυστήματα. Τα μεσογειακά πευκοδάση αποτελούν τον κυρίαρχο τύπο βλάστησης γύρω από τα μεγάλα αστικά κέντρα.

Τα φορτία της καύσιμης ύλης στα μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα τυπικά κυμαίνονται ως α) Θαμνώνες αείφυλλων/σκληρόφυλλων-πλατύφυλλων (25-50 τόνοι ανά 10 στρέμματα, 70% κλαδιά διαμέτρου 7 cm, 30% χλωρό φύλλωμα), β) Πρινώνες (30-35 τόνοι ανά 10 στρέμματα, 80% κλαδιά, 20% φύλλωμα), γ) Φρύγανα (5-10 τόνοι ανά 10 στρέμματα, 100% κλαδιά διαμέτρου μικρότερης των 2.5 cm), δ) Βελονοτάπητας δασών χαλεπίου και τραχείας πεύκης (2-3 τόνοι ανά 10 στρέμματα), ε) Μεσογειακά χορτολίβαδα (4-5 τόνοι ανά 10 στρέμματα λεπτής χορτολιβαδικής βιομάζας), στ) Μεσογειακά πευκοδάση με ή χωρίς υπόροφο βλάστησης αείφυλλων-πλατύφυλλων (40-150 τόνοι ανά 10 στρέμματα καύσιμης ύλης όλων των διαστάσεων) (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

Οι θαμνώνες αείφυλλων-πλατύφυλλων (Σχήμα 1.12) είναι ο τύπος βλάστησης που εκδηλώνονται οι περισσότερες πυρκαγιές (56.83%) με τις μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις

(55.73%). Έπονται τα παράκτια δάση μεσογειακών κωνοφόρων ειδών (κυρίως χαλεπίου και τραχείας πεύκης) με 14.49% του συνόλου του πυρκαγιών και 12.32% των καμένων εκτάσεων. Τα δάση φυλλοβόλων δρυών της παραμεσογειακής ζώνης βλάστησης, αν και καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις, υφίστανται το 5.84% των πυρκαγιών και μόνο το 4.67% των καμένων εκτάσεων. Οι φρυγανότοποι, τα χορτολίβαδα αλλά και οι αγροτικές καλλιέργειες παρουσιάζουν αριθμό πυρκαγιών 7.88%, 10.84%, 4.2%, αντίστοιχα και καμένων εκτάσεων 6.77%, 8.15%, 9.11% αντίστοιχα. Τα δάση ψυχοβρίων κωνοφόρων και ελάτης έχουν ελάχιστες πυρκαγιές (5.13% και 1.07%) και καμένες εκτάσεις (2.55% και 0.66%).



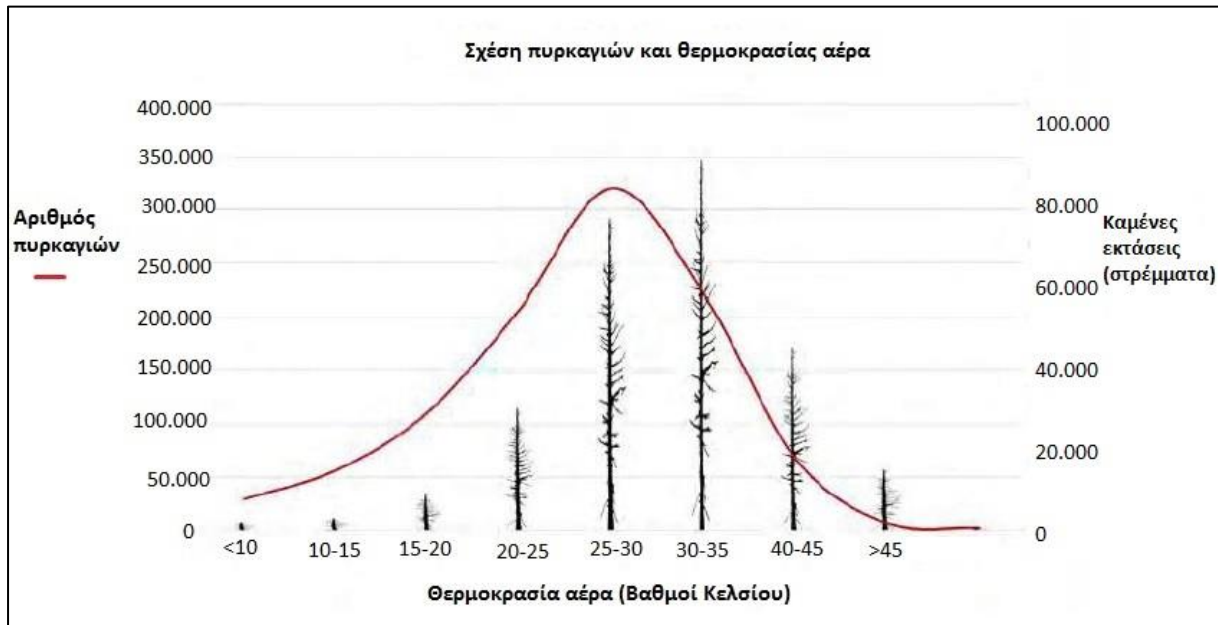
**Σχήμα 1.12** Κατανομή των πυρκαγιών και των καμένων εκτάσεων ανά τύπο βλάστησης στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

### 1.3.5 Καιρικές Συνθήκες στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η αντιπυρική περίοδος αρχίζει τυπικά από τον Ιούνιο και τελειώνει στα μέσα ή τέλος Οκτωβρίου. Οι περισσότερες πυρκαγιές συμβαίνουν κατά τη ξηροθερμική περίοδο του θέρους και των αρχών του φθινοπώρου, ενώ καταλυτικό ρόλο στην εκδήλωση και τη συμπεριφορά των πυρκαγιών παίζουν οι ετήσιοι περιοδικοί άνεμοι Β-ΒΑ διεύθυνσης που πνέουν κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Σχεδόν το σύνολο των μεγάλων πυρκαγιών (μεγαλύτερες των 10,000 στρεμμάτων) δασών και υπαίθρου στην Ελλάδα συμβαίνουν με την παρουσία ισχυρών ανέμων (πλέον των 6 Beaufort).

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, καθώς και η ταχύτητα και η διεύθυνση του πνέοντος ανέμου είναι οι κύριες μετεωρολογικές παράμετροι που διαμορφώνουν τις συνθήκες καύσης στο ύπαιθρο και προκαλούν τις μεταβολές της υγρασίας στη ζωντανή και νεκρή βλάστηση. Έτσι, επιδρούν καθοριστικά στην ταχύτητα, τη θερμική ένταση και τον τρόπο διάδοσης των πυρκαγιών (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

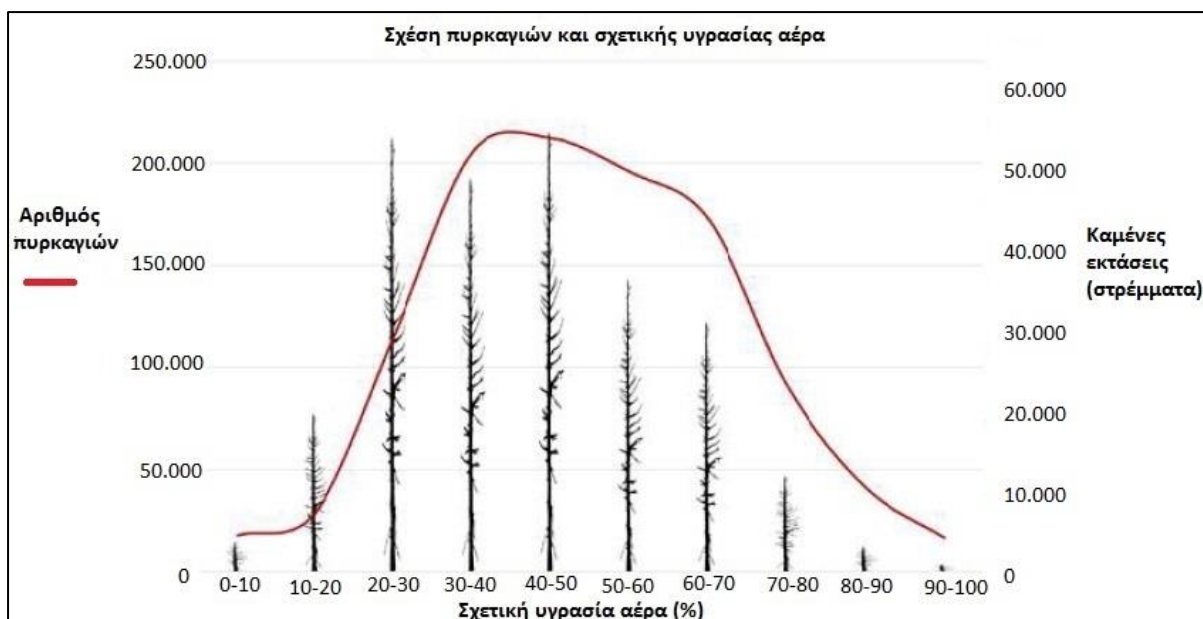
Οι περισσότερες πυρκαγιές (31.23%) συμβαίνουν όταν η θερμοκρασία του ανέμου είναι 25-30°C, ενώ το 75% των πυρκαγιών συγκεντρώνονται στο θερμοκρασιακό εύρος 21-35°C. Σε συνθήκες καύσινα (35-40°C) συμβαίνουν μόνο το 6.59% των πυρκαγιών που όμως καίνε δυσανάλογα μεγάλες εκτάσεις (16.56%). Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα φαίνεται να επιδρά στο μέγεθος των καμένων εκτάσεων και όχι στη συχνότητα έναρξης των πυρκαγιών (Σχήμα 1.13).



**Σχήμα 1.13** Κατανομή των πυρκαγιών και των καμένων εκτάσεων ανά θερμοκρασιακό εύρος στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019) .

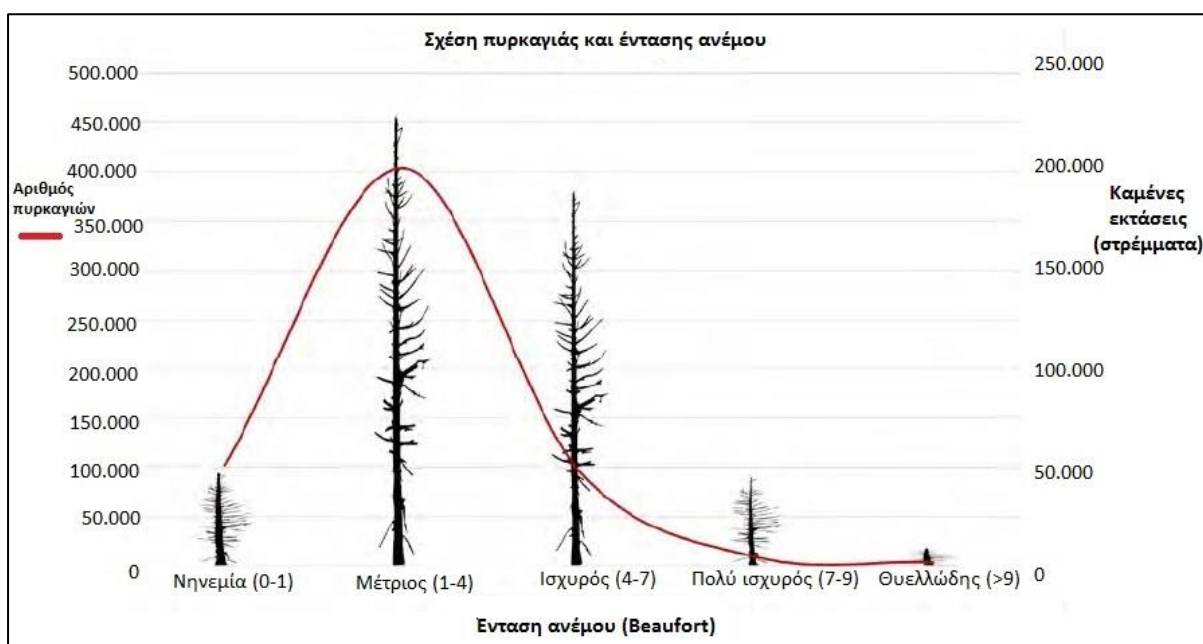
Η σχετική υγρασία της ατμόσφαιράς επηρεάζει την καύση της δασικής βλάστησης και κατά συνέπεια των πυρκαγιών. Οι μισές πυρκαγιές (52.84%) εξαπλώνονται σε συνθήκες κανονικής ατμοσφαιρικής υγρασίας (40-70%), ενώ το 33.6% συμβαίνει σε συνθήκες ατμοσφαιρικής ξηρασίας (σχετική υγρασία αέρα  $\leq 40\%$ ). Αυξανόμενης της σχετικής υγρασίας του αέρα γενικά μειώνεται το μέγεθος των καμένων εκτάσεων (Σχήμα 1.14).





**Σχήμα 1.14** Κατανομή των πυρκαγιών και των καμένων εκτάσεων ανά εύρος τιμών σχετικής υγρασίας στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

Η επίδραση του ανέμου στις πυρκαγιές είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας για το μέγεθος της έκτασης που θα καεί. Το 65.72% των πυρκαγιών διαδίδονται με μέτρια ένταση ανέμου (1 – 4 Beaufort) και καίνε τις περισσότερες εκτάσεις (43.94%). Αν και μόλις το 1.46% των πυρκαγιών εξαπλώνονται με πολύ ισχυρούς ανέμους (7 – 9 Beaufort), εν τούτοις ευθύνονται για το 8.66% των συνολικά καμένων εκτάσεων. Οι περισσότερες πυρκαγιές διαδίδονται με Βόρεια (43.96%) ή Νότια (19.11%) διεύθυνση ανέμου και ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό καμένων εκτάσεων (50.01% και 16.04% αντίστοιχα) (Σχήμα 1.15).



**Σχήμα 1.15** Κατανομή των πυρκαγιών και των καμένων εκτάσεων ανά περιοχή ταχυτήτων ανέμου στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1984-2009 (Έκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

### 1.3.6 Μελλοντική Εξέλιξη του Κινδύνου Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών

Ο κίνδυνος έναρξης πυρκαγιών στα δάση και την ύπαιθρο αναμένεται να έχει αυξητικές τάσεις καθόσον στο μέλλον προβλέπονται, λόγω της αλλαγής του κλίματος, συχνότερα περιστατικά ξηρασίας με μεγαλύτερη διάρκεια και περισσότεροι καύσωνες κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση της αντιπυρικής περιόδου, την ταχύτερη ξήρανση και αύξηση της ευφλεκτότητας της δασικής καύσιμης ύλης, τη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών καύσης και τελικά την αύξηση της συχνότητας και έντασης των πυρκαγιών.

Με την άνοδο της θερμοκρασίας αναμένεται να αυξηθεί ο αριθμός των πυρκαγιών και η συνολική καμένη έκταση, ενώ θα μειωθεί ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών πυρκαγιών στην ίδια περιοχή. Τα δάση της νότιας ηπειρωτικής χώρας και της Κρήτης αναμένεται να ζημιωθούν περισσότερο.

Κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα διαπιστώθηκε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση του ύψους των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Η τάση αυτή εκτιμάται ότι θα συνεχιστεί και τον 21<sup>ο</sup> αιώνα σύμφωνα με τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια. Τα δασικά οικοσυστήματα θα ζημιωθούν περισσότερο από τα μειωμένα κατακρημνίσματα και τις υψηλές θερμοκρασίες που θα επικρατήσουν κατά την ξηροθερμική περίοδο, ενώ διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο καταστροφικών πυρκαγιών.

Σύμφωνα με τις προβλέψεις που έχουν γίνει με ανάλυση του Μετεωρολογικού Δείκτη Κινδύνου Έναρξης Δασικών Πυρκαγιών (FWI), στην Ελλάδα το διάστημα 2021-2050, οι ημέρες με υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς θα είναι 20 περισσότερες και 45 περισσότερες για το διάστημα 2071-2100. Εκτιμάται πως η Αττική, η Ανατολική Πελοπόννησος, η Κεντρική Μακεδονία και η Θεσσαλία θα είναι οι περιοχές που θα επηρεαστούν πιο έντονα. Επιπλέον, εκτιμάται ότι η αύξηση των δεικτών ξηρασίας στην Ελλάδα τα επόμενα χρόνια ενδέχεται να αυξήσει τον αριθμό πυρκαγιών και των καμένων εκτάσεων στη Βόρεια και Δυτική Ελλάδα (Εκθεση Ανεξάρτητης Επιτροπής 2019).

## 1.4 Σκοπός της Εργασίας

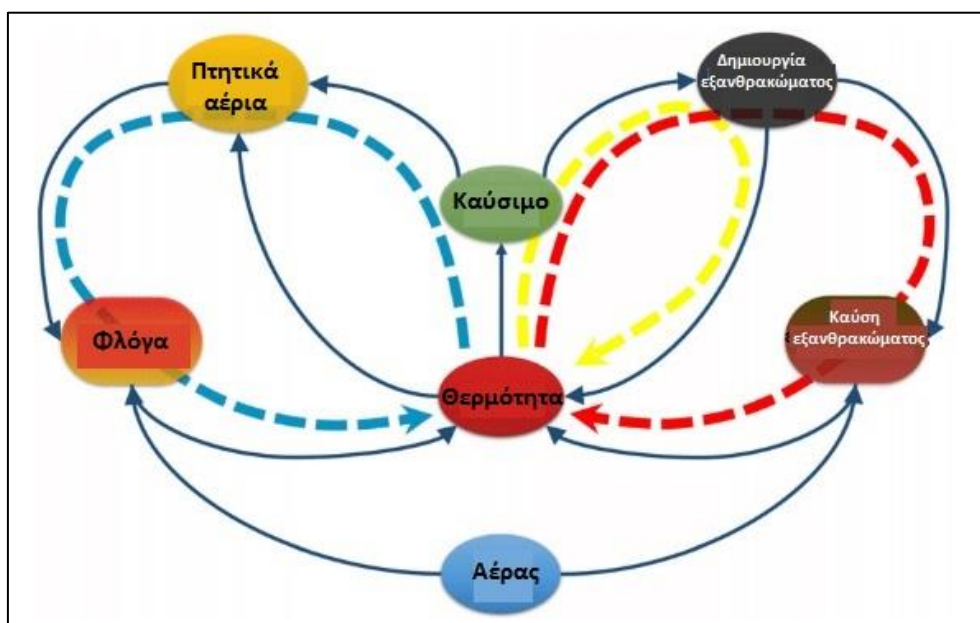
Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να μελετήσει και να ποσοτικοποιήσει τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας φλόγας δασικής πυρκαγιάς, δηλαδή το ύψος, το μήκος και τη γωνία κλίσης της φλόγας. Η εργαστηριακή προσομοίωση και ανάλυση του φαινομένου της πυρκαγιάς θα προσφέρει χρήσιμα δεδομένα για αξιολόγηση προκειμένου να διερευνηθούν οι κυριότερες παράμετροι επίδρασης στη συμπεριφορά των βασικών γεωμετρικών μεγεθών της φλόγας. Επίσης, θα πραγματοποιηθεί ενδελεχής σύγκριση παλαιότερων ερευνών και σχέσεων, που αφορούν το συγκεκριμένο πεδίο εργασίας, με την παρούσα μελέτη και θα εξαχθούν γόνιμα συμπεράσματα για την επαλήθευση ή μη της σύγκλισης των αποτελεσμάτων. Η ελπίδα είναι η συγκεκριμένη εργασία να προσφέρει τη μικρή συμβολή της πάνω στο υπό μελέτη σύνθετο πεδίο των δασικών πυρκαγιών.

## 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Η φωτιά χαρακτηρίζεται από τη μη ελεγχόμενη εξάπλωση ενός μετώπου καύσης και αποτελεί ένα από τα πλέον σύνθετα φαινόμενα, καθώς ενσωματώνει μια μεγάλη ποικιλία φυσικών και χημικών διεργασιών, οι οποίες παρατηρούνται στις πολυφασικές, πολυσυστατικές και αντιδρώσες ροές. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν φαινόμενα καύσης, μεταφοράς ορμής, μάζας και θερμότητας, τα οποία αλληλεπιδρούν συνθέτοντας ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φυσικό και χημικό φαινόμενο.

### 2.1 Στάδια της Καύσης στις Δασικές Πυρκαγιές

Η συνύπαρξη καύσιμης ύλης, πηγής θερμότητας, οξειδωτικού μέσου και αλυσιδωτών χημικών αντιδράσεων απαιτούνται για την έναρξη της χημικής αντίδρασης της καύσης. Οι παραπάνω παράγοντες συνιστούν το «*Τετράεδρο της φωτιάς*» και χρειάζεται μόνο η καταστολή ενός από αυτούς για να τερματιστεί το φαινόμενο. Το φαινόμενο της καύσης αποτελείται από τα στάδια της προθέρμανσης, της πυρόλυσης, της έναυσης και δημιουργία φλόγας και της δημιουργίας και καύσης του εξανθρακώματος (Σχήμα 2.1). Αυτά τα στάδια μπορούν να συντελούνται διαδοχικά ή και ταυτόχρονα στις δασικές πυρκαγιές.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση των κύριων σταδίων της καύσης (Sullivan 2017a).

#### 2.1.1 Προθέρμανση

Το φαινόμενο της καύσης ξεκινάει με την προθέρμανση του καυσίμου από μία πηγή θερμότητας. Κατά τη διάρκεια αυτής της ενδόθερμης διεργασίας, εξαιτίας της συνεχούς απορρόφησης θερμότητας από το καύσιμο, η θερμοκρασία του αυξάνεται μέχρι η περιεχόμενη υγρασία του, η οποία μπορεί να έχει προσκολληθεί στην επιφάνεια του ή να έχει απορροφηθεί στο εσωτερικό της πορώδους δομής του, να εξατμιστεί και να

ελευθερωθεί μικρή ποσότητα πτητικών αερίων. Η προθέρμανση του καυσίμου οδηγεί αφενός στην ξήρανση του και αφετέρου στην απελευθέρωση μικρής ποσότητας πυρολυτικών αερίων χαμηλής θερμοκρασίας. Στα περισσότερα δασικά καύσιμα, το στάδιο της προθέρμανσης διαρκεί έως ότου η θερμοκρασία τους φτάσει τους 180°C (Κωνσταντινίδης 2003).

### **2.1.2 Πυρόλυση**

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της πυρόλυσης. Είναι η διαδικασία της χημικής αποσύνθεσης των μεγάλων ανθρακικών αλυσίδων του καυσίμου λόγω της έκθεσης σε υψηλές ροές θερμότητας και της έντονης παραγωγής εύφλεκτων πτητικών αερίων που τροφοδοτούν συνεχώς το φαινόμενο της καύσης. Αυτά τα εύφλεκτα προϊόντα, που διαφεύγουν διαμέσου της πορώδους δομής του καυσίμου και εκλύονται στο περιβάλλον, ονομάζονται πυρολυτικά αέρια. Τα πυρολυτικά αέρια παράγονται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 250°C. Πιο συγκεκριμένα, η κυτταρίνη αρχίζει να διασπάται στους 325°C (Κωνσταντινίδης 2003).

### **2.1.3 Έναυση και Δημιουργία Φλόγας**

Η διεργασία της έναυσης σηματοδοτεί την έναρξη της καύσης. Η έναυση των πτητικών αερίων πραγματοποιείται όταν η συγκέντρωση τους στον περιβάλλοντα αέρα οδηγεί στη δημιουργία αναφλέξιμου μείγματος, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλότερη της αντίστοιχης θερμοκρασίας ανάφλεξης. Οι χημικές αντιδράσεις καύσης των αερίων πτητικών ενώσεων πραγματοποιούνται με πολύ ταχείς ρυθμούς. Κατά συνέπεια, ο συνολικός χρόνος καύσης των πτητικών ενώσεων καθορίζεται κυρίως από τον ρυθμό παραγωγής τους μέσω των αντιδράσεων πυρόλυσης και από το ρυθμό ανάμειξης τους με τον περιβάλλοντα αέρα. Η καύση των πτητικών χαρακτηρίζεται συνήθως από την εμφάνιση τυρβώδους φλόγας διάχυσης, που αντιστοιχεί στην περιοχή της στοιχειομετρικής αναλογίας του μείγματος αέρα-πτητικών. Το φαινόμενο της τυρβώδους διάχυσης ενισχύει σε μεγάλο βαθμό τόσο τον ρυθμό ανάμειξης των αντιδρώντων όσο και το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ρυθμού καύσης (Φούντη, Κολαΐτης 2014). Το στάδιο της καύσης πραγματοποιείται για τα δασικά καύσιμα σε θερμοκρασίες 380°C έως 450°C (Κωνσταντινίδης 2003).

### **2.1.4 Δημιουργία και Καύση Εξανθρακώματος**

Έπειτα από τη διαδικασία της πυρόλυσης και τη δημιουργία των εύφλεκτων αερίων, η περαιτέρω θέρμανση της καύσιμης ύλης σε θερμοκρασία άνω των 500°C προκαλεί τη δημιουργία του εξανθρακώματος (char), ενός στερεού υπολείμματος που αποτελείται κυρίως από ανθρακούχες ενώσεις. Γενικά, το εξανθράκωμα είναι πορώδες και αποτελείται κυρίως από άνθρακα (55-97%) και ανόργανες ενώσεις. Η έναυση του εξανθρακώματος απαιτεί την προσρόφηση επαρκών ποσοτήτων οξυγόνου στην επιφάνεια του, καθώς και την ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών (άνω των 800°C). Στην περίπτωση που η καύσιμη ύλη υπόκειται σε υψηλό ρυθμό θέρμανσης η έναυση των πτητικών αερίων και του εξανθρακώματος μπορεί να γίνει ταυτόχρονα. Η ολοκλήρωση του σταδίου της καύσης του



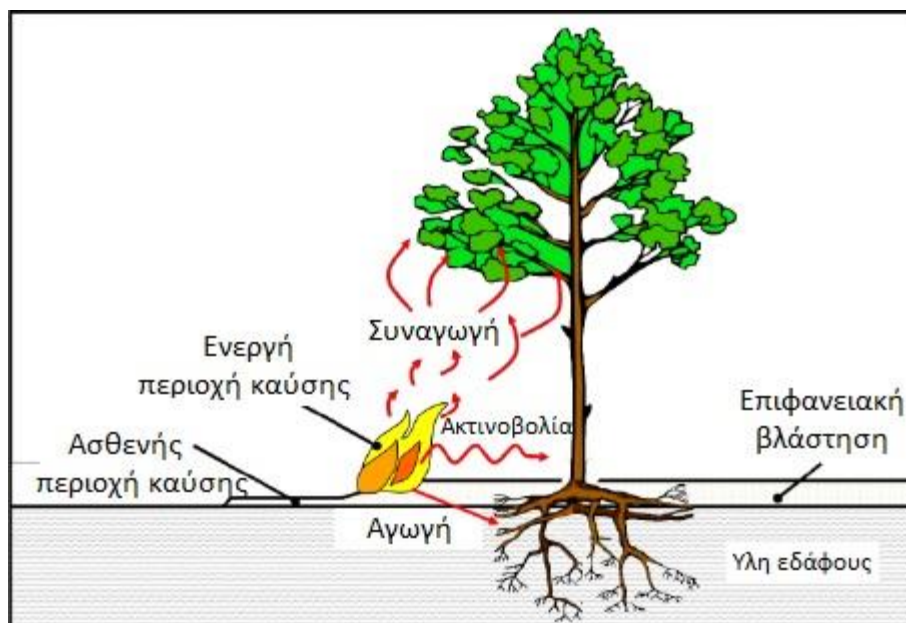
εξανθρακώματος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός άκαυστου υπολείμματος τέφρας, αποτελούμενου κυρίως από οξείδια ανόργανων ενώσεων (Φούντη, Κολαϊτής 2014).

### 2.1.5 Επίδραση της Τύρβης στις Δασικές Πυρκαγιές

Το φαινόμενο της τύρβης επιδρά πάνω σε μια μεγάλη χωρική κλίμακα κατά τη διάρκεια των δασικών πυρκαγιών. Οι τυρβώδεις ροές παρουσιάζουν α) χαοτική συμπεριφορά, β) ενεργειακή υποβάθμιση, καθώς έχουν την τάση να χάνουν πολύ γρήγορα την κινητική τους ενέργεια, εκτός κι αν υπάρχει μηχανισμός δημιουργίας ή αναπλήρωσης τους, γ) διάχυση, όπου ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και ο ρυθμός ανάμειξης των συστατικών ενός πολυσυστατικού μείγματος είναι αρκετά έντονος και δ) στροβιλότητα, όπου παρατηρείται εμφάνιση συστρεφόμενων δινών που κινούνται και παραμορφώνονται διαρκώς (Φούντη, Κολαϊτής 2014). Πιο συγκεκριμένα, η τύρβη παρατηρείται τόσο στην κλίμακα της φλόγας όσο και στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Είναι υπεύθυνη τόσο για την ανάμειξη των θερμών πυρολυμένων αερίων με τον αέρα του περιβάλλοντος όσο και για την αλληλεπίδραση των πτητικών αυτών αερίων με το άκαυστο καύσιμο λόγω της έντονης εκπομπής ακτινοβολίας. Επίσης, η δράση της τύρβης οδηγεί, εν μέρει, και στην εμφάνιση του φαινομένου της κηλίδωσης.

Τέλος, η παρουσία τύρβης συναντάται και στις ροές του ανέμου όπου μπορούν να παρατηρηθούν στροβιλώδεις κινήσεις που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος κλιμάκων. Στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα ο αριθμός Richardson, ο οποίος συσχετίζει τη θερμική παραγωγή τύρβης με τη παραγωγή τύρβης από διατμητικές τάσεις, είναι κατάλληλος για να δείξει την ύπαρξη ή όχι τύρβης στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η παρουσία τύρβης είναι ένας επιπλέον παράγοντας που καθιστά το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών σύνθετο κατά τη μελέτη του.

## 2.2 Μηχανισμοί Διάδοσης Δασικής Φωτιάς



**Σχήμα 2.2** Σχηματική αναπαράσταση των κύριων μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας σε δασική φωτιά.

Για να ξεκινήσει η καύση απαιτείται η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης να ανέλθει στο σημείο ανάφλεξης, το οποίο εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης και την περιεχόμενη υγρασία. Ωστόσο, για να παρατηρηθεί εξάπλωση της φωτιάς είναι αναγκαία η μεταφορά της στην παρακείμενη καύσιμη ύλη. Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας καθώς και ένας τέταρτος αστάθμητος σημαντικός παράγοντας (Σχήμα 2.2).

### 2.2.1 Αγωγή

Αγωγή θερμότητας, η οποία περιγράφει τα φαινόμενα μεταφοράς ενέργειας που λαμβάνουν χώρα λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ μορίων ή ατόμων υψηλού ενεργειακού περιεχομένου (υψηλής θερμοκρασία) με γειτονικά τους μόρια ή άτομα χαμηλότερου ενεργειακού περιεχομένου (χαμηλής θερμοκρασίας). Η συμβολή της αγωγής θερμότητας είναι περιορισμένη στη διάδοση των πυρκαγιών, όπου τα στοιχεία του καυσίμου παρουσιάζουν μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ετερογένεια και χωρικές ασυνέχειες. Ακόμα και σε ομογενή καύσιμη ύλη, όπως το γρασίδι, τα στοιχεία του καυσίμου δεν παρουσιάζουν χωρική συνέχεια και, επομένως, η αγωγή θερμότητας μεταξύ τους είναι πρακτικά αμελητέα. Ωστόσο, η αγωγή μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας διαμέσω μεγαλύτερων καυσίμων, όπως πλατιά φύλλα ή μεγάλους πεσμένους κορμούς και κλαδιά (Sullivan 2017b).

### 2.2.2 Συναγωγή

Συναγωγή θερμότητας, η οποία περιγράφει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ενός στερεού και ενός κινούμενου ρευστού, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία. Στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών παρατηρείται ελεύθερη (φυσική) συναγωγή όπου η κίνηση του ρευστού δημιουργείται λόγω διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του ρευστού διαφορετικής θερμοκρασίας (θερμική άνωση). Ειδικότερα, η συναγωγή των θερμών αέριων μαζών ερμηνεύει την ταχύτερη εξάπλωση της φωτιάς προς τα ανάντη σε περιπτώσεις πυρκαγιών σε επικλινή εδάφη (Duruy 1995). Επιπλέον, η συναγωγή θερμότητας ερμηνεύει το φαινόμενο της μετατροπής της έρπουσας πυρκαγιάς σε επικόρυφη, καθώς τα θερμά καυσαέρια καθώς ανέρχονται προς τα πάνω, λόγω ανωστικών δυνάμεων, αυξάνουν έντονα τη θερμοκρασία της φυλλωσιάς των δένδρων (Κατσάνος 1970). Η συναγωγή θερμότητας έχει πολύ μικρή συνεισφορά στη διάδοση της φωτιάς σε επίπεδες επιφάνειες με χαμηλή ταχύτητα ανέμου, καθώς τα θερμά αέρα ανέρχονται και διαχέονται στην ατμόσφαιρα χωρίς να αλληλεπιδράσουν με το καύσιμο.

### 2.2.3 Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία, η οποία περιγράφει την ενέργεια που εκπέμπεται από κάθε υλικό σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτείται η ύπαρξη μέσου διάδοσης. Η μεταφορά θερμότητας στη γειτονική άκαυστη βλάστηση, μέσω προσπίπτουσας ακτινοβολίας, είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας διάδοσης της φωτιάς. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τυρβώδεις φλόγες διάχυσης των δασικών πυρκαγιών χαρακτηρίζονται από έντονη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας που οφείλεται τόσο στα πυρακτωμένα σωματίδια αιθάλης, όσο και στη μοριακή ακτινοβολία των θερμών

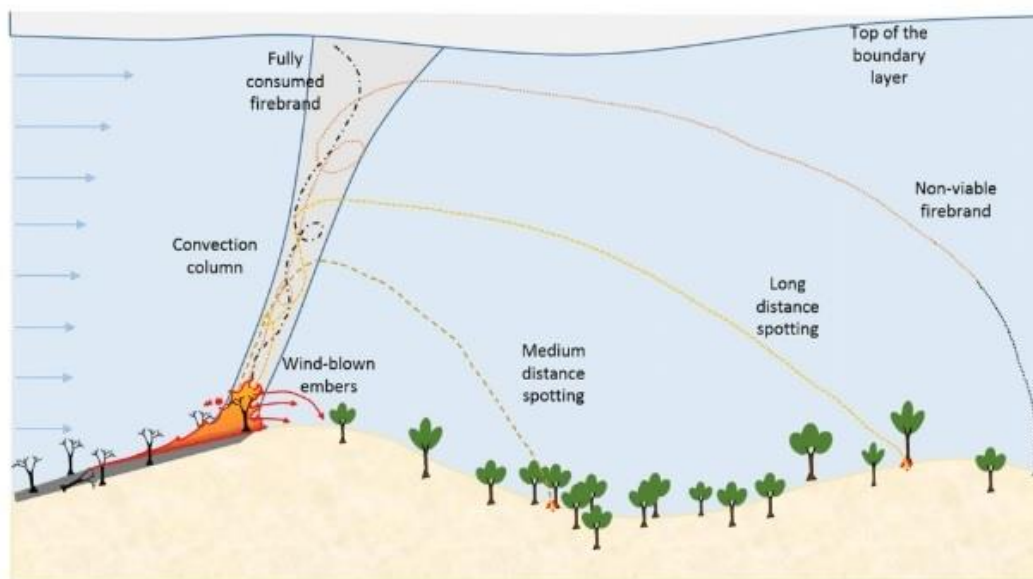
καυσαερίων, κυρίως του CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Η απόσταση της φλόγας από τη βλάστηση εξαρτάται από την κλίση της φλόγας, η οποία καθορίζεται με τη σειρά της από την τοπογραφική κλίση και την ένταση του ανέμου. Η ένταση της ακτινοβολίας αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από τη φλόγα.

Η συναγωγή και η ακτινοβολία έχουν τους κυρίαρχους ρόλους στην μεταφορά θερμότητας στην δασικές πυρκαγιές, σε αντίθεση με την σχεδόν απύουσα αγωγή. Η σχετική τους συνεισφορά εξαρτάται από τις ιδιότητες του καυσίμου και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Ο Simms (1963) διερεύνησε την συνολική ακτινοβολία που χρειάζεται ένα δείγμα ξύλου προκειμένου να επιτευχθεί η έναυση του. Πιο συγκεκριμένα, η έναυση συσχετίστηκε με την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία, όπου υπολογίστηκε μια κρίσιμη τιμή προσπίπτουσας ακτινοβολίας της τάξης των 13 kW/m<sup>2</sup> για χρόνο 10 s. Ο Van Wagner (1967) συμπέρανε ότι η ακτινοβολία είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας για την προθέρμανση υπολειμμάτων πεύκου σε μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων σε κλίση καυσίμου. Η μελέτη του Anderson (1969) όρισε θερμοκρασιακά όρια όπου παρατηρείται έναυση σε καύσιμα από κυτταρίνη και καθόρισε, μέσω πειραμάτων, ότι η συνεισφορά της ακτινοβολίας στην έναυση των καυσίμων είναι πάνω από 40%. Ο Ragni (1972) εκτέλεσε μια σειρά πειραμάτων και κατέδειξε τις περιπτώσεις που είναι κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας η ακτινοβολία και τις αντίστοιχες περιπτώσεις για την συναγωγή. Πιο συγκεκριμένα, έδειξε ότι κάτω από συνθήκες άπνοιας η ακτινοβολία είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός, ενώ στις φωτιές καθοδηγούμενες από τον άνεμο η συναγωγή έχει τον κυρίαρχο ρόλο. Ο Albini (1985) ανέπτυξε ένα μοντέλο για τις δασικές πυρκαγιές, όπου έλυσε την εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και αμέλησε τα φαινόμενα συναγωγής. Αργότερα, το μοντέλο τροποποιήθηκε για να περιγράψει τη ψύξη του καυσίμου μέσω της φυσικής συναγωγής (Albini 1986). Οι Tihay et al. (2014) ερεύνησαν την επίδραση της κλίσης στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας. Ειδικότερα, σε πειράματα υπό μηδενική κλίση η συνεισφορά της συναγωγής έχει τιμή 80% της συνολικά εκπεμπόμενης θερμότητας από τη φωτιά, ενώ το υπόλοιπο 20% οφείλεται στην ακτινοβολία (10% αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που εκπέμπουν οι φλόγες και το υπόλοιπο 10% αφορά την εκπεμπόμενη ακτινοβολία του εξανθρακώματος (ember) που σιγοκαίει). Σε πειράματα υπό κλίση 20° παρατηρήθηκε ότι η συνεισφορά της συναγωγής είναι λιγότερο από 65% της συνολικά εκπεμπόμενης θερμότητας, ενώ το υπόλοιπο 35% αφορούσε την ακτινοβολία (το 24% αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία από τις φλόγες και το υπόλοιπο 11% αφορά την ακτινοβολία από το εξανθράκωμα). Επομένως, με την αύξηση της κλίσης η συνεισφορά της ακτινοβολίας αυξάνεται και αυτό οφείλεται στην αύξηση του όγκου του εξανθρακώματος, στην ενίσχυση της φλόγας και στην εντονότερη παραγωγή σωματιδίων αιθάλης.

#### 2.2.4 Κηλίδωση

Πέρα από τους τρεις αξιωματικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, η διάδοση της φλόγας επηρεάζεται και από έναν τέταρτο καθοριστικό παράγοντα, την λεγόμενη κηλίδωση (spotting). Τα πυρακτωμένα τεμάχια καύσιμης ύλης, ή αλλιώς «καύτρες», προσγειώνονται πάνω στο άκαυστο καύσιμο, ακόμα και δεκάδες μέτρα από το μέτωπο της φωτιάς και δημιουργούν νέες εστίες φλόγας (Σχήμα 2.3). Ειδικότερα, κατά την καύση των δέντρων ή των θάμνων, λόγω της θερμικής αποσύνθεσης, μικρά φλεγόμενα κομμάτια (κοτσάνια, κλαδιά, μίσχοι) σπάνε και εκσφενδονίζονται με τη βοήθεια του ανέμου σε

αστάθμητες κατευθύνσεις. Επίσης, πολλά τεμαχίδια καύσιμης ύλης παρασύρονται από το ανωστικό πλούμιο και μεταφέρονται αρκετά μέτρα μακριά από το σημείο της φλόγας. Οι παράγοντες που καθορίζουν αν το τεμάχιο της ύλης θα ταξιδέψει και θα προσγειωθεί φλεγόμενο στο έδαφος είναι η ευκολία αποκόλλησης και ανύψωσης του, ο βαθμός ευφλεκτότητας του, το μέγεθος, τα αεροδυναμικά του χαρακτηριστικά, η χημική του σύσταση, η θέση του στο χώρο σε σχέση με την υπόλοιπη βλάστηση, η ύπαρξη ανωρόφου, η ύπαρξη συναγωγικής στήλης και οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Αν οι καύτρες, μόλις προσγειωθούν, συνεχίζουν να είναι αναμμένες, δημιουργούν νέα μέτωπα φλόγας που αναπτύσσονται ανεξάρτητα από το κύριο μέτωπο (Simeoni 2016) αυξάνοντας τον κίνδυνο εγκλωβισμού πολιτών και δασοπυροσβεστών.



Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού της κηλίδωσης (Sullivan 2017b).

## 2.3 Χρονική και Χωρική Κλίμακα στις Δασικές Πυρκαγιές

Οι βασικές χημικές και φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φωτιάς μπορούν να κατανεμηθούν σε ένα ευρύ φάσμα χρονικών και χωρικών κλιμάκων (Πίνακας 2.1). Η αλληλεπίδραση του ποικίλου εύρους των κλιμάκων καθορίζουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς και η έρευνα τους αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα.

**Πίνακας 2.1** Οι βασικές βιολογικές, φυσικές και χημικές διαδικασίες και συνιστώσες που παρατηρούνται σε μια δασική πυρκαγιά καθώς και το εύρος των χρονικών και χωρικών (οριζόντιας και κατακόρυφης) κλιμάκων που συμβαίνουν (Sullivan 2017a).

Τύπος	Χρονική κλίμακα (s)	Κατακόρυφη κλίμακα (m)	Οριζόντια κλίμακα (m)
<b>Συνιστώσες</b>			
Στοιχεία Καυσίμου	-	0.001 - 0.01	0.001 – 0.01
Μέρη Καυσίμου	-	1 - 10	1 - 100
Συνθήκες Καυσίμου	-	0.1 - 1	0.01 - 1
Άνεμος	1 - 1000	1 - 100	0.1 - 1000
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	100 - 1000	1 - 100	100 - 1000
Σχετική υγρασία	100 – 10,000	1 - 100	100 - 1000
Τοπογραφία	-	1 - 1000	1 - 1000
Φλόγες	0.01 - 10	0.1 - 10	0.1 - 1
Πλούμιο καυσαερίων	1 – 10,000	1 - 10.000	1 - 100
<b>Διαδικασίες</b>			
Χημικές αντιδράσεις	$10^{-20}$ - 0.01	$10^{-4}$ - 0.01	$10^{-4}$ - 0.01
Ακτινοβολία	$10^{-9}$ - 10	0.1 - 100	0.1 - 100
Αγωγή	0.01 - 1	0.01 - 10	0.01 - 10
Συναγωγή	1 - 100	0.1 - 100	0.1 - 10
Τύρβη	0.1 – 1000	0.01 - 100	0.01 - 1000
Κηλίδωση	0.1 - 1000	1 - 1000	0.1 – 10,000

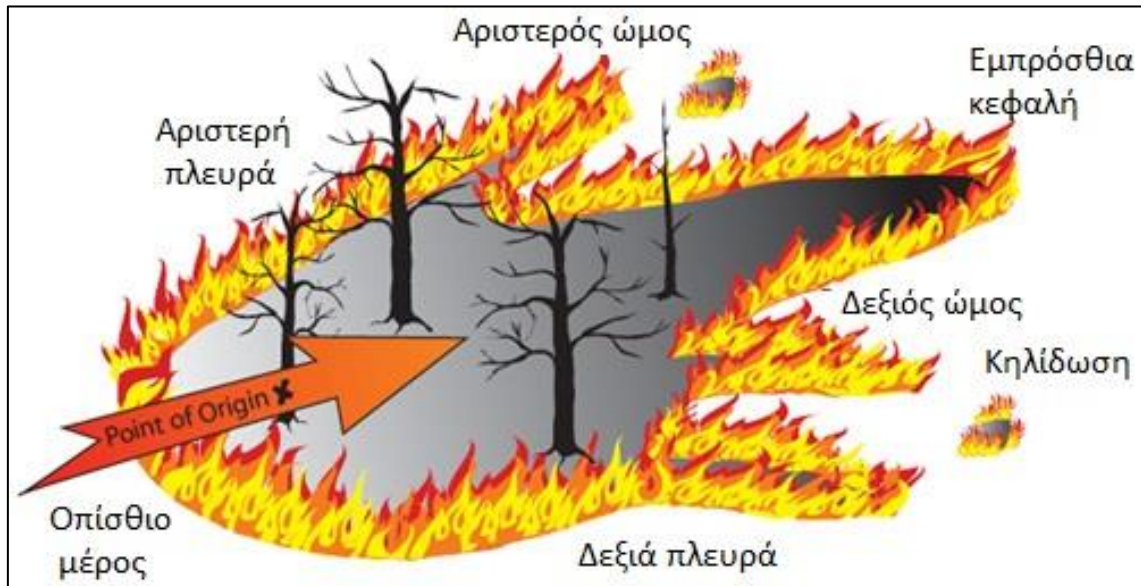
## 2.4 Ποσοτικά Χαρακτηριστικά της Δασικής Φωτιάς

### 2.4.1 Ρυθμός Εξάπλωσης της Φωτιάς

Ο ρυθμός εξάπλωσης (Rate of Spread)  $r$  ή ROS (m/s) της δασικής φλόγας ορίζεται ως η απόσταση εξάπλωσης της προς τον απαιτούμενο χρόνο. Αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά μιας φλόγας και ο έλεγχος του αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την κατάσβεση της φωτιάς.

Οι υπόγειες πυρκαγιές (smoldering fires) εξαπλώνονται αργά, χωρίς ορατή φλόγα. Για τις πυρκαγιές επιφανείας ή κόμης η εξάπλωση (Σχήμα 2.4) αφορά: α) εξάπλωση της κεφαλής με τη βοήθεια του ανέμου ή της μορφολογικής κλίσης, β) οπισθοδρομούσα εξάπλωση όταν εξαπλώνονται αντίθετα από τη διεύθυνση του ανέμου (ανάντι), γ) πλάγια εξάπλωση όταν διαδίδονται κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου ή παράλληλα με τις ισοϋψείς μιας πλαγιάς και δ) εξάπλωση στον ώμο που είναι τμήμα της πυρκαγιάς μεταξύ κεφαλής και πλευράς, όπου η διεύθυνση εξάπλωσης σχηματίζει γωνία με τη διεύθυνση της κύριας εξάπλωσης της (Αθανασίου 2015).

Οι τιμές του ρυθμού εξάπλωσης στην κεφαλή μπορεί να ποικίλλουν από 1.4 km/h (το κατώτερο όριο ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς σε επιφανειακά καύσιμα) έως τα 14 km/h σε ενεργές πυρκαγιές κόμης σε υψηλά δάση και μπορεί να είναι μεγαλύτερες από 20 km/h σε πυρκαγιές επιφανείας που εξαπλώνονται σε χόρτα (Alexander 2000).



**Σχήμα 2.4** Αναπαράσταση της « ανατομίας » μιας δασικής φωτιάς.

Πέρα από τον υπολογισμό του μεγέθους μέσω της παρατήρησης, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης του. Το πιο γνωστό, αξιόπιστο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο υπολογισμού του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς είναι το μαθηματικό, ημι-εμπειρικό μοντέλο του Rothermel (1972). Το σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου του Rothermel είναι η δυνατότητα χρήσης του σε οποιονδήποτε τύπο δασικής καύσιμης ύλης μέχρι ύψους 2 μέτρων, περιλαμβανομένων θαμνότοπων και λιβαδιών. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί ως δεδομένα την ταχύτητα του ανέμου, την κλίση του εδάφους και την υγρασία του καυσίμου προκειμένου να υπολογίσει τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς.

Στο μοντέλο πρόβλεψης του Rothermel βασίζονται, με μικρές διαφοροποιήσεις, το Εθνικό Σύστημα Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών (NFDRS) των Η.Π.Α (Deeming et al. 1972, 1977), το σύστημα πρόβλεψης δασικής πυρκαγιάς Behave (Burgan & Rothermel 1984) της Δασικής Υπηρεσίας των Η.Π.Α, που δημιουργήθηκε το 1984 και σήμερα έχει εξελιχθεί σημαντικά φέροντας την ονομασία BehavePlus, και το σύγχρονο σύστημα προσομοίωσης της εξάπλωσης των πυρκαγιών στο χώρο FARSITE.

Βάσει των εξισώσεων του Behave, ο ROS της εξάπλωσης: α) των πλευρών (flank) (με διεύθυνση που σχηματίζει γωνία 90° προς την κύρια εξάπλωση) είναι 20% του ROS της κεφαλής, β) των ώμων (hank) (με διεύθυνση που σχηματίζει γωνία 45° προς την κύρια εξάπλωση) είναι το 74% του ROS της κεφαλής και γ) της ουράς (back) (αντίρροπα προς την κύρια εξάπλωση) είναι το 5% του ROS της κεφαλής (Scott 2012).

Επίσης, ο McArthur θεώρησε τον ROS ως τον πλέον σημαντικό δείκτη της δριμύτητας των δασικών πυρκαγιών (Luke & McArthur 1978). Σύμφωνα με την προσέγγιση του McArthur, ο ROS είναι ανάλογος με την ταχύτητα του ανέμου και με το διαθέσιμο φορτίο δασικών καυσίμων και αντιστρόφως ανάλογος της περιεχόμενης υγρασίας των καυσίμων. Το μοντέλο του McArthur υπερεκτιμά τον ROS στα πρώτα στάδια της πυρκαγιάς και είναι



αξιόπιστο για πλήρως αναπτυγμένες πυρκαγιές που εξαπλώνονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Sullivan 2009).

Εργαστηριακά πειράματα κατέδειξαν την μείωση του ROS με αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας των δασικών καυσίμων (Rossa 2017), την αύξηση του ROS με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου (fuel load), την μείωση του ROS για αρνητικές γωνίες κλίσης της κλίνης και αύξηση του για θετικές γωνίες κλίσης της κλίνης, καθώς και την καταλυτική επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στο ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς (Dupuy 1995, Tihay et al. 2014).

#### 2.4.2 Ένταση της Φωτιάς

Η ένταση (Intensity) της φωτιάς είναι ένα μέγεθος ποσοτικοποίησης της δριμύτητας της φωτιάς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για το σχεδιασμό της καταστολής της φωτιάς αλλά και για την αποτίμηση των επιπτώσεων της (Rothermel & Deeming 1980, Andrews & Rothermel 1982).

Η ένταση της φωτιάς κατά μήκος της ζώνης καύσης (Frontal fire intensity ή Fire line Intensity ή  $I$ , kW/m) είναι το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται στη μονάδα του χρόνου και του μήκους. Η φυσική ερμηνεία του μεγέθους είναι ο ρυθμός με τον οποίο η αποθηκευμένη στα δασικά καύσιμα χημική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω της καύσης ανά μονάδα μήκους του μέτωπου της φωτιάς.

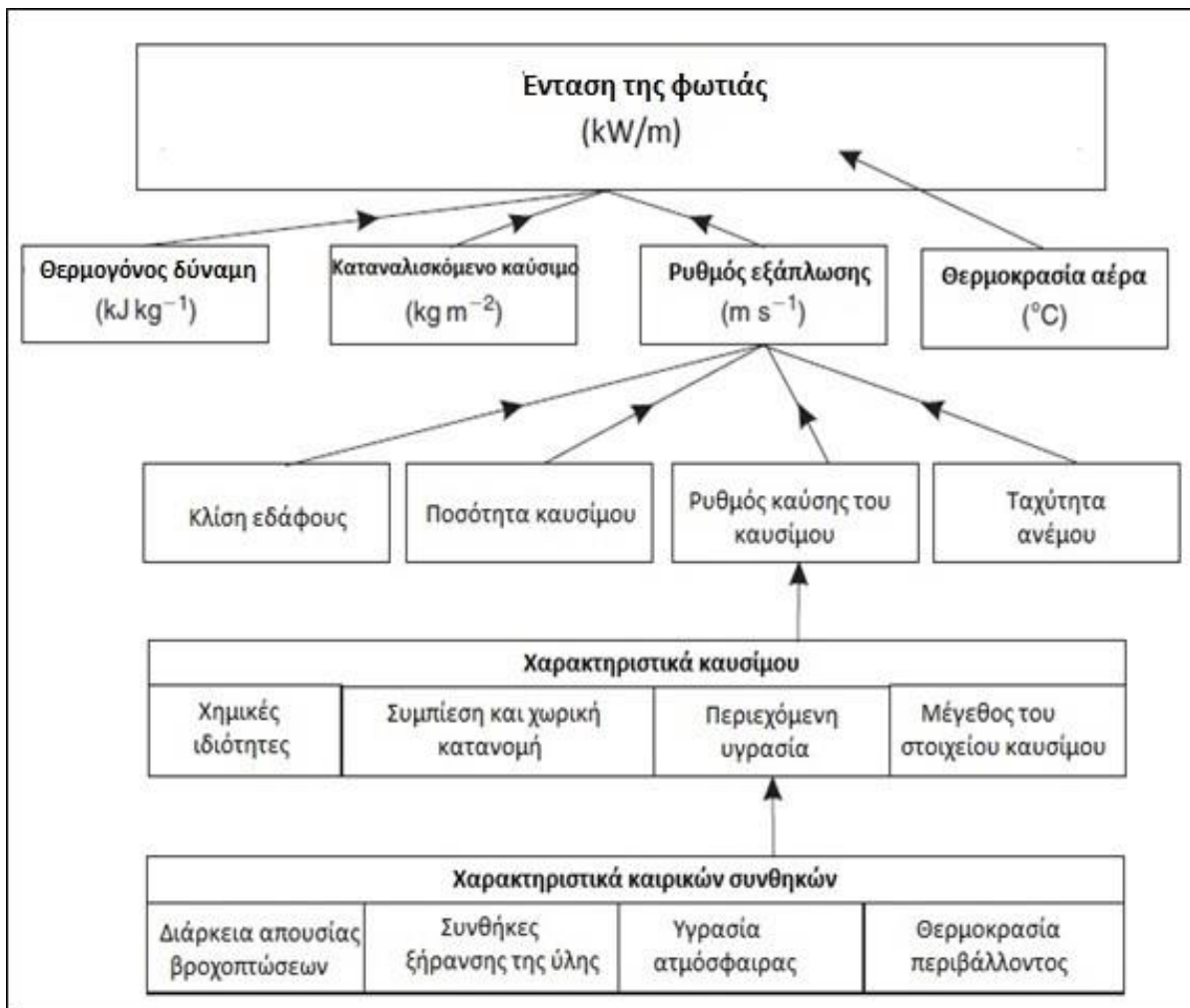
Ο Byram (1959) όρισε την ένταση ( $I$ ) της φωτιάς, συμπεριλαμβάνοντας αρκετούς παράγοντες από το περιβάλλον της φλόγας (Σχήμα 2.5), μέσω της Εξίσωσης (2.1), όπου  $I$  (kW/m) η ένταση της φωτιάς,  $H_u$  (kJ/kg) η κατώτερη θερμογόνο δύναμη της καύσιμης ύλης,  $w$  (kg/m<sup>2</sup>) η μάζα του καταναλισκόμενου καυσίμου στην ενεργή ζώνη φλόγας και  $r$  (m/s) ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς (ROS).

$$I = H_u \cdot w \cdot r \quad (2.1)$$

Η κατώτερη θερμογόνο δύναμη ( $H_u$ ) θεωρείται σχεδόν σταθερή για μια μεγάλη ποικιλία βιομάζας και μπορεί να κυμαίνεται από 18,000 kJ/kg έως 21,000 kJ/kg. Οι απώλειες θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας, της ατελούς καύσης και της ατμοποίησης της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού. Η διόρθωση της τιμής της θερμογόνου ικανότητας λόγω των απωλειών θερμότητας μέσω ακτινοβολίας θεωρείται σημαντική συνιστώσα της διαδικασίας υπολογισμού της έντασης της φωτιάς. Αυτό συμβαίνει γιατί, αν και η ακτινοβολία αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής εκπεμπόμενης ενέργειας, η συναγωγή θεωρείται ο μηχανισμός που συνεισφέρει κυρίως στην ένταση και στη γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φωτιάς. Οι Nelson & Adkins (1986) σε πειράματα τους διόρθωσαν την τιμή της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας λαμβάνοντας υπόψη ένα ποσοστό 20% ως απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας. Όσον αφορά τη διόρθωση της θερμογόνου ικανότητας ως προς την περιεχόμενη υγρασία, προτείνεται μείωση της τιμής της θερμογόνου ικανότητας κατά 24 kJ/kg ανά 1% περιεχόμενης υγρασίας (Van Wagner 1972). Τέλος, η επίδραση της ατελούς καύσης στη διόρθωση του μεγέθους της θερμογόνου ικανότητας είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί.

Η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται στην ενεργή ζώνη φλόγας ( $w$ ) είναι ουσιαστικά αδύνατο να υπολογισθεί καθώς είναι δύσκολο να διαχωριστεί η βιομάζα που καίγεται ακριβώς στο μέτωπο της φλόγας από τη βιομάζα που καίγεται αφού το μέτωπο

περάσει από αυτή (Simard et al. 1989). Μόνο υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες μπορεί να υπολογιστεί αυτό το μέγεθος. Στο Σχήμα (2.5) διαγράφονται καθαρά όλες οι συνιστώσες που επηρεάζουν την ένταση της φωτιάς.



**Σχήμα 2.5** Σχηματική αναπαράσταση που υποδεικνύει τις ποικίλες συνιστώσες που συνεισφέρουν στη τιμή της έντασης της φωτιάς (I) (Alexander & Cruz 2012).

Η διακύμανση των τιμών της έντασης της φωτιάς (I) οφείλονται κυρίως στη διακύμανση των τιμών του ROS, οπότε οι μετρήσεις του ρυθμού εξάπλωσης πρέπει να χαρακτηρίζονται από ικανή διάρκεια και να αφορούν την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε αρκετό μήκος, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις και να εξασφαλίζεται η μέτρηση μιας σταθερής μέσης τιμής (Alexander 1982).

Η ένταση της φωτιάς (I) μπορεί να ποικίλλει κατά περισσότερες από 4 τάξεις μεγέθους, από περίπου 10 kW/m που συνιστά την τιμή κατωφλίου για τη διάδοση της φλόγας, έως και μεγαλύτερη των 100,000 kW/m (τιμή έντασης πολύ μεγάλων πυρκαγιών) (Alexander 1982).

Στον Πίνακα (2.2) κατηγοριοποιούνται οι διακυμάνσεις της έντασης της φωτιάς σε σχέση με την προσπάθεια δασοπυρόσβεσης (McArthur & Cheney 1966).



**Πίνακας 2.2** Συσχέτιση κλάσεων έντασης πυρκαγιάς σε σχέση με την αποτελεσματικότητα της δασοπυρόσβεσης.

Κλάσεις έντασης	Επίπεδο έντασης (kW/m)	Επίπεδο δασοπυρόσβεσης
Πολύ χαμηλή	< 350	Εύκολη κατάσβεση φωτιάς
Χαμηλή	350 – 1,700	
Μεσαία	1,700 – 3,500	Έντονη προσπάθεια και σημαντικός εξοπλισμός δασοπυρόσβεσης
Υψηλή	3,500 – 7,000	Κατώφλι δασοπυρόσβεσης από επίγειες δυνάμεις
Πολύ Υψηλή	> 7,000	Πυρκαγιά κόμης – Υποστήριξη από εναέρια μέσα
Ακραία	> 10,000	

Ο Rothermel (1972) εισήγαγε το μέγεθος της έντασης αντίδρασης καύσης  $I_R$  (reaction intensity, kW/m<sup>2</sup>) για να καταδείξει τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας στη ζώνη ενεργούς καύσης μέσω της Εξίσωσης (2.2), όπου  $D$  (m) το βάθος της ενεργής οριζόντιας φλόγας (Σχήμα 2.6). Ο Byram πρότεινε ότι η ένταση της φωτιάς ( $I$ ) μπορεί να υπολογιστεί και για ομοιογενείς κλίνες με καύσιμα μικρών διαμέτρων από την Εξίσωση (2.2).

$$I_R = \frac{I}{D} \quad (2.2)$$

Επίσης, σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται η Εξίσωση (2.3) για τον υπολογισμό της έντασης της φωτιάς, όπου  $t_r$  (sec) χρόνος παραμονής της φλόγας.

$$I = I_R \cdot t_r \cdot r \quad (2.3)$$

Το βάθος της ενεργής οριζόντιας φλόγας  $D$  (m) υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.4) και καταδεικνύεται στο Σχήμα (2.6).

$$D = r \cdot t_r \quad (2.4)$$

Μια εκτίμηση του χρόνου παραμονής της φλόγας  $t_r$  (s) (Anderson 1969) διατυπώνεται στην Εξίσωση (2.5), όπου  $d$  (cm) η διάμετρος των στοιχείων της καύσιμης ύλης.

$$t_r = 189 \cdot d \quad (2.5)$$

Τέλος, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει τον προσδιορισμό της έντασης της φωτιάς ( $I$ ) από την παρατήρηση του μήκους της φλόγας. Η συσχέτιση της έντασης της φωτιάς με τη γεωμετρία της φλόγας είναι πολύ χρήσιμη και εφαρμόσιμη στο πεδίο της έρευνας. Μία από αυτές της σχέσεις είναι η πρόταση του Byram (1959) για την ένταση της φλόγας στην Εξίσωση (2.6), όπου  $L$  (**m**) μήκος της φλόγας.

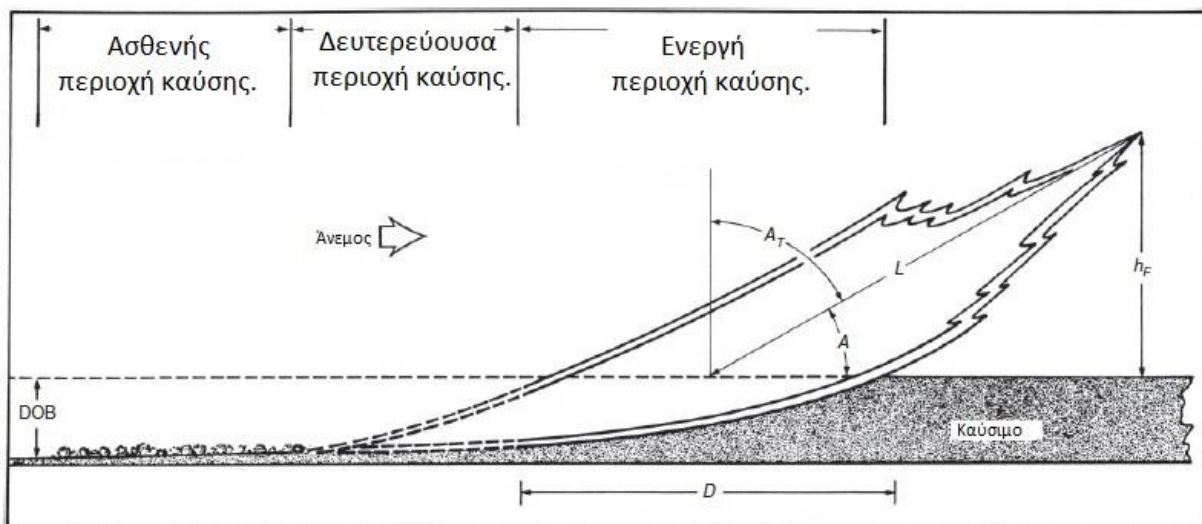
$$I = 259.833 \cdot L^{2.174} \quad (2.6)$$

### 2.4.3 Μήκος και Ύψος της Φλόγας

Το ύψος της φλόγας (Flame Height ή  $h_F$ , m) είναι η μέγιστη κατακόρυφη προέκταση της φωτιάς, χωρίς της περιοδικές «γλώσσες» φωτιάς που εμφανίζονται, ενώ το μήκος της φλόγας (Flame Length ή  $L$ , m) είναι η απόσταση από το μέσο της βάσης της ενεργής ζώνης καύσης ως το ψηλότερο σημείο της, όπως φαίνεται στα Σχήματα (2.6) και (2.7). Το ύψος και το μήκος της φλόγας ταυτίζονται μόνο σε συνθήκες άπνοιας και απουσίας κλίσης. Οι Εξισώσεις (2.7) και (2.8) περιγράφουν τη σχέση μήκους και ύψους της φλόγας για διάδοση φωτιάς σε επίπεδη επιφάνεια ( $S=0^\circ$ ) ή υπό κλίση επίπεδο ( $S \neq 0^\circ$ ), όπου  $A$  (**degrees**) η γωνία της φλόγας που σχηματίζεται μεταξύ του μήκους της φλόγας και της άκαυστης κλίνης καυσίμου,  $A_T$  (**degrees**) η γωνία κλίσης της φλόγας που σχηματίζεται μεταξύ του μήκους της φλόγας και της κατακόρυφου και  $S$  (**degrees**) η γωνία κλίσης του επιπέδου.

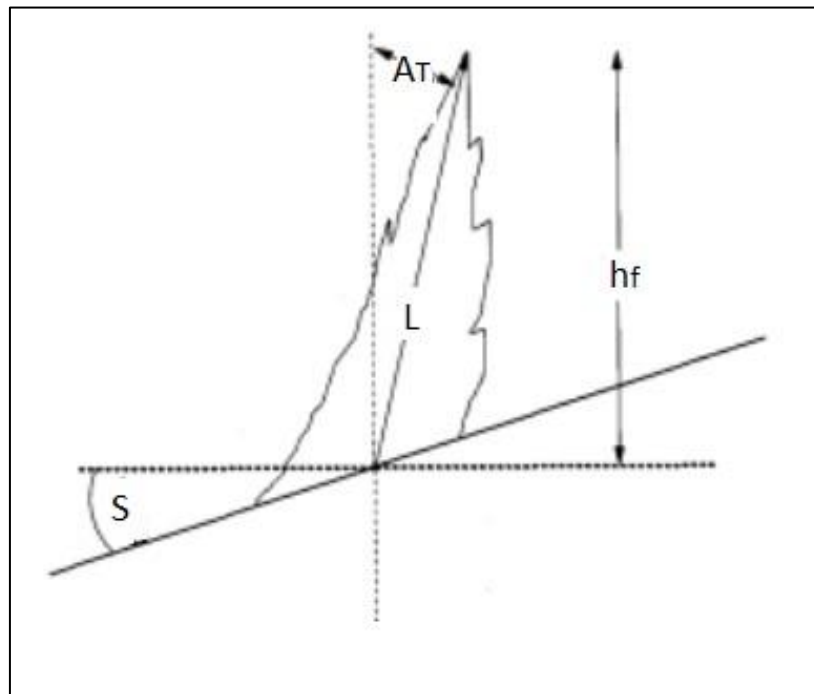
$$L = \frac{h_F}{\sin(A + S)} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{h_F}{\cos A_T} \quad (2.8)$$



**Σχήμα 2.6** Τομή της φλόγας όπου διαφαίνονται τα στάδια της απελευθέρωσης θερμότητας κατά το πέρασμα της φωτιάς καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της, όπως το μήκος της φλόγας ( $L$ ), το ύψος της φλόγας ( $h_F$ ), η γωνία της φλόγας ( $A$ ), η γωνία κλίσης της φλόγας ( $A_T$ ) και το βάθος της ενεργής οριζόντιας φλόγας ( $D$ ) (Alexander 1982).

Επίσης, στο Σχήμα (2.6) διακρίνονται η ασθενής περιοχή καύσης, όπου παρατηρείται απουσία της φλόγας και αργή καύση του εναπομείναντος εξανθρακώματος, η δευτερεύουσα περιοχή καύσης, όπου οι φλόγες είναι ασυνεχείς και χαμηλής έντασης και η ενεργή περιοχή καύσης με φλόγα υψηλής έντασης και διακριτά χαρακτηριστικά όπου εξελίσσονται όλες οι διαδικασίες του φαινομένου.



**Σχήμα 2.7** Τομή φλόγας που διαδίδεται σε έδαφος υπό κλίση  $S$  και διαφαίνονται τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της.

Το ύψος της φλόγας είναι πολύ σημαντικό για τον καθορισμό της πιθανότητας μετατροπής της πυρκαγιάς σε φωτιά κόμης (Van Wagner 1977). Με δεδομένη την απουσία καυτρών, οι οποίες προκαλούν εναύσεις μακριά από την περίμετρο της φλόγας, το ελάχιστο πλάτος μιας αντιπυρικής ζώνης πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο του αναμενόμενου μήκους φλόγας (Byram 1959, Albini 1976). Για τους πυροσβέστες που προσεγγίζουν μια πυρκαγιά προκειμένου να την καταστείλουν, το μήκος της φλόγας οπτικοποιεί και αποδίδει με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο την ένταση και την επικινδυνότητα της φωτιάς και γι' αυτό θεωρείται βασικό ποσοτικό χαρακτηριστικό της (Rothermel 1991b). Περαιτέρω ανάλυση της γεωμετρίας της φλόγας γίνεται στην Ενότητα (2.6).

## 2.5 Πειραματικές Μελέτες

Οι συστηματικές μελέτες του φαινομένου της δασικής πυρκαγιάς ξεκίνησαν στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, με την κορύφωση των προσπαθειών να συντελείται μετά το 1950, προκειμένου να υπάρξει μια συντονισμένη προσπάθεια περιορισμού και καταστολής του φαινομένου. Οι μελέτες διεξάγονταν τόσο σε εξωτερικές δασικές εκτάσεις όσο και σε πειραματικές ελεγχόμενες διατάξεις, όπως η κλίση καύσιμου, προκειμένου να ερευνηθούν τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της φλόγας, να μελετηθούν οι παράγοντες μεταβολής της συμπεριφοράς της και να εξαχθούν συμπεράσματα και μοντέλα εξισώσεων.

### 2.5.1 Μελέτες Μικρής Κλίμακας (Fuel Beds)

Η μοντελοποίηση της δασικής πυρκαγιάς σε ελεγχόμενες πειραματικές εγκαταστάσεις είναι αρκετά διαδεδομένη παγκοσμίως. Η δημιουργία χώρων μελέτης της φωτιάς σε εργαστηριακό περιβάλλον υπερνίκησε τους οικολογικούς και κοινωνικούς παράγοντες δημιουργίας και μελέτης πυρκαγιών στο φυσικό περιβάλλον και δημιούργησε μια μεγάλη βάση δεδομένων για την πρόβλεψη της φωτιάς.

Ο εργαστηριακός χώρος μελέτης της φωτιάς αρχικά περιλαμβάνει την κλίνη καυσίμου (fuel bed) (Σχήμα 2.8). Αυτή είναι μια διάταξη η οποία μπορεί να ανυψώνεται από τη μια πλευρά και να αναδιπλώνει κατά το μήκος της, μοντελοποιώντας τις εκάστοτε διαμορφώσεις του εδάφους. Έτσι, είναι δυνατόν να προσομοιώνονται πεδιάδες, κλειστές κοιλάδες, ανυψωμένες εκτάσεις και κλειστά φαράγγια. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμάται η επίδραση των χαρακτηριστικών της τοπογραφίας καθώς και του καυσίμου, που τοποθετείται πάνω στην κλίνη, στη συμπεριφορά της φωτιάς. Επίσης, η τοποθεσία της κλίνης του καυσίμου σε αεροσήραγγα μοντελοποιεί την επίδραση του αέρα στο φαινόμενο εξέλιξης της φωτιάς.

Ταυτόχρονα, με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού όπως ψηφιακών καμερών, θερμοστοιχείων, αισθητήρων θερμοροής, ζυγαριών, συσκευών ανάλυσης καυσαερίων και τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών λαμβάνονται τιμές για τα υπό μελέτη χαρακτηριστικά της φωτιάς όπως η γεωμετρία, η ένταση, η θερμοκρασία, ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς, ο ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου κ.α.



**Σχήμα 2.8** Εργαστηριακή κλίνη καυσίμου υπό κλίση και με παροχή ρεύματος αέρα στο ένα της άκρο στο Πανεπιστήμιο Coibra της Πορτογαλίας.

Τα παραδείγματα εργαστηριακών πειραμάτων της φωτιάς ποικίλλουν. Ο Fons (1946) ήταν ο πρώτος που μελέτησε εργαστηριακές πυρκαγιές σε αεροδυναμική σήραγγα και προσπάθησε να περιγράψει τη συμπεριφορά της φωτιάς με τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου. Ο Fons (1946) υποστήριξε ότι η εξάπλωση της φωτιάς σε μια κλίνη καυσίμου μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία διαδοχικών αναφλέξεων και ότι ο ρυθμός της

εξάπλωσης της φωτιάς καθορίζεται από τον απαιτούμενο για την ανάφλεξη χρόνο και την απόσταση μεταξύ των τμημάτων της βλάστησης.

Η μελέτη των δασικών πυρκαγιών κορυφώθηκε στις Η.Π.Α, στον Καναδά και στην Αυστραλία από το 1950 έως το 1963, όπου οι Δασικές Υπηρεσίες και Εθνικά εργαστήρια συστηματοποίησαν τις προσπάθειες δημιουργίας μοντέλων πρόβλεψης πυρκαγιών.

Οι Rothermel & Anderson (1966) στη σημαντική εργαστηριακή μελέτη τους σε κλίση καυσίμου από υπολείμματα πεύκου υποστήριξαν ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς και του βάθους της ενεργούς περιοχής καύσης, ενώ με την απουσία του αέρα ο ρυθμός εξάπλωσης μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου.

Ο Thomas (1967) εκτέλεσε πειράματα προκειμένου να κατανοηθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της φωτιάς. Ειδικότερα, μέσα από τη μελέτη του κατέδειξε ότι η εξάπλωση της φωτιάς, στην οποία κυριαρχούν τα φαινόμενα άνωσης και ο εξωτερικός άνεμος είναι αμελητέος, συντελείται μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας του καυσίμου, ενώ οι καθοδηγούμενες από τον άνεμο φωτιές εξαπλώνονται εξαιτίας του μηχανισμού ακτινοβολίας από τις φλόγες, οι οποίες είναι πιο πυκνές.

Ο Van Wagner (1968) σε εργαστηριακά πειράματα με κλίση καυσίμου από πεύκο μελέτησε την επίδραση της κλίσης και της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου στο ρυθμό διάδοσης της φωτιάς και κατέληξε ότι η αύξηση της κλίσης και η μείωση της υγρασίας οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς εξάπλωσης. Επίσης, ο Rothermel (1972) εκτίμησε μέσω εργαστηριακών δοκιμών έναν συντελεστή κλίσης και τον πρόσθεσε στην γνωστή εξίσωση του για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς.

Οι Albinì & Stocks (1986) εκτέλεσαν πειράματα πυρκαγιών κόμης προκειμένου να εκτιμήσουν εμπειρικές παραμέτρους καθώς και να αξιολογήσουν αν το μοντέλο του Albinì (1985) βασισμένο σε διαφορικές εξισώσεις με κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας την ακτινοβολία, είναι ικανό να προβλέψει το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς.

Ο Van Wagner (1988) παρατήρησε μέσω πειραματικών δοκιμών σε κλίση καυσίμου από πεύκο ότι η οπισθοδρομούσα εξάπλωση μειώνεται για γωνίες κλίσης από 0° έως -20°, όπου φτάνει τη ελάχιστη τιμή, και έπειτα αυξάνεται μέχρι τις -45°. Σύμφωνα με τον παραβολικό τρόπο του ρυθμού εξάπλωσης, υποστήριξε ότι αρχικά η μείωση οφείλεται στην ελαχιστοποίηση της ακτινοβολίας από τις φλόγες στην επιφάνεια του καυσίμου λόγω της αύξησης της γωνίας κλίσης, ενώ για την μετέπειτα αύξηση δεν κατέληξε σε κάποιο συμπέρασμα.

Επίσης, οι Viegas et al. (1994) και Viegas (2002) πρότειναν ένα μοντέλο που περιγράφει την παραμόρφωση του περιγράμματος της φωτιάς υπό συνθήκες κλίσης. Ο Dupuy (1995) υποστήριξε ότι κλίσεις καυσίμου με μήκος έως 1.5 m είναι σχετικά μικρές και ακατάλληλες προκειμένου να υπολογιστεί η επίδραση της κλίσης στη συμπεριφορά της φωτιάς.

Οι Weise & Biging (1997) μελέτησαν το συνδυαστικό αποτέλεσμα της κλίσης και του ανέμου στη συμπεριφορά της φωτιάς και εξέτασαν 4 μοντέλα που συμπεριλαμβάνουν και τους 2 αυτούς παράγοντες (the Canadian Fire Behavior Prediction system, McArthur's Mark V fire danger meters, το μοντέλο του Rothermel και το φυσικό μοντέλο των Pagni & Peterson). Τα πειράματα τους έδειξαν ότι το μοντέλο του Rothermel υπολογίζει καλύτερα το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς ενώ διατύπωσαν την αδυναμία του συγκεκριμένου μοντέλου να υπολογίζει το ROS για περιεχόμενη υγρασία καυσίμου πάνω από 35%. Τα υπόλοιπα μοντέλα υπερεκτιμούσαν το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς.

Οι Mendes-Lopez et al. (2003) σε πειράματα με κλίση καυσίμου από υπολείμματα πεύκου εξέτασαν τους παράγοντες της κλίσης, της ταχύτητας του ανέμου και της περιεχόμενης

υγρασίας στη διάδοση της φωτιάς. Ειδικότερα, υποστήριξαν ότι ο ρυθμός εξάπλωσης της κεφαλής της φωτιάς αυξάνεται έντονα με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και πιο ήπια με την αύξηση της κλίσης και τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Επίσης η οπισθοδρομούσα εξάπλωση της φωτιάς είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τους παραπάνω παράγοντες, σε αντίθεση με τη γεωμετρία της φωτιάς, η οποία επηρεάζεται έντονα με τη μεταβολή των συγκεκριμένων παραγόντων.

Οι Duruy et al. (2011) σε πειράματα με κλίνη καυσίμου από πεύκο προσπάθησαν να ερμηνεύσουν την επίδραση της κλίσης και του πλάτους της κλίσης καυσίμου στη διάδοση της πυρκαγιάς. Η έρευνα τους οδήγησε στο συμπέρασμα ότι αύξηση της κλίσης ισοδυναμεί με αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς, αύξηση του χρόνου παραμονής της φλόγας ( $t_r$ ) ενώ η αύξηση του πλάτους της κλίσης (που ισοδυναμούσε με το πλάτος της φωτιάς) συντελούσε σε αύξηση των παραπάνω μεγεθών εξίσου.

Οι Tihay et al. (2014) εκτέλεσαν πειράματα με καύσιμο υπολείμματα πεύκου προσπαθώντας να βρουν την επίδραση της κλίσης στη γεωμετρία του εμπρόσθιου μετώπου της φωτιάς, στο ρυθμό απώλειας μάζας και στην συνεισφορά της συναγωγής και της ακτινοβολίας στη συνολική μεταφορά θερμότητας. Τα συμπεράσματα τους ήταν ότι υπό μηδενική κλίση ο ρυθμός απώλειας μάζας έφτανε σε μια σταθερή τιμή, η εκλυόμενη θερμότητα λόγω συναγωγής ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από τη θερμότητα που εκλυόταν λόγω ακτινοβολίας. Υπό συνθήκες κλίσης παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου, συνεχής αύξηση του μήκους της φλόγας, καθώς και αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ως προς την συνολικά εκλυόμενη θερμότητα του φαινομένου.

Ο Rossa (2017) ανέπτυξε ένα μοντέλο που συσχετίζει την επίδραση της υγρασίας στη εξάπλωση της φωτιάς διεξάγοντας εργαστηριακά πειράματα με καύσιμο από υπολείμματα ζωντανής βλάστησης και θάμνων με την περιεχόμενη τους υγρασία να κυμαίνεται από 6% έως 179%.

Οι Xie et al. (2017), (2020) ερεύνησαν την συμπεριφορά της φωτιάς σε κλειστά φαράγγια υπό εργαστηριακές συνθήκες και υποστήριξαν ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της γωνίας της κεντρικής κλίσης (της γωνίας αναδίπλωσης) όπου η επιτάχυνση της φωτιάς οδηγεί σε «εκρηκτική» συμπεριφορά. Επίσης, συμπέραναν ότι η αλληλεπίδραση της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής των πλευρικών τοιχωμάτων είναι ο καταλυτικός μηχανισμός εμφάνισης «εκρηκτική» συμπεριφοράς σε τοπογραφία κλειστού φαραγγιού. Ειδικότερα, η επαφή των φλογών και των δύο πλευρικών τοιχωμάτων καθιστά τη συναγωγή ως τον κύριο μηχανισμό προθέρμανσης του καυσίμου ενώ προκαλεί απότομη αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς. Υπό χαμηλές κλίσεις αναδίπλωσης της κλίσης (κάτω από 20°) δεν παρατηρείται επαφή των πλευρικών μετώπων και ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς παραμένει σταθερός.

Τέλος, σε πρόσφατη εργαστηριακή μελέτη, αμελώντας την επίδραση του ανέμου και της κλίσης, οι Campbell-Lochrie et al. (2020) υποστήριξαν ότι ο ρυθμός εξάπλωσης και το ύψος της φωτιάς αυξάνονται με την ανεξάρτητη αύξηση του φορτίου του καυσίμου και τη μείωση της φαινομενικής πυκνότητας του καυσίμου (bulk density).

## 2.5.2 Μελέτες Μεγάλης Κλίμακας

Η αδυναμία των εργαστηριακών ελέγχων να τοποθετήσουν το φαινόμενο της πυρκαγιάς στο φυσικό του χώρο, όπου οι συνιστώσες του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι αστάθμητες και δύσκολα ελεγχόμενες, οδήγησε τη διεξαγωγή προδιαγεγραμμένων



πειραμάτων σε δασικές εκτάσεις (Σχήμα 2.9) ή μελέτη μη προδιαγεγραμμένων πυρκαγιών. Το δυσκολότερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στα πειράματα μεγάλης κλίμακας είναι ο έλεγχος των μεταβλητών που επιδρούν στη συμπεριφορά της φωτιάς καθώς και η δυσκολία τοποθέτησης μετρητικών οργάνων προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν τα χαρακτηριστικά της.



**Σχήμα 2.9** Στιγμιότυπο από πειράματα προδιαγεγραμμένων δασικών πυρκαγιών στην Πορτογαλία το 2013.

Η πρώτη γνωστή έρευνα μεγάλης κλίμακας πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών δημοσιεύτηκε από τον Show (1919), ο οποίος παρατήρησε τη συμπεριφορά της φωτιάς σε συστάδες πεύκης στη Βόρεια Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Οι Hawley (1926) και Gisborne (1929) θεωρούνται οι πρωτοπόροι του ερευνητικού πεδίου στην περιγραφή εξάπλωσης της φωτιάς και πρότειναν ότι η φωτιά μπορεί να προσομοιωθεί από την συσχέτιση της συμπεριφοράς της μέσω της παρατήρησης με τους παράγοντες που επιδρούν στα αποτελέσματα της.

Ο Byram (1959) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας που εκτέλεσε με καύσιμο υπολείμματα πεύκου όρισε το θεμελιώδες μέγεθος της έντασης της φωτιάς, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από την πλειονότητα της επιστημονικής κοινότητας στις μελέτες των δασικών πυρκαγιών.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960 ο McArthur εκτέλεσε πάνω από 800 πειράματα στα δάση ευκαλύπτου της δυτικής Αυστραλίας (McArthur 1958, 1962, 1967). Με τα δεδομένα που συνέλλεξε δημιούργησε μοντέλα πρόβλεψης της φωτιάς καθώς και μέτρα προστασίας. Το McArthur's Mark V fire danger meters (McArthur 1973) αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά και χρησιμοποιημένα μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς φωτιάς που εμπεριέχει την επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου και τροποποιήθηκε στη συνέχεια προκειμένου να συμπεριλάβει την κλίση και την ποιότητα του καυσίμου στην συμπεριφορά της φωτιάς.

Οι Tarifa & Torraldo (1967) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας κατέδειξαν την προθέρμανση του καυσίμου ως τον πλέον βασικό μηχανισμό διάδοσης της φλόγας.



Ο Peet (1972) εκτέλεσε πειράματα στα δάση ευκαλύπτου της Δυτικής Αυστραλίας προκειμένου να ιεραρχήσει την επικινδυνότητα της φωτιάς καθώς και να δώσει συγκεκριμένες κατευθύνσεις για την αντιμετώπιση της. Επίσης, συμπέρανε ότι η ταχύτητα του αέρα είναι η πιο σημαντική μεταβλητή στην εξάπλωση της φωτιάς.

Οι Sneeuwjagt & Frandhsen (1977) εκτέλεσαν 40 προδιαγεγραμμένες πυρκαγιές στα δάση της κεντρικής Ουάσιγκτον και της βόρειας Καλιφόρνια προκειμένου να αξιολογήσουν το μοντέλο εξάπλωσης της φωτιάς του Rothermel (1972). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήρθαν σε συμφωνία για τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς σε αντίθεση με την απόκλιση που είχαν οι παρατηρούμενες τιμές του μήκους της φωτιάς και του βάθους της ενεργής περιοχής καύσης με τις προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου. Η απόκλιση των παραπάνω μεγεθών οφείλεται σύμφωνα με τους μελετητές στις μη ακριβείς μετρήσεις του μήκους της φλόγας και του βάθους της ενεργής περιοχής καύσης.

Οι Cheney et al. (1993) σε μια εκτεταμένη έρευνα των χαρακτηριστικών του καυσίμου σε ομοιογενή λιβάδια παρατήρησαν ότι η διάδοση της φωτιάς έχει μικρή εξάρτηση από το φορτίο του καυσίμου καθώς και από το λόγο επιφάνειας προς όγκο του καυσίμου (surface to volume ratio). Επίσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για τη μελέτη της διάδοσης της φωτιάς σε πεδίο με γρασίδι και χαμηλή βλάστηση, το καύσιμο πρέπει να κατηγοριοποιηθεί σε α) φυσικά και άθικτα λιβάδια και β) λιβάδια τα οποία έχουν κουρευτεί. Επίσης, οι Cheney et al. (1998) εκτέλεσαν πειράματα μεγάλης κλίμακας προκειμένου να αξιολογήσουν το μοντέλο εξάπλωσης της φωτιάς που είχαν εκτιμήσει. Παρατήρησαν ότι το μοντέλο τους υπερεκτιμά τη διάδοση της φωτιάς σε λιβάδια με μεσαίες και υψηλές ταχύτητες ανέμου. Επίσης, κατά την εξάπλωση της στο πεδίο η φωτιά βρίσκει διάφορα εμπόδια (όπως δρόμους, λωρίδες νερού ποταμών ή ρυακιών) τα οποία καθυστερούν την εξάπλωση της φωτιάς ειδικότερα και αν πνέουν ασθενείς άνεμοι.

Ο Burrows (1999) σε πειράματα που εκτέλεσε σε δάση ευκαλύπτου της δυτικής Αυστραλίας προσπάθησε να προβλέψει το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς κάτω από διαφορετικές συνθήκες ανέμου και περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου. Το μοντέλο υποεκτίμησε τις πειραματικές παρατηρήσεις του ρυθμού εξάπλωσης και τόνισε τη σημαντικότητα του μεγέθους της κλίμακας των πειραμάτων. Ειδικότερα, οι έρευνες μικρής κλίμακας είναι σχετικά ανακριβείς για την διατύπωση εμπειρικών σχέσεων για τη διάδοση της φωτιάς, αν και είναι σημαντικό εργαλείο για κατανόηση της συμπεριφοράς της.

Οι Viegas et al. (1998) και Fernandez et al. (2009) εκτέλεσαν πειράματα μεγάλης κλίμακας και ανέπτυξαν εμπειρικά μοντέλα που συσχετίζουν την κλίση του εδάφους με τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί η συνεχής και αδιάκοπη μελέτη του πολύπλοκου φαινομένου της πυρκαγιάς. Η επιστημονική κοινότητα προτρέπει συνεχώς την εκτέλεση πειραμάτων μικρής και μεγάλης κλίμακας υπό διαφορετικές συνθήκες προκειμένου να ερμηνευτούν πιο αξιόπιστα τα χαρακτηριστικά και οι παράγοντες επίδρασης του φαινομένου. Η εξέλιξη που έχει συντελεστεί τα τελευταία 50 χρόνια, με την ανάπτυξη των τεχνικών μέσων και των μετρητικών οργάνων, στον τομέα μελέτης των πυρκαγιών είναι αξιοσημείωτη, ωστόσο δεν υπάρχει κανένα απόλυτο μοντέλο που να υπολογίζει με ακρίβεια τις μετρήσεις μεγεθών και επομένως δεν πρέπει να υπάρξει εφησυχασμός.

## 2.6 Σχέσεις Προσδιορισμού Γεωμετρικών Μεγεθών

Η γνώση της γεωμετρίας της φλόγας στις μη ελεγχόμενες δασικές πυρκαγιές είναι πολύ σημαντική για ποικίλες εφαρμογές της συμπεριφοράς της φωτιάς και των αποτελεσμάτων της. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος της φλόγας έχει χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό μέγεθος της έντασης της φωτιάς καταδεικνύοντας την δυσκολία καταστολής της (Alexander 1982). Επιπλέον, το ύψος της φλόγας είναι σημαντικό στον καθορισμό της έναυσης της πυρκαγιάς κόμης (Van Wagner 1977, Alexander 1998, Cruz et al. 2006). Επιπλέον, το ύψος και η γωνία της φλόγας είναι απαραίτητα για τον καθορισμό του ποσού της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τη φλόγα (Albini 1985, 1986). Δεδομένα από πειράματα μικρής και μεγάλης κλίμακας έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της γεωμετρίας της φωτιάς.

### 2.6.1 Σχέσεις Μήκους Φλόγας

Αρχικά, ο Byram (1959) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας, καίγοντας υπολείμματα πεύκου με υπόστρωμα γρασιδιού, διατύπωσε την θεμελιώδη σύνδεση του μήκους της φλόγας με την ένταση της φωτιάς στην Εξίσωση (2.9).

$$L = 0.0775 \cdot I^{0.46} \quad (2.9)$$

Η Εξίσωση (2.9) δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για επίπεδες και θαμνώδεις επιφανειακές πυρκαγιές κεφαλής με τη βοήθεια του ανέμου και σχετικά μικρές εντάσεις φλόγας.

Οι Fons et al. (1963) σε πειράματα μικρής κλίμακας σε υπολείμματα υλοτομίας διατύπωσαν την Εξίσωση (2.10).

$$L = 0.127 \cdot I^{2/3} \quad (2.10)$$

Ο Thomas (1963), χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη υπολείμματα υλοτομίας, διατύπωσε κάτω υπό εργαστηριακές συνθήκες την Εξίσωση (2.11) που συνδέει το μήκος φλόγας με την ένταση της φωτιάς.

$$L = 0.0266 \cdot I^{2/3} \quad (2.11)$$

Η Εξίσωση (2.11) παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για πυρκαγιές που εξαπλώνονται χωρίς τη βοήθεια του ανέμου και σε επίπεδες περιοχές. Ωστόσο, υπερεκτιμά το μήκος της φλόγας σε περιπτώσεις πυρκαγιών υψηλής έντασης (Catchpole et al. 1998) εξαιτίας του μεγάλου της εκθέτη (Anderson et al. 2006).

Οι Anderson et al. (1966) σε πειράματα με δασικό καύσιμο υπολείμματα πεύκου πρότειναν την Εξίσωση (2.12).

$$L = 0.07446 \cdot I^{0.65} \quad (2.12)$$

Ο Newman (1974) πρότεινε έναν εμπειρικό κανόνα (Εξίσωση 2.13), ο οποίος προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα για χρήση σε μεγάλη κλίμακα.

$$L = 0.0577 \cdot I^{0.5} \quad (2.13)$$

Ο Nelson (1980) διατύπωσε την Εξίσωση (2.14) για το μήκος της φλόγας σε πειράματα μεγάλης κλίμακας που εκτέλεσε στα νότια δάση των Η.Π.Α.

$$L = 0.0377 \cdot I^{0.5} \quad (2.14)$$

Οι Nelson & Adkins (1986), χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη θάμνους και υπολείμματα δέντρων σε πειράματα μικρής και μεγάλης κλίμακας, διατύπωσαν την Εξίσωση (2.15) που συνδέει το μήκος με την ένταση της φλόγας.

$$L = 0.0475 \cdot I^{0.493} \quad (2.15)$$

Η Εξίσωση (2.15) παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για πυρκαγιές κεφαλής που εξαπλώνονται με τη βοήθεια του ανέμου, αλλά σύμφωνα με τους Anderson et al. (2006) μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις πυρκαγιών που διαδίδονται σε επίπεδες περιοχές με ξηροφυλλοτάπητα.

Ο Van Wilgen (1986) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας από θαμνώνες αείφυλλων πλατύφυλλων διατύπωσε την Εξίσωση (2.16).

$$L = 0.0462 \cdot I^{0.513} \quad (2.16)$$

Ο Burrows (1994) σε πειράματα που διεξήγε σε δάση ευκαλύπτων διατύπωσε την Εξίσωση (2.17).

$$L = 0.0147 \cdot I^{0.767} \quad (2.17)$$

Η Εξίσωση (2.17) είναι κατάλληλη όταν τα όρια έντασης κυμαίνονται από 50 έως 4500 kW/m.

Οι Weise & Biging (1996) σε εργαστηριακά πειράματα σε αεροσήραγγα με καύσιμο ροκανίδια κατέληξαν στην Εξίσωση (2.18).

$$L = 0.016 \cdot I^{0.70} \quad (2.18)$$

Οι Vega et al. (1998) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας από θαμνώδη βλάστηση διατύπωσαν την Εξίσωση (2.19).

$$L = 0.0872 \cdot I^{0.492} \quad (2.19)$$

Οι Catchpole et al. (1998) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας από θαμνώδεις βλάστηση διατύπωσαν την Εξίσωση (2.20).

$$L = 0.0327 \cdot I^{0.558} \quad (2.20)$$

Οι Fernandez et al. (2000) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας σε θαμνώδεις περιοχές διατύπωσαν την Εξίσωση (2.21).

$$L = 0.05176 \cdot I^{0.452} \quad (2.21)$$

Τέλος, οι Fernandez et al. (2009) σε πειράματα μεγάλης κλίμακας που εκτέλεσαν σε καύσιμα από παραθαλάσσια δάση πεύκου διατύπωσαν την Εξίσωση (2.22).

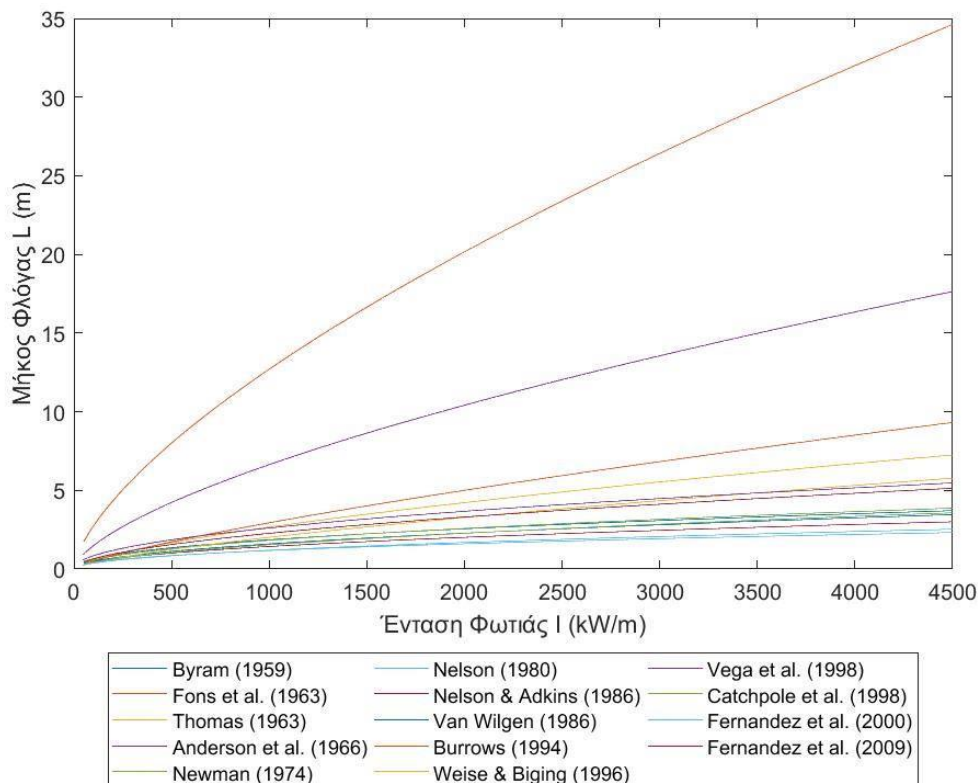
$$L = 0.0533 \cdot I^{0.543} \quad (2.22)$$

Στον Πίνακα (2.3) παρουσιάζονται συγκεντρωμένες όλες οι εξισώσεις μήκους – έντασης φωτιάς.

**Πίνακας 2.3** Συγκεντρωτικός κατάλογος εξισώσεων Μήκους φλόγας-Έντασης.

Αναφορά	Τύπος Καυσίμου	Εξίσωση	Κλίμακα Πειράματος
<b>Byram (1959)</b>	Υπολείμματα πεύκου με υπόστρωμα γρασιδιού	$L = 0.0775 \cdot I^{0.46}$	Μεγάλη
<b>Fons et al. (1963)</b>	Υπολείμματα υλοτομίας	$L = 0.127 \cdot I^{2/3}$	Μικρή
<b>Thomas (1963)</b>	Υπολείμματα υλοτομίας	$L = 0.0266 \cdot I^{2/3}$	Μικρή
<b>Anderson et al. (1966)</b>	Υπολείμματα πεύκου	$L = 0.07446 \cdot I^{0.65}$	Μικρή
<b>Newman (1974)</b>	Απροσδιόριστο	$L = 0.0577 \cdot I^{0.5}$	Εμπειρικός Κανόνας
<b>Nelson (1980)</b>	Νότια Δάση Η.Π.Α	$L = 0.0377 \cdot I^{0.5}$	Μεγάλη
<b>Nelson &amp; Adkins (1986)</b>	Θάμνοι και υπολείμματα δέντρων	$L = 0.0475 \cdot I^{0.493}$	Μικρή
<b>Van Wilgen (1986)</b>	Θαμνώδεις αείφυλλων πλατύφυλλων	$L = 0.0462 \cdot I^{0.513}$	Μεγάλη
<b>Burrows (1994)</b>	Δάση ευκαλύπτου	$L = 0.0147 \cdot I^{0.767}$	Μεγάλη
<b>Weise &amp; Biging (1996)</b>	Ροκανίδια	$L = 0.016 \cdot I^{0.70}$	Μικρή
<b>Vega et al. (1998)</b>	Θάμνοι	$L = 0.0872 \cdot I^{0.492}$	Μεγάλη
<b>Catchpole et al. (1998)</b>	Θάμνοι	$L = 0.0327 \cdot I^{0.558}$	Μεγάλη
<b>Fernandez et al. (2000)</b>	Θάμνοι	$L = 0.05176 \cdot I^{0.452}$	Μεγάλη
<b>Fernandez et al. (2009)</b>	Παραθαλάσσια δάση πεύκου	$L = 0.0533 \cdot I^{0.543}$	Μεγάλη

Στο Σχήμα (2.10) αναπαριστώνται οι καμπύλες εκθετικής μορφής που προκύπτουν για το μήκος της φλόγας από τις εξισώσεις της Ενότητας (2.6.1). Σύμφωνα με το διάγραμμα, οι εξισώσεις των Fons et al. (1963) και Anderson et al. (1966) παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες εξισώσεις για όλο το εύρος τιμών της έντασης. Αυτό οφείλεται κυρίως στον συνδυασμό του υψηλού συντελεστή και εκθέτη της έντασης που παρουσιάζουν οι δύο αυτές εξισώσεις και υπολογίζουν αρκετά αυξημένες τιμές του μήκους της φλόγας. Όσον αφορά τις υπόλοιπες εξισώσεις, παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις για εντάσεις φωτιάς έως και 500 kW/m. Έπειτα, για υψηλότερες εντάσεις φλόγας οι αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών αυξάνονται συνεχώς (της τάξης των λίγων μέτρων).



**Σχήμα 2.10** Διάγραμμα Έντασης - Μήκους φλόγας της μορφής  $L = a \cdot I^b$  των χαρακτηριστικών εξισώσεων της Ενότητας 2.6.1 για εύρος της έντασης από 50 kW/m έως 4500 kW/m.

### 2.6.2 Σχέσεις Γωνίας Κλίσης της Φλόγας

Αρχικά, ο Taylor (1961) υποστήριξε ότι η γωνία κλίσης της φλόγας είναι ανάλογη της τιμής  $(U^3/I)^{0.5}$ , όπως φαίνεται στην Εξίσωση (2.23), όπου  $\alpha$  ( $\text{m}^2/\text{kJ}^{0.5}\cdot\text{s}$ ) συντελεστής αναλογίας.

$$\tan A_T = \alpha \cdot \left( \frac{U^3}{I} \right)^{0.5} \quad (2.23)$$

Στη συνέχεια, ο Putnam (1965) ανέπτυξε ένα θεωρητικό μοντέλο (Εξίσωση 2.24) για την κλίση της φλόγας που βασίστηκε σε δεδομένα από εργαστηριακά πειράματα με καύσιμο το

φυσικό αέριο, όπου  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η Εξίσωση (2.24) υποθέτει οριζόντια ροή ανέμου και μηδενική κλίση.

$$\tan A_T = 1.4 \cdot \left( \frac{U^2}{g \cdot L} \right)^{0.5} \quad (2.24)$$

Επίσης, οι Anderson & Rothermel (1966) ανέπτυξαν μια σχέση (Εξίσωση 2.25) που δείχνει ότι η γωνία κλίσης της φλόγας είναι προϊόν της ταχύτητας του ανέμου και της ενέργειας της φωτιάς, όπου  $J$  ( $\text{kJ/kcal}$ ) το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας με τιμή 4.186 και  $q$  ( $\text{kg/m}^2$ ) η δυναμική πίεση της ροής του αέρα που δίνεται στην Εξίσωση (2.26), όπου :  $\rho_a$  ( $\text{kg/m}^3$ ) η πυκνότητα του αέρα.

$$\tan A_T = 6.9 \cdot \left( \frac{q \cdot U}{I_R \cdot J} \right)^{0.18} \quad (2.25)$$

$$q = \frac{\rho_a \cdot U^2}{2 \cdot g} \quad (2.26)$$

Ο Albini (1981) προέβλεψε από το μοντέλο εξισώσεων του, βασισμένο στην αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας, την Εξίσωση (2.27) για την γωνία κλίσης της φλόγας.

$$\tan A_T = 1.22 \cdot \left( \frac{U^2}{g \cdot h_F} \right)^{0.5} \quad (2.27)$$

Σύμφωνα τους Anderson et al. (2006), η Εξίσωση (2.27) του Albini (1981) είναι αξιόπιστη για την περιγραφή της κλίσης της φλόγας σε συνθήκες οριζόντιου ανέμου και χωρίς κλίση. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα της είναι η απαίτηση γνώσης του ύψους της φλόγας εκ των προτέρων. Ο όρος  $U^2/g \cdot h_F$  είναι ο αδιάστατος αριθμός Froude που συνδέει την αδρανειακή επίδραση του ανέμου με την βαρυτική επίδραση στη φλόγα.

Επίσης, οι Nelson & Adkins (1986) σε εργαστηριακά πειράματα σε αεροσήραγγα με κλίση καυσίμου από υπολείμματα πεύκου διατύπωσαν την Εξίσωση (2.28).

$$\tan A_T = 0.89 \cdot \left( \frac{U^2}{g \cdot h_F} \right)^{0.29} \quad (2.28)$$

Οι Marcelli et al. (2011) διατύπωσαν ένα απλοποιημένο φυσικό μοντέλο (Εξίσωση 2.29) που παρέχει τον υπολογισμό της κλίσης της φλόγας, όπου  $S$  (**degrees**) κλίση της κλίνης του καυσίμου,  $u_0$  ( $\text{m/s}$ ) η κατακόρυφη ταχύτητα των καυσαερίων σε επίπεδη κλίση που υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.30), όπου  $w_0$  ( $\text{kg/m}^2$ ) το φορτίο του καυσίμου στην κλίση που είναι διαθέσιμο για καύση,  $t_r$  (**sec**) χρόνος παραμονής της φλόγας,  $T$  (**K**) θερμοκρασία της φλόγας,  $T_a$  (**K**) θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $\rho_v$  ( $\text{kg/m}^3$ ) πυκνότητα καυσίμου,  $\rho_a$  ( $\text{kg/m}^3$ ) η πυκνότητα του αέρα,  $s_t$  στοιχειομετρική σταθερά με τιμή 9,  $\tau_0$  (**s/m**) σταθερά χρόνου παραμονής της φλόγας κατά Anderson με τιμή 75591.

$$\tan A_T = \tan S + \frac{U}{u_0} \quad (2.29)$$

$$u_0 = 8 \cdot \frac{s_t + 1}{\tau_0} \cdot \frac{\rho_v}{\rho_a} \cdot \frac{T}{T_a} \cdot \frac{w_0}{t_r} \quad (2.30)$$

Η Εξίσωση (2.30) εξετάστηκε πειραματικά σε εργαστηριακή κλίνη και τα αποτελέσματα των πειραμάτων έρχονται σε συμφωνία με τις προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου.

### 2.6.3 Σχέσεις Ύψους Φλόγας

Ο Albinì (1981) ανέπτυξε ένα μοντέλο διαφορικών εξισώσεων βασισμένο στην αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας σε μονοδιάστατη γραμμική εξάπλωση της φλόγας. Αυτές μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά και να υπολογίσουν την πρόβλεψη της τιμής του ύψους και της γωνίας της φωτιάς. Οι Nelson & Adkins (1986) παρείχαν μια προσέγγιση του μοντέλου του Albinì και διατύπωσαν την Εξίσωση (2.31) η οποία συνδέει το ύψος της φλόγας με την ένταση της φωτιάς.

$$h_F = \frac{1}{360} \cdot \frac{I}{U} \quad (2.31)$$

Η Εξίσωση (2.31) παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για καθοδηγούμενη από τον άνεμο εξάπλωση της φωτιάς (επίπεδη και υπό κλίση) μόνο εφόσον η σχέση διορθωθεί με την “δραστική” (effective) τιμή του ανέμου, όπως την όρισε ο Nelson (2002), δηλαδή την συνιστώσα του ανέμου που είναι παράλληλη με την κύρια γραμμή εξάπλωσης της φωτιάς (Anderson et al. 2006).

Από την Εξίσωση (2.27) του Albinì (1981) σχετικά με τον υπολογισμό της γωνίας κλίσης της φλόγας προκύπτει, με κατάλληλη αλλαγή μεταβλητών, η Εξίσωση (2.32) για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας.

$$h_F = \left( \frac{1.22}{\tan A_T} \right)^2 \cdot \frac{U^2}{g} \quad (2.32)$$

Από την Εξίσωση (2.28) του Nelson & Adkins (1986) σχετικά με τον υπολογισμό της γωνίας κλίσης της φλόγας προκύπτει, με κατάλληλη αλλαγή μεταβλητών, η εξίσωση (2.33) για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας.

$$h_F = \left( \frac{0.89}{\tan A_T} \right)^{3.45} \cdot \frac{U^2}{g} \quad (2.33)$$



### **3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

#### **3.1 Μήκος Φλόγας**

Με χρήση δεδομένων από 9 ξεχωριστές μελέτες διάφορων ερευνητών με 210 συνολικά πειράματα αξιολογήθηκε τόσο η επίδραση των διάφορων παραμέτρων (κλίση εδάφους, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) στη μεταβολή του μήκους της φλόγας όσο και η ακρίβεια των υπολογιζομένων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.1) σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Οι 9 πειραματικές μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των σχέσεων δημοσιοποιούν τις μετρούμενες τιμές της γεωμετρίας της φλόγας για τις εκάστοτε συνθήκες του πειράματος, καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά του δασικού καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε και της φλόγας που δημιουργήθηκε. Επίσης, το χρονικό πλαίσιο που διεξήχθησαν καλύπτει την περίοδο από το 1968, οπότε πραγματοποιήθηκε το χρονικά πιο παρελθοντικό πείραμα, έως το 2020, όπου πραγματοποιήθηκε το χρονικά πιο πρόσφατο πείραμα. Τα πειράματα αφορούν μελέτες που έγιναν τόσο σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας όσο και σε πειράματα μεγάλης κλίμακας. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι πειραματικές τιμές των ερευνών των Nelson & Adkins (1986) και Weise & Biging (1997) παραλήφθηκαν κατά την αξιολόγηση των αντίστοιχων εξισώσεων που ανέπτυξαν αυτές οι δύο επιστημονικές έρευνες.

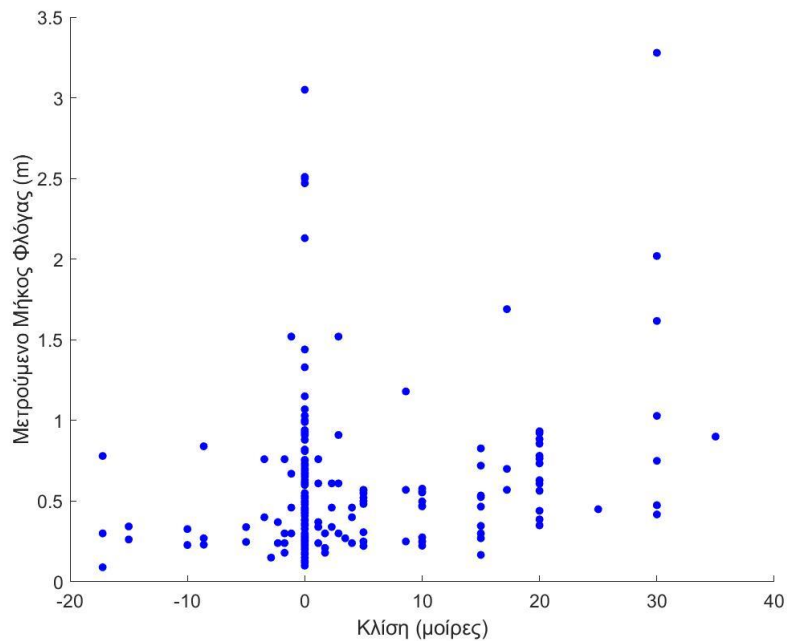
Οι 9 μελέτες με τα κύρια χαρακτηριστικά τους καταγράφονται στον Πίνακα (3.1).

**Πίνακας 3.1** Συγκεντρωτικός κατάλογος των βιβλιογραφικών μελετών που αποτέλεσαν πηγή αναφοράς για την αξιολόγηση των παραμέτρων και των σχέσεων για το μήκος της φλόγας.

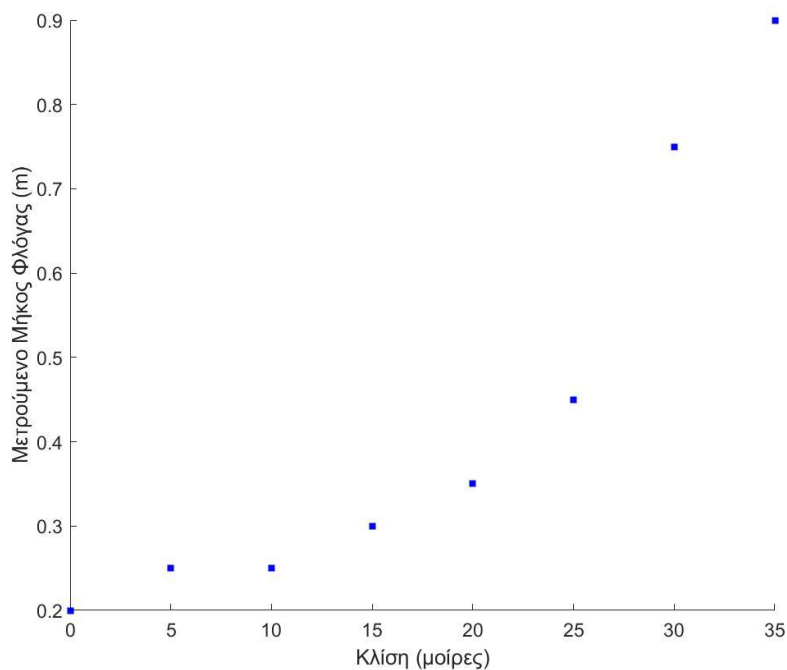
A/A	Αναφορά Μελέτης	Τύπος Καυσίμου	Κλίμακα Πειράματος	Παράμετροι υπό Μελέτη (εύρος)	Αριθμός Πειραμάτων
1	Van Wagner (1968)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Περιεχόμενη Υγρασία (1.7-26.2%)	22
		Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Κλίση εδάφους (0-35°)	8
		Δάσος Πεύκου	Μεγάλη	Ποσότητα Καυσίμου (0.58-1.5 kg/m <sup>2</sup> ), Περιεχόμενη υγρασία (4-17%), Ταχύτητα ανέμου (1-1.5 m/s)	4
2	Sneeuwjagt & Fradsen (1977)	Λιβάδι από γρασίδι	Μεγάλη	Περιεχόμενη υγρασία (12-60%), Ταχύτητα ανέμου (0.86-3.13 m/s), Ποσότητα καυσίμου (0.04– 0.47 kg/m <sup>2</sup> )	42
3	Nelson & Adkins (1986)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Περιεχόμενη υγρασία (11 έως 44%), Ταχύτητα ανέμου (0.57-2.19 m/s) Ποσότητα καυσίμου (0.49-1 kg/m <sup>2</sup> )	20
		Λιβάδι από χαμηλή βλάστηση	Μεγάλη	Περιεχόμενη υγρασία (18-60%), Ποσότητα καυσίμου (0.151-0.723 kg/m <sup>2</sup> )	12
4	Weise & Biging (1997)	Υπολείμματα σημύδας και λεύκας	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-17.22-17.22°) Ταχύτητα ανέμου (0-1.1 m/s)	15
5	Mendez-Lopez et al. (2003)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-15-15°), Περιεχόμενη υγρασία (10-18%) Ταχύτητα ανέμου(0-5 m/s)	40
6	Morandini et al. (2013)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Ποσότητα καυσίμου (0.6-1.2 kg/m <sup>2</sup> )	14
7	Tihay et al. (2014)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Κλίση εδάφους (0-20°), Ποσότητα Καυσίμου (0.6-1.2 kg/m <sup>2</sup> )	15
8	Morandini et al. (2017)	Υπολείμματα ελάτου	Μικρή	Κλίση εδάφους (0-30°), Ποσότητα καυσίμου (0.2-0.6 kg/m <sup>2</sup> )	10
9	Cambell-Lochrie et al. (2020)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Περιεχόμενη υγρασία (10.1-16.6%), Ποσότητα καυσίμου (0.2-1.2 kg/m <sup>2</sup> )	8
Συνολικός αριθμός πειραμάτων =					210

### 3.1.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων

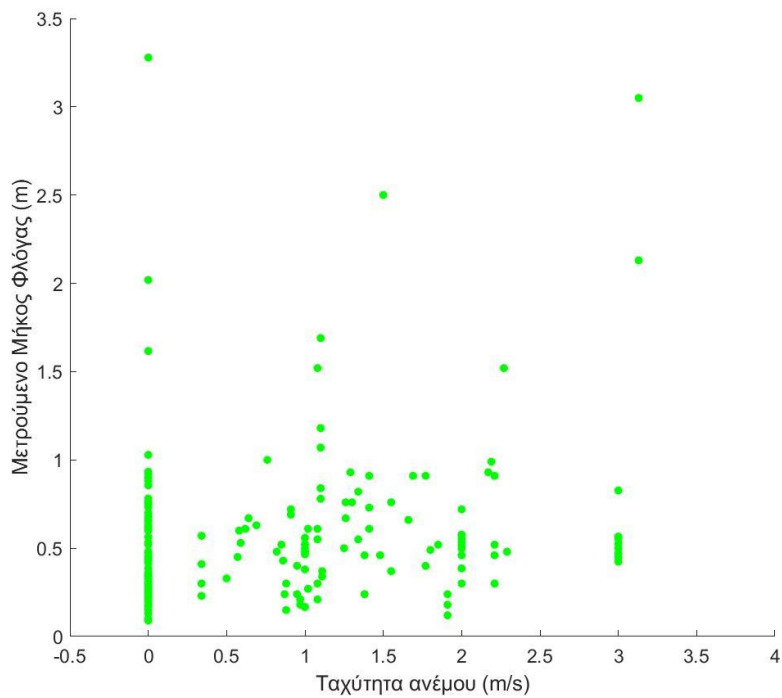
Με βάση τις παραπάνω 9 πειραματικές μελέτες σχεδιάστηκαν διαγράμματα προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής διάφορων παραγόντων στο μήκος της φλόγας. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε παράγοντα επίδρασης σχεδιάστηκαν 2 διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται το σύνολο των πειραματικών σημείων όπου οι υπόλοιπες παράμετροι επίδρασης μεταβάλλονται εξίσου με την εξεταζόμενη παράμετρο επίδρασης. Στο δεύτερο διάγραμμα καταγράφεται η μεταβολή της εξεταζόμενης μεταβλητής για σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες. Έτσι, η μεταβολή της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας του ανέμου, της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας του καυσίμου και οι αντίστοιχες επιπτώσεις στην τιμή του μήκους της φλόγας καταγράφηκαν στα Σχήματα (3.1) - (3.2), (3.3) - (3.4), (3.5) - (3.6) και (3.7) - (3.8), αντίστοιχα.



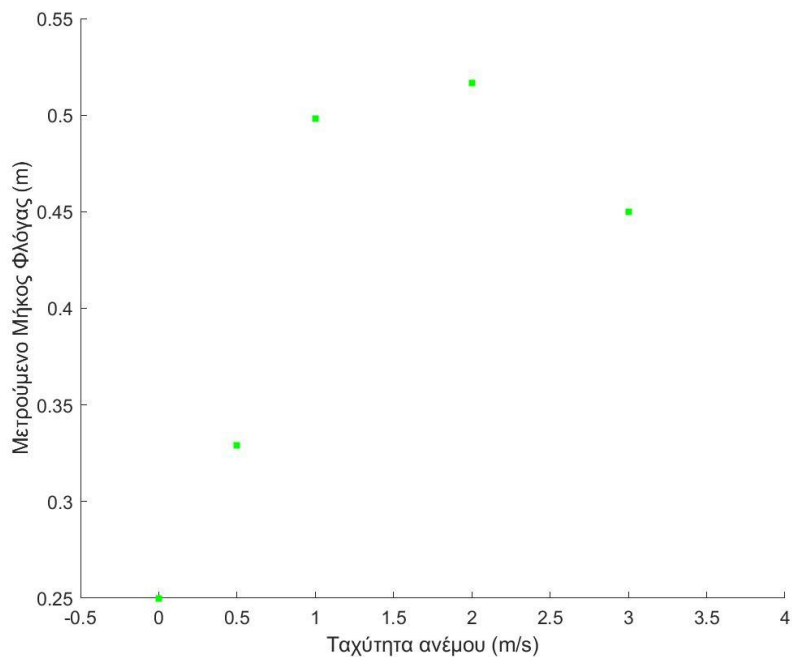
**Σχήμα 3.1** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της κλίσης του εδάφους. Οι υπόλοιπες παράμετροι (ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



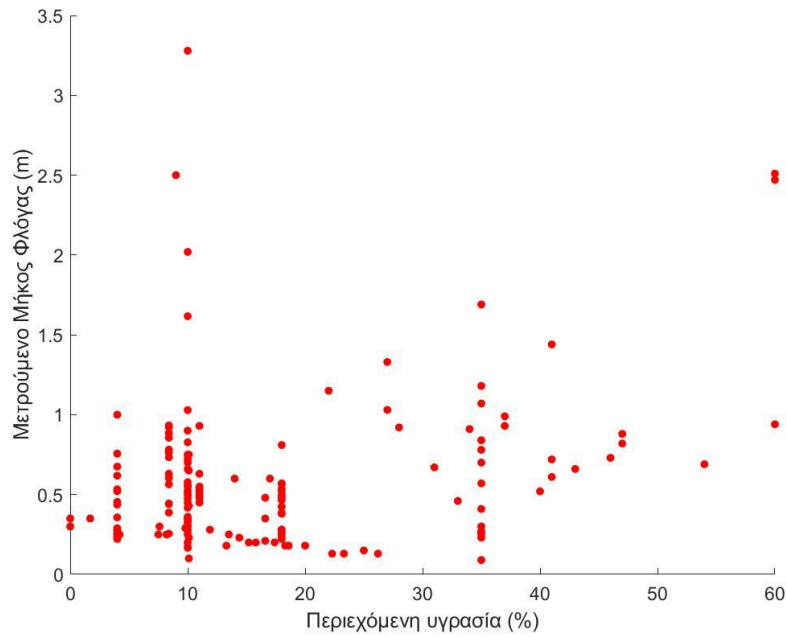
**Σχήμα 3.2** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας συναρτήσει της κλίσης του εδάφους για ταχύτητα ανέμου 0 m/s, περιεχόμενη υγρασία 10%, ποσότητα καυσίμου 0.6 kg/m<sup>2</sup>.



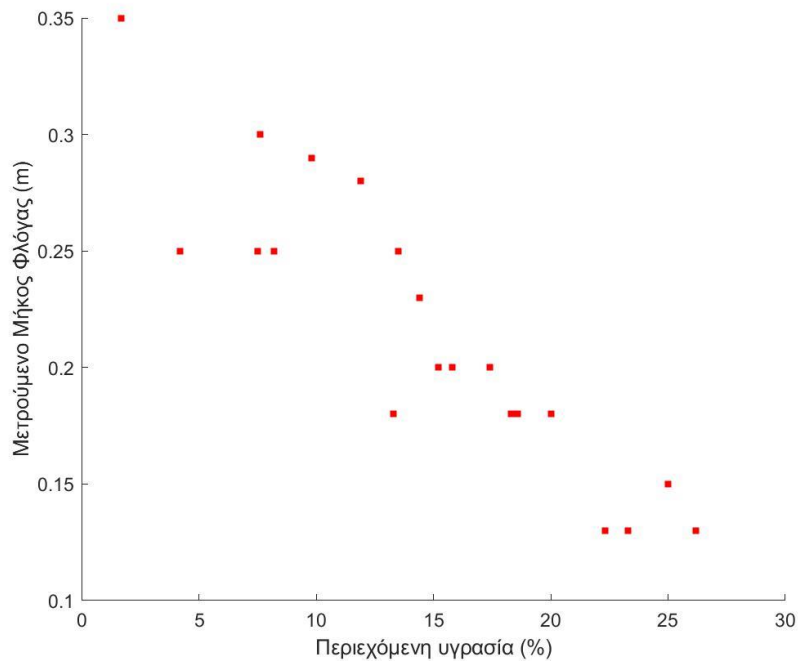
**Σχήμα 3.3** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



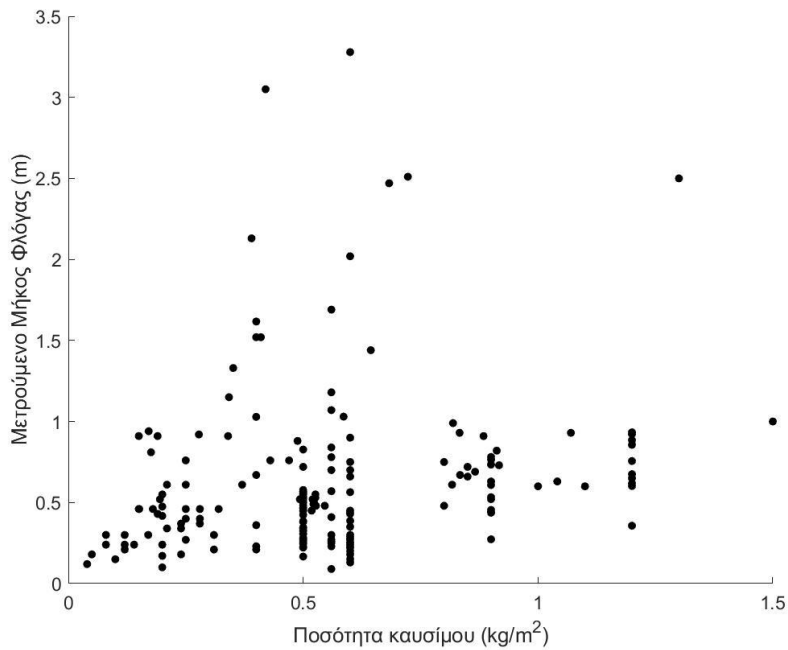
**Σχήμα 3.4** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου για κλίση  $0^\circ$ , περιεχόμενη υγρασία 10%, ποσότητα καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$ .



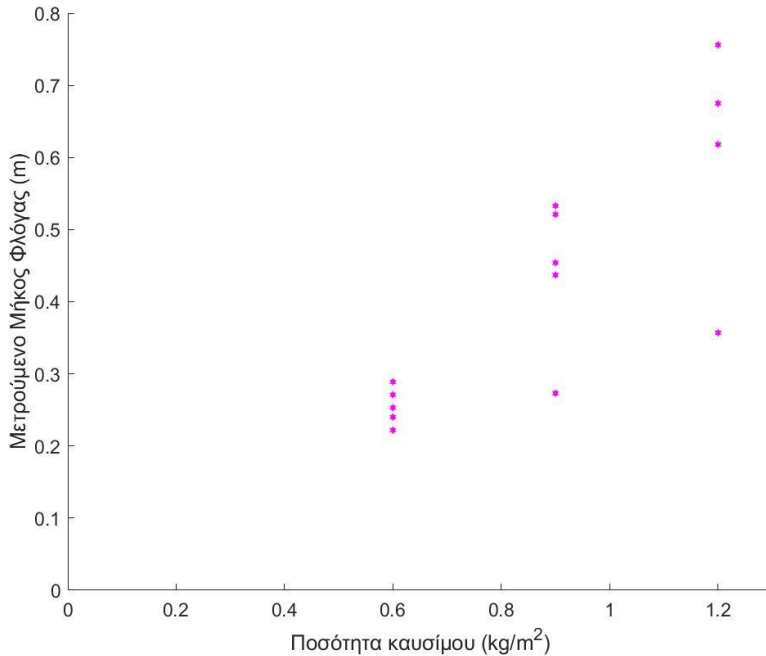
**Σχήμα 3.5** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, ταχύτητα ανέμου, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.6** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου για κλίση  $0^\circ$ , ταχύτητα ανέμου  $0 \text{ m/s}$ , ποσότητα καυσίμου  $0.6 \text{ kg/m}^2$ .



**Σχήμα 3.7** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ποσότητας του καυσίμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.8** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου μήκους φλόγας συναρτήσει της ποσότητας του καυσίμου για κλίση  $0^\circ$ , ταχύτητα ανέμου  $0 \text{ m/s}$ , περιεχόμενη υγρασία 4%.

Από τα εικονιζόμενα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Πρέπει να τονιστεί ότι για την σχεδίαση των διαγραμμάτων (3.1), (3.3), (3.5), (3.7) οι υπόλοιποι παράγοντες επίδρασης δεν παρέμεναν σταθεροί. Έτσι, δεν μπορεί

να υπάρξει ξεκάθαρο συμπέρασμα για τη μεταβολή της τιμής του μήκους της φλόγας από κάθε παράγοντα μεμονωμένα, εφόσον και οι υπόλοιποι παράγοντες μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Ωστόσο, από αυτά τα διαγράμματα καταγράφεται και αξιολογείται μια γενική τάση της μεταβολής του μήκους της φλόγας. Αντιθέτως, από τα διαγράμματα (3.2), (3.4), (3.6), (3.8) οι υπόλοιποι παράγοντες επίδρασης παραμένουν σταθεροί και μπορούν να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα για την ξεχωριστή επίδραση της κάθε παραμέτρου.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα (3.1) παρατηρείται αύξηση του μήκους της φλόγας με αύξηση της κλίσης του εδάφους, κάτι που αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Tihay et al. 2014), ενώ επιβεβαιώνεται επίσης και από το Σχήμα (3.2).

Στη συνέχεια, με βάση το Σχήμα (3.3) παρατηρείται αύξηση της τιμής του μήκους της φλόγας με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, κάτι που βρίσκεται σε αντιστοιχία με άλλες επιστημονικές μελέτες (Campbell-Lochrie et al. 2020) καθώς επιβεβαιώνεται επίσης και από το Σχήμα (3.4).

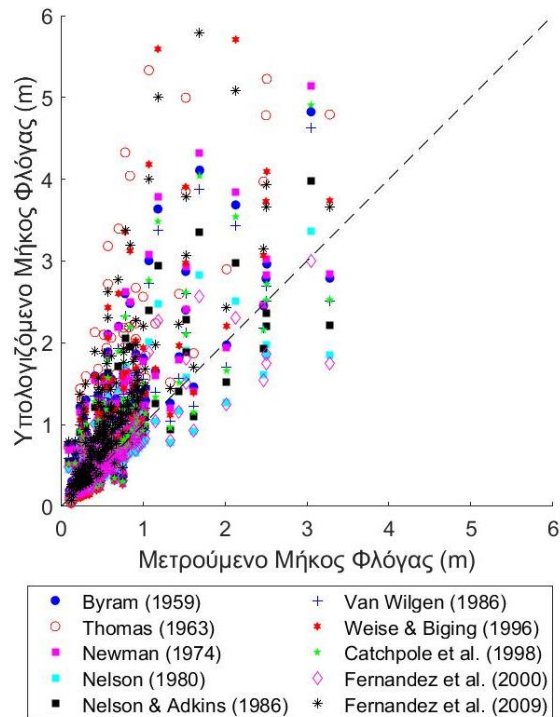
Επίσης, με βάση το Σχήμα (3.5) παρατηρείται μικρή συμβολή της υγρασίας για τιμές έως 35% στη μεταβολή του μήκους της φλόγας, ενώ περιεχόμενη υγρασία μεγαλύτερη της τιμής των 35% επιφέρει έντονη αύξηση της φλόγας της φωτιάς, κάτι που έρχεται σε αναντιστοιχία με τις επιστημονικές μελέτες (Van Wagner 1968), όπως επίσης και με το Σχήμα (3.6) που δείχνει μείωση του μήκους της φλόγας με αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας.

Τέλος, με βάση το Σχήμα (3.7) παρατηρείται αύξηση της τιμής του μήκους της φλόγας με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου, κάτι που βρίσκεται σε συμφωνία με επιστημονικές μελέτες (Foster 1976) καθώς και με το Σχήμα (3.8).

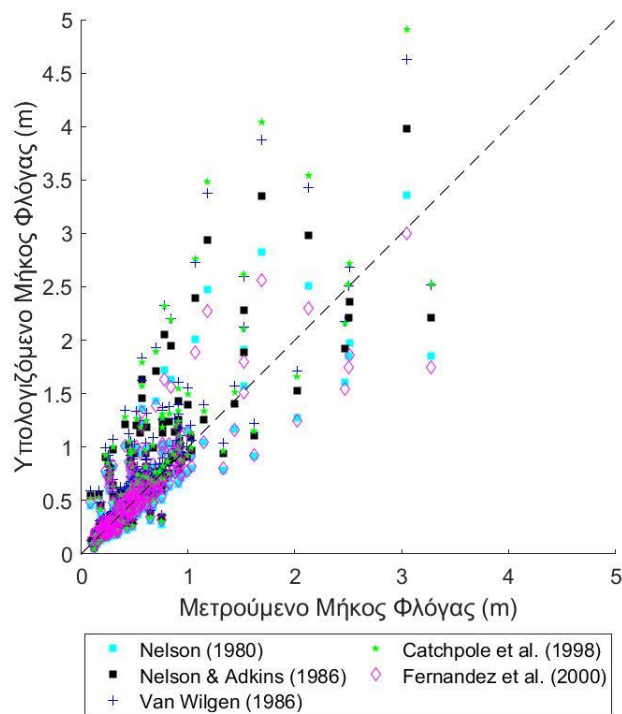
### *3.1.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων*

Η σύγκριση και η αξιολόγηση των υπολογιζόμενων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.1) με τις μετρούμενες τιμές του μήκους της φλόγας καταγράφονται στο συγκεντρωτικό και εποπτικό Σχήμα (3.9). Πιο συγκεκριμένα, η διχοτόμος ευθεία του διαγράμματος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι διακεκομμένη, υποδεικνύει πλήρη ταύτιση των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών. Αντιθέτως, σημεία που βρίσκονται πάνω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υπερεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του μήκους φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων, ενώ σημεία που βρίσκονται κάτω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υποεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του μήκους φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Στο Σχήμα (3.10) επιλέχθηκαν οι σχέσεις που εξάγουν τα πιο ακριβή αποτελέσματα, δηλαδή αυτές με το μικρότερο απόλυτο σφάλμα, προκειμένου να γίνει εποπτική επιθεώρηση και να εξαχθούν συμπεράσματα. Στο Σχήμα (3.11) επιλέχθηκαν οι σχέσεις με τα περισσότερο ανακριβή αποτελέσματα, δηλαδή αυτές με το μεγαλύτερο απόλυτο σφάλμα, προκειμένου να γίνει εποπτική εξέταση τους. Τέλος, στον Πίνακα (3.2) καταγράφονται τα απόλυτα σφάλμα όλων των εξισώσεων κατά τη σύγκριση τους με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων.

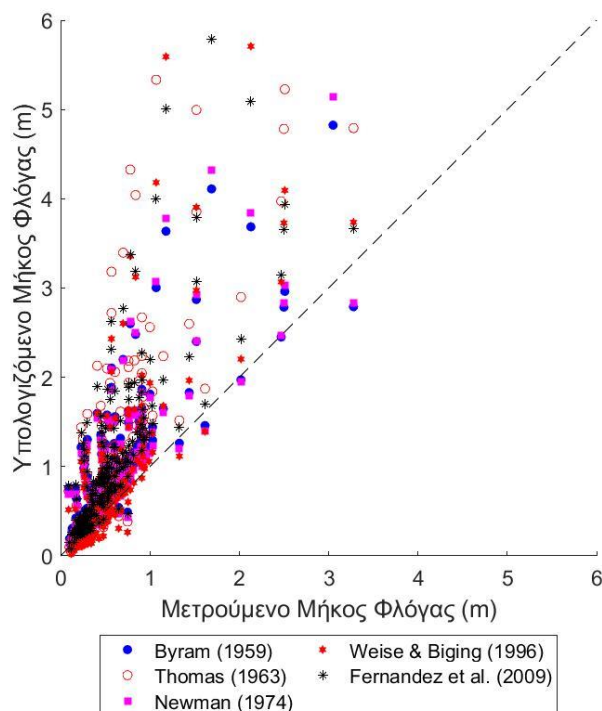




**Σχήμα 3.9** Διάγραμμα Μετρούμενου – Υπολογιζόμενου μήκους φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων.



**Σχήμα 3.10** Διάγραμμα Μετρούμενου – Υπολογιζόμενου μήκους φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων με βάση το μικρότερο απόλυτο σφάλμα.



**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα Μετρούμενου – Υπολογιζόμενου μήκους φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων με βάση το μεγαλύτερο απόλυτο σφάλμα.

**Πίνακας 3.2** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με το μετρούμενο μήκος της φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	37	Van Wilgen (1986)	27
Fons et al. (1963)	85	Burrows (1994)	43
Thomas (1963)	39	Weise & Biging (1996)	38
Anderson et al. (1966)	72	Vega et al. (1998)	51
Newman (1974)	32	Catchpole et al. (1998)	28
Nelson (1980)	29	Fernandez et al. (2000)	26
Nelson & Adkins (1986)	27	Fernandez et al. (2009)	39
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 42%			

Από τα σχετικά διαγράμματα και τον Πίνακα (3.2) μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά, για χαμηλές μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας, πιο συγκεκριμένα μέχρι του 1 m, παρατηρείται έντονη πληθώρα πειραματικών μετρήσεων, συνεπώς και τα σημεία των διαγραμμάτων είναι αρκετά πυκνά. Αντιθέτως, για μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας μεγαλύτερες του 1 m, τα σημεία των διαγραμμάτων

γίνονται πιο αραιά, κάτι που δηλώνει λιγότερο συχνή παρατήρηση αντίστοιχων πειραματικών τιμών.

Στη συνέχεια, παρατηρείται μια σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των υπολογιζόμενων και των μετρούμενων τιμών για μετρούμενα μήκη φλόγας μέχρι και 1 m από το σύνολο των εξισώσεων με μικρή τάση υπερεκτίμησης. Αντιθέτως, για μετρούμενα μήκη φλόγας μεγαλύτερα του 1 m, υπάρχει έντονη υπερεκτίμηση του υπολογιζόμενου μήκους φλόγας από την πλειονότητα των εξισώσεων.

Επίσης, η συστάδα των εξισώσεων του Σχήματος (3.10) περιέχει τα μικρότερα απόλυτα σφάλματα και αποτυπώνει μια σχετικά καλή προσέγγιση των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών του μήκους φλόγας. Αξίζει να σημειωθεί η ικανοποιητική προσέγγιση των υπολογιζόμενων τιμών για μετρούμενες τιμές μήκους φλόγας μέχρι και 1 m, καθώς και η σχετική ισορροπία υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των μετρούμενων τιμών για μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας μεγαλύτερες του 1 m.

Από την άλλη πλευρά, η συστάδα των εξισώσεων του Σχήματος (3.11) περιέχει τα μεγαλύτερα απόλυτα σφάλματα και αποτυπώνει μια υπερεκτιμημένη τάση των υπολογιζόμενων τιμών για όλα τα μετρούμενα μήκη φλόγας. Αυτή η υπερεκτιμημένη τάση οφείλεται, εν μέρει, στον μεγάλο εκθέτη που έχει η ένταση της φωτιάς στις συγκεκριμένες εξισώσεις.

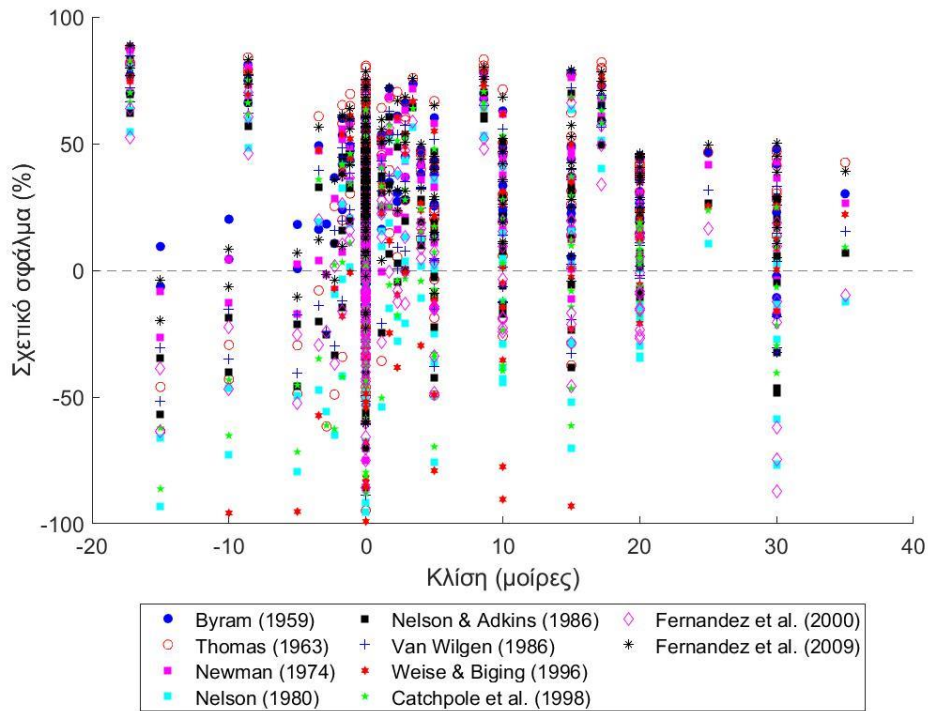
Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι, εκτός από την ακρίβεια ως προς τα φυσικά φαινόμενα, πρέπει να διασφαλιστεί και ο ασφαλής σχεδιασμός συστημάτων πυροπροστασίας με βάση τις πιο συντηρητικές προβλέψεις, δηλαδή τις υπολογιζόμενες τιμές που υπερεκτιμούν τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας. Αν και η ομάδα των εξισώσεων του Σχήματος (3.10) έχει καλή ακρίβεια ως προς τα φυσικά φαινόμενα, οι προβλέψεις της είναι μη συντηρητικές αρκετές φορές. Γι' αυτό το λόγο, η συστάδα των εξισώσεων του Σχήματος (3.11) παρέχει τις πιο συντηρητικές προβλέψεις και είναι προτιμότερή να επιλεγεί για εφαρμογές συστημάτων πυροπροστασίας.

### *3.1.3 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Κλίση του Εδάφους*

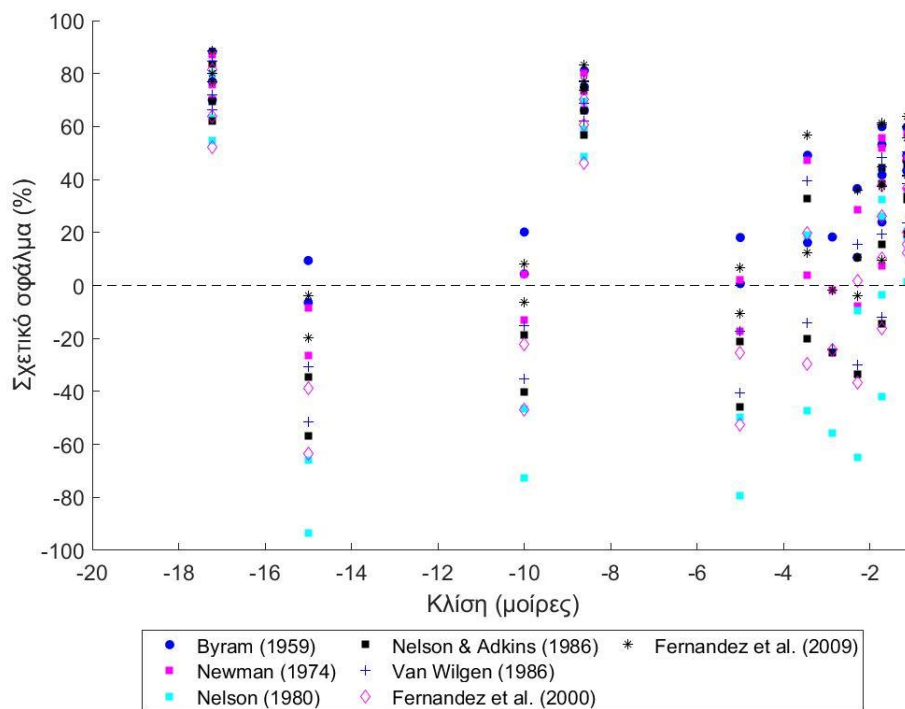
Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση της κλίσης του εδάφους στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (3.12) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλο το εύρος κλίσεων του εδάφους. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος ορίζει την ταύτιση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων με τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας των πειραμάτων. Σημεία με θετικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή, ενώ σημεία με αρνητικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υποεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή.

Έπειτα, η κλίση του εδάφους χωρίζεται και εξετάζεται σε τρεις κλάσεις. Η πρώτη κλάση περιλαμβάνει τις αρνητικές κλίσεις (Σχήμα 3.13), δηλαδή τις τιμές του μήκους φλόγας για εξάπλωση φωτιάς ανάντι της κεκλιμένης επιφάνειας. Η δεύτερη κλάση περιλαμβάνει τη μηδενική κλίση (Σχήμα 3.14), δηλαδή τις τιμές του μήκους φλόγας για εξάπλωση φωτιάς σε επίπεδη επιφάνεια. Η τρίτη κλάση περιλαμβάνει τις θετικές κλίσεις (Σχήμα 3.15), δηλαδή τις τιμές του μήκους φλόγας για εξάπλωση φωτιάς κατάντι της κεκλιμένης επιφάνειας. Να τονιστεί ότι για τη χάραξη των διαγραμμάτων επιλέχθηκαν οι εξισώσεις εκείνες που έδιναν

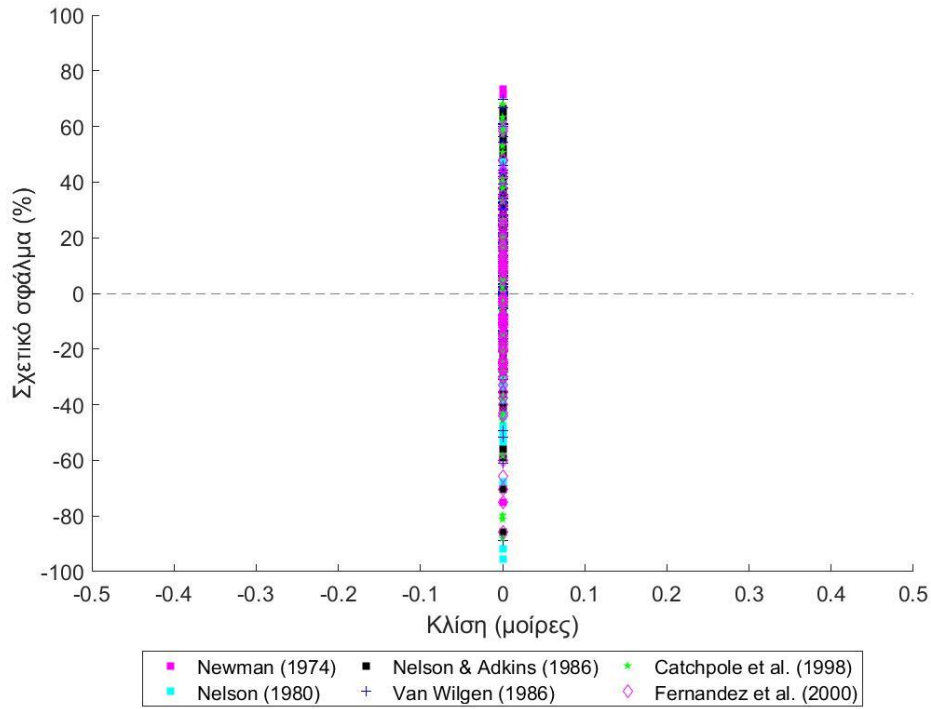
το μικρότερο απόλυτο σφάλμα για κάθε κλάση της κλίσης με βάση τους Πίνακες (3.3), (3.4), (3.5).



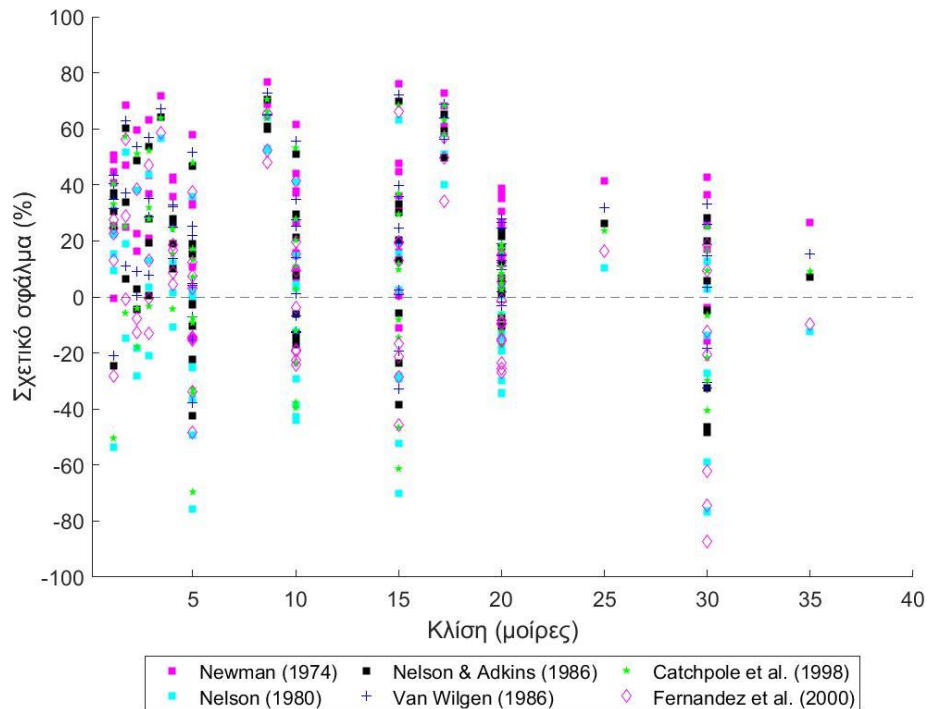
**Σχήμα 3.12** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την κλίση του εδάφους.



**Σχήμα 3.13** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την αρνητική κλίση του εδάφους.



**Σχήμα 3.14** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς τη μηδενική κλίση του εδάφους.



**Σχήμα 3.15** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς τη θετική κλίση του εδάφους.

**Πίνακας 3.3** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της αρνητικής γωνίας κλίσης του εδάφους στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	41	Van Wilgen (1986)	41
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	73
Thomas (1963)	54	Weise & Biging (1996)	77
Anderson et al. (1966)	70	Vega et al. (1998)	54
Newman (1974)	38	Catchpole et al. (1998)	50
Nelson (1980)	46	Fernandez et al. (2000)	36
Nelson & Adkins (1986)	40	Fernandez et al. (2009)	41
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 53%			

**Πίνακας 3.4** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της μηδενικής κλίσης του εδάφους στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	35	Van Wilgen (1986)	23
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	36
Thomas (1963)	34	Weise & Biging (1996)	34
Anderson et al. (1966)	71	Vega et al. (1998)	49
Newman (1974)	30	Catchpole et al. (1998)	23
Nelson (1980)	27	Fernandez et al. (2000)	23
Nelson & Adkins (1986)	24	Fernandez et al. (2009)	37
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 38%			

**Πίνακας 3.5** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της θετικής κλίσης του εδάφους στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	39	Van Wilgen (1986)	28
Fons et al. (1963)	87	Burrows (1994)	44
Thomas (1963)	42	Weise & Biging (1996)	35
Anderson et al. (1966)	75	Vega et al. (1998)	53
Newman (1974)	34	Catchpole et al. (1998)	27
Nelson (1980)	27	Fernandez et al. (2000)	24
Nelson & Adkins (1986)	25	Fernandez et al. (2009)	41
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 41%			

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τους πίνακες μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που διεξήχθησαν για εξάπλωση φωτιάς σε μηδενική κλίση, κάτι που υποδηλώνεται από την πυκνή διάταξη των σημείων στην περιοχή των μηδέν μοιρών. Αντίθετα, τα πειράματα που έγιναν για εξάπλωση φωτιάς σε θετική ή αρνητική κλίση εδάφους ήταν λιγότερα, κάτι που υποδηλώνεται από την αραιή διάταξη των σημείων εκατέρωθεν της μηδενικής κλίσης.

Όσον αφορά την αρνητική κλίση, οι υπολογιζόμενες τιμές παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις από τις μετρούμενες τιμές. Για μεγάλες γωνίες αρνητικής κλίσης παρατηρούνται πιο έντονες αποκλίσεις, ενώ όσο η αρνητική γωνία κλίσης ελαττώνεται, οι αποκλίσεις μικραίνουν χωρίς ωστόσο να αποδίδουν με ακρίβεια το φυσικό φαινόμενο. Οι έντονες αποκλίσεις συνηγορούν στο γεγονός ότι οι εξισώσεις δεν θεμελιώθηκαν για αρνητικές γωνίες κλίσης και είναι δύσκολο να προβλέψουν ικανοποιητικά το μήκος της φλόγας όταν υπόκεινται σε αυτή τη κατηγορία.

Όσον αφορά τη μηδενική κλίση, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν ακριβέστερα τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Όσον αφορά τη θετική κλίση, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Με την αύξηση της κλίσης παρατηρούνται πιο έντονες αποκλίσεις σε σχέση με τις μικρότερες θετικές κλίσεις. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

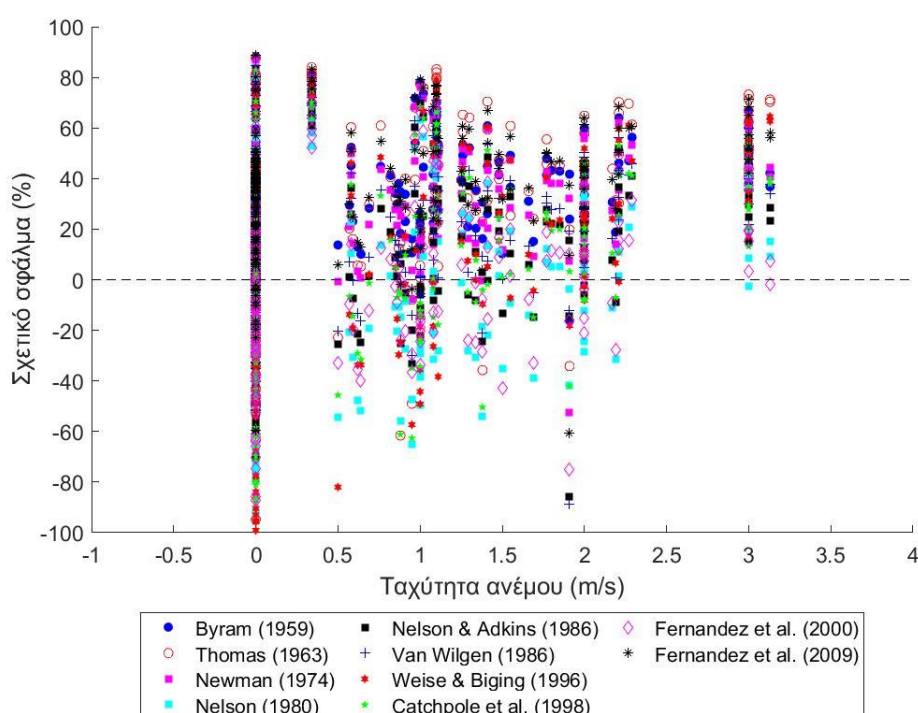
Συνοψίζοντας, η ομάδα των εξισώσεων με βάση την οποίαν χαράχθηκαν τα διαγράμματα κάθε κατηγορίας κλίσης είναι ικανή να αποδώσει με σχετική ακρίβεια το μήκος φλόγας για εξάπλωση φωτιάς σε επιφάνεια με μηδενική και θετική κλίση, ενώ είναι επισφαλές επιστημονικά να προβλεφθεί το μήκος της φλόγας για εξάπλωση φωτιάς σε επιφάνεια με αρνητική κλίση.



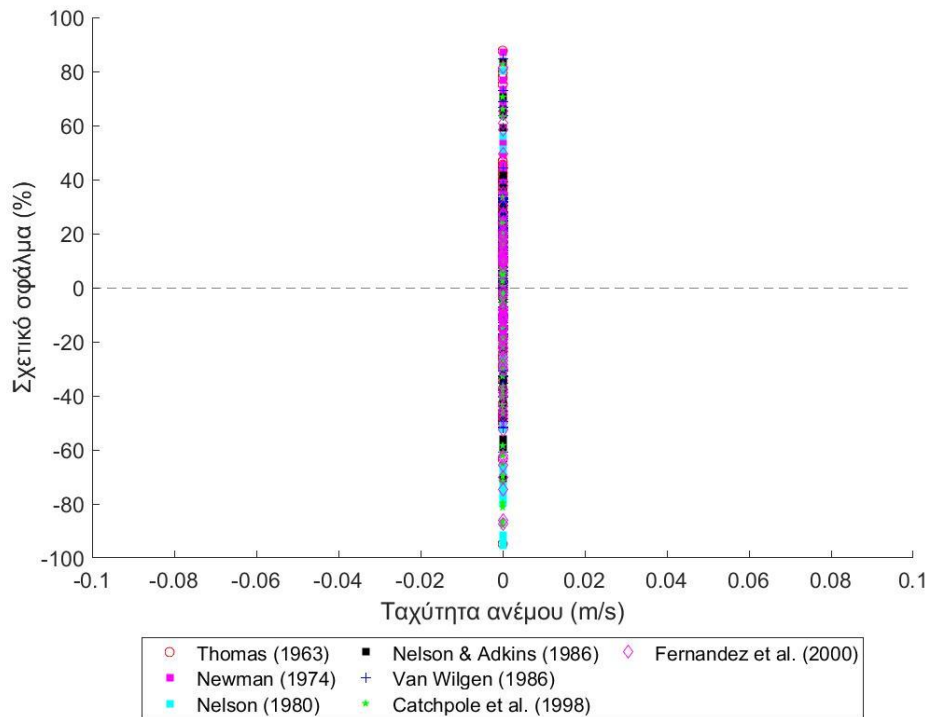
### 3.1.4 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Ταχύτητα του Ανέμου

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (3.16) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλο το εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος ορίζει την ταύτιση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων με τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας των πειραμάτων. Σημεία με θετικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή, ενώ σημεία με αρνητικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υποεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή.

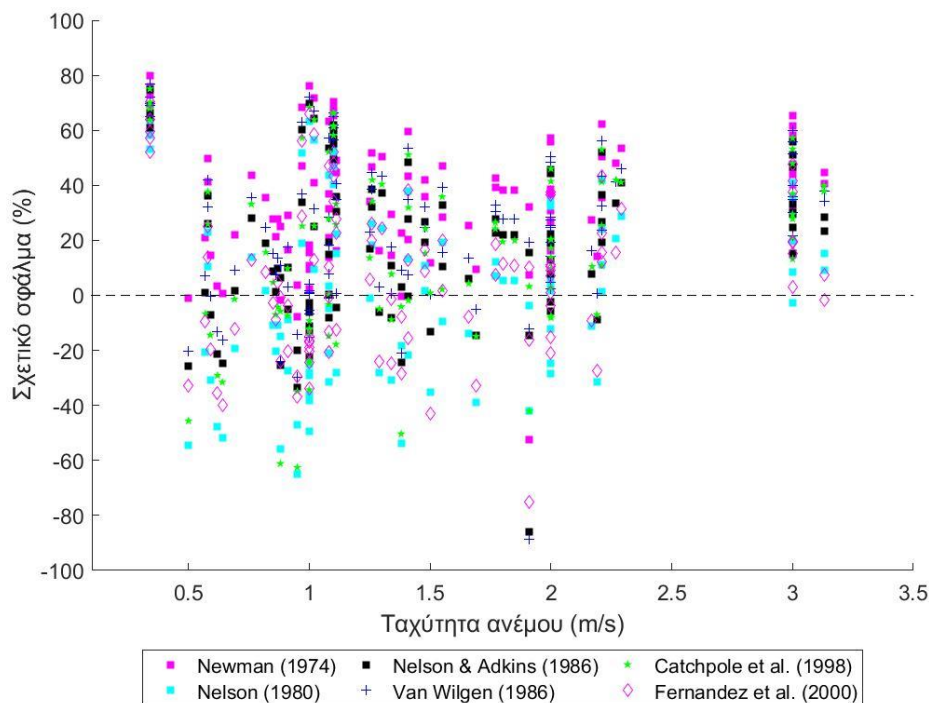
Έπειτα, η ταχύτητα του ανέμου χωρίζεται και εξετάζεται σε δύο κλάσεις. Η πρώτη κλάση περιλαμβάνει τη μηδενική ταχύτητα ανέμου (Σχήμα 3.17), δηλαδή συνθήκες άπνοιας. Η δεύτερη κλάση περιλαμβάνει τις θετικές ταχύτητες ανέμου (Σχήμα 3.18). Να τονιστεί ότι για τη χάραξη των διαγραμμάτων επιλέχθηκαν οι εξισώσεις εκείνες που έδιναν το μικρότερο απόλυτο σφάλμα για κάθε κλάση της ταχύτητας ανέμου με βάση τους Πίνακες (3.6), (3.7).



**Σχήμα 3.16** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της ταχύτητας ανέμου.



**Σχήμα 3.17** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της μηδενικής ταχύτητας ανέμου.



**Σχήμα 3.18** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της θετικής ταχύτητας ανέμου.

**Πίνακας 3.6** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων, για μηδενική ταχύτητα ανέμου.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	34	Van Wilgen (1986)	24
Fons et al. (1963)	82	Burrows (1994)	36
Thomas (1963)	30	Weise & Biging (1996)	40
Anderson et al. (1966)	67	Vega et al. (1998)	47
Newman (1974)	28	Catchpole et al. (1998)	26
Nelson (1980)	31	Fernandez et al. (2000)	26
Nelson & Adkins (1986)	24	Fernandez et al. (2009)	33
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 38%			

**Πίνακας 3.7** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της θετικής ταχύτητας ανέμου στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	41	Van Wilgen (1986)	30
Fons et al. (1963)	87	Burrows (1994)	49
Thomas (1963)	46	Weise & Biging (1996)	42
Anderson et al. (1966)	76	Vega et al. (1998)	55
Newman (1974)	37	Catchpole et al. (1998)	30
Nelson (1980)	28	Fernandez et al. (2000)	24
Nelson & Adkins (1986)	29	Fernandez et al. (2009)	45
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 44%			

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τους πίνακες μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρείται ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που διεξήχθησαν τόσο για μηδενική όσο και για θετική ταχύτητα ανέμου, κάτι που υποδηλώνεται από την πυκνή διάταξη των σημείων στην μεγαλύτερο εύρος των ταχυτήτων.

Όσον αφορά τη μηδενική ταχύτητα ανέμου, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας, κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Όσον αφορά τη θετική ταχύτητα ανέμου, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου

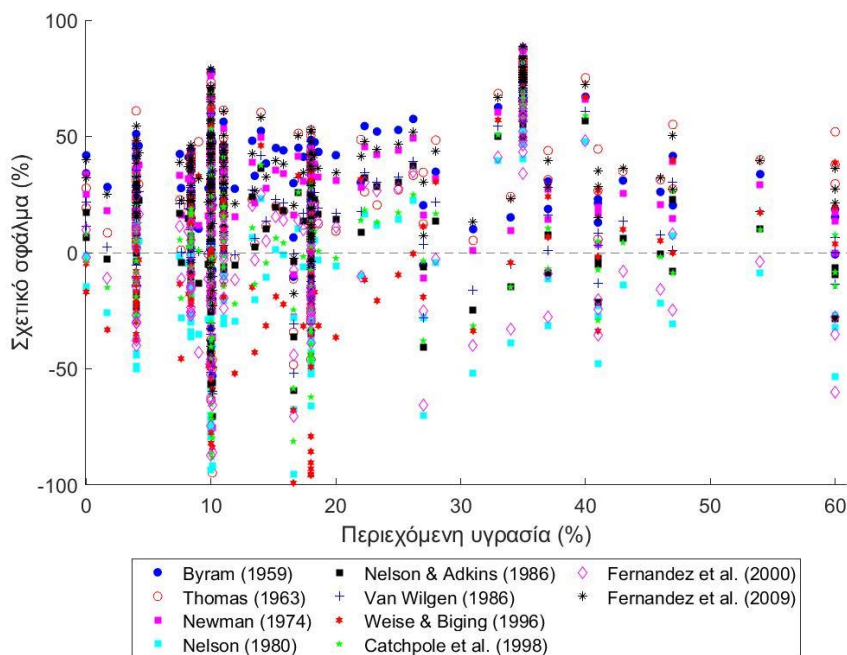
παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Συνοπτικά, η ομάδα των εξισώσεων με βάση της οποίας χαράχτηκαν τα διαγράμματα κάθε κατηγορίας ταχύτητας ανέμου είναι ικανή να αποδώσει με σχετική ακρίβεια το μήκος φλόγας τόσο για μηδενική όσο και για θετική ταχύτητα ανέμου. Επίσης, οι εξισώσεις παρέχουν κυρίως συντηρητικές προβλέψεις για θετική ταχύτητα ανέμου και δύνανται να χρησιμοποιηθούν για ασφαλή σχεδιασμό πυροπροστασίας.

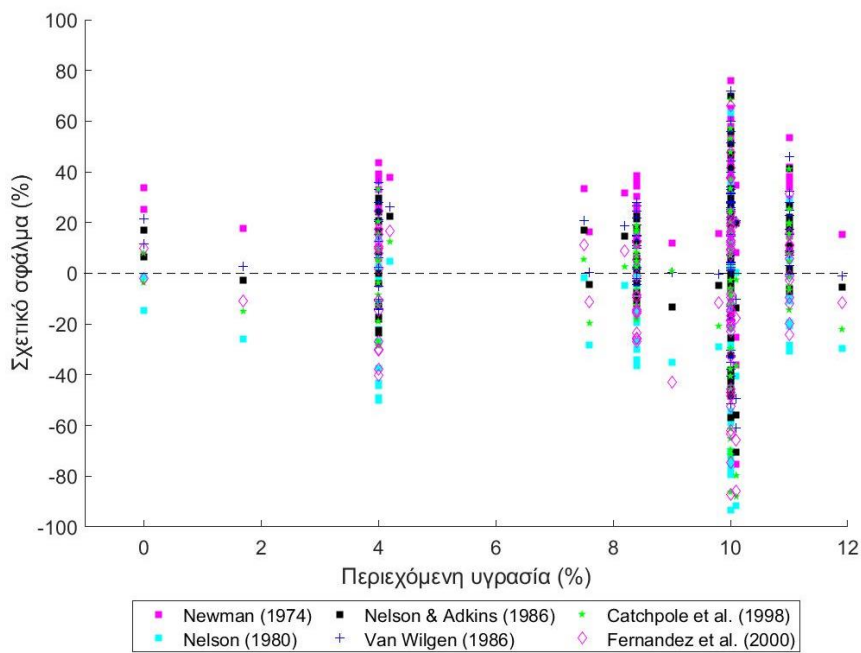
### 3.1.5 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Περιεχόμενη Υγρασία του Καυσίμου

Στη συνέχεια εξετάζεται η περιεχόμενη υγρασία του δασικού καυσίμου στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (3.19) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλο το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος ορίζει την ταύτιση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων με τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας των πειραμάτων. Σημεία με θετικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή, ενώ σημεία με αρνητικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υποεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή.

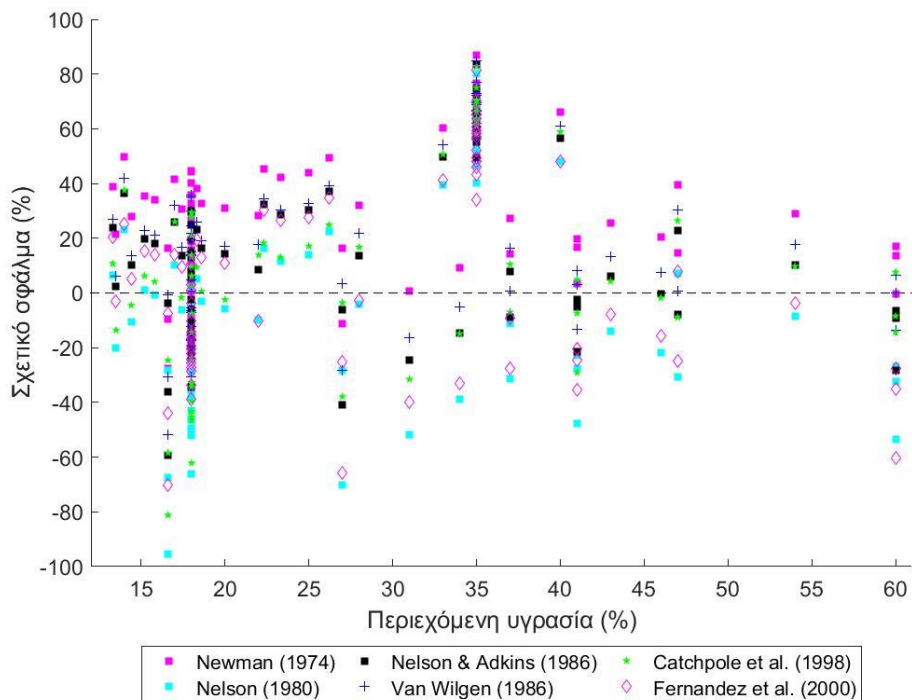
Έπειτα, η υγρασία του καυσίμου χωρίζεται και εξετάζεται σε δύο κλάσεις. Η πρώτη κλάση περιλαμβάνει εύρος υγρασίας 0-12% (Σχήμα 3.20), δηλαδή κυρίως νεκρή και αποξηραμένη βιομάζα. Η δεύτερη κλάση περιλαμβάνει εύρος υγρασίας 12-60% (Σχήμα 3.21), δηλαδή κυρίως ζωντανή βιομάζα. Να τονιστεί ότι για τη χάραξη των διαγραμμάτων επιλέχθηκαν οι εξισώσεις εκείνες που έδιναν το μικρότερο απόλυτο σφάλμα για κάθε κλάση της περιεχόμενης υγρασίας με βάση τους Πίνακες (3.8) και (3.9).



**Σχήμα 3.19** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της περιεχομένης υγρασίας του καυσίμου.



**Σχήμα 3.20** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της περιεχομένης υγρασίας του καυσίμου για εύρος 0-12%.



**Σχήμα 3.21** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της περιεχομένης υγρασίας του καυσίμου για εύρος 12-60%.

**Πίνακας 3.8** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της κλάσης της περιεχόμενης υγρασίας από 0-12% στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	33	Van Wilgen (1986)	22
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	34
Thomas (1963)	33	Weise & Biging (1996)	32
Anderson et al. (1966)	70	Vega et al. (1998)	47
Newman (1974)	28	Catchpole et al. (1998)	23
Nelson (1980)	27	Fernandez et al. (2000)	24
Nelson & Adkins (1986)	22	Fernandez et al. (2009)	35
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 37%			

**Πίνακας 3.9** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της κλάσης της περιεχόμενης υγρασίας από 12-60% στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	40	Van Wilgen (1986)	29
Fons et al. (1963)	86	Burrows (1994)	45
Thomas (1963)	41	Weise & Biging (1996)	36
Anderson et al. (1966)	74	Vega et al. (1998)	54
Newman (1974)	34	Catchpole et al. (1998)	31
Nelson (1980)	33	Fernandez et al. (2000)	29
Nelson & Adkins (1986)	33	Fernandez et al. (2009)	41
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 43%			

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τους πίνακες μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρείται ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που διεξήχθησαν για εύρος περιεχόμενης υγρασίας 8-20%, κάτι που υποδηλώνεται από την πυκνή διάταξη των σημείων σε αυτή την περιοχή. Αντιθέτως, τα πειράματα που έγιναν για εξάπλωση φωτιάς σε καύσιμα με εύρος περιεχόμενης υγρασίας εκατέρωθεν της προαναφερθείσας περιοχής ήταν λιγότερα, κάτι που υποδηλώνεται από την αραιή διάταξη των σημείων εκατέρωθεν αυτής της περιοχής.

Όσον αφορά το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας 0-12%, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας για όλο το

συγκεκριμένο εύρος και ειδικά για περιεχόμενη υγρασία καυσίμου 10%, κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Όσον αφορά το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας 12-60%, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας για όλο το συγκεκριμένο εύρος, κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

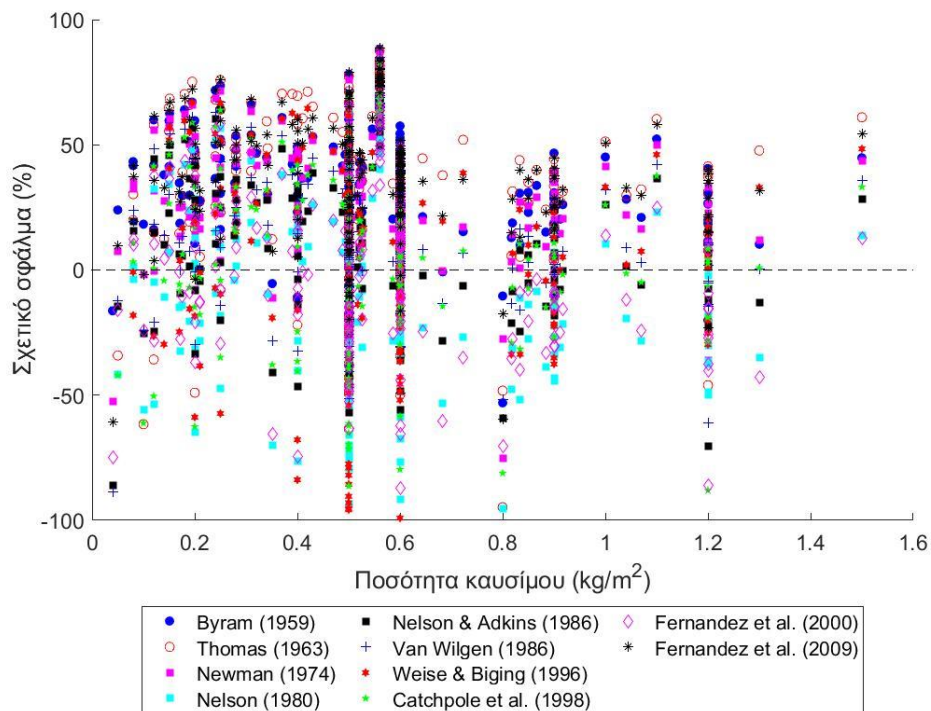
Συνοπτικά, η ομάδα των εξισώσεων με βάση της οποίας χαράχτηκαν τα διαγράμματα κάθε κατηγορίας περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου είναι ικανή να αποδώσει με σχετική ακρίβεια το μήκος φλόγας για εύρος περιεχόμενης υγρασίας 0-60%. Επίσης, επειδή κυριαρχούν κυρίως μη συντηρητικές προβλέψεις των τιμών του μήκους φλόγας, ο σχεδιασμός συστημάτων από άποψη ασφάλειας με βάση τις προβλεπόμενες εξισώσεις καθίσταται επισφαλής.

### *3.1.6 Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων ως προς την Ποσότητα του Καυσίμου*

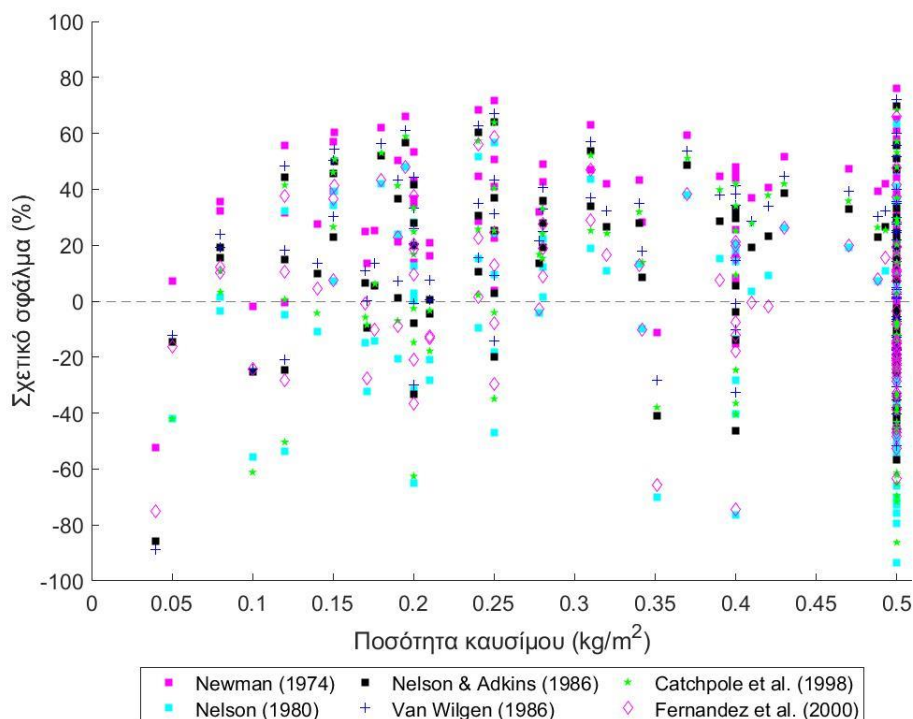
Στη συνέχεια εξετάζεται η ποσότητα του δασικού καυσίμου στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (3.22) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλο το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος ορίζει την ταύτιση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων με τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας των πειραμάτων. Σημεία με θετικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή, ενώ σημεία με αρνητικό σχετικό σφάλμα δηλώνουν υποεκτίμηση της υπολογιζόμενης τιμής σε σχέση με τη μετρούμενη τιμή.

Έπειτα, η ποσότητα καυσίμου χωρίζεται σε δύο κλάσεις. Η πρώτη κλάση περιλαμβάνει εύρος ποσότητας καυσίμου 0.04 - 0.5 kg/m<sup>2</sup> (Σχήμα 3.23), ενώ η δεύτερη κλάση περιλαμβάνει εύρος ποσότητας καυσίμου 0.5 - 1.5 kg/m<sup>2</sup> (Σχήμα 3.24). Να τονιστεί ότι για τη χάραξη των διαγραμμάτων επιλέχθηκαν οι εξισώσεις εκείνες που έδιναν το μικρότερο απόλυτο σφάλμα για κάθε κλάση της ποσότητας καυσίμου με βάση τους Πίνακες (3.10), (3.11).

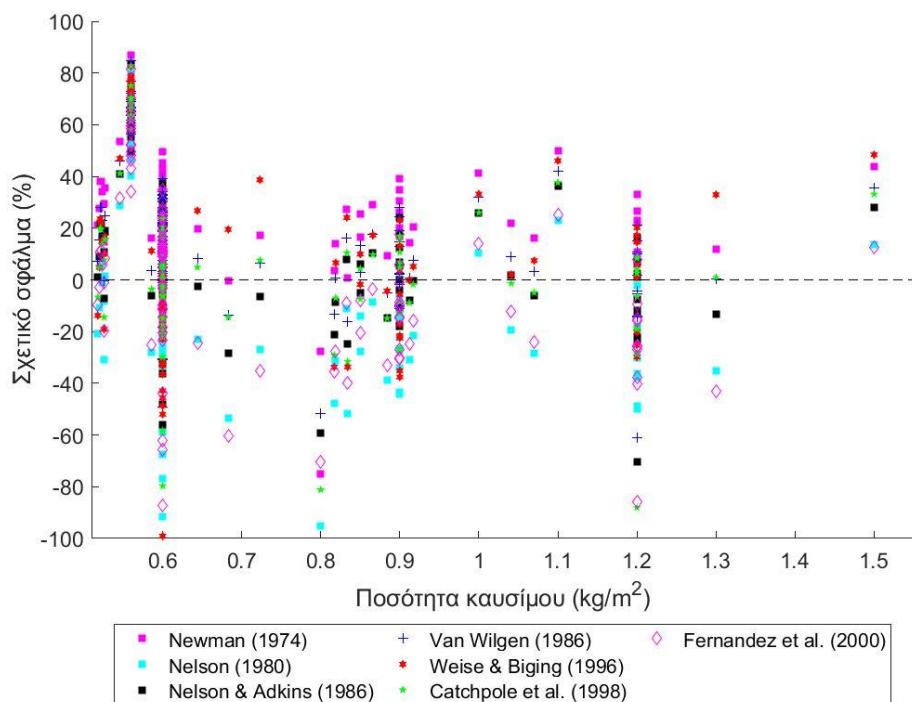




**Σχήμα 3.22** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της ποσότητας καυσίμου.



**Σχήμα 3.23** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της ποσότητας καυσίμου για εύρος 0.04 - 0.5 kg/m<sup>2</sup>.



**Σχήμα 3.24** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την επίδραση της ποσότητας καυσίμου για εύρος 0.5 - 1.5 kg/m<sup>2</sup>.

**Πίνακας 3.10** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της κλάσης της ποσότητας του καυσίμου από 0.04 - 0.5 kg/m<sup>2</sup> στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	36	Van Wilgen (1986)	28
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	53
Thomas (1963)	42	Weise & Biging (1996)	51
Anderson et al. (1966)	71	Vega et al. (1998)	51
Newman (1974)	32	Catchpole et al. (1998)	33
Nelson (1980)	30	Fernandez et al. (2000)	24
Nelson & Adkins (1986)	26	Fernandez et al. (2009)	38
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 43%			

**Πίνακας 3.11** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της κλάσης της ποσότητας του καυσίμου από 0.5-1.5 kg/m<sup>2</sup> στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Byram (1959)	38	Van Wilgen (1986)	25
Fons et al. (1963)	86	Burrows (1994)	34
Thomas (1963)	36	Weise & Biging (1996)	24
Anderson et al. (1966)	73	Vega et al. (1998)	52
Newman (1974)	33	Catchpole et al. (1998)	24
Nelson (1980)	28	Fernandez et al. (2000)	26
Nelson & Adkins (1986)	27	Fernandez et al. (2009)	40
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 39%			

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τους πίνακες μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρείται ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που διεξήχθησαν για σχεδόν όλο το εύρος της ποσότητας καυσίμου, κάτι που υποδηλώνεται από την πυκνή διάταξη των σημείων σε όλη την περιοχή.

Όσον αφορά το εύρος της ποσότητας καυσίμου 0.04-0.5 kg/m<sup>2</sup>, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υπερεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας για όλο το συγκεκριμένο εύρος, κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Όσον αφορά το εύρος της ποσότητας καυσίμου 0.5-1.5 kg/m<sup>2</sup>, οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν σχετικά ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο, παρατηρείται έντονη τάση υποεκτίμησης των τιμών του μήκους φλόγας για όλο το συγκεκριμένο εύρος, σε αντίθεση με το προηγούμενο μικρότερο εύρος, κάτι που δεν δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Συνοπτικά, η ομάδα των εξισώσεων με βάση της οποίας χαράχτηκαν τα διαγράμματα κάθε κατηγορίας ποσότητας καυσίμου είναι ικανή να αποδώσει με σχετική ακρίβεια το μήκος φλόγας. Επίσης, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η συντηρητικότητα των προβλέψεων των εξισώσεων για όλο το εύρος της ποσότητας καυσίμων.

### 3.1.7 Συγκεντρωτική Παρουσίαση των Εξισώσεων του Μήκους της Φλόγας

Προκειμένου να επιλεγεί η εξίσωση που δίνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του μήκους της φλόγας δημιουργήθηκε ο εποπτικός Πίνακας (3.12), ο οποίος περιέχει όλη την πληροφορία των προηγούμενων πινάκων του κεφαλαίου σε συγκεντρωτική μορφή. Στο Πίνακα (3.12) έχουν χρωματιστεί τα κελιά τα οποία περιέχουν το μικρότερο απόλυτο σφάλμα σε κάθε περίπτωση.

Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ακριβέστερες τιμές για αρνητική κλίση εδάφους δίνονται από την εξίσωση του Fernandez et al. (2000), για μηδενική κλίση εδάφους δίνονται από τις εξισώσεις του Van Wilgen (1986), Catchpole et al. (1998) και Fernandez et

al. (2000), για θετική κλίση εδάφους δίνονται από την εξίσωση του Fernandez et al. (2000), για μηδενική ταχύτητα ανέμου δίνονται από τις εξισώσεις του Nelson & Adkins (1986) και Van Wilgen (1986), για θετική ταχύτητα ανέμου από την εξίσωση του Fernandez et al. (2000), για μικρή περιεκτικότητα υγρασίας καυσίμου δίνονται από τις εξισώσεις του Nelson & Adkins (1986) και Van Wilgen (1986), για μεγάλη περιεκτικότητα υγρασίας καυσίμου δίνονται από την εξίσωση του Van Wilgen (1986), για μικρή ποσότητα καυσίμου δίνονται από την εξίσωση του Fernandez et al. (2000) και για μεγάλη ποσότητα καυσίμου δίνονται από την εξίσωση του Catchpole et al. (1998).

Επίσης, με βάση τον συνολικό μέσο όρο των απόλυτων σφαλμάτων, διακρίνονται για την καλή ακρίβεια τους οι εξισώσεις του Nelson & Adkins (1986) και Van Wilgen (1986) με 27% αντίστοιχα, του Catchpole et al. (1998) με 28%, του Nelson (1980) με 29% και του Newman (1974) με 32%.

Καταληκτικά, ως εξίσωση με τους συνολικά ακριβέστερους υπολογισμούς του μήκους της φλόγας διακρίνεται η εξίσωση του **Fernandez et al. (2000)** με συνολικό μέσο όρο απόλυτων σφαλμάτων 26%.

**Πίνακας 3.12** Συγκεντρωτική καταγραφή όλων των απόλυτων σφαλμάτων (%) των χαρακτηριστικών εξισώσεων για κάθε περίπτωση.

	Αρνητική κλίση	Μηδενική κλίση	Θετική κλίση	Μηδενική ταχύτητα ανέμου	Θετική ταχύτητα ανέμου	Μικρή Περιεκτικότητα υγρασίας	Μεγάλη Περιεκτικότητα υγρασίας	Μικρή ποσότητα καυσίμου	Μεγάλη ποσότητα καυσίμου	Συνολικός μέσος όρος
Byram (1959)	41	35	39	34	41	33	40	36	38	37
Fons et al. (1963)	84	84	87	82	87	84	86	84	86	85
Thomas (1963)	54	34	42	30	46	33	41	42	36	39
Anderson et al. (1966)	70	71	75	67	76	70	74	71	73	72
Newman (1974)	38	30	34	28	37	28	34	32	33	32
Nelson (1980)	46	27	27	31	28	27	33	30	28	29
Nelson & Adkins (1986)	40	24	25	24	29	22	33	26	27	27
Van Wilgen (1986)	41	23	28	24	30	22	29	28	25	27
Burrows (1994)	73	36	44	36	49	34	45	53	34	43
Weise & Biging (1996)	77	34	35	40	42	32	36	51	24	38
Vega et al. (1998)	54	49	53	47	55	47	54	51	52	51
Catchpole et al. (1998)	50	23	27	26	30	23	31	33	24	28
Fernandez et al. (2000)	36	23	24	26	24	24	29	24	26	26
Fernandez et al. (2009)	41	37	41	33	45	35	41	38	40	39

### 3.2 Γωνία Κλίσης Φλόγας

Με χρήση δεδομένων από 3 διαφορετικές πειρατικές μελέτες διάφορων ερευνητών και 57 συνολικά πειράματα αξιολογήθηκε τόσο η επίδραση των διάφορων παραμέτρων (κλίση εδάφους, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) στη μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας όσο και η ακρίβεια των υπολογιζομένων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.2) σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Οι 3 πειραματικές μελέτες που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση των σχέσεων δημοσιοποιούν τις μετρούμενες

τιμές της γεωμετρίας της φλόγας για τις εκάστοτε συνθήκες του πειράματος, καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά του δασικού καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε και της φλόγας που δημιουργήθηκε.

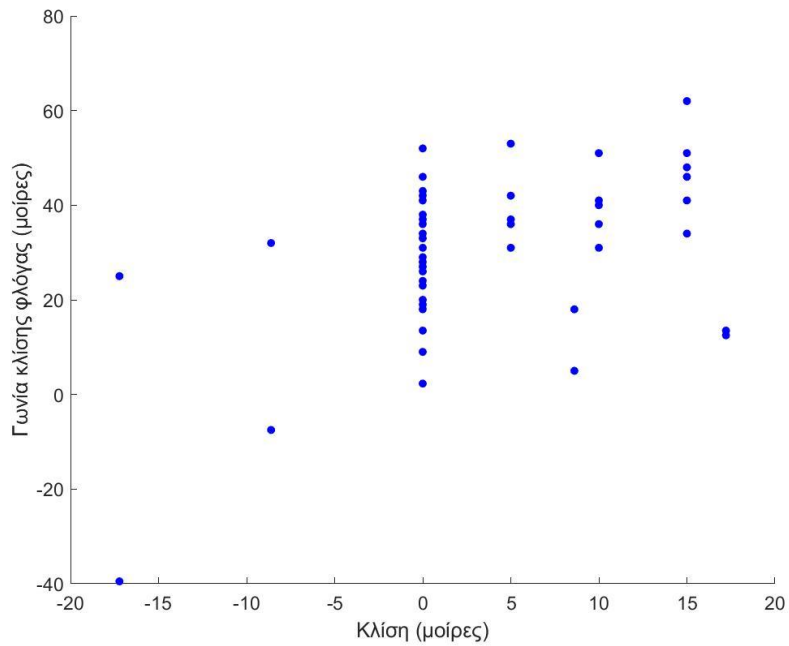
Πιο συγκεκριμένα, οι 3 μελέτες, που αποτελούν υποσύνολο των μελετών της ενότητας (3.1) με τα κύρια χαρακτηριστικά τους καταγράφονται στον Πίνακα (3.13).

**Πίνακας 3.13** Συγκεντρωτικός κατάλογος των μελετών που αποτέλεσαν πηγή αναφοράς για την αξιολόγηση των παραμέτρων και των σχέσεων για τη γωνία κλίσης της φλόγας.

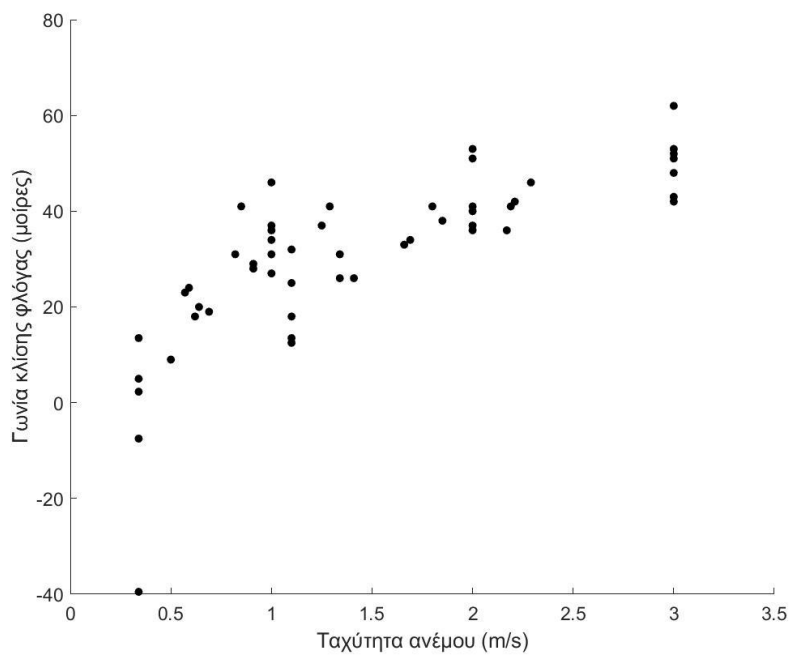
A/A	Αναφορά Μελέτης	Τύπος Καυσίμου	Κλίμακα Πειράματος	Παράμετροι υπό Μελέτη (εύρος)	Αριθμός Πειραμάτων
1	Nelson & Adkins (1986)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Περιεχόμενη υγρασία (11 έως 44%), Ταχύτητα ανέμου (0.57-2.19 m/s) Ποσότητα καυσίμου (0.49-1 kg/m <sup>2</sup> )	12
		Λιβάδι από χαμηλή βλάστηση	Μεγάλη	Περιεχόμενη υγρασία (18-60%), Ποσότητα καυσίμου (0.151-0.723 kg/m <sup>2</sup> )	10
2	Weise & Biging (1997)	Υπολείμματα σημύδας και λεύκας	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-17.22-17.22°) Ταχύτητα ανέμου (0-1.1 m/s)	10
3	Mendez-Lopez et al. (2003)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-15-15°), Περιεχόμενη υγρασία (10-18%) Ταχύτητα ανέμου (0-5 m/s)	25
Συνολικός αριθμός πειραμάτων =					57

### 3.2.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων

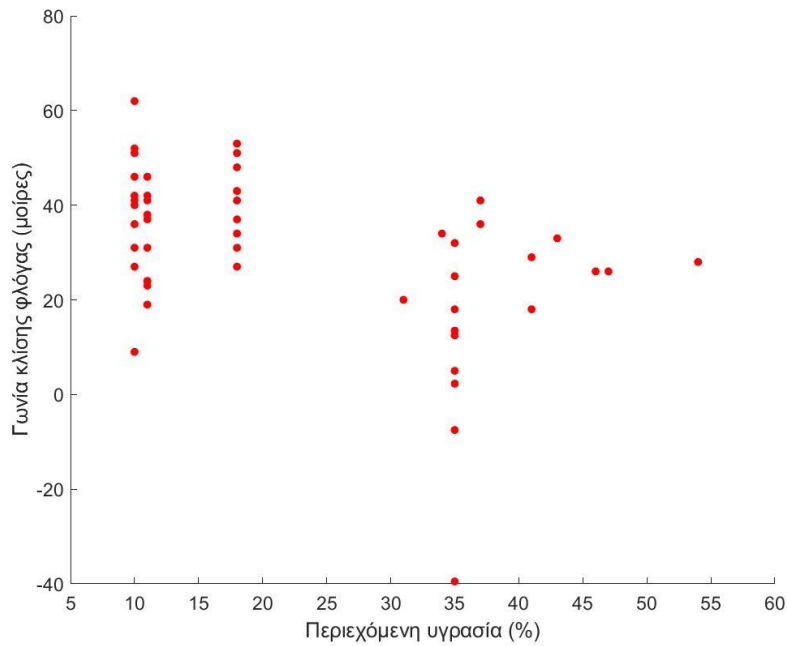
Με βάση τις παραπάνω 3 πειραματικές μελέτες σχεδιάστηκαν διαγράμματα προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής διάφορων παραγόντων στη μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας. Έτσι, η μεταβολή της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας του ανέμου, της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας του καυσίμου και το αποτέλεσμα που υπήρξε στη τιμή της γωνίας κλίσης καταγράφηκαν στα Σχήματα (3.25), (3.26), (3.27), (3.28) αντίστοιχα.



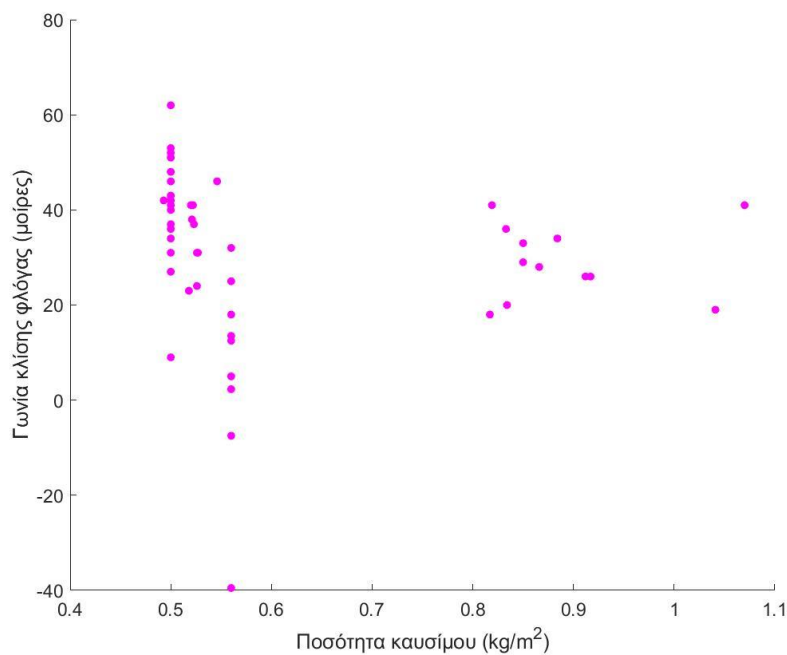
**Σχήμα 3.25** Διάγραμμα μεταβολής της μετρούμενης γωνίας κλίσης της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της κλίσης του εδάφους. Οι υπόλοιπες παράμετροι (ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.26** Διάγραμμα μεταβολής της μετρούμενης γωνίας κλίσης της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.27** Διάγραμμα μεταβολής της μετρούμενης γωνίας κλίσης της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, ταχύτητα ανέμου, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.28** Διάγραμμα μεταβολής της μετρούμενης γωνίας κλίσης φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ποσότητας του καυσίμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία) δεν παρέμεναν σταθερές.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Πρέπει να τονιστεί ότι για την σχεδίαση των Σχημάτων (3.25), (3.26), (3.27), (3.28) οι υπόλοιποι παράγοντες επίδρασης δεν παρέμεναν σταθεροί. Έτσι, δεν μπορεί να υπάρξει



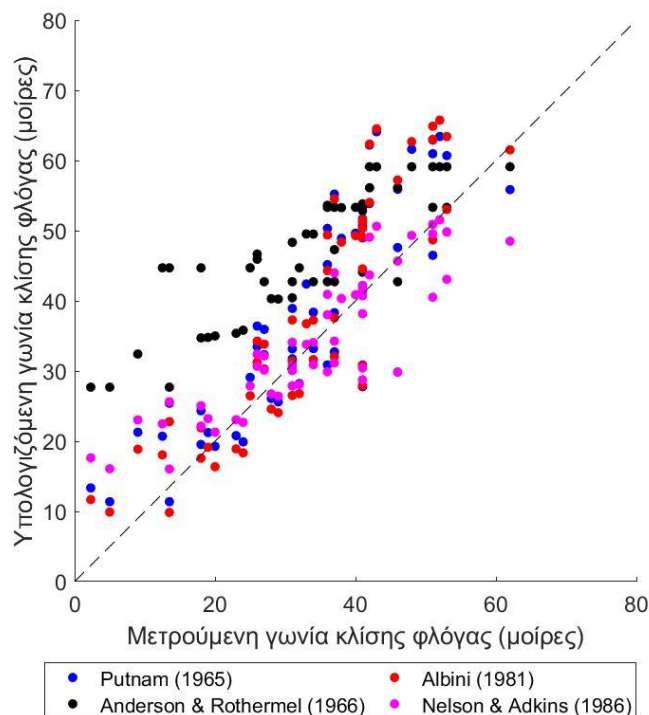
ξεκάθαρο συμπέρασμα για τη μεταβολή της τιμής της γωνίας κλίσης της φλόγας από κάθε παράγοντα μεμονωμένα, εφόσον και οι υπόλοιποι παράγοντες μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Ωστόσο, από αυτά τα διαγράμματα καταγράφεται και αξιολογείται μια γενική τάση της μεταβολής της γωνίας κλίσης της φλόγας.

Στο Σχήμα (3.25) παρατηρείται μια μικρή αύξηση της γωνίας κλίσης της φλόγας με την αύξηση της κλίσης του εδάφους. Στο Σχήμα (3.26) παρατηρείται η καταλυτική επίδραση που έχει η παρουσία του ανέμου στην γωνία κλίση της φλόγας. Ειδικότερα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο η φωτιά γέρνει προς την κατεύθυνση μετάδοσης της. Αντιθέτως σε μηδενικές ή πολύ μικρές ταχύτητες ανέμου η φλόγα θεωρείται σχεδόν κατακόρυφη. Στο Σχήμα (3.27) παρατηρείται μείωση της γωνίας κλίσης της φλόγας με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Όπως και στις παρατηρήσεις του μήκους της φλόγας η αύξηση της υγρασίας λειτουργεί κατασταλτικά στην εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς. Τέλος, στο Σχήμα (3.28) παρατηρείται σχετική ανεξαρτησία της γωνίας κλίσης της φλόγας με την μεταβολή της ποσότητας καυσίμου.

### 3.2.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων

Η σύγκριση και η αξιολόγηση των υπολογιζόμενων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.2) με τις μετρούμενες τιμές της γωνίας κλίσης της φλόγας καταγράφηκαν στο συγκεντρωτικό και εποπτικό Σχήμα (3.29). Πιο συγκεκριμένα, η διχοτόμος ευθεία του διαγράμματος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι διακεκομμένη, υποδεικνύει πλήρη ταύτιση των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών. Αντιθέτως, σημεία που βρίσκονται πάνω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υπερεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων της γωνίας κλίσης της φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων, ενώ σημεία που βρίσκονται κάτω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υποεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων της γωνίας κλίσης φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Τέλος, στον Πίνακα (3.14) καταγράφονται τα απόλυτα σφάλμα όλων των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση τους με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων.

Οι 4 εξισώσεις που αξιολογήθηκαν ως προς την ακρίβεια τους είναι η Εξίσωση (2.24) του Putnam (1965), η Εξίσωση (2.25) του Anderson & Rothermel (1966), η Εξίσωση (2.27) του Albin (1981) και η Εξίσωση (2.28) του Nelson & Adkins (1986). Όσον αφορά την Εξίσωση (2.25) του Anderson & Rothermel χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (2.2) για την εύρεση του μεγέθους  $I_R$ , ενώ για την εύρεση του βάθους της ενεργής οριζόντιας φλόγας  $D$  της εξίσωσης (2.2) χρησιμοποιήθηκαν οι Εξισώσεις (2.4) και (2.5).



**Σχήμα 3.29** Διάγραμμα Μετρούμενης – Υπολογιζόμενης γωνίας κλίσης φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων.

**Πίνακας 3.14** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με τη μετρούμενη γωνία κλίσης της φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
Putnam (1965)	29
Anderson & Rothermel (1966)	36
Albini (1981)	29
Nelson & Adkins (1986)	31
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων =	31

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, πρέπει να τονιστεί η μεγάλη επίδραση της τιμής της ταχύτητας πάνω στις υπολογιζόμενες γωνίες κλίσεις φλόγας των εξισώσεων. Όλες οι εξισώσεις, εκτός από αυτήν των Anderson & Rothermel (1966), έχουν παρόμοια μορφή, χρησιμοποιούν γεωμετρική πληροφορία από τη φλόγα (μήκος ή ύψος), ενώ οι συντελεστές και οι εκθέτες των εξισώσεων παρουσιάζουν μικρές αριθμητικές διαφορές.

Όσον αφορά την εξίσωση του Putnam (1965), η ακρίβεια των υπολογισμών παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων για όλο το εύρος των γωνιών κλίσης της φλόγας, κάτι που καταδεικνύεται και από την αποδεκτή τιμή του απόλυτου σφάλματος της τάξης των 29%. Πρέπει να αναφερθεί ότι η εξίσωση αυτή έχει εξαχθεί από πειράματα που διεξήχθησαν με καύσιμο φυσικό αέριο, ωστόσο η χρήση της είναι αποδεκτή σε διάφορες μελέτες πειραμάτων με δασικά καύσιμα (Nelson & Adkins 1986).

Η εξίσωση των Anderson & Rothermel (1966) παρουσιάζει τη χειρότερη προσέγγιση σε σχέση με τις υπόλοιπες εξισώσεις καθώς είναι έντονη η τάση υπερεκτίμησης των υπολογιζόμενων τιμών σε σχέση με τις μετρούμενες. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση της εξίσωσης έγινε με παραδοχές που πιθανώς επηρέασαν το τελικό αποτέλεσμα της υπολογιζόμενης τιμής. Οι παραδοχές αυτές έγιναν επειδή δεν υπήρχε δημοσιευμένη στις πειραματικές μελέτες η απαιτούμενη πληροφορία και αφορούσαν την τιμή της πυκνότητας του αέρα, που επιλέχθηκε ίση με  $1.2 \text{ kg/m}^3$ , καθώς και την εκλογή της μέσης διαμέτρου των στοιχείων καυσίμου, η οποία θεωρήθηκε ότι ήταν ίση με  $0.052 \text{ cm}$ . Αυτή η τιμή της διαμέτρου υπολογίστηκε από τη μέση τιμή 5 μετρήσεων διαμέτρων από δείγματα πευκοβελόνων που μετρήθηκαν με παχύμετρο στο εργαστήριο. Η εκτίμηση αυτή θεωρείται επιστημονικά σωστή εφόσον τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μελέτες αποτελούνταν από υπολείμματα πεύκου.

Η εξίσωση του Albin (1981) παρουσιάζει πολύ καλή προσέγγιση των υπολογιζόμενων τιμών σε σύγκριση με τις μετρούμενες για όλο το εύρος των κλίσης φλόγας με μικρή τάση υπερεκτίμησης των αποτελεσμάτων.

Τέλος, η εξίσωση του Nelson & Adkins (1986) παρουσιάζει εξίσου καλή ακρίβεια αποτελεσμάτων με το μετρούμενο μέγεθος με αρκετές μη συντηρητικές προβλέψεις.

Καταληκτικά, επιλέγεται ως ακριβέστερη εξίσωση υπολογισμού της γωνίας κλίσης της φωτιάς με βάση τη σύγκριση με τα δεδομένα πειραματικά σημεία, η εξίσωση του **Nelson & Adkins (1986)**. Η συγκεκριμένη εξίσωση επιλέχθηκε κυρίως λόγω των μη συντηρητικότερων τιμών που υπολογίζει, κάτι που ερμηνεύει φυσικά καλύτερα το φαινόμενο, ενώ έχει πολύ μικρή αριθμητική διαφορά στη μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος σε σχέση με την εξίσωση του Putnam (1965) και του Albin (1981).

Τέλος, να επισημανθεί ότι εξετάστηκε η επίδραση της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας του ανέμου, της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας καυσίμου ως προς την μεταβολή της υπολογιζόμενης τιμής των εξισώσεων σχετικά με τη γωνία κλίσης της φλόγας, αλλά δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα με τα δεδομένα πειραματικά σημεία, οπότε η παράθεση τους αμελείται.

### 3.3 Ύψος φλόγας

Με χρήση δεδομένων από 3 διαφορετικές πειραματικές μελέτες διάφορων ερευνητών και 57 συνολικά πειράματα αξιολογήθηκε τόσο η επίδραση των διάφορων παραμέτρων (κλίση εδάφους, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) στη μεταβολή του ύψους της φλόγας όσο και η ακρίβεια των υπολογιζόμενων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.3) σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Οι 3 πειραματικές μελέτες που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση των σχέσεων δημοσιοποιούν τις μετρούμενες τιμές της γεωμετρίας της φλόγας για τις εκάστοτε συνθήκες του πειράματος, καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά του δασικού καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε και της φλόγας που δημιουργήθηκε.

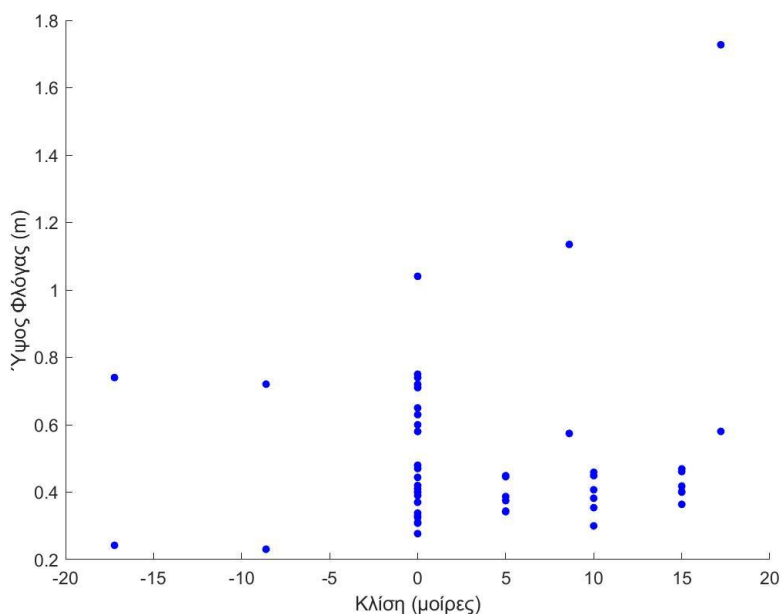
Πιο συγκεκριμένα, οι 3 μελέτες, που αποτελούν υποσύνολο των μελετών της ενότητας (3.1) με τα κύρια χαρακτηριστικά τους καταγράφονται στον Πίνακα (3.15).

**Πίνακας 3.15** Συγκεντρωτικός κατάλογος των μελετών που αποτέλεσαν πηγή αναφοράς για την αξιολόγηση των παραμέτρων και των σχέσεων για τη γωνία κλίσης της φλόγας.

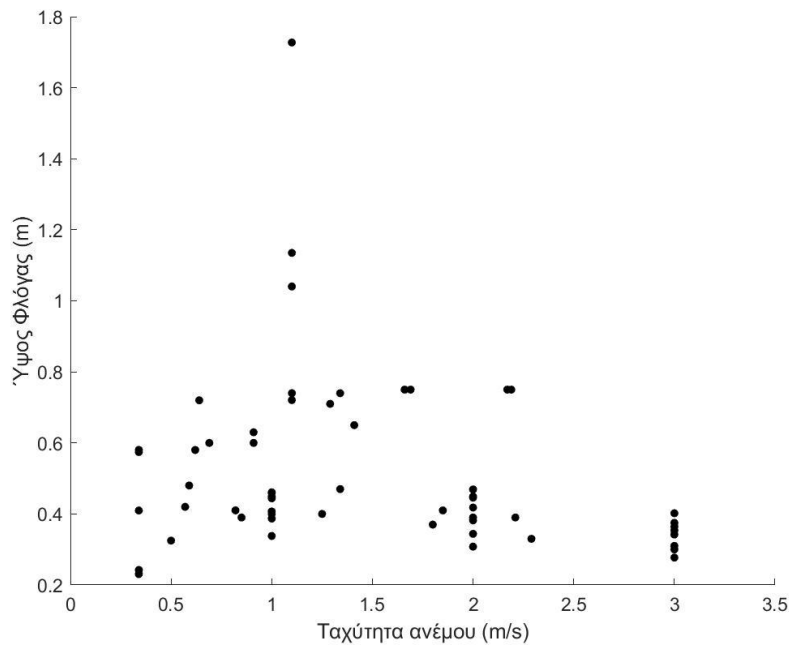
A/A	Αναφορά Μελέτης	Τύπος Καυσίμου	Κλίμακα Πειράματος	Παράμετροι υπό Μελέτη (εύρος)	Αριθμός Πειραμάτων
1	Nelson & Adkins (1986)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Περιεχόμενη υγρασία (11 έως 44%) Ταχύτητα ανέμου(0.57-2.19 m/s) Ποσότητα καυσίμου (0.49-1 kg/m <sup>2</sup> )	12
		Λιβάδι από χαμηλή βλάστηση	Μεγάλη	Περιεχόμενη υγρασία (18-60%) Ποσότητα καυσίμου (0.151-0.723 kg/m <sup>2</sup> )	10
2	Weise & Biging (1997)	Υπολείμματα σημύδας και λεύκας	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-17.22-17.22°) Ταχύτητα ανέμου (0-1.1 m/s)	10
3	Mendez-Lopez et al. (2003)	Υπολείμματα πεύκου	Μικρή	Κλίσης εδάφους (-15-15°), Περιεχόμενη υγρασία (10-18%) Ταχύτητα ανέμου (0-5 m/s)	25
Συνολικός αριθμός πειραμάτων =					57

### 3.3.1 Αξιολόγηση Επίδρασης Διάφορων Παραμέτρων

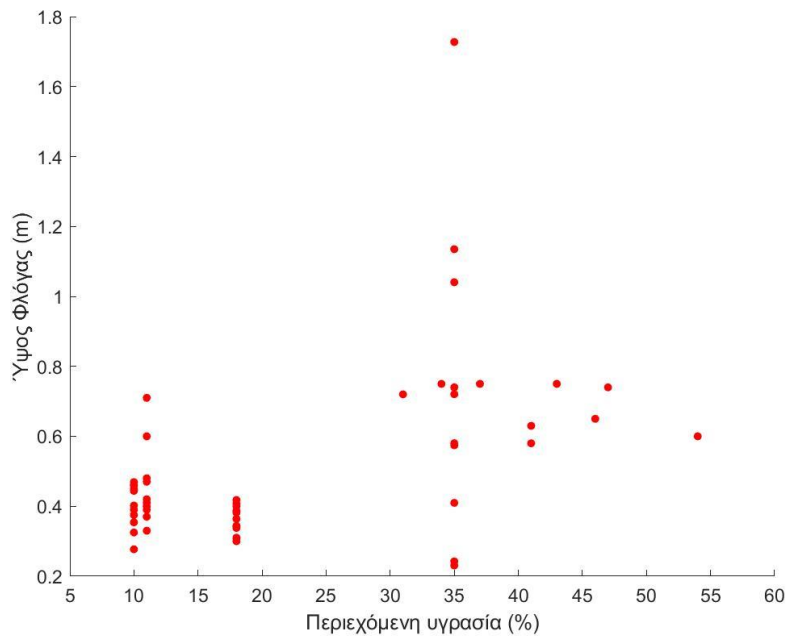
Με βάση τις παραπάνω 3 πειραματικές μελέτες σχεδιάστηκαν διαγράμματα προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής διάφορων παραγόντων στη μεταβολή του ύψους της φλόγας. Έτσι, η μεταβολή της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας του ανέμου, της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας του καυσίμου και το αποτέλεσμα που υπήρξε στη τιμή της γωνίας κλίσης καταγράφηκαν στα Σχήματα (3.30), (3.31), (3.32), (3.33) αντίστοιχα.



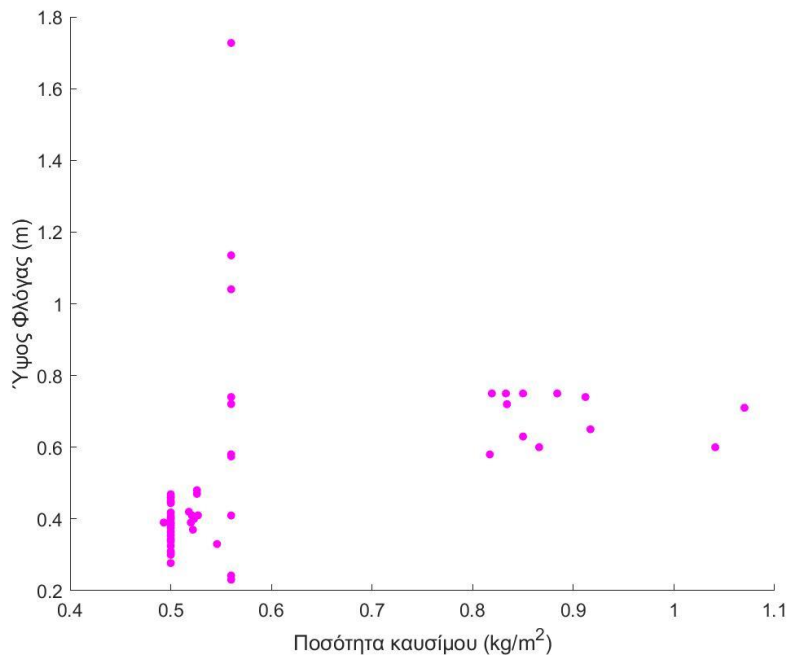
**Σχήμα 3.30** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου ύψους της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της κλίσης του εδάφους. Οι υπόλοιπες παράμετροι (ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.31** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου ύψους της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση εδάφους, περιεχόμενη υγρασία, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.32** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου ύψους της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση εδάφους, ταχύτητα ανέμου, ποσότητα καυσίμου) δεν παρέμεναν σταθερές.



**Σχήμα 3.33** Διάγραμμα μεταβολής του μετρούμενου ύψους της φλόγας των πειραμάτων συναρτήσει της ποσότητας καυσίμου. Οι υπόλοιπες παράμετροι (κλίση εδάφους, ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη υγρασία) δεν παρέμεναν σταθερές.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Πρέπει να τονιστεί ότι για την σχεδίαση των Σχημάτων (3.30), (3.31), (3.32), (3.33) οι υπόλοιποι παράγοντες επίδρασης δεν παρέμεναν σταθεροί. Έτσι, δεν μπορεί να υπάρξει ξεκάθαρο συμπέρασμα για τη μεταβολή του ύψους της φλόγας από κάθε παράγοντα μεμονωμένα, εφόσον και οι υπόλοιποι παράγοντες μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Ωστόσο, από αυτά τα διαγράμματα καταγράφεται και αξιολογείται μια γενική τάση της μεταβολής του ύψους της φλόγας.

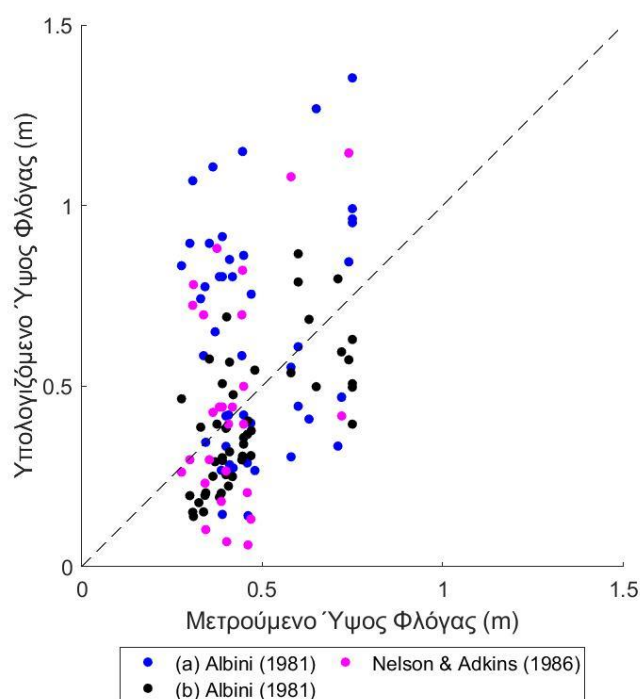
Σύμφωνα με το Σχήμα (3.30) παρατηρείται μια μικρή αύξηση του ύψους της φλόγας καθώς αυξάνεται η κλίση του εδάφους. Αυτό είναι λογικό καθώς έχει παρατηρηθεί αύξηση του μεγέθους των γεωμετρικών μεγεθών όσο αυξάνεται η κλίση. Στο Σχήμα (3.31) παρατηρείται μικρή μείωση του ύψους της φλόγας όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Αυτό είναι επιστημονικά ορθό καθώς όσο μεγαλώνει η ένταση του ανέμου τόσο «γέρνει» η φωτιά και επομένως μειώνεται η κατακόρυφη απόσταση της από το έδαφος. Στο Σχήμα (3.32) παρατηρείται αύξηση του ύψους της φλόγας με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την επίδραση της υγρασίας να καταστέλλει το φαινόμενο της φωτιάς και ειδικά τα γεωμετρικά μεγέθη. Τέλος, στο Σχήμα (3.33) παρατηρείται αύξηση του ύψους της φλόγας με αύξηση της ποσότητας καυσίμου, κάτι που είναι επιστημονικά αποδεκτό από τη βιβλιογραφία.

### 3.3.2 Γενική Αξιολόγηση Βιβλιογραφικών Εξισώσεων

Η σύγκριση και η αξιολόγηση των υπολογιζόμενων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.3) με τις μετρούμενες τιμές του ύψους της φλόγας καταγράφηκαν στο συγκεντρωτικό και εποπτικό Σχήμα (3.34). Πιο συγκεκριμένα, η διχοτόμος ευθεία του διαγράμματος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι διακεκομμένη, υποδεικνύει πλήρη ταύτιση των

υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών. Αντιθέτως, σημεία που βρίσκονται πάνω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υπερεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του ύψους της φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων, ενώ σημεία που βρίσκονται κάτω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υποεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του ύψους της φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Τέλος, στον Πίνακα (3.16) καταγράφονται τα απόλυτα σφάλματα όλων των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση τους με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων.

Να σημειωθεί ότι ως (a) Albini (1981) αναφέρεται η Εξίσωση (2.32) και ως (b) Albini (1981) η Εξίσωση (2.31).



**Σχήμα 3.34** Διάγραμμα Μετρούμενου – Υπολογιζόμενου ύψους της φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων.

**Πίνακας 3.16** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με το μετρούμενη ύψος της φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο σφάλμα (%)
(a) Albini (1981)	51
(b) Albini (1981)	49
Nelson & Adkins (1986)	93
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων =	64.33

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται έντονη απόκλιση όλων των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές του ύψους της φλόγας.

Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση (a) Albinì (1981) παρουσιάζει κακή συσχέτιση των υπολογιζομένων τιμών με τις μετρούμενες τιμές του ύψους φλόγας. Επίσης, η εξίσωση αυτή κυρίως υπερεκτιμά την τιμή του ύψους φλόγας.

Επίσης, η εξίσωση (b) Albinì (1981) παρουσιάζει εξίσου έντονη ανακρίβεια καθώς η συσχέτιση των υπολογιζομένων τιμών με τις μετρούμενες τιμές του ύψους φλόγας έχει μεγάλες αποκλίσεις. Επιπρόσθετα, η εξίσωση αυτή παρέχει μη συντηρητικές προβλέψεις.

Τέλος, η εξίσωση του Nelson & Adkins (1986) είναι ανακριβής και δεν συνίσταται για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας. Η εξίσωση αυτή περιέχει μεγάλο εκθέτη που οδηγεί στην έντονη υπερεκτίμηση του ύψους της φλόγας.

Καταληκτικά, η εξίσωση (b) του Albinì επιλέγεται ως η καλύτερη αφενός γιατί είναι περισσότερο ακριβής σε σχέση με τις υπόλοιπες και αφετέρου είναι η εξίσωση που απευθύνεται άμεσα στον υπολογισμό του ύψους της φλόγας, καθώς οι άλλες δύο εξισώσεις δημιουργήθηκαν για να υπολογίζουν την γωνία κλίσης της φωτιάς. Επίσης, για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων προτείνεται η χρήση των ακριβέστερων εξισώσεων του μήκους και τη γωνίας κλίσης της φλόγας και έπειτα μέσω του πυθαγορείου θεωρήματος να βρίσκεται η τιμή του ύψους της φλόγας.

Τέλος, να επισημανθεί ότι εξετάστηκε η επίδραση της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας του ανέμου, της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας καυσίμου ως προς την μεταβολή της υπολογιζόμενης τιμής των εξισώσεων σχετικά με το ύψος της φλόγας αλλά δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα με τα δεδομένα πειραματικά σημεία, οπότε η παράθεση τους αμελείται.

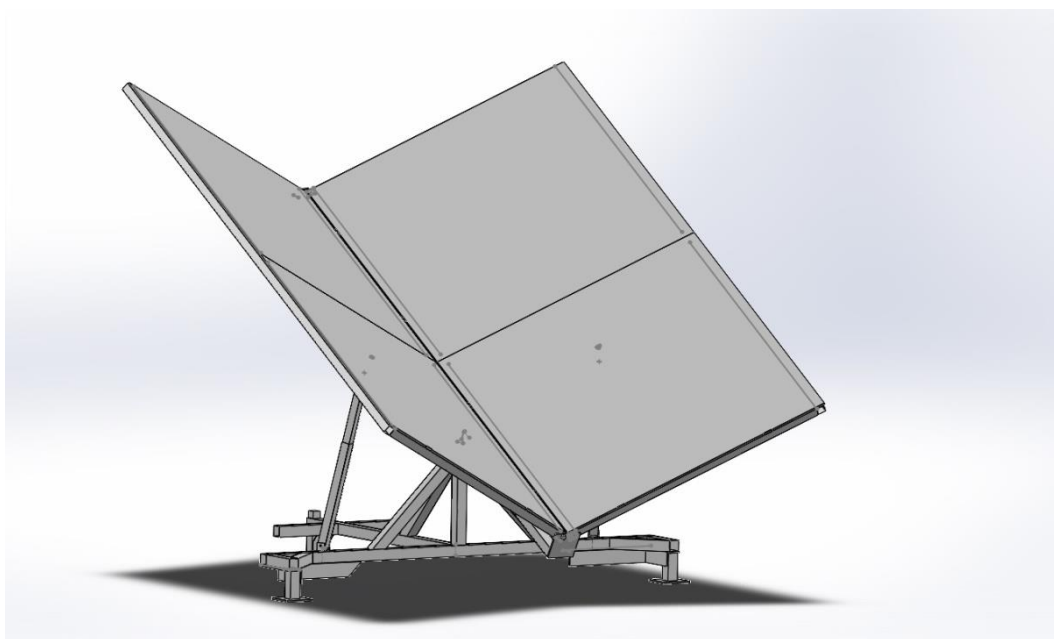


## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### 4.1 Κλίνη Καυσίμου

Η πειραματική εγκατάσταση που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από την κλίνη του καυσίμου (fuel bed) και από τα διάφορα μετρητικά όργανα (Σχήματα 4.1 και 4.2). Πιο συγκεκριμένα, η κλίνη του καυσίμου αποτελείται από μια μεταλλική βάση που στηρίζει την εγκατάσταση και επιτρέπει τη σχετική περιστροφή της κλίνης γύρω από 2 άξονες προκειμένου να προσομοιωθεί η τοπογραφία πλαγιάς και φαραγγιού. Ορίζεται ο άξονας  $x$  συγγραμμικός με την κατεύθυνση κίνησης του κύριου μετώπου της φλόγας, ο άξονας  $y$  κάθετος στην κύρια κίνηση του μετώπου της φλόγας και ο άξονας  $z$  παράλληλος με το ύψος της φλόγας (Σχήμα 4.2). Η αρχή των αξόνων ορίστηκε στο σημείο έναυσης της καύσης και όλες οι αποστάσεις μετρούνται σε χιλιοστά (mm). Έτσι, περιστροφή της κλίνης γύρω από τον άξονα  $x$  προσομοιάζει τοπογραφία φαραγγιού και περιστροφή γύρω από τον άξονα  $y$  προσομοιάζει τοπογραφία πλαγιάς.

Στη συνέχεια, πάνω στη μεταλλική βάση τοποθετούνται 4 τετραγωνικές κεραμικές πλάκες με πλευρά 1 m έκαστη. Οι πλάκες αυτές έχουν πυκνότητα ίση με  $2440 \text{ kg/m}^3$ , πάχος ίσο με 6 mm και χαρακτηρίζονται από την ικανότητα πυραντοχής τους, έτσι ώστε να μην αλλοιώνονται οι μηχανικές τους ιδιότητες όταν εκτίθενται σε θερμικές ροές. Επί αυτών των πλακών τοποθετείται το καύσιμο που πρόκειται να καεί.



**Σχήμα 4.1** Αναπαράσταση της κλίνης καυσίμου στο πρόγραμμα Solidworks.



**Σχήμα 4.2** Κλίνη καυσίμου στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σημειώνεται η αρχή των αξόνων.

## 4.2 Οπτικές Κάμερες

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η πληροφορία που λήφθηκε από τις οπτικές κάμερες. Η πληροφορία των υπόλοιπων μετρητικών οργάνων δεν μελετήθηκε, οπότε τα διάφορα μετρητικά όργανα θα αναφερθούν περιληπτικά χάριν της πληρότητας.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν 2 ψηφιακές κάμερες που βιντεοσκοπούσαν το φαινόμενο της καύσης. Η πρώτη ψηφιακή κάμερα μοντέλου Panasonic HC-VX1 ρυθμού λήψης 25 fps (frames per second) και ανάλυσης 1280x720 τοποθετήθηκε πλάγια της εγκατάστασης σε απόσταση (1155 mm, 4560 mm, 618 mm) από την αρχή των αξόνων (Σχήμα 4.3). Η κάμερα αυτή παρέχει την πληροφορία της χρονικής μεταβολής της γεωμετρίας του κύριου μετώπου της φλόγας (ύψος και γωνία κλίσης της φλόγας) καθώς και το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς.

Η δεύτερη ψηφιακή κάμερα μοντέλου Sony a3000 ρυθμού λήψης 25 fps και ανάλυσης 1920x1080 τοποθετήθηκε οπίσθια σε σχέση με την μετάδοση της φλόγας σε απόσταση (-1630 mm, 0 mm, 1252 mm) από την αρχή των αξόνων με γωνία κλίσης  $-26^\circ$  σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 4.4). Η κάμερα αυτή παρέχει την πληροφορία της χρονικής μεταβολής του περιγράμματος της φωτιάς κατά την καύση του καυσίμου καθώς και τη χρονική στιγμή που το κεντρικό μέτωπο της φωτιάς φτάνει στο τέλος της κλίνης καυσίμου, κάτι που είναι δύσκολο να ελεγχθεί με τη πλάγια κάμερα.



**Σχήμα 4.3** Κάμερα Panasonic HC-VX1 τοποθετημένη πλάγια της εγκατάστασης.



**Σχήμα 4.4** Κάμερα Sony a3000 τοποθετημένη οπίσθια της εγκατάστασης.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα μετρητικά όργανα η εγκατάσταση περιείχε συνολικά 86 θερμοστοιχεία τύπου K προκειμένου να μετράται η θερμοκρασία της φλόγας σε διάφορες θέσεις και ύψη. Επίσης, 3 δικατευθυντικοί και 1 μονοκατευθυντικός μετρητής ταχύτητας τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις προκειμένου να μετρηθεί η ταχύτητα της ροής του πλουμίου της φλόγας. Επιπρόσθετα, 3 υδρόψυκτοι μετρητές ροής θερμότητας, τύπου Schmidt-Boelter, μετρούσαν τη ροή θερμότητας της φωτιάς λόγω ακτινοβολίας. Επίσης, η εγκατάσταση περιλάμβανε αναλυτή καυσαερίων τύπου ABB ACX Optima AO2000 Series, με τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα. Τέλος, για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής καυσαερίων εγκαταστάθηκε εντός αγωγού διαμέτρου 315 mm, το μετρητικό όργανο KIMO DEBIMO.

Για την καταγραφή και αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Systems). Το πρώτο σύστημα ήταν το NI cDAQ-9172 της εταιρείας National Instruments, το οποίο περιέχει 4 κάρτες με διάφορα κανάλια για την είσοδο σημάτων από τις μετρητικές συσκευές των θερμοστοιχείων, των δικατευθυντικών μετρητών ταχύτητας, των μετρητών θερμοροής και παροχής καυσαερίων. Το δεύτερο σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν τρεις Agilent 34972A της εταιρείας Agilent Technologies, οι οποίοι περιείχαν 1 κάρτα ο καθένας με 20 κανάλια για την είσοδο σημάτων από τις μετρητικές συσκευές των θερμοστοιχείων. Ακόμα, ο χρόνος δειγματοληψίας των τιμών από τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1.25 sec. Τέλος, για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση των τιμών από τις κάρτες συλλογής δεδομένων των δυο συστημάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW.

## 4.3 Ανάπτυξη Λογισμικού Αναγνώρισης Ορίων Φλόγας

### 4.3.1 Προεργασία Βίντεο και Φωτογραφιών

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η πληροφορία που παρέχεται από την πλάγια κάμερα. Στα βίντεο που προήλθαν από την πλάγια κάμερα είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς, το ύψος της φλόγας αλλά, κυρίως, η γωνία κλίσης της. Τα βίντεο που προήλθαν από την οπίσθια κάμερα παρουσίαζαν δυσκολία στον υπολογισμό της κλίσης της φωτιάς και έτσι δεν χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση που έγινε με τον κώδικα. Τέλος, να σημειωθεί ότι στα πειράματα που εκτελέστηκαν υπό κλίση της κλίνης, η κάμερα στράφηκε κατά αντίστοιχη γωνία, προκειμένου να βρίσκεται πάντα παράλληλα με την επιφάνεια της κλίσης του καυσίμου.

Έπειτα από τη βιντεοσκόπηση του φαινομένου λαμβανόταν ένα σύνολο φωτογραφικών στιγμιότυπων από το βίντεο προκειμένου να αναλυθούν από τον κώδικα. Το βίντεο αποτελείται από 25 καρτέ (frames) το δευτερόλεπτο και επιλέχθηκε το βίντεο να αποκοπεί σε 5 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο, δηλαδή χρονικό βήμα ίσο με 0.2 sec, που θεωρήθηκε αρκετά επαρκές ώστε να αποκτηθεί αξιόπιστη πληροφορία για τη συνολική εικόνα εξέλιξης του φαινομένου (Σχήμα 4.5). Η εξαγωγή φωτογραφιών από το βίντεο έγινε με ρύθμιση στο πρόγραμμα αναπαραγωγής πολυμέσων VLC Media Player. Το πρόγραμμα αυτό επιλέχθηκε για την αποκοπή του βίντεο σε φωτογραφίες σε σχέση με άλλα εξαιτίας της δυνατότητας του να αποκόπτει το βίντεο σε πολλά καρτέ το δευτερόλεπτο και επομένως να παρέχει αρκετά μικρό χρονικό βήμα μελέτης του φαινομένου. Να σημειωθεί ότι το σύνολο φωτογραφικών στιγμιότυπων αφορά το χρονικό διάστημα από την έναυση της φλόγας ως τη στιγμή που το κεντρικό μέτωπο της φωτιάς φτάνει στο τέλος της κλίνης καυσίμου. Οι φωτογραφίες που λαμβάνονταν πριν την έναυση του φαινομένου και μετά το πέρας του διαγράφονταν προφανώς και δεν αναλύθηκαν.

Στη συνέχεια, πριν εισαχθούν και αναλυθούν οι εξαγόμενες φωτογραφίες από το βίντεο στον κώδικα έπρεπε πρώτα να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, ήταν απαραίτητη η περικοπή του μεγέθους και η χρωματική επεξεργασία της κάθε φωτογραφίας. Οι επεξεργασίες αυτές πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων IrfanView. Όσον αφορά το στάδιο της περικοπής, οι φωτογραφίες περικόπηκαν στα pixels που παρείχαν την απαραίτητη πληροφορία για το φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα, η περικοπή έγινε στο ύψους της κλίνης καυσίμου και περιλάμβανε όλο το μήκος της κλίνης καυσίμου και ύψος επαρκές ώστε να μην χάνεται η πληροφορία του ύψους της φλόγας (Σχήμα 4.6). Σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν απαραίτητη η περιστροφή των φωτογραφιών λίγες μοίρες ( $-1.25^\circ$  έως  $1.25^\circ$ ) προκειμένου να περιοριστεί η παρέκκλιση της κάμερας από το οριζόντιο επίπεδο, κάτι που οφειλόταν στην ασταθή ρύθμιση του τριπόδου στο οποίο τοποθετούνταν οι κάμερες. Να σημειωθεί ότι ως background τοποθετήθηκε ένας μαύρος πίνακας.

Σχετικά με την χρωματική επεξεργασία της φωτογραφίας, επιλέχθηκε ένας συνδυασμός ρυθμίσεων μετά από σειρά δοκιμών (Σχήμα 4.7). Ο σκοπός αυτών των ρυθμίσεων ήταν η βέλτιστη αναγνώριση του περιγράμματος και του σχήματος της φλόγας με βάση το επιλεγόμενο χρωματικό μοντέλο από τον κώδικα. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν τρεις κύριες ρυθμίσεις. Η πρώτη ρύθμιση αφορά τον κορεσμό (saturation) της φωτογραφίας που επιλέχθηκε με τιμή 255, η οποία αποτελεί και τη μέγιστη τιμή κορεσμού. Ο κορεσμός της εικόνας αφορά την πυκνότητα του χρώματος, δηλαδή το ποσοστό του λευκού που

περιέχεται μέσα στο χρώμα. Να σημειωθεί ότι τα γκρι χρώματα έχουν μηδενικό κορεσμό. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση του χρώματος της εικόνας μέσω της αλλαγής του κορεσμού της έδινε καλά αποτελέσματα. Η δεύτερη ρύθμιση ήταν η επιλογή του Median Filter με τιμή 9, η οποία αποτελεί και τη μέγιστη τιμή. Ο ρόλος του Median Filter είναι να θολώνει όλη την εικόνα εκτός από τις ακμές (edges). Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονταν τα όρια της φλόγας και θολωνόταν το εσωτερικό της, βοηθώντας τον κώδικα να αναγνωρίσει το περίγραμμα της φωτιάς. Η τρίτη ρύθμιση αφορά την επιλογή Replace Color. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το πορτοκαλί χρώμα του περιγράμματος της φωτιάς, που οφείλεται στη μειωμένη περιεκτικότητα σωματιδίων αιθάλης, να μετατραπεί σε μπλε προκειμένου ο κώδικας να μην το λάβει υπόψη στην ανάλυση. Τέλος, στα πειράματα 5 και 10 η φωτιά ξεπερνούσε τα όρια του μαύρου background και ο κώδικας αναγνώριζε ως φλόγα και τους άσπρους τοίχους και τα παράθυρα με φως που υπήρχαν στο βάθος. Αυτό αντιμετωπίστηκε με τη απομόνωση μιας φωτογραφίας που περιείχε μόνο το background (χωρίς ύπαρξη φλόγας), την αλλαγή του Brightness αυτής της φωτογραφίας στην τιμή -100 μέσω του IrfanView και τέλος την αφαίρεση όλων των υπόλοιπων φωτογραφιών που περιείχαν φλόγα με τη συγκεκριμένη φωτογραφία. Η τιμή -100 επιλέχθηκε με δοκιμές για την φωτεινότητα της φωτογραφίας προκειμένου τα εικονοστοιχεία που ανήκαν στο άσπρο background και περιείχαν φλόγα να μην χάνουν την πληροφορία της φωτιάς. Έτσι, μειωνόταν η ένταση των χρωμάτων του background και ο κώδικας δεν τα αναγνώριζε ως φλόγα.

Στα Σχήματα (4.5), (4.6), (4.7) φαίνεται καθαρά η σταδιακή διαδικασία επεξεργασίας μιας εξαγόμενης φωτογραφίας του βίντεο πριν εισαχθεί για ανάλυση στον κώδικα. Να σημειωθεί ότι οι φωτογραφίες περικόπτονται και επεξεργάζονται ταυτόχρονα όλες μαζί από το IrfanView και όχι μεμονωμένα.

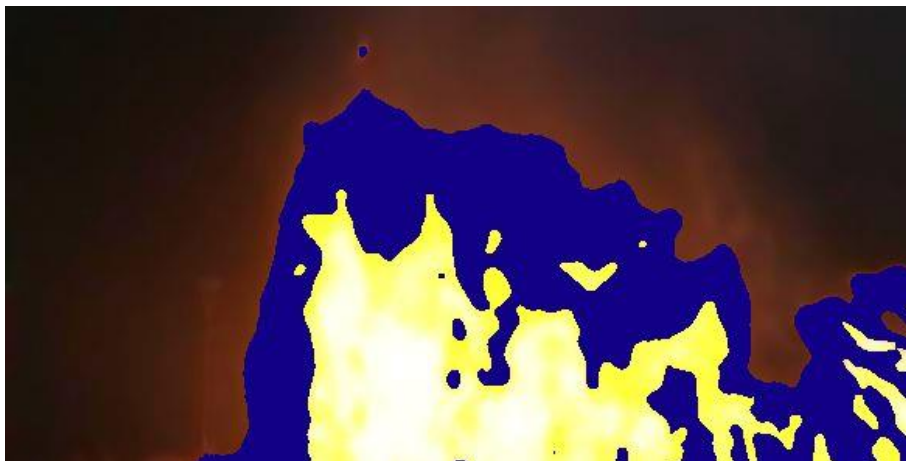


**Σχήμα 4.5** Στιγμιότυπο φωτογραφίας όπως δημιουργήθηκε από την αποκοπή του βίντεο σε φωτογραφικά στιγμιότυπα.





**Σχήμα 4.6** Περικοπτόμενη φωτογραφία ώστε να περιέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία προς εξέταση.



**Σχήμα 4.7** Χρωματικά επεξεργασμένη φωτογραφία που εισάγεται στον κώδικα προς ανάλυση.

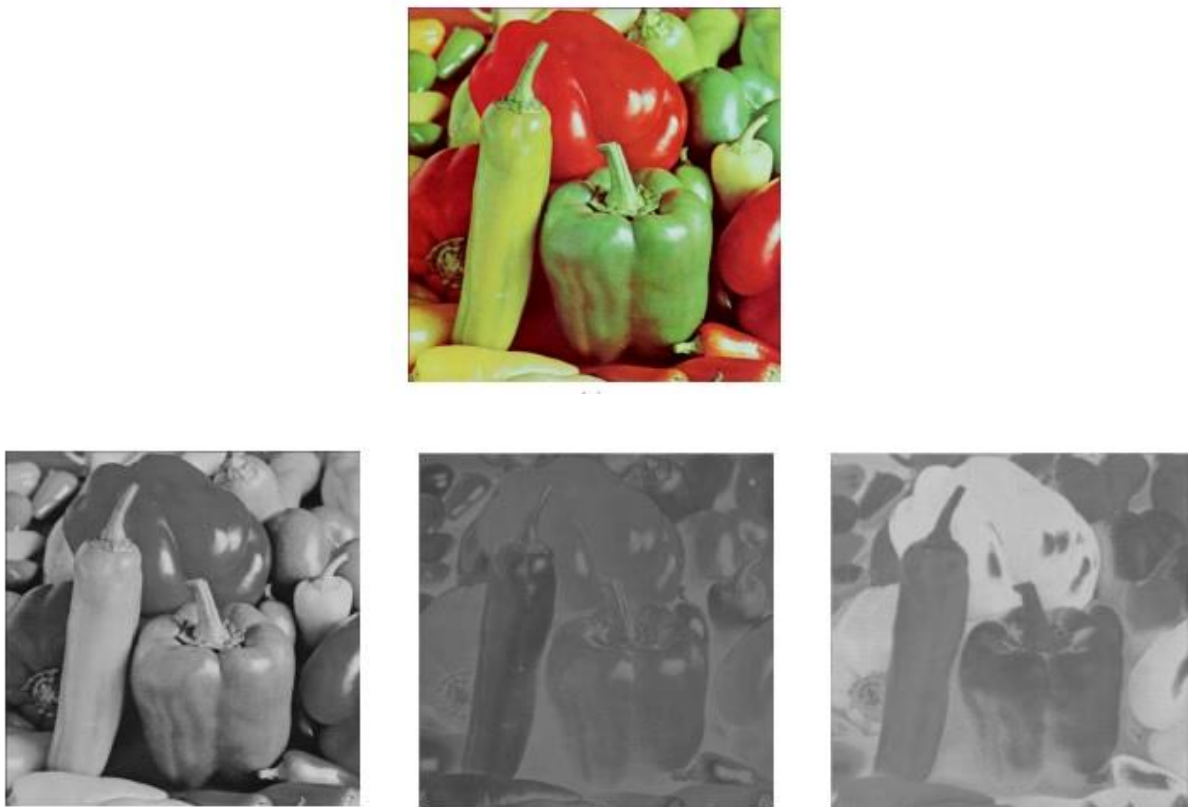
### 4.3.2 Χρωματικό Μοντέλο

Προκειμένου να αναγνωρίζει ο κώδικας την ύπαρξη ή όχι φλόγας από τη φωτογραφία έπρεπε να επιλεγεί χρωματικό μοντέλο. Γενικά, τα χρωματικά μοντέλα είναι μαθηματικά συστήματα περιγραφής και επικοινωνίας χρωμάτων, έτσι ώστε να γίνεται κατάλληλη η επεξεργασία τους από ψηφιακά μέσα. Η περιγραφή των χρωμάτων γίνεται με αριθμούς με τους οποίους συσχετίζονται τα χρώματα και το ίδιο χρώμα μπορεί να περιγραφεί με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το χρωματικό μοντέλο.

Τα χρωματικά μοντέλα παρέχουν ένα βασικό τρόπο να απομονώνεται ένα συγκεκριμένο χρώμα, ορίζοντας ένα 3D σύστημα συντεταγμένων, και ένα υποσύνολο που περιέχει όλα τα αναγνωρίσιμα χρώματα μέσα στο συγκεκριμένο μοντέλο. Κάθε χρώμα που μπορεί να αναγνωριστεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό σημείο μέσα στο υποσύνολο που ορίζει. Υπάρχουν διάφορα χρωματικά μοντέλα με τα κυριότερα να είναι το RGB και το CMYK. Ειδικά, το μοντέλο RGB χρησιμοποιείται ευρέως καθώς σχεδόν όλες οι κάμερες ορατού φάσματος διαθέτουν αισθητήρες που καταγράφουν το βίντεο σε μορφή RGB (Κόντης & Τσίγλας 2018).

Στην προκειμένη περίπτωση, η μεθοδολογία οπτικής ανίχνευσης της φωτιάς βασίστηκε στην ανίχνευση χρώματος με αναφορά στο μοντέλο YCbCr ή Y'CbCr. Το χρωματικό μοντέλο YCbCr ή Y'CbCr είναι ένα κριτήριο φωτεινότητας – χρώματος. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο δεν εκφράζει ένα χρώμα με τα προσθετικά βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και γαλάζιο (RGB), αλλά με άλλες ιδιότητες όπως το πρότυπο φωτεινότητας - χρώματος. Εδώ, τα κριτήρια είναι η βασική φωτεινότητα των χρωμάτων (από μαύρο, μέσω του γκρι, στο λευκό), τα χρώματα με την μέγιστη αναλογία (κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, γαλάζιο, ιώδες, ή άλλα καθαρά χρώματα που βρίσκονται μεταξύ τους) και ο κορεσμός των χρωμάτων (φανταχτερά σε χλωμά). Αυτό το χρωματικό πρότυπο βασίζεται στην ικανότητα του ματιού να αναγνωρίζει μικρές διαφορές στη φωτεινότητα καλύτερα παρά μικρές χρωματικές διαφορές και να τις αναγνωρίζει καλύτερα από μικρές διαφορές στον κορεσμό. Αυτό κάνει το γκρι κείμενο γραμμένο σε μαύρο υπόβαθρο ευανάγνωστο, αλλά το γαλάζιο κείμενο σε κόκκινο υπόβαθρο πολύ δυσανάγνωστο, ακόμα και με την ίδια βασική φωτεινότητα. Το χρωματικό αυτό μοντέλο αποτελείται από 3 συνιστώσες: τη φωτεινότητα Y και τις Cb, Cr που εκφράζουν τη χρωματική διαφορά ως προς το μπλε και το κόκκινο αντίστοιχα (Κόντης & Τσίγλας 2018).

Στο Σχήμα (4.8) παρουσιάζεται η αποδόμηση μιας εικόνας στις τρεις βασικές συνιστώσες του χρωματικού μοντέλου YCbCr.



**Σχήμα 4.8** Η αποσύνθεση της έγχρωμης ψηφιακής εικόνας (πάνω κέντρο) στις τρεις παραμέτρους του χρωματικού μοντέλου YCbCr: την Y (κάτω αριστερά), την Cb (κάτω κέντρο) και την Cr (κάτω δεξιά).

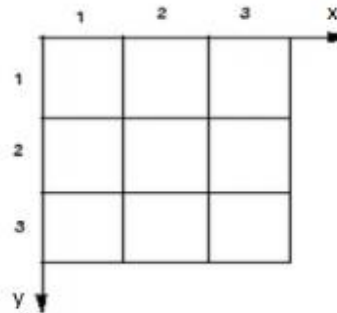
Θεωρώντας κανονικοποιημένες τις τιμές της εικόνας, ο μετασχηματισμός από RGB σε YCbCr πραγματοποιείται σύμφωνα με την Εξίσωση (4.1).

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.4811 & 128.553 & 24.966 \\ -37.797 & -74.303 & 112 \\ 112 & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

### 4.3.3 Λογισμικό MATLAB

Ο αλγόριθμος αναγνώρισης φλόγας και εξαγωγής αποτελεσμάτων γράφτηκε στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Η MATLAB είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για διαχείριση πινάκων και εφόσον οι εικόνες είναι ουσιαστικά αριθμητικοί πίνακες, πολλοί αλγόριθμοι όρασης είναι εφαρμόσιμοι στη MATLAB. Έτσι, η MATLAB είναι το πλέον εύχρηστο εργαλείο για την απεικόνιση και επεξεργασία των εικόνων. Η εικόνα (MxN) pixels απεικονίζεται στη MATLAB με έναν διδιάστατο πίνακα MxN στοιχείων.

Συχνά, η πιο βολική μέθοδος για την έκφραση της θέσης σε μια εικόνα είναι η χρήση των δεικτών των pixels. Η εικόνα ουσιαστικά αντιμετωπίζεται σαν ένα σύνολο από διακριτά στοιχεία, από πάνω προς τα κάτω και από τα αριστερά προς τα δεξιά (Σχήμα 4.9).

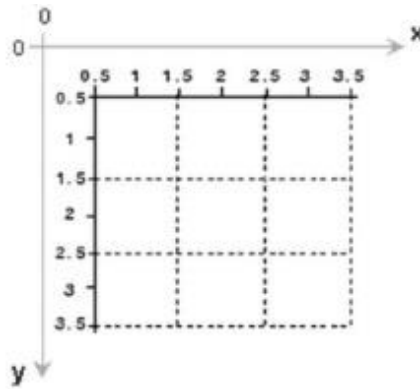


Σχήμα 4.9 Δείκτες των pixels.

Για τους δείκτες αυτούς, ο αριθμός της σειράς αυξάνει προς τα κάτω ενώ ο αριθμός της στήλης προς τα δεξιά. Οι δείκτες των pixels είναι ακέραιοι αριθμοί, και έχουν εύρος από 1 μέχρι τον αριθμό που υποδηλώνει τον αριθμό των σειρών/στηλών. Υπάρχει 1 προς 1 αντιστοίχιση μεταξύ των δεικτών των pixels και των δεικτών της MATLAB για τις δύο πρώτες διαστάσεις του πίνακα στη MATLAB. Χρησιμοποιείται πολύ απλή γραφή MATLAB την απεικόνιση των στοιχείων διαφορετικών pixels.

Κατά σύμβαση, η MATLAB χρησιμοποιεί ένα χωρικό σύστημα συντεταγμένων που αντιστοιχεί στους δείκτες των pixels της εικόνας. Αυτό ονομάζεται σύστημα φυσικών συντεταγμένων (Σχήμα 4.10). Είναι αξιοσημείωτο ότι το y μεγαλώνει προς τα κάτω καθώς ο προσανατολισμός είναι συναφής με τον τρόπο με τον οποίον συνήθως διαβάζεται η ψηφιακή εικόνα.

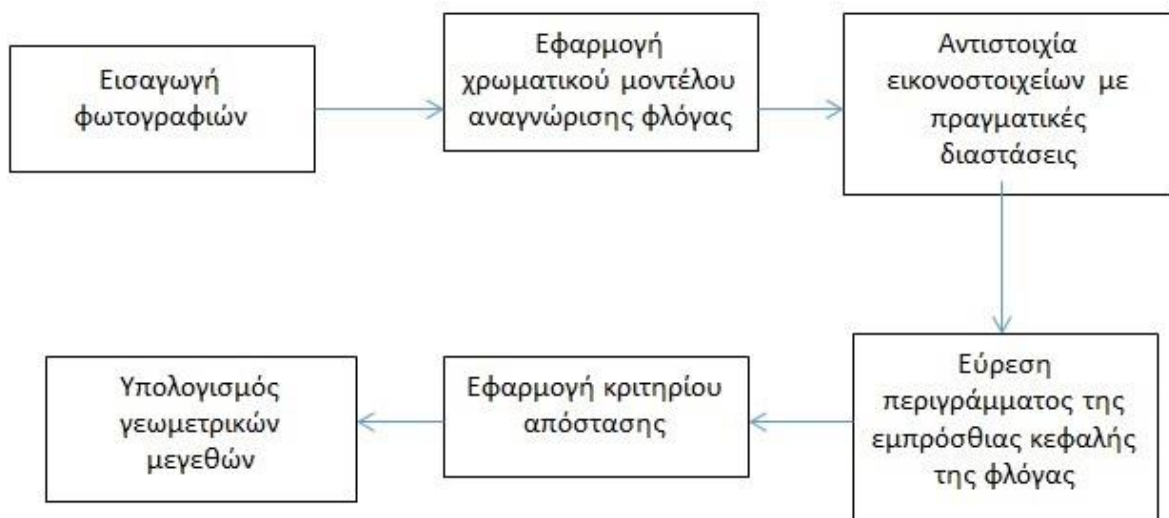




**Σχήμα 4.10** Απεικόνιση χωρικών συντεταγμένων.

#### 4.3.4 Αλγόριθμος Επεξεργασίας Εικόνας στο MATLAB

Με στόχο την ανίχνευση του περιγράμματος της φλόγας και την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων αναπτύχθηκε αλγόριθμος στη MATLAB, ο οποίος τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα στα επιθυμητά πειραματικά δεδομένα. Ο αλγόριθμος ακολουθεί μια σειρά βημάτων τα οποία φαίνονται συνοπτικά στο Σχήμα (4.11) και περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω. Να σημειωθεί ότι ολόκληρος ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα Α.



**4.11** Διάγραμμα ροής βασικών βημάτων αλγόριθμου επεξεργασίας εικόνας.

Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στη MATLAB από συγκεκριμένο φάκελο τόσο των αποκομμένων φωτογραφιών από το βίντεο και των περικομμένων φωτογραφιών στις κατάλληλες διαστάσεις, όσο και των χρωματικά επεξεργασμένων φωτογραφιών. Να σημειωθεί ότι η ανάλυση γίνεται μόνο στις χρωματικά επεξεργασμένες φωτογραφίες όπως περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3.1.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος διαβάζει το πλήθος των φωτογραφιών που πρόκειται να υποστούν επεξεργασία καθώς και τον αριθμό των pixels που περιέχει κάθε εικόνα. Να σημειωθεί ότι όλες οι εισαγόμενες εικόνες έχουν τον ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εφαρμόζει σε κάθε εικόνα το κριτήριο αναγνώρισης χρώματος, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα (4.3.2), προκειμένου να διακρίνει την ύπαρξη ή όχι φλόγας σε κάθε pixel της εικόνας. Ειδικότερα, το Image Processing Toolbox του MATLAB δίνει την δυνατότητα με την εντολή `Rgb2ycbcr` να αποδομήσει την εικόνα στα συστατικά της βασικής φωτεινότητας (Y), του δείκτη Cb και του δείκτη Cr. Επομένως, για το ίδιο εικονοστοιχείο εφόσον η τιμή της βασικής φωτεινότητας του (Y) είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή του δείκτη Cb τότε ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται την ύπαρξη φλόγας. Συνεπώς, δημιουργείται ένας νέος πίνακας αντίστοιχος σε μέγεθος με τον πίνακα που αντιστοιχεί στα pixel της εικόνας. Αυτός ο πίνακας γεμίζει με τιμές 0, εφόσον το χρωματικό κριτήριο δεν αναγνωρίζει φλόγα, και τιμές 255 εφόσον το χρωματικό κριτήριο αναγνωρίζει pixel που περιέχουν πληροφορία φλόγας.

Έπειτα, ορίζεται η αντιστοιχία των pixels κάθε εικόνας με τις πραγματικές διαστάσεις που αναλογούν με σύστημα αναφοράς ενός κανόνα συνολικού μήκους 1 m τοποθετημένου στο κέντρο της κλίνης και τίθενται οι μέγιστες αποστάσεις κατά  $x$  και  $y$ . Επίσης, πραγματοποιείται αλλαγή συστήματος συντεταγμένων. Από το σύστημα φυσικών συντεταγμένων της MATLAB (όπως ορίστηκε στην Ενότητα 4.3.3), ο κώδικας μεταφέρει τη αρχή των αξόνων στο κάτω δεξιά σημείο της φωτογραφίας και το  $y$  αυξάνεται προς τα πάνω, ενώ το  $x$  αυξάνεται προς τα αριστερά. Να σημειωθεί ότι η απόσταση στον  $x$  άξονα είναι σχετική και δεν αντιστοιχεί στο σταθερό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων της κλίνης καυσίμου. Επίσης, να σημειωθεί ότι η κατώτατη απόσταση στον άξονα  $y$  ισοδυναμεί με το ύψος της κλίνης καυσίμου που μετρήθηκε στα πειράματα εφόσον σε αυτό το ύψος περικόπτεται η φωτογραφία.

Έπειτα, ο κώδικας διατρέχει τον παραπάνω πίνακα ανά γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω και μόλις εντοπίζει το πρώτο pixel που περιέχει πληροφορία φωτιάς αποθηκεύει τις συντεταγμένες του, αλλάζει γραμμή και επαναλαμβάνει τη διαδικασία. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται μόνο το περίγραμμα του εμπρόσθιου κεντρικού μετώπου της φλόγας και παραλείπεται όλη η υπόλοιπη πληροφορία φωτιάς (Σχήμα 4.12). Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται δύο αντικειμενικές δυσκολίες. Αρχικά, ο κώδικας περιλάμβανε ως περίγραμμα του εμπρόσθιου κεντρικού μετώπου και τους αυτόνομους «θύσανούς» φωτιάς που βρίσκονταν εξωτερικά και προπορεύονταν σε σχέση με το υπόλοιπο περίγραμμα του κεντρικού μετώπου. Επίσης, ο κώδικας θεωρούσε ως περίγραμμα του εμπρόσθιου κεντρικού μετώπου και πληροφορία που προερχόταν από τα πλευρά της φωτιάς και όχι μόνο από την εμπρόσθια κεφαλή (Σχήμα 4.13). Προκειμένου να αντιμετωπιστούν όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα αυτές οι δυσκολίες ορίστηκε ένα κριτήριο απόστασης. Ειδικότερα, μόλις παρουσιαζόταν ανωμαλία στο εμπρόσθιο περίγραμμα, τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα, στον οποίο αποθηκευόταν η πληροφορία της θέσης των pixel του εμπρόσθιου περιγράμματος, παρουσίαζαν μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τη θέση των προηγούμενων τους. Αντίθετα, αν δεν παρουσιαζόταν κάποια από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις η απόσταση κάθε σημείου σε σχέση με τα γειτονικά του ήταν αρκετά μικρή. Έτσι, επιλέχθηκε ένα κριτήριο απόστασης μεταξύ γειτονικών σημείων και με δοκιμές αποδείχθηκε ότι εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα, δηλαδή παραλείπει τους θύσανούς φωτιάς που προπορεύονται του περιγράμματος της εμπρόσθιας κεφαλής ή κόβει την πληροφορία φωτιάς των pixel που βρίσκονται στα πλάγια της φωτιάς. Το κριτήριο απόστασης ορίστηκε μέσω της Εξίσωσης (4.2), όπου  $(y_1, x_1)$  και  $(y_2, x_2)$  είναι οι συντεταγμένες 2 διαδοχικών σημείων. Εφόσον ικανοποιείται αυτό το κριτήριο τότε σημαίνει ότι το εμπρόσθιο περίγραμμα της κεφαλής διαγράφεται σωστά.

$$0.8875 < (y_2 \cdot x_1)/(y_1 \cdot x_2) < 1.25 \quad (4.2)$$

Επομένως, αφού βρεθεί το τελικό εμπρόσθιο περίγραμμα εξάγεται το ύψος της φλόγας ( $h_f$ ) σε κάθε στιγμιότυπο, που ισοδυναμεί με την κατακόρυφη απόσταση από το κατώτατο ως το ανώτατο σημείο του περιγράμματος.

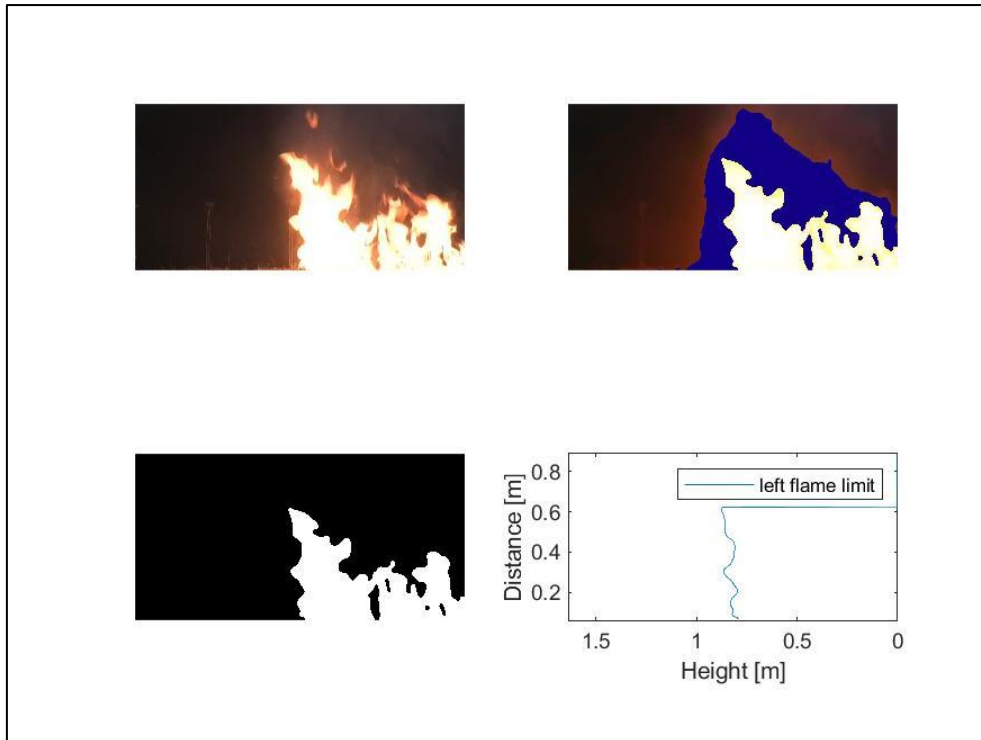
Η γωνία της φλόγας (A) θεωρείται ο μέσος όρος της γωνίας κλίσης όλων των ευθειών που σχηματίζει κάθε σημείο του εμπρόσθιου περιγράμματος με το κατώτατο σημείο του περιγράμματος. Να σημειωθεί ότι η γωνία της φλόγας, όπως ορίστηκε στην Ενότητα (2.4.3), δεν ταυτίζεται με το μέγεθος της γωνίας όπως υπολογίζεται από τον κώδικα καθώς δεν είναι γνωστό το βάθος της ενεργής ζώνης καύσης D. Ωστόσο, από παρατηρήσεις που έγιναν στο βίντεο της οπίσθιας κάμερας, διαπιστώθηκε ότι η παραδοχή να θεωρηθεί το μέτωπο της φωτιάς σαν ένα λεπτό φύλλο φλόγας είναι αρκετά αξιόπιστη. Έπειτα η γωνία κλίσης της φλόγας  $A_T$  προσδιορίζεται ως συμπληρωματική της γωνίας φλόγας A.

Το μήκος της φλόγας (L) υπολογίζεται γεωμετρικά, εφόσον είναι γνωστά το ύψος και η γωνία κλίσης της φλόγας, μέσω του Πυθαγορείου θεωρήματος. Να σημειωθεί ότι το μήκος φλόγας, όπως ορίστηκε στην Ενότητα (2.4.3), δεν ταυτίζεται με το μέγεθος που υπολογίζει ο αλγόριθμος καθώς δεν είναι γνωστό το βάθος της ενεργής περιοχής καύσης D. Ωστόσο, από παρατηρήσεις που έγιναν στο βίντεο της οπίσθιας κάμερας διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος D είναι πολύ μικρό και η παραδοχή ότι το εμπρόσθιο περίγραμμα της φωτιάς λαμβάνεται για την υπολογισμό του μήκους της φλόγας είναι αρκετά αξιόπιστη.

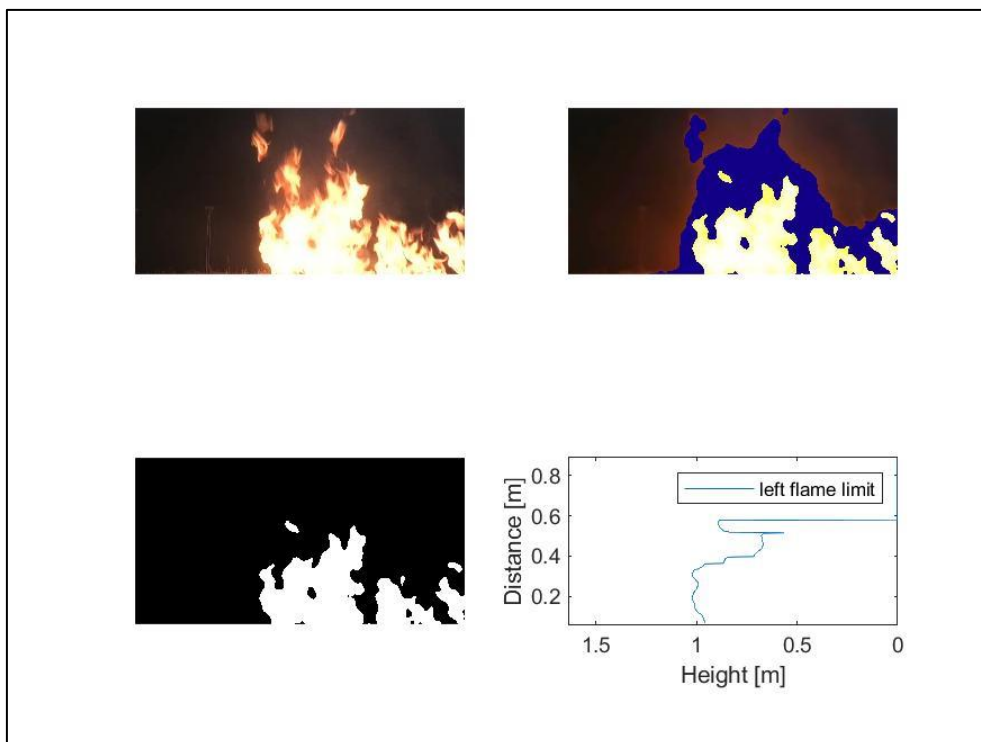
Ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς (r) υπολογίζεται ως η διαφορά της θέσης κάθε δύο διαδοχικών κατώτατων σημείων του περιγράμματος της φλόγας διαιρεμένης με το χρονικό βήμα.

Ειδικά για τις περιπτώσεις των πειραμάτων που αφορούσαν μη μηδενική κλίση αρχικά βρισκόταν η κατακόρυφη απόσταση του ανώτερου με το κατώτατο σημείο φωτιάς. Να σημειωθεί ότι αυτή η απόσταση δεν αποτελεί το ύψος της φλόγας όταν επικρατούν συνθήκες μη μηδενικής κλίσης (Σχήμα 2.7). Επίσης, να σημειωθεί ότι με τον τρόπο που είχε τοποθετηθεί η κάμερα παρακολουθούσε τη φωτιά να διαδίδεται οριζόντια και όχι υπό κλίση. Στη συνέχεια βρισκόταν η γωνία κλίσης της φλόγας, όπως περιγράφηκε παραπάνω για τις συνθήκες μηδενικής κλίσης, και στη συνέχεια με γεωμετρικές σχέσεις προσδιοριζόταν το μήκος και τέλος το ύψος της φλόγας.

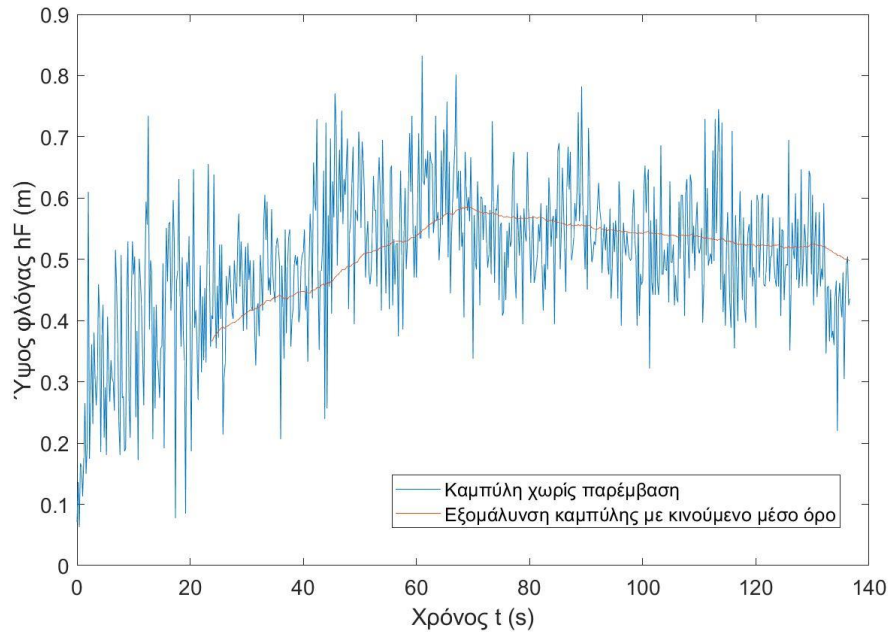
Τέλος, να σημειωθεί ότι τα γραφήματα των τελικών αποτελεσμάτων (L-t,  $h_f$ -t,  $A_T$ -t, r-t) παρουσίαζαν αρκετό θόρυβο και έντονες αυξομειώσεις σε γειτονικά χρονικά διαστήματα λόγω της έντονης τύρβης που παρουσιάζει το φαινόμενο. Προκειμένου να αμβλυνθούν αυτές οι τυχαίες αποκλίσεις επιλέχτηκε η μέθοδος του απλού κινούμενου μέσου όρου (simple moving average) με την πληροφορία να λαμβάνεται από 120 συνολικά σημεία με την ίδια βαρύτητα (το σημείο ενδιαφέροντος και τα 119 προηγούμενα του) (Σχήμα 4.14).



**Σχήμα 4.12** Αποτελέσματα του αλγορίθμου σε ένα τυχαίο στιγμιότυπο. Πάνω αριστερά φαίνεται η περικομμένη φωτογραφία και πάνω δεξιά η χρωματικά επεξεργασμένη φωτογραφία. Κάτω αριστερά βρίσκεται η φωτογραφία που έχει δημιουργηθεί με το κριτήριο του χρωματικού μοντέλου και κάτω δεξιά αποτυπώνεται το περίγραμμα της εμπρόσθιας κεφαλής.



**Σχήμα 4.13** Αποτέλεσμα στιγμιότυπου εξαγόμενο από τον αλγόριθμο κατά το οποίο ο αλγόριθμος λαμβάνει ως πληροφορία περιγράμματος της εμπρόσθιας κεφαλής τόσο το θύσανό φωτιάς όσο και πληροφορία από τα πλευρά της φωτιάς. Αυτή η ανωμαλία επιλύθηκε με το κριτήριο απόστασης.



**Σχήμα 4.14** Καμπύλη με θόρυβο και εξομαλυμένη καμπύλη με τη τεχνική του κινούμενου μέσου όρου.

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### 5.1 Παραμετρικές Μελέτες

Τα πειράματα διεξήχθησαν στην πειραματική εγκατάσταση στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο του 2021. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 10 πειραματικές δοκιμές στο διάστημα αυτό. Οι παράγοντες που μεταβάλλονταν ήταν η γωνία κλίσης της κλίνης καυσίμου (0, 10, 20, 30 μοίρες), η ποσότητα καυσίμου (0.5, 1 kg/m<sup>2</sup>) και η περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου (1%, 8%). Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα ήταν υπολείμματα πεύκου επιστημονικής ονομασίας *Pinus halepensis* και ειδικότερα πευκοβελόνες οι οποίες συλλέχθηκαν σε διάφορα σημεία της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου σε διαφορετικές περιόδους του χρόνου. Από δείγμα 100 πευκοβελόνων μετρήθηκε η πυκνότητα του καυσίμου και η αναλογία επιφάνειας προς όγκου ενός στοιχείου πευκοβελόνας με μέση τιμή  $\rho_v = 826.71 (\pm 224.25) \text{ kg/m}^3$  και  $\sigma = 7446.78 (\pm 726.78) \text{ m}^{-1}$ , αντίστοιχα. Τέλος, με τη χρήση θερμιδόμετρου υπολογίστηκε η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου με τιμή  $H_u = 19174 \text{ kJ/kg}$ . Η αρχική ανάφλεξη ήταν σημειακή, στο σημείο (x, y, z) = (0, 0, 0), με χρήση καυστήρα βουτανίου. Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά κάθε πειράματος παρουσιάζονται στον Πίνακα (5.1).

Πίνακας 5.1 Αρίθμηση και χαρακτηριστικά πειραμάτων.

A/A	Κλίση κλίνης (μοίρες)	Πυροθερμικό φορτίο (kg/m <sup>2</sup> )	Περιεχόμενη υγρασία (%)	Κωδική ονομασία πειράματος
1	0	0.5	1	S0-FLO_5-FM1 (A)
2	0	0.5	1	S0-FLO_5-FM1 (B)
3	0	0.5	1	S0-FLO_5-FM1 (C)
4	0	1	1	S0-FL1-FM1
5	0	0.5	8	S0-FLO_5-FM8
6	10	0.5	8	S10-FLO_5-FM8
7	20	0.5	8	S20-FLO_5-FM8 (A)
8	20	0.5	8	S20-FLO_5-FM8 (B)
9	20	0.5	8	S20-FLO_5-FM8 (C)
10	30	0.5	8	S30-FLO_5-FM8

Να σημειωθεί ότι η ρύθμιση της γωνίας κλίσης της κλίνης καυσίμου πραγματοποιούνταν μηχανικά αξιοποιώντας το βαθμό ελευθερίας περιστροφής ως προς τον άξονα γ της εγκατάστασης και η ακρίβεια της τιμής της κλίσης ελεγχόταν με ψηφιακό μετρητή κλίσης.

Όσον αφορά την ποσότητα του καυσίμου, πραγματοποιούνταν μέτρηση με ψηφιακή ζυγαριά πριν τοποθετηθεί πάνω στην κλίνη η εξεταζόμενη ποσότητα. Να επισημανθεί ότι το καύσιμο δεν απλωνόταν σε όλη την επιφάνεια της κλίνης καυσίμου που ισοδυναμούσε με 4m<sup>2</sup>, αλλά σε επιφάνεια κλίνης που κυμαινόταν από 2.64m<sup>2</sup> έως 2.8875m<sup>2</sup> αναλόγως το πείραμα.

Επίσης, η περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου επί υγρής βάσης (wet basis) μετριόνταν πριν την έναρξη του κάθε πειράματος. Τα καύσιμα με 1% περιεχόμενη υγρασία είχαν παραμείνει σε φούρνο στους 105°C για 24 ώρες ενώ τα καύσιμα με 8%, αφού συλλέχθηκαν, αποθηκεύτηκαν για επαρκή χρονικό διάστημα έτσι ώστε να εξισορροπηθεί η φυσική τους υγρασία. Όλο το καύσιμο αποθηκευόταν σε ειδικά σφραγισμένα βαρέλια προκειμένου να μην αλληλεπιδρά με το εξωτερικό περιβάλλον. Για τη μέτρηση της υγρασίας χρησιμοποιούνταν συσκευή μέτρησης υγρασίας της εταιρείας Mettler Toledo και μοντέλου MJ33 και λαμβάνονταν 9 δείγματα από κάθε βαρέλι σε διαφορετικά σημεία του. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονταν τρία δείγματα στην πάνω πλευρά, 3 δείγματα στο κέντρο και 3 δείγματα στον πάτο του βαρελιού. Έτσι, υπολογιζόταν ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση της υγρασίας του καυσίμου κάθε βαρελιού και επιβεβαιωνόταν ότι η περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου βρίσκεται στα επιθυμητά όρια.

Τέλος, να σημειωθεί ότι δεν εξετάστηκε η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στη συμπεριφορά της φωτιάς. Η πειραματική εγκατάσταση δεν ήταν τοποθετημένη σε αεροσήραγγα, ούτε υπήρξε η δυνατότητα τοποθέτησης συσκευών πάνω στην κλίνη καυσίμου, όπως ανεμιστήρες, προκειμένου να δημιουργηθεί η επιθυμητή ροή αέρα. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων έκλειναν όλες οι πόρτες και τα παράθυρα του εργαστηρίου προκειμένου να μη δημιουργούνται ρεύματα αέρα και επηρεάσουν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών.

Στιγμιότυπα που τραβήχτηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα (5.1) και (5.2).



**Σχήμα 5.1** Στιγμιότυπα της φωτιάς κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αριστερά από το Πείραμα 4 (S0-FL1-FM1) και δεξιά από το Πείραμα 6 (S10-FLO\_5-FM8).





**Σχήμα 5.2** Στιγμιότυπα της φωτιάς κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αριστερά από το Πείραμα 9 (S20-FLO\_5-FM8 (C)) και δεξιά από το Πείραμα 10 (S30-FLO\_5-FM8).

Καταληκτικά, μετά το πέρας κάθε πειράματος συλλέγονταν και ζυγίζονταν τα υπολείμματα της καύσης (κυρίως στάχτη και άκαυστα), ενώ η κλίνη καυσίμου καθαριζόταν προσεχτικά και αφηνόταν να ψυχθεί φυσικά μέχρι την υλοποίηση του επόμενου πειράματος.

### 5.1.1 Σφάλματα Τεχνικών Μετρήσεων

Ως πειραματικό σφάλμα μέτρησης ορίζεται η διαφορά της πραγματικής τιμής της μεταβλητής και της μετρούμενης τιμής. Επειδή η πραγματική τιμή δεν είναι ποτέ γνωστή, βρίσκεται το πιθανό σφάλμα μέτρησης με βάση κάποιες συγκεκριμένες υποθέσεις, το οποίο ονομάζεται αβεβαιότητα. Υπάρχουν δύο είδη σφαλμάτων, το συστηματικό και το τυχαίο.

Το συστηματικό σφάλμα ( $B_T$ ) είναι το σφάλμα που οφείλεται σε συστηματικές μεταβολές. Τα συστηματικά σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε περιορισμούς στην ακρίβεια του οργάνου, στη κακή βαθμονόμηση και τη λανθασμένη χρήση των οργάνων, και στο υποκειμενικό σφάλμα του παρατηρητή. Τα συστηματικά σφάλματα τείνουν να μετατοπίσουν όλες τις μετρήσεις με συστηματικό τρόπο έτσι ώστε η μέση τιμή να είναι μετατοπισμένη προς μία διεύθυνση.

Το τυχαίο σφάλμα ( $S_T$ ) είναι το οφειλόμενο σε τυχαίες μεταβολές, ποικίλλει από μέτρηση σε μέτρηση και εκτιμάται από στατιστικές μεθόδους. Τα τυχαία σφάλματα δείχνουν τις διακυμάνσεις που έχουν οι μετρήσεις ενός επαναλαμβανόμενου πειράματος που γίνεται κάτω από τις ίδιες φαινομενικά συνθήκες και τα οποία οδηγούν στην κατανομή των αποτελεσμάτων γύρω από μία μέση τιμή. Μπορεί να οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή στον παρατηρητή (σφάλματα ανάγνωσης), στον εξωτερικό θόρυβο, στις διαταραχές που επιδρούν σε μικρά και ακανόνιστα διαστήματα και στις διακυμάνσεις των πειραματικών συνθηκών (π.χ. λόγω χρονικής μεταβολής των τιμών των εξωτερικών μεταβλητών).



Από τα παραπάνω φαίνεται ότι σε μία μέτρηση μπορεί να συνυπάρχουν συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα είτε εκτιμώνται κατά τη μέτρηση, είτε θεωρούνται δεδομένα (π.χ. το συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης). Τα τυχαία σφάλματα είναι δυνατόν να εκτιμηθούν, μόνο αν γίνουν επανειλημμένες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους και κάτω από κατά το δυνατόν αμετάβλητες πειραματικές συνθήκες (Σιμόπουλος 1989).

Το μοντέλο που επιλέχθηκε προκειμένου να υπολογιστούν οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις των οργάνων είναι το μοντέλο 95 (ASME 1997) που διέπεται από την Εξίσωση (5.1), όπου  $U_{95}$  η συνολική αβεβαιότητα για διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Η μέθοδος αυτή είναι αξιόπιστη και χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για βαθμούς ελευθερίας  $\geq 30$ .

$$U_{95} = \pm 2 \cdot \left[ \left( \frac{B_T}{2} \right)^2 + S_T^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Δεδομένου ότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών παρουσίαζαν διακυμάνσεις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του τυχαίου σφάλματος (Εξίσωση 5.2). Τα τυχαία σφάλματα μετρήσεων οφείλονται κυρίως στον τυρβώδη χαρακτήρα της φωτιάς και υπολογίζονται από την Εξίσωση (5.2), όπου  $\sigma_\chi$  η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής. Επιλέγεται το εύρος  $2\sigma_\chi$  διότι αντιστοιχεί στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% που έχει επιλεγεί για την ανάλυση σφαλμάτων.

$$S_T = 2 \cdot \sigma_\chi \quad (5.2)$$

Το μέγεθος  $\sigma_\chi$  προσδιορίζεται από την Εξίσωση (5.3), όπου  $s$  η τυπική απόκλιση,  $N$  το μέγεθος του δείγματος.

$$\sigma_\chi = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5.3)$$

Στην παρούσα εργασία μπορούν να εντοπιστούν διάφορα σφάλματα που έγιναν τόσο κατά την προεργασία των πειραμάτων όσο και κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αρχικά, σε κάθε πείραμα γινόταν προσπάθεια να τηρηθούν συνθήκες ομοιομορφίας στη τοποθέτηση του καυσίμου πάνω στην κλίνη. Ωστόσο, σε ορισμένα σημεία της κλίνης, λόγω της τυχειότητας του απλώματος των πευκοβελόνων πάνω της, παρατηρούνταν υψηλότερο ύψος της κλίνης καυσίμου και σε άλλα (κυρίως στα πλάγια) χαμηλότερο ύψος κλίνης καυσίμου. Επίσης, μια πηγή σφάλματος αποτελούσε η περικοπή της φωτογραφίας στο ύψος της κλίνης, όπου κάποιες φορές χανόταν η ακρίβεια καθώς το ύψος της κλίνης δεν ήταν ομοιόμορφο σε όλο το μήκος της κλίνης καυσίμου. Επίσης, κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων με τον αλγόριθμο ανίχνευσης φωτιάς, το κριτήριο της απόστασης που αμελούσε τους αυτόνομους θύσανους φλόγας και την πληροφορία ύπαρξης φλόγας από τα πλάγια της φωτιάς δεν είχε πλήρη αποτελεσματικότητα και σε ελάχιστες περιπτώσεις υποεκτιμούσε ή υπερεκτιμούσε το ύψος της φλόγας. Επιπρόσθετα, κατά την εξαγωγή των γεωμετρικών μεγεθών η γωνία κλίσης και το μήκος της φλόγας δεν υπολογίζονταν στο μέσο της ενεργής περιοχής καύσης, όπως ορίζονται κανονικά, αλλά στο εμπρόσθιο περίγραμμα της φωτιάς χάνοντας έτσι την ακρίβεια τους. Αυτά αποτελούν κυρίως

συστηματικά σφάλματα τα οποία είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Ως συστηματικό σφάλμα του ύψους της φλόγας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η διακριτική ικανότητα των εικονοστοιχείων της φωτογραφίας και ως συστηματικό σφάλμα του χρόνου η διακριτική ικανότητα της συχνότητας δειγματοληψίας φωτογραφιών από το βίντεο. Για τα μεγέθη της γωνίας κλίσης, του μήκους και του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας τόσο τα μεγέθη τους, όπως υπολογίζονται από τον αλγόριθμο ανίχνευσης φλόγας, όσο και τα ολικά σφάλματα υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (5.4) έως (5.9), όπου  $U_{A_T}$  η συνολική αβεβαιότητα της γωνίας κλίσης,  $U_x$ ,  $U_y$  η συνολική αβεβαιότητα του χωρικού βήματος κατά x και y αντίστοιχα (θεωρήθηκε  $U_x=U_y$  και ίση με τη διακριτική ικανότητα του εικονοστοιχείου της φωτογραφίας),  $U_L$  η συνολική αβεβαιότητα του μήκους της φλόγας,  $U_{h_F}$  η συνολική αβεβαιότητα του ύψους της φλόγας,  $U_r$  η συνολική αβεβαιότητα του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας και  $U_t$  η συνολική αβεβαιότητα του χρόνου ίση με την τιμή 0.04 s.

$$A_T = \tan^{-1} \frac{dy}{dx} \quad (5.4)$$

$$U_{A_T} = \left[ \left( \frac{\partial A_T}{\partial dx} \cdot U_x \right)^2 + \left( \frac{\partial A_T}{\partial dy} \cdot U_y \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

$$L = \frac{h_F}{\cos A_T} \quad (5.6)$$

$$U_L = \left[ \left( \frac{\partial L}{\partial A_T} \cdot U_{A_T} \right)^2 + \left( \frac{\partial L}{\partial h_F} \cdot U_{h_F} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

$$r = \frac{dx}{dt} \quad (5.8)$$

$$U_r = \left[ \left( \frac{\partial r}{\partial dx} \cdot U_x \right)^2 + \left( \frac{\partial r}{\partial dt} \cdot U_t \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

Τα τυχαία σφάλματα μετρήσεων οφείλονται κυρίως στον τυρβώδη χαρακτήρα της φωτιάς και υπολογίζονται από την Εξίσωση (5.2). Τα συστηματικά σφάλματα υπολογίζονται από μετασχηματισμό της Εξίσωσης (5.1) εφόσον υπολογίστηκαν τα ολικά και τυχαία σφάλματα.

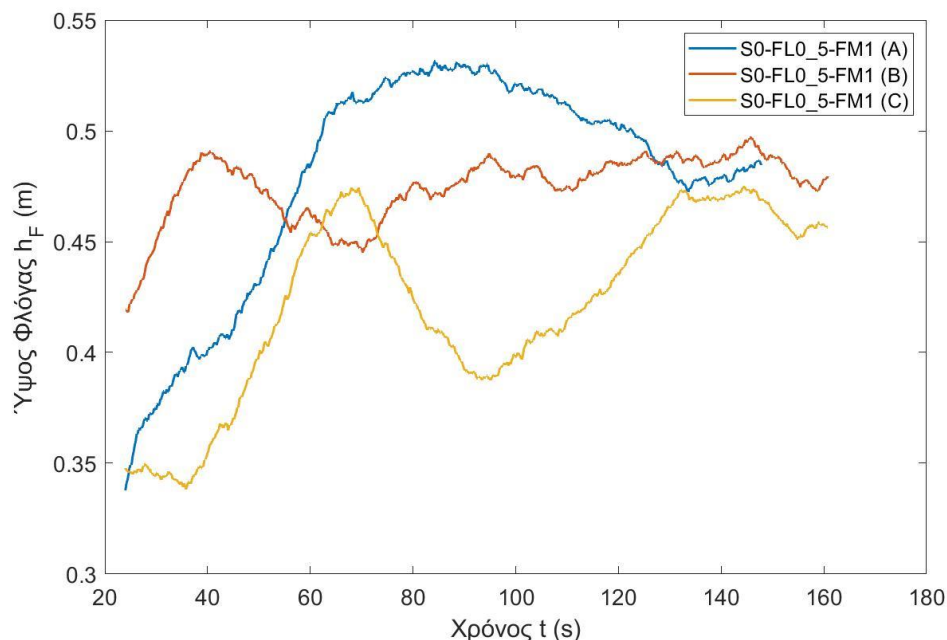
Πίνακας 5.1 Καταγραφή των αβεβαιοτήτων των πειραματικών μετρήσεων.

Πείραμα	Μέγεθος	Μέση τιμή	Συστηματικό Σφάλμα	Τυχαίο σφάλμα	Ολικό σφάλμα
<b>S0-FLO_5-FM1 (A)</b>	$h_F$ (m)	0.4649	$2.8925 \cdot 10^{-3}$	$8.4329 \cdot 10^{-3}$	0.01711
	L (m)	0.4675	$9.5571 \cdot 10^{-3}$	$8.4770 \cdot 10^{-3}$	0.01945
	$A_T$ (μοίρες)	-1.618	0.5200	0.4380	0.7071
	r (m/s)	0.0102	0.010	$3.7569 \cdot 10^{-3}$	0.01474
<b>S0-FLO_5-FM1 (B)</b>	$h_F$ (m)	0.4680	$2.6373 \cdot 10^{-3}$	$6.2384 \cdot 10^{-3}$	0.01275
	L (m)	0.4719	$3.8051 \cdot 10^{-3}$	$6.2313 \cdot 10^{-3}$	0.01303
	$A_T$ (μοίρες)	0.4674	0.8400	0.5497	0.7071
	r (m/s)	0.0097	0.01100	$3.8276 \cdot 10^{-3}$	0.01344
<b>S0-FLO_5-FM1 (C)</b>	$h_F$ (m)	0.4191	$3.0654 \cdot 10^{-3}$	$6.6120 \cdot 10^{-3}$	0.013575
	L (m)	0.4239	0.02367	$6.6543 \cdot 10^{-3}$	0.02716
	$A_T$ (μοίρες)	-4.2505	0.7800	0.5255	0.7071
	r (m/s)	0.0084	0.0142	$3.2566 \cdot 10^{-3}$	0.01563
<b>S0-FL1-FM1</b>	$h_F$ (m)	0.6278	$3.7640 \cdot 10^{-3}$	0.01261	0.02549
	L (m)	0.6353	0.01602	0.01249	0.02968
	$A_T$ (μοίρες)	1.9582	1.2997	0.7398	0.7071
	r (m/s)	0.0136	$3.1602 \cdot 10^{-3}$	$9.4646 \cdot 10^{-3}$	0.01919
<b>S0-FLO_5-FM8</b>	$h_F$ (m)	0.2976	$2.9497 \cdot 10^{-3}$	$3.6660 \cdot 10^{-3}$	0.007892
	L (m)	0.3009	0.01105	$3.6870 \cdot 10^{-3}$	0.013286
	$A_T$ (μοίρες)	-2.9018	0.4989	0.4327	0.7071
	r (m/s)	0.005	0.0014	$2.6576 \cdot 10^{-3}$	0.015037
<b>S10-FLO_5-FM8</b>	$h_F$ (m)	0.2812	$3.3500 \cdot 10^{-3}$	$4.1484 \cdot 10^{-3}$	0.008947
	L (m)	0.2853	0.012117	$4.1617 \cdot 10^{-3}$	0.0147
	$A_T$ (μοίρες)	3.348	1.00619	0.6149	0.7071
	r (m/s)	0.007	0.014695	$4.3545 \cdot 10^{-3}$	0.017082
<b>S20-FLO_5-FM8 (A)</b>	$h_F$ (m)	0.2953	$4.500 \cdot 10^{-3}$	$5.1519 \cdot 10^{-3}$	0.01124
	L (m)	0.2996	0.017826	$5.0822 \cdot 10^{-3}$	0.02052
	$A_T$ (μοίρες)	-2.8857	1.1885	0.6915	0.7071
	r (m/s)	0.0082	0.02052	$5.1330 \cdot 10^{-3}$	0.02294
<b>S20-FLO_5-FM8 (B)</b>	$h_F$ (m)	0.3339	$4.1400 \cdot 10^{-3}$	$6.4395 \cdot 10^{-3}$	0.013528
	L (m)	0.3430	0.02579	$7.0907 \cdot 10^{-3}$	0.02936
	$A_T$ (μοίρες)	6.2517	1.3633	0.7679	0.7071
	r (m/s)	0.0094	0.017099	$6.1907 \cdot 10^{-3}$	0.02111
<b>S20-FLO_5-FM8 (C)</b>	$h_F$ (m)	0.3518	$3.8300 \cdot 10^{-3}$	$6.1982 \cdot 10^{-3}$	0.01297
	L (m)	0.3669	0.027267	$6.3026 \cdot 10^{-3}$	0.03004
	$A_T$ (μοίρες)	6.1728	0.7683	0.5221	0.7071
	r (m/s)	0.0101	0.017017	$4.7735 \cdot 10^{-3}$	0.019529
<b>S30-FLO_5-FM8</b>	$h_F$ (m)	0.4778	$4.100 \cdot 10^{-3}$	$9.7233 \cdot 10^{-3}$	0.019875
	L (m)	0.4919	0.01380	$9.7661 \cdot 10^{-3}$	0.02392
	$A_T$ (μοίρες)	10.5120	2.4693	1.2843	0.7071
	r (m/s)	0.0151	0.01100	0.01181	0.02090

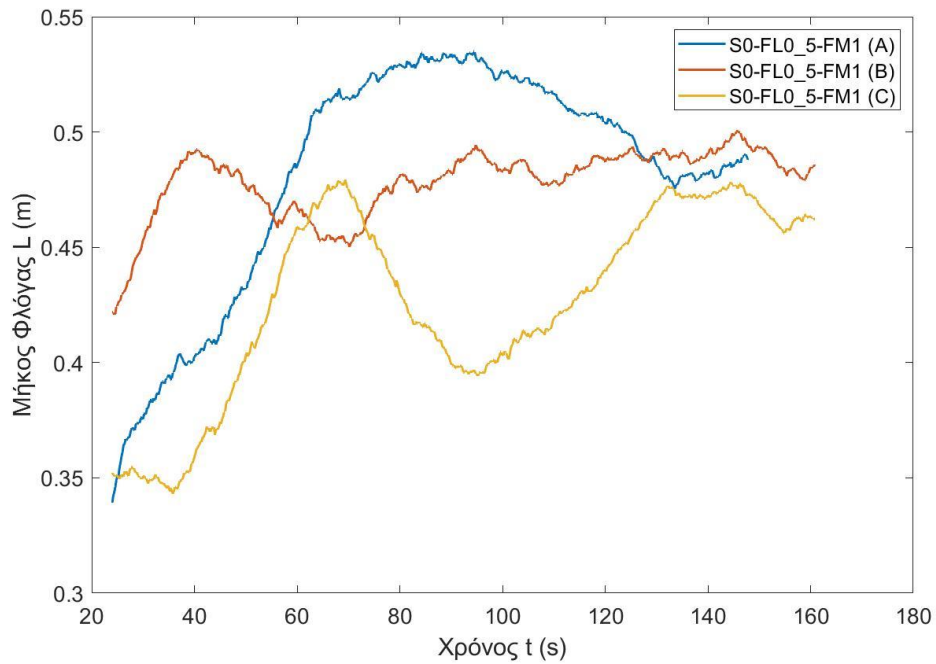
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, μεγάλα ολικά σφάλματα παρατηρούνται στο ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας. Ειδικότερα, τα ολικά σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 100% της μέσης τιμής του μεγέθους σε όλες τις περιπτώσεις πειραμάτων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς ο τρόπος που υπολόγιζε ο αλγόριθμος τον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας δεν ήταν τόσο αξιόπιστος. Αρχικά, λαμβανόταν η διαφορά της θέσης 2 διαδοχικών κατώτατων σημείων. Αυτό εμπεριέχει μεγάλο σφάλμα αφενός γιατί η φωτιά τρεμοπαίζει και υπήρχαν περιπτώσεις όπου ο ρυθμός εξάπλωσης προέκυπτε αρνητικός για δύο διαδοχικά κατώτατα σημεία φλόγας καθώς το χρονικό βήμα ήταν πολύ μικρό ( $dt = 0.2$  s) και αφετέρου στην επεξεργασία των φωτογραφιών η περικοπή τους γινόταν στο ύψος της κλίνης καυσίμου, το οποίο δεν ήταν ομοιόμορφο, κάτι που εισήγαγε σφάλμα.

### 5.1.2 Επαναληψιμότητα

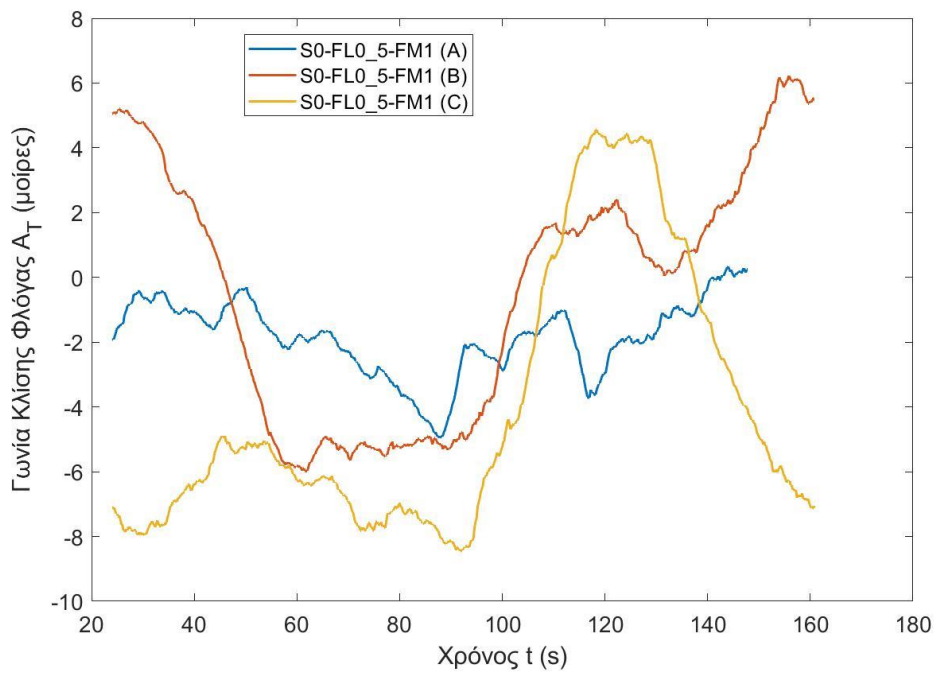
Η επαναληψιμότητα αποτελεί βασική αρχή της πειραματικής μεθόδου. Ο κύριος της στόχος είναι να αποκτηθούν αποτελέσματα στο ίδιο δείγμα που έγιναν υπό τις ίδιες συνθήκες και να επαληθευτεί η αξιοπιστία του πειράματος. Προκειμένου να εξεταστεί η εγγύτητα της συμφωνίας μεταξύ των διαδοχικών αποτελεσμάτων εκτελέστηκαν δύο σετ πανομοιότυπων πειραμάτων. Το πρώτο σετ πειραμάτων αφορά τρεις πειραματικές δοκιμές σε κλίση 0 μοιρών, ποσότητα καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενη υγρασία 1% (Πείραμα 1 έως 3). Το δεύτερο σετ πειραμάτων αφορά τρεις πειραματικές δοκιμές σε κλίση 20 μοιρών, ποσότητα καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενη υγρασία 8% (Πείραμα 7 έως 9). Τα αποτελέσματα του πρώτου σετ πειραμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα (5.3) έως (5.6) και στον Πίνακα (5.2), ενώ του δεύτερου σετ πειραμάτων στα Σχήματα (5.7) έως (5.10) και στον Πίνακα (5.3).



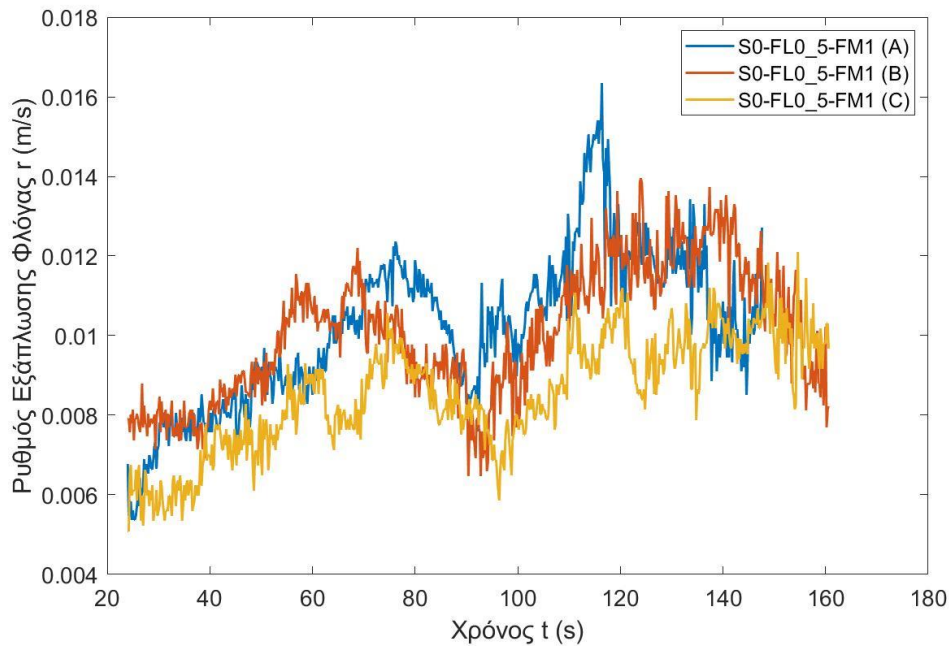
**Σχήμα 5.3** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το ύψος της φλόγας για συνθήκες κλίσης 0 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 1%.



**Σχήμα 5.4** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το μήκος της φλόγας για συνθήκες κλίσης 0 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 1%.



**Σχήμα 5.5** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για τη γωνία κλίσης της φλόγας για συνθήκες κλίσης 0 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 1%.



**Σχήμα 5.6** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας για συνθήκες κλίσης 0 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 1%.

**Πίνακας 5.2** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των πειραμάτων 1 έως 3.

Μέγεθος	Πείραμα 1 S0-FLO_5-FM1 (A)	Πείραμα 2 S0-FLO_5-FM1 (B)	Πείραμα 3 S0-FLO_5-FM1 (C)
$h_F$ (m)	$0.4649 \pm 0.1147$	$0.4680 \pm 0.0885$	$0.4191 \pm 0.0938$
$L$ (m)	$0.4675 \pm 0.1153$	$0.4719 \pm 0.0884$	$0.4239 \pm 0.0944$
$A_T$ (μοίρες)	$-1.1680 \pm 5.9578$	$0.4679 \pm 7.7985$	$-4.5205 \pm 7.456$
$r$ (m/s)	$0.0102 \pm 0.0511$	$0.0097 \pm 0.0543$	$0.0084 \pm 0.0462$

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τον πίνακα εξάγονται συμπεράσματα για την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων για συνθήκες κλίσης 0 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 1%. Το ύψος της φλόγας παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα αφενός γιατί ποιοτικά οι καμπύλες του ύψους έχουν την τάση να αυξάνουν, να ελαττώνονται και έπειτα πάλι να αυξάνουν (αν και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα), ενώ ποσοτικά το ύψος παρουσιάζει παρόμοιους μέσους όρους σε κάθε πείραμα χωρίς έντονες αποκλίσεις.

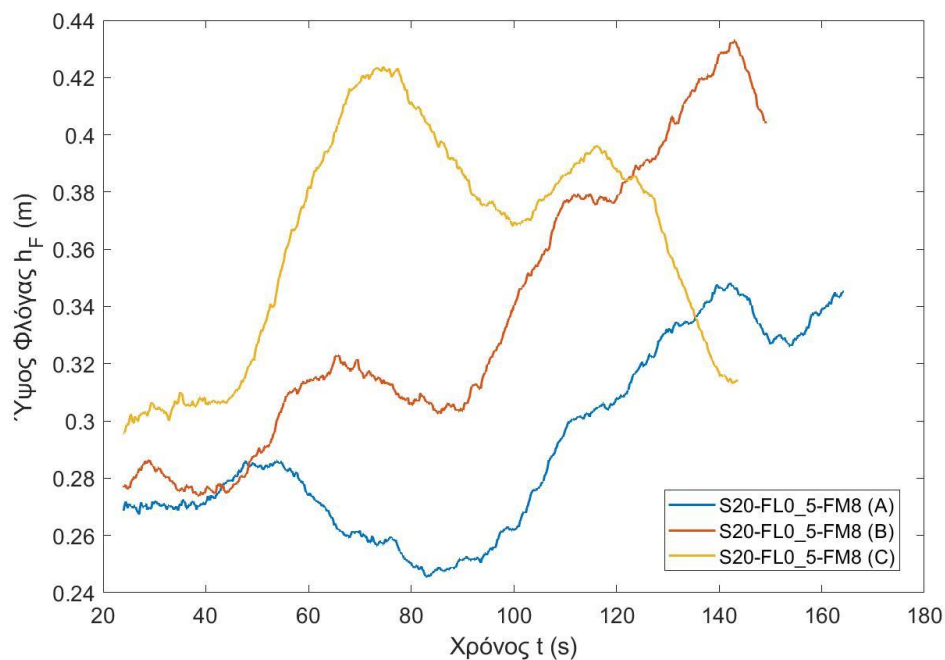
Το μήκος της φλόγας παρουσιάζει εξίσου καλή επαναληψιμότητα καθώς παρομοιάζει τόσο ποιοτικά όσο και ποιοτικά με το ύψος της φλόγας.

Η γωνία κλίσης της φλόγας παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα αφενός γιατί ποιοτικά οι καμπύλες έχουν ίδια τάση, δηλαδή να κατέρχονται, έπειτα να ανέρχονται και τέλος να ανέρχονται πάλι (με την εξαίρεση του πειράματος 3 στα τελευταία στάδια, όπου

συνεχίζεται η καθοδική πορεία). Ποσοτικά παρουσιάζουν παρόμοιες μέσες τιμές και δείχνουν ότι η φωτιά ήταν σχεδόν κατακόρυφη.

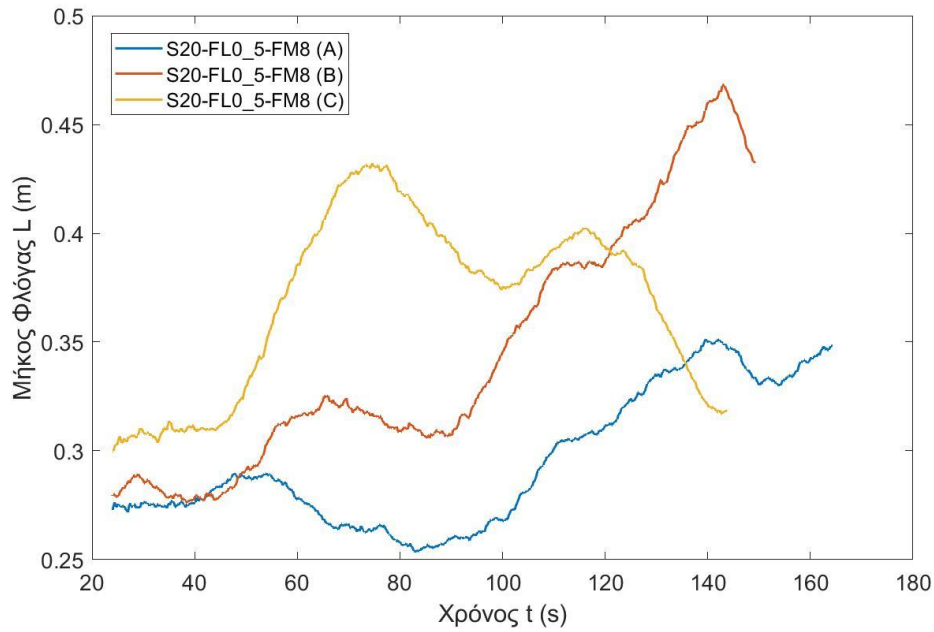
Ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα εφόσον ποιοτικά αυξάνεται, έπειτα μειώνεται και έπειτα αυξάνεται πάλι, ενώ ποσοτικά παρουσιάζει παρόμοιες μέσες τιμές που δείχνει ότι η φωτιά κινείται σχεδόν με την ίδια ταχύτητα σε κάθε πείραμα.

Καταληκτικά, εξάγεται το συμπέρασμα της καλής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων των πειραμάτων. Οι όποιες μικρές διαφορές υπάρχουν οφείλονται τόσο στο τυρβώδη χαρακτήρα της φωτιάς όσο και στις μικρές βιολογικές διαφορές των πευκοβελόνων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πείραμα.

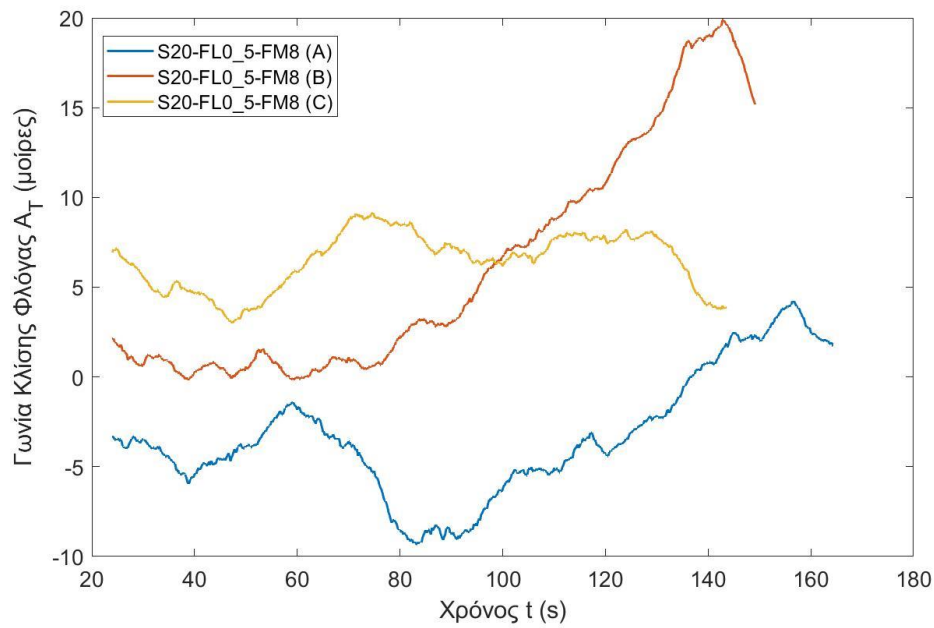


**Σχήμα 5.7** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το ύψος της φλόγας για συνθήκες κλίσης 20 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 8%.

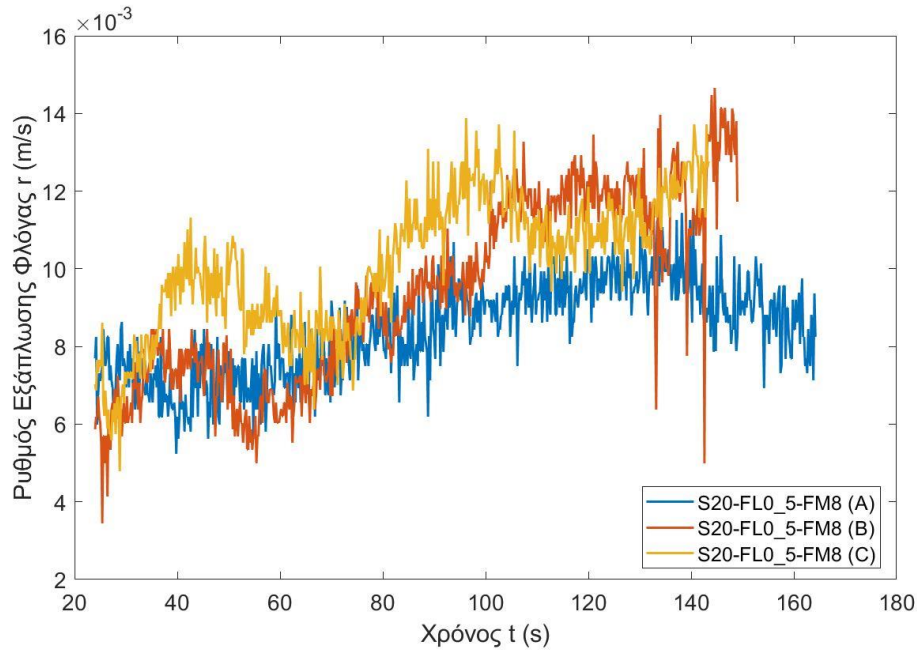




**Σχήμα 5.8** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το μήκος της φλόγας για συνθήκες κλίσης 20 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 8%.



**Σχήμα 5.9** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για τη γωνία κλίσης της φλόγας για συνθήκες κλίσης 20 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 8%.



**Σχήμα 5.10** Αξιολόγηση επαναληψιμότητας για το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας για συνθήκες κλίσης 20 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 8%.

**Πίνακας 5.3** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των πειραμάτων 7 έως 9.

Μέγεθος	Πείραμα 7	Πείραμα 8	Πείραμα 9
	S20-FLO_5-FM8 (A)	S20-FLO_5-FM8 (B)	S20-FLO_5-FM8 (C)
$h_F$ (m)	$0.2953 \pm 0.0739$	$0.3339 \pm 0.0880$	$0.3518 \pm 0.0831$
$L$ (m)	$0.2996 \pm 0.0729$	$0.3430 \pm 0.0969$	$0.3669 \pm 0.0845$
$A_T$ (μοίρες)	$-2.8875 \pm 9.1997$	$6.2517 \pm 10.4673$	$6.1728 \pm 7.3789$
$r$ (m/s)	$0.0082 \pm 0.0736$	$0.0094 \pm 0.0846$	$0.0101 \pm 0.0640$

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τον πίνακα εξάγονται συμπεράσματα για την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων για συνθήκες κλίσης 20 μοιρών, ποσότητας καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και περιεχόμενης υγρασίας 8%. Το ύψος της φλόγας παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα αφενός γιατί ποιοτικά οι καμπύλες του ύψους έχουν την τάση να αυξάνουν, να κατέρχονται και έπειτα πάλι να αυξάνουν και να κατέρχονται (αν και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα), ενώ ποσοτικά το ύψος παρουσιάζει παρόμοιους μέσους όρους σε κάθε πείραμα χωρίς έντονες αποκλίσεις.

Το μήκος της φλόγας παρουσιάζει εξίσου καλή επαναληψιμότητα καθώς παρομοιάζει τόσο ποιοτικά όσο και ποιοτικά με το ύψος της φλόγας.

Η γωνία κλίσης της φλόγας παρουσιάζει σχετικά καλή επαναληψιμότητα. Αν και ποιοτικά κάθε καμπύλη παρουσιάζει διαφορετική τάση ενώ ποσοτικά το πείραμα 7 παρουσιάζει απόκλιση από τις μέσες τιμές των υπόλοιπων δύο πειραμάτων μπορεί να εξαχθεί το

συμπέρασμα ότι η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων για τη γωνία κλίσης δεν καταλύεται καθώς οι αποκλίσεις δεν είναι τόσο έντονες.

Ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα εφόσον ποιοτικά παρουσιάζει γενικά αυξητική τάση, ενώ ποσοτικά παρουσιάζει παρόμοιες μέσες τιμές που δείχνει ότι η φωτιά κινείται σχεδόν με την ίδια ταχύτητα σε κάθε πείραμα.

Καταληκτικά, εξάγεται το συμπέρασμα της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων των πειραμάτων. Οι όποιες μικρές διαφορές υπάρχουν οφείλονται τόσο στον τυρβώδη χαρακτήρα της φωτιάς που είναι ακόμα πιο έντονος όσο αυξάνεται η κλίση της κλίνης καυσίμου, όσο και στις μικρές βιολογικές διαφορές των πευκοβελόνων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πείραμα. Να τονιστεί ότι σε όλα τα πειράματα επαναληψιμότητας ελέγχθηκε κάθε χρονική στιγμή η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής κάθε καμπύλης ως προς τη μέση σύνθετη καμπύλη που προκύπτει αν συνδυαστούν οι μέσες χρονικά τιμές των καμπυλών και εξακριβώθηκαν οι μικρές αποκλίσεις που υπήρχαν.

### 5.1.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη της Κλίνης Καυσίμου

Η τοποθέτηση του καυσίμου πάνω στην κλίνη πραγματοποιούνταν τηρώντας συνθήκες ομοιομορφίας σε όλη την χρησιμοποιούμενη επιφάνεια της κλίνης. Μετά το τέλος της τοποθέτησης του καυσίμου και πριν την έναρξη της ανάφλεξης μετρούνταν τα χαρακτηριστικά της κλίνης καυσίμου και ειδικότερα το ύψος της κλίνης καυσίμου  $\delta$  (m), ο βαθμός συμπίεσης  $\beta$  και το πορώδες  $\alpha$ .

Το ύψος της κλίνης καυσίμου για κάθε πείραμα μετριόταν σε διάφορα σημεία της κλίνης. Να σημειωθεί ότι η διαδικασία μέτρησης του ύψους της κλίνης καυσίμου συστηματοποιήθηκε στα τελευταία πειράματα που υλοποιήθηκαν, ενώ στα πρώτα πειράματα λαμβανόταν μόνο μια μέτρηση.

Ο βαθμός συμπίεσης  $\beta$  (packing ratio) υπολογίζεται από την Εξίσωση (5.10), όπου  $w_o$  ( $\text{kg/m}^2$ ) η ποσότητα καυσίμου επί υγρής βάσης,  $\delta$  (m) το ύψος της κλίνης καυσίμου και  $\rho_v$  ( $\text{kg/m}^3$ ) η πυκνότητα του καυσίμου.

$$\beta = \frac{w_o}{\delta \rho_v} \quad (5.10)$$

Το πορώδες της κλίνης καυσίμου  $\alpha$  (porosity) υπολογίζεται από την Εξίσωση (5.11).

$$\alpha = 1 - \beta \quad (5.11)$$

Στο Πίνακα (5.4) καταγράφονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κλίνης καυσίμου για κάθε πείραμα.

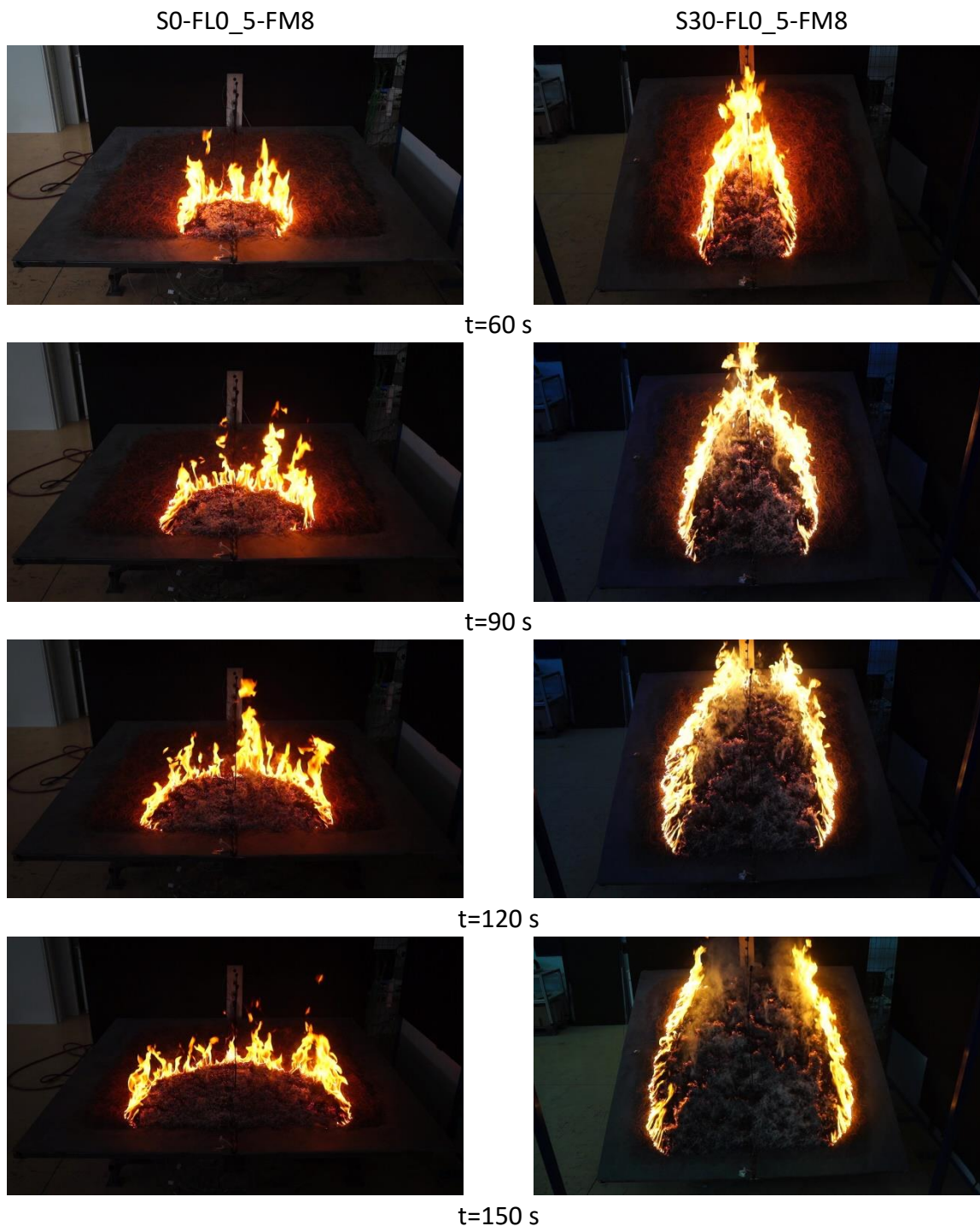
**Πίνακας 5.4** Χαρακτηριστικά μεγέθη της κλίνης καυσίμου για κάθε πείραμα.

A/A	Κωδική ονομασία πειράματος	Ύψος κλίνης καυσίμου $\delta$ (m)	Βαθμός συμπίεσης $\beta$	Πορώδες $\alpha$
1	S0-FLO_5-FM1 (A)	0.055	0.010996	0.989004
2	S0-FLO_5-FM1 (B)	0.050	0.012096	0.987904
3	S0-FLO_5-FM1 (C)	0.048	0.0126	0.9874
4	S0-FL1-FM1	0.078	0.015508	0.984492
5	S0-FLO_5-FM8	0.0335	0.018054	0.981946
6	S10-FLO_5-FM8	0.035	0.01728	0.98272
7	S20-FLO_5-FM8 (A)	0.035	0.01728	0.98272
8	S20-FLO_5-FM8 (B)	0.035	0.01728	0.98272
9	S20-FLO_5-FM8 (C)	0.045	0.01344	0.98656
10	S30-FLO_5-FM8	0.047	0.01286	0.9871

#### 5.1.4 Ποιοτική Περιγραφή Εξέλιξης του Φαινομένου

Μετά την ανάφλεξη, παρατηρούνταν διαφορετικοί τρόποι εξέλιξης της φωτιάς τόσο κατά το μήκος όσο και κατά το πλάτος της κλίνης καυσίμου. Αρχικά, για όλα τα πειράματα το μέτωπο της φλόγας που βρισκόταν στο κέντρο της κλίνης καυσίμου ( $y=0$ ) προχωρούσε πολύ γρηγορότερα από το μέτωπο της φλόγας στις άκρες. Η ταχύτητα του εμπρόσθιου μετώπου καθώς και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά αυξάνονταν μετά την αρχική ανάφλεξη μέχρις ότου να αποκτήσουν σχεδόν σταθερή (μόνιμη) συμπεριφορά. Η ποσοτική αυτή αύξηση εξαρτιόταν από τις εκάστοτε συνθήκες πειράματος και περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες για το κεντρικό μέτωπο της φλόγας.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του μετώπου φλόγας των πλευρών της φωτιάς εξάγονται ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Κάτω από συνθήκες απουσίας κλίσης ολόκληρο το εμπρόσθιο μέτωπο ανέπτυξε καμπυλόγραμμο περίγραμμα (σχήματος U) κατά την εξάπλωση του. Αυτή η καμπυλότητα αυξανόταν με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης καυσίμου και σε γωνία κλίσης 30 μοιρών διαμορφωνόταν αιχμηρό καμπυλόγραμμο περίγραμμα (σχήματος V). Από τις λήψεις της οπίσθιας κάμερας εξήχθησαν τα στιγμιότυπα στο Σχήμα (5.11) που απεικονίζουν καθαρά την χρονική εξέλιξη του περιγράμματος της φωτιάς σε δύο διαφορετικά πειράματα.



**Σχήμα 5.11** Στιγμιότυπα του περιγράμματος της φλόγας σε διάφορες χρονικές στιγμές των πειραμάτων S0-FLO\_5-FM8 και S30-FLO\_5-FM8.

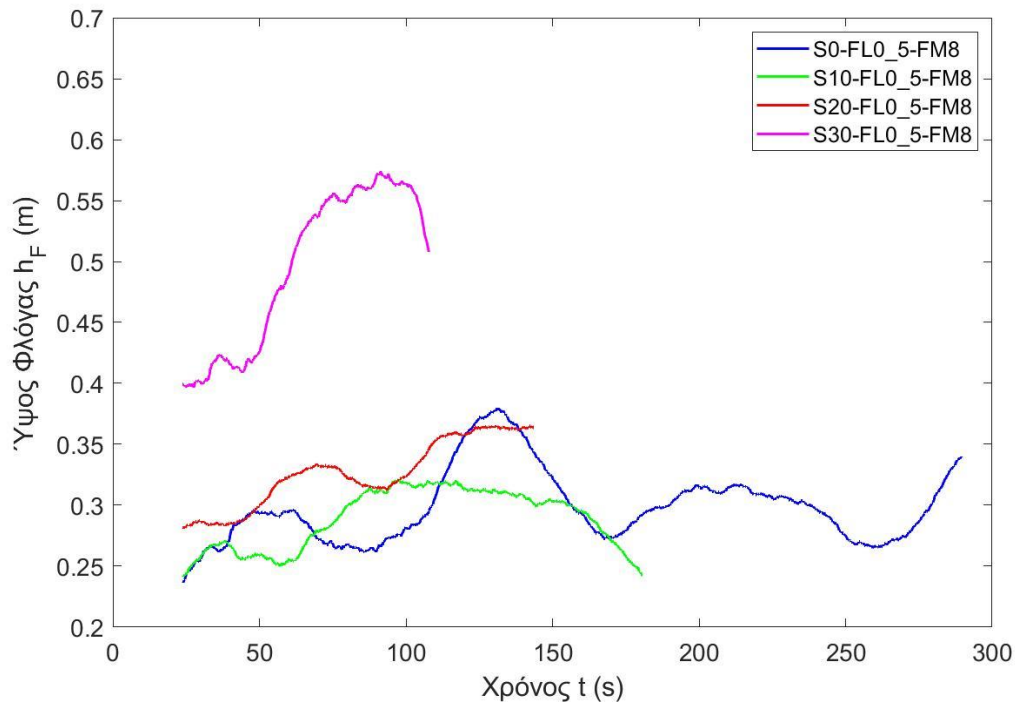
## 5.2 Μετρήσεις Ύψους Φλόγας

Να σημειωθεί ότι για κάθε ένα από τα δύο σετ πειραμάτων επαναληψιμότητας (S0-FLO\_5-FM8 και S20-FLO\_5-FM8) επιλέχθηκε να ληφθεί υπόψη η μέση τιμή των καμπυλών για κάθε εξεταζόμενο μέγεθος κάθε χρονική στιγμή, αντί να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο πείραμα από

τα εκτελεσθέντα, προκειμένου η σύνθετη πληροφορία που προκύπτει να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική του φαινομένου.

### 5.2.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.12) απεικονίζεται η μεταβολή του ύψους της φλόγας για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου 0, 10, 20, 30 μοιρών διατηρώντας την ποσότητα καυσίμου στη τιμή 0.5 kg/m<sup>2</sup> και την περιεχόμενη υγρασία 8%. Στον Πίνακα (5.5) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.12** Μεταβολή του ύψους της φλόγας για διάφορες γωνίες κλίσης της κλίνης διατηρώντας σταθερή την ποσότητα καυσίμου και την περιεχόμενη υγρασία.

**Πίνακας 5.5** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το ύψος της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FLO_5-FM8	S10-FLO_5-FM8	S20-FLO_5-FM8	S30-FLO_5-FM8
<b><math>h_F</math> (m)</b>	0.2976±0.0698	0.2812±0.0624	0.3270±0.1418	0.4778±0.1254

Από το διάγραμμα παρατηρείται η έντονη επίδραση της κλίσης 30 μοιρών σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες κλίσης σχετικά με την αύξηση του ύψους της φλόγας. Ειδικότερα, στις 20 μοίρες παρατηρείται μια μικρή αύξηση των τιμών του ύψους φλόγας χωρίς ωστόσο να παρουσιάζονται έντονες διαφορές σε σύγκριση με τις γωνίες κλίσης 0 και 10 μοιρών. Έτσι, εξαγεται το συμπέρασμα ότι για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου έως 20 μοιρών, η επίδραση της γωνίας κλίσης στη μεταβολή του ύψους της φλόγας είναι μικρή. Αντίθετα, παρατηρείται εμφανής αύξηση του ύψους της φλόγας έως και 35% για μεγαλύτερες των 20 μοιρών γωνίες.



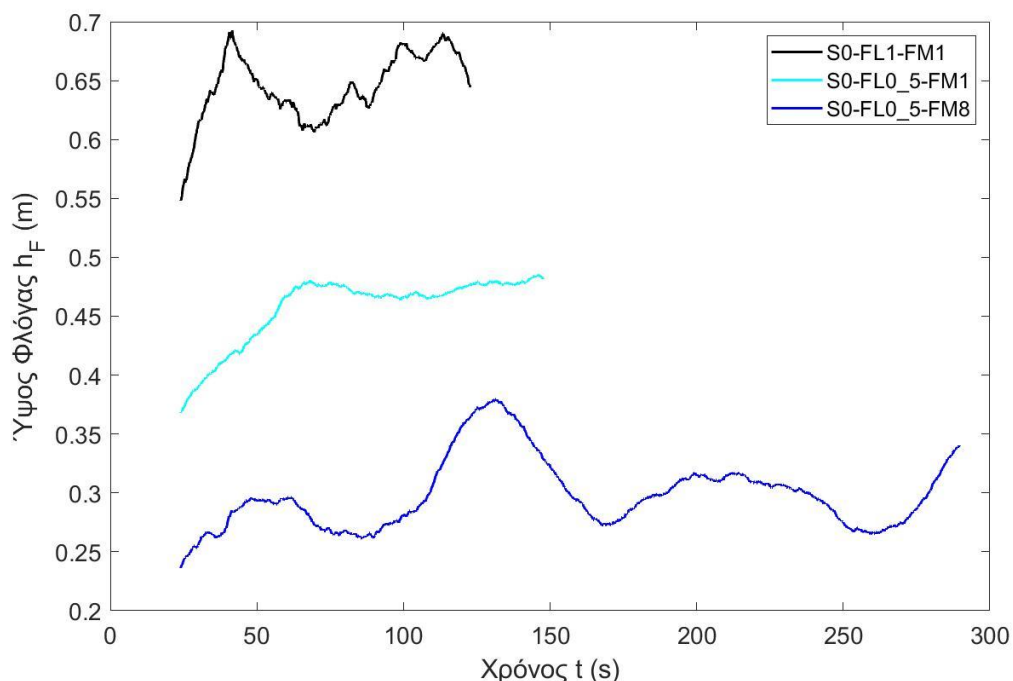
Επίσης, ανεξαρτήτως γωνίας κλίσης, παρατηρείται αρχική αύξηση του ύψους της φλόγας για όλα τα πειράματα και στη συνέχεια σχετική σταθεροποίηση του. Ωστόσο, στις 30 μοίρες η αύξηση του ύψους της φλόγας είναι εντονότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες κλίσης.

Στη συνέχεια, αξίζει να επισημανθεί ότι όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης της κλίνης τόσο πιο γρήγορα εξελίσσεται το φαινόμενο και διαρκεί λιγότερο χρονικό διάστημα.

Τέλος, τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα αντίστοιχων πειραματικών βιβλιογραφικών μελετών που εξέτασαν την επίδραση της κλίσης του καυσίμου στη γεωμετρία της φλόγας (Tihay et al. 2014).

### 5.2.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.13) απεικονίζεται η μεταβολή του ύψους της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την γωνία κλίσης σταθερή και ίση με μηδέν. Στον Πίνακα (5.6) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.13** Μεταβολή του ύψους της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσοτήτων καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την κλίση της κλίνης σταθερή.

**Πίνακας 5.6** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το ύψος της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FL1-FM1	S0-FLO_5-FM1	S0-FLO_5-FM8
$h_F$ (m)	$0.6278 \pm 0.1551$	$0.4506 \pm 0.1725$	$0.2976 \pm 0.0698$

Στο Σχήμα (5.14) συγκρίνονται στιγμιότυπα της φλόγας την ίδια χρονική στιγμή για ξεχωριστά πειράματα. Με αυτό τον τρόπο διαφαίνεται καλύτερα η πορεία του φαινομένου και η εξέλιξη του ύψους της φλόγας.





**Σχήμα 5.14** Στιγμιότυπα εξέλιξης του φαινομένου από την οπίσθια κάμερα για τα πειράματα S0-FLO\_5-FM1 (A) και S0-FL1-FM1 για διάφορες χρονικές στιγμές.

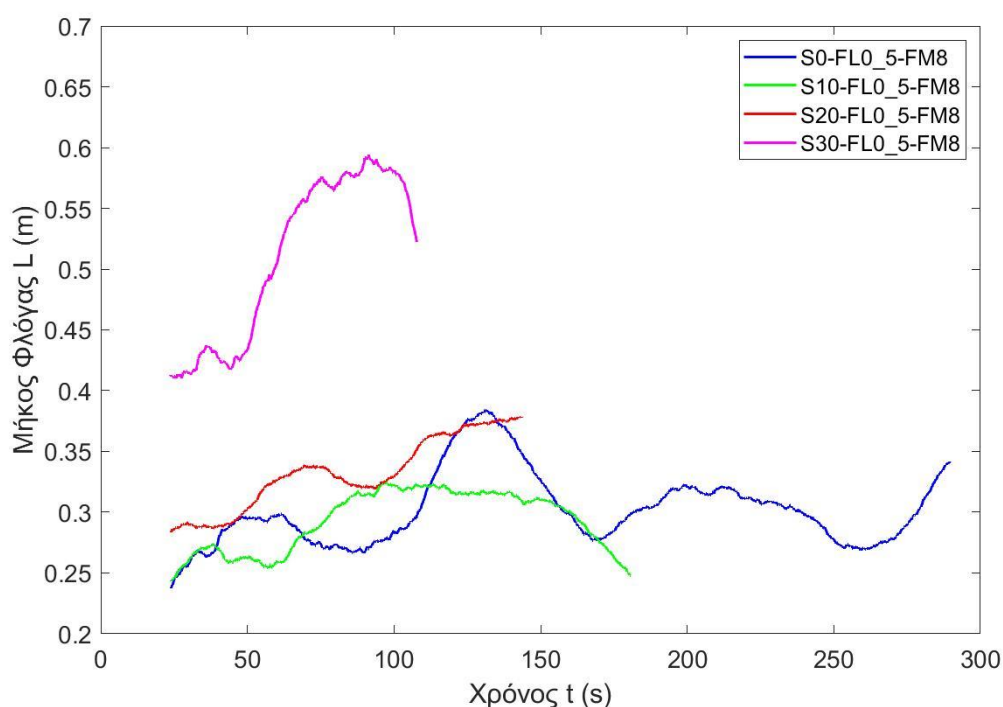
Αρχικά, από το διάγραμμα παρατηρείται η έντονη επίδραση στο ύψος της φλόγας της μεγάλης ποσότητας καυσίμου σε συνδυασμό με την μικρή περιεχόμενη υγρασία. Ειδικότερα, διατηρώντας την κλίση και την υγρασία σταθερή (μαύρη και ανοιχτόχρωμη γαλάζια καμπύλη) παρατηρείται αύξηση στο ύψος της φλόγας της τάξης του 30% με διπλασιασμό της ποσότητας καυσίμου, κάτι που φαίνεται παραστατικά και στο Σχήμα

(5.14). Επίσης, διατηρώντας την κλίση και την ποσότητα καυσίμου σταθερή παρατηρείται αύξηση του ύψους της φλόγας έως και 35% με μείωση της περιεχόμενης υγρασίας από 8% σε 1%. Τέλος, παρατηρείται αύξηση έως και 53% στο ύψος της φλόγας όταν διπλασιάζεται η ποσότητα καυσίμου και μειώνεται η υγρασία από 8% σε 1%. Επίσης, παρατηρείται ότι με αύξηση της ποσότητας καυσίμου και μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας το φαινόμενο εξελίσσεται πιο γρήγορα και διαρκεί λιγότερο χρονικό διάστημα. Καταληκτικά, τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης έρχονται σε αντιστοιχία με τα συμπεράσματα αντίστοιχων πειραματικών βιβλιογραφικών μελετών (Van Wagner 1968), (Morandini et al. 2013), (Tihay et al. 2014).

## 5.3 Μετρήσεις Μήκους Φλόγας

### 5.3.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.15) απεικονίζεται η μεταβολή του μήκους της φλόγας για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου 0, 10, 20, 30 μοιρών διατηρώντας την ποσότητα καυσίμου στη τιμή 0.5 kg/m<sup>2</sup> και την περιεχόμενη υγρασία 8%. Στον Πίνακα (5.7) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.15** Μεταβολή του μήκους της φλόγας για διάφορες γωνίες κλίσης της κλίνης διατηρώντας σταθερή την ποσότητα καυσίμου και την περιεχόμενη υγρασία.

**Πίνακας 5.7** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το μήκος της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FL0_5-FM8	S10-FL0_5-FM8	S20-FL0_5-FM8	S30-FL0_5-FM8
L (m)	0.3009±0.0702	0.2853±0.0626	0.3365±0.1477	0.4919±0.1313

Το παραπάνω διάγραμμα είναι ποσοτικά και ποιοτικά παρόμοιο με το αντίστοιχο διάγραμμα του ύψους της φλόγας (Σχήμα 5.11). Αυτό συμβαίνει γιατί υπό συνθήκες απουσίας ροής ανέμου η φωτιά παραμένει σχεδόν κατακόρυφη οπότε δεν παρουσιάζονται έντονες διαφορές στις τιμές του ύψους και του μήκους τη φλόγας καθώς η φωτιά παραμένει σχεδόν κατακόρυφη και δεν γέρνει.

Στο Σχήμα (5.16) συγκρίνονται στιγμιότυπα της φλόγας την ίδια χρονική στιγμή για ξεχωριστά πειράματα. Με αυτό τον τρόπο διαφάνεται καλύτερα η πορεία του φαινομένου και η εξέλιξη του μήκους της φλόγας.

S10-FLO\_5-FM8

S20-FLO\_5-FM8 (C)



t=30 s



t=60 s



t=90 s

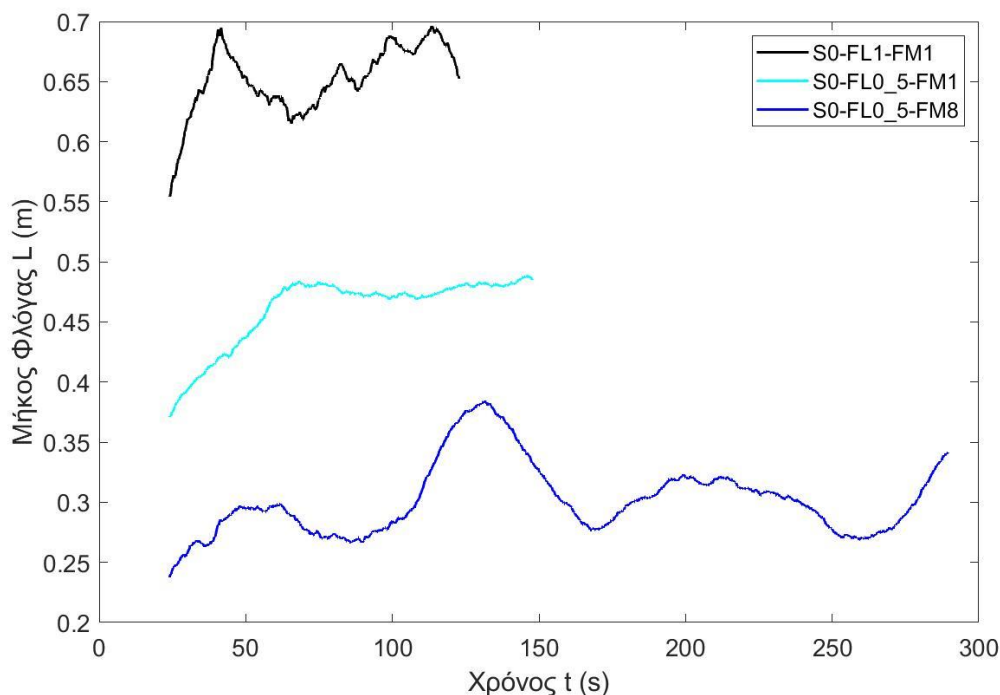


t=120 s

**Σχήμα 5.16** Στιγμιότυπα εξέλιξης του φαινομένου για τα πειράματα S10-FLO\_5-FM8 και S20-FLO\_5-FM8 (C) για διάφορες χρονικές στιγμές.

### 5.3.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.17) απεικονίζεται η μεταβολή του μήκους της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την γωνία κλίσης σταθερή και ίση με μηδέν. Στον Πίνακα (5.8) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.17** Μεταβολή του μήκους της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσοτήτων καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την κλίση της κλίνης σταθερή.

**Πίνακας 5.8** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το μήκος της φλόγας σε κάθε πείραμα.

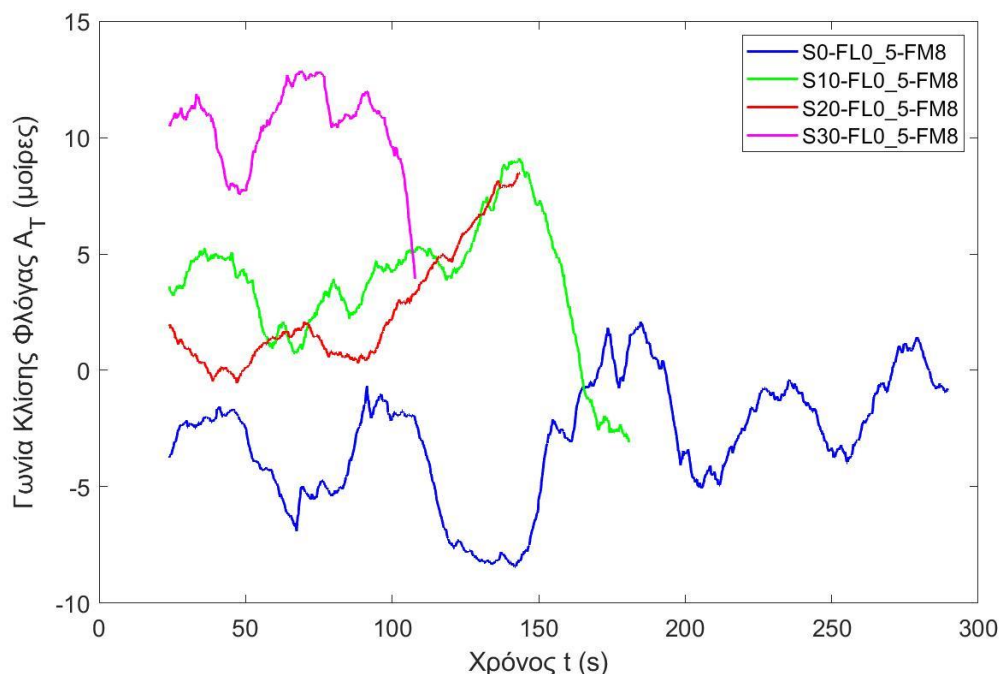
	S0-FL1-FM1	S0-FLO_5-FM1	S0-FLO_5-FM8
<b>L (m)</b>	0.6353±0.1537	0.4544±0.1732	0.3009±0.0702

Το παραπάνω διάγραμμα είναι ποσοτικά και ποιοτικά παρόμοιο με το αντίστοιχο διάγραμμα του ύψους της φλόγας (Σχήμα 5.12). Αυτό συμβαίνει γιατί υπό συνθήκες απουσίας ροής ανέμου η φωτιά παραμένει σχεδόν κατακόρυφη οπότε δεν παρουσιάζονται έντονες διαφορές στις τιμές του ύψους και του μήκους τη φλόγας καθώς η φωτιά παραμένει σχεδόν κατακόρυφη και δεν γέρνει.

## 5.4 Μετρήσεις Γωνίας Κλίσης της Φλόγας

### 5.4.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.18) απεικονίζεται η μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου 0, 10, 20, 30 μοιρών διατηρώντας την ποσότητα καυσίμου στη τιμή 0.5 kg/m<sup>2</sup> και την περιεχόμενη υγρασία 8%. Στον Πίνακα (5.9) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.18** Μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας για διάφορες γωνίες κλίσης της κλίνης διατηρώντας σταθερή την ποσότητα καυσίμου και την περιεχόμενη υγρασία.

**Πίνακας 5.9** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για τη γωνία κλίσης της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FLO_5-FM8	S10-FLO_5-FM8	S20-FLO_5-FM8	S30-FLO_5-FM8
<b>A<sub>T</sub> (μοίρες)</b>	-2.9018±8.2385	3.3480±9.2501	3.1796±16.1991	10.512±17.2672

Από το παραπάνω διάγραμμα διαφαίνεται καθαρά η τάση της φωτιάς να «γέρνει» προς τη κατεύθυνση μετάδοσης της με αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης. Ειδικότερα, για μηδενική κλίση της κλίνης, η φωτιά παρουσιάζει αρνητικές γωνίες κλίσης, κάτι που δείχνει ότι γέρνει ελαφρώς αντίθετα στη φορά κατεύθυνσης της. Αντίθετα, με αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης παρατηρείται αύξηση της γωνίας κλίσης της φωτιάς προς τις θετικές γωνίες, κάτι που σημαίνει ότι η φωτιά γέρνει κατά το μεγαλύτερο διάστημα της εξάπλωσης της προς την κλίση του καυσίμου. Τέλος παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως της γωνίας κλίσης της κλίνης, οι καμπύλες των γωνιών κλίσης της φωτιάς δεν παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά αλλά έντονες ταλαντώσεις, κάτι που δείχνει το διαρκές τρεμόπαιγμα της φλόγας.



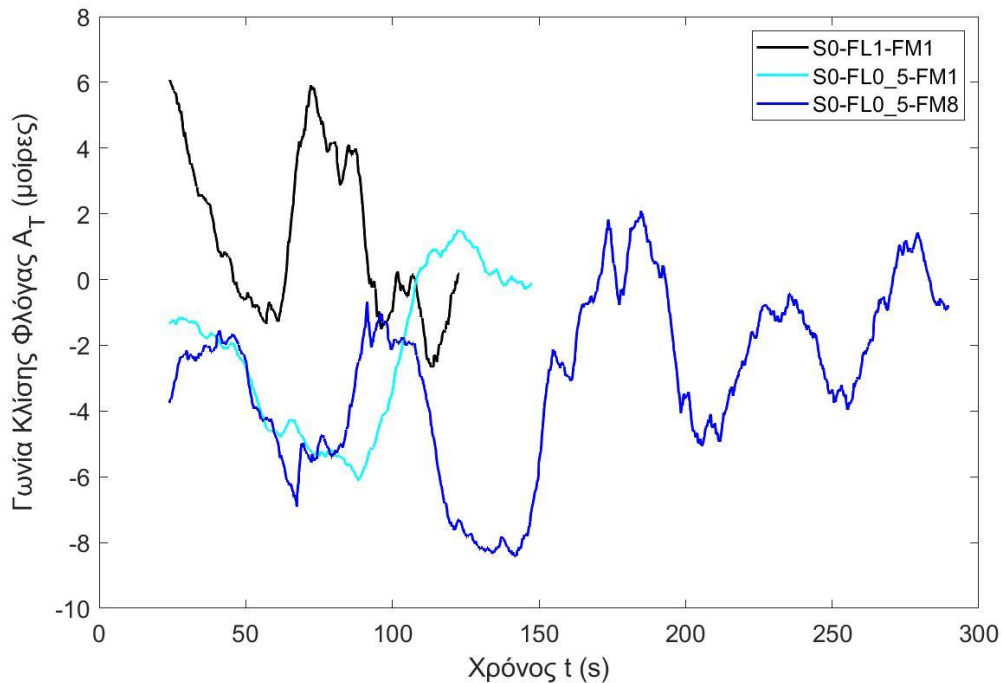
Στο Σχήμα (5.19) συγκρίνονται στιγμιότυπα της φλόγας την ίδια χρονική στιγμή για ξεχωριστά πειράματα. Με αυτό τον τρόπο διαφαίνεται καλύτερα η πορεία του φαινομένου και η εξέλιξη της γωνίας κλίσης της φλόγας.



**Σχήμα 5.19** Στιγμιότυπα εξέλιξης του φαινομένου για τα πειράματα S0-FLO\_5-FM8 και S30-FLO\_5-FM8 για διάφορες χρονικές στιγμές.

#### 5.4.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.20) απεικονίζεται η μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την γωνία κλίσης σταθερή και ίση με μηδέν. Στον Πίνακα (5.10) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.20** Μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσοτήτων καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την κλίση της κλίνης σταθερή.

**Πίνακας 5.10** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για τη γωνία κλίσης της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FL1-FM1	S0-FLO_5-FM1	S0-FLO_5-FM8
<b>A<sub>T</sub> (μοίρες)</b>	1.9582±9.0995	-1.8903±12.3249	-2.9018±8.2385

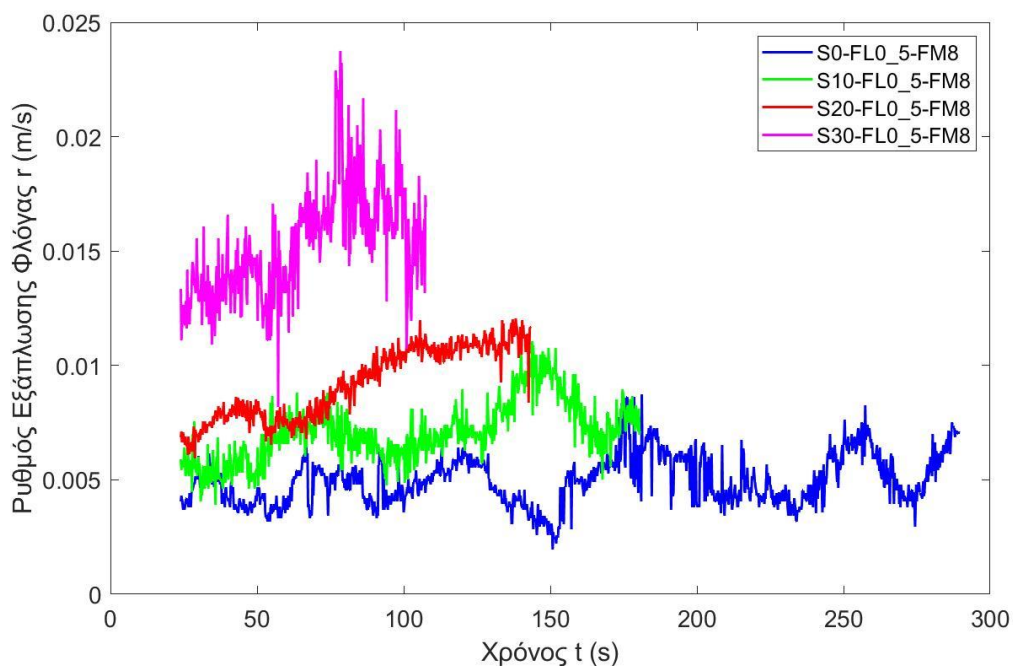
Αρχικά, από το παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι μικρές αποκλίσεις της φλόγας από την κατακόρυφο για όλους τους συνδυασμούς ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας, κάτι που δείχνει ότι αυτοί οι δυο παράγοντες δεν επηρεάζουν έντονα τη γωνία κλίσης της φλόγας. Ειδικότερα, για το συνδυασμό της μικρής ποσότητας καυσίμου μαζί με τη μικρή και μεγάλη περιεχόμενη υγρασία, η φωτιά γέρνει ελαφρώς αντίθετα της φοράς κατεύθυνσης της, ενώ με διπλασιασμό της ποσότητας καυσίμου η φωτιά αποκτά ελαφρώς θετική κλίση προς τη φορά κατεύθυνσης. Τέλος, παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως συνδυασμού ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας, οι καμπύλες των γωνιών κλίσης της φωτιάς δεν παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά αλλά έντονες ταλαντώσεις, κάτι που δείχνει το διαρκές τρεμόπαιγμα της φλόγας.

## 5.5 Μετρήσεις Ρυθμού Εξάπλωσης της Φλόγας



### 5.5.1 Επίδραση Γωνίας Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.21) απεικονίζεται η μεταβολή του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου 0, 10, 20, 30 μοιρών διατηρώντας την ποσότητα καυσίμου στη τιμή  $0.5 \text{ kg/m}^2$  και την περιεχόμενη υγρασία 8%. Στον Πίνακα (5.11) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.21** Μεταβολή του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας για διάφορες γωνίες κλίσης της κλίνης διατηρώντας σταθερή την ποσότητα καυσίμου και την περιεχόμενη υγρασία.

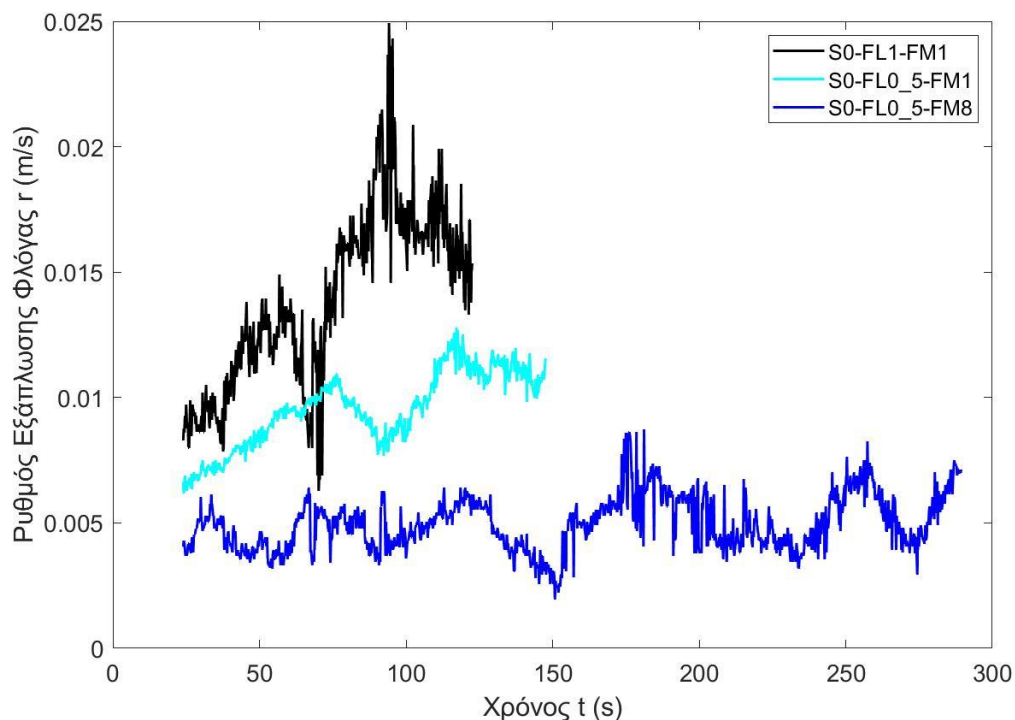
**Πίνακας 5.11** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FLO_5-FM8	S10-FLO_5-FM8	S20-FLO_5-FM8	S30-FLO_5-FM8
<b>r (m/s)</b>	0.005±0.0506	0.007±0.0655	0.009±0.1291	0.0151±0.1589

Από το παραπάνω διάγραμμα διαφαίνεται η έντονη επίδραση της μεταβολής της κλίσης της κλίνης καυσίμου στο ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας. Ειδικότερα, η αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης καυσίμου αυξάνει την ταχύτητα μετάδοσης της φωτιάς. Σε γωνία κλίσης 30 μοιρών η αύξηση της τάξης μεγέθους της γωνίας κλίσης είναι αρκετά εμφανής σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες κλίσης. Για γωνίες κλίσης 0, 10, 20 μοιρών οι καμπύλες παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις-ταλαντώσεις σε σχέση με το χρόνο, κάτι που δείχνει την σταθερό ρυθμό εξάπλωσης του φαινομένου. Αντίθετα, για γωνία κλίσης 30 μοιρών το φαινόμενο παρουσιάζει διαρκή επιτάχυνση και αυξανόμενη ταχύτητα μετάδοσης. Καταληκτικά, τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης έρχονται σε αντιστοιχία με τα συμπεράσματα αντίστοιχων πειραματικών βιβλιογραφικών μελετών (Van Wagner 1968), (Morandini et al. 2013), (Tihay et al. 2014).

### 5.5.2 Επίδραση Ποσότητας και Περιεχόμενης Υγρασίας Καυσίμου

Στο Σχήμα (5.22) απεικονίζεται η μεταβολή του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσότητας καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την γωνία κλίσης σταθερή και ίση με μηδέν. Στον Πίνακα (5.12) καταγράφονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του μετρούμενου μεγέθους σε κάθε πείραμα.



**Σχήμα 5.22** Μεταβολή του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας για διάφορους συνδυασμούς ποσοτήτων καυσίμου και περιεχόμενης υγρασίας διατηρώντας την κλίση της κλίνης σταθερή.

**Πίνακας 5.12** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση για το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας σε κάθε πείραμα.

	S0-FL1-FM1	S0-FLO_5-FM1	S0-FLO_5-FM8
<b>r (m/s)</b>	0.0136±0.1164	0.0094±0.0877	0.005±0.0506

Αρχικά, από το παραπάνω διάγραμμα διαφαίνεται η αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου και την μείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Ειδικότερα, για τον συνδυασμό της μικρής ποσότητας καυσίμου και της μεγάλης περιεχόμενης υγρασίας το μέτωπο της φλόγας εξαπλώνεται αργά και με σταθερό ρυθμό καθώς δεν υπάρχουν έντονες αποκλίσεις και ταλαντώσεις. Στη συνέχεια, διατηρώντας το φορτίο σταθερό και μειώνοντας την περιεχόμενη υγρασία παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές του ρυθμού εξάπλωσης καθώς και μικρή επιτάχυνση της φωτιάς. Τέλος, αυξάνοντας την ποσότητα καυσίμου και διατηρώντας τη μικρή περιεχόμενη υγρασία παρατηρείται έντονη αύξηση του μεγέθους του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς και το μέτωπο της φλόγας συνεχώς επιταχύνεται. Καταληκτικά, τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης έρχονται

σε αντιστοιχία με τα συμπεράσματα αντίστοιχων πειραματικών βιβλιογραφικών μελετών (Nelson & Adkins 1986), (Cambell-Lochrie et al. 2020).

Στο Σχήμα (5.23) συγκρίνονται στιγμιότυπα της φλόγας την ίδια χρονική στιγμή για ξεχωριστά πειράματα. Με αυτό τον τρόπο διαφαίνεται καλύτερα η πορεία του φαινομένου και η εξέλιξη του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας.



**Σχήμα 5.23** Στιγμιότυπα εξέλιξης του φαινομένου για τα πειράματα S0-FLO\_5-FM1 (A) και S0-FLO\_5-FM8 για διάφορες χρονικές στιγμές.

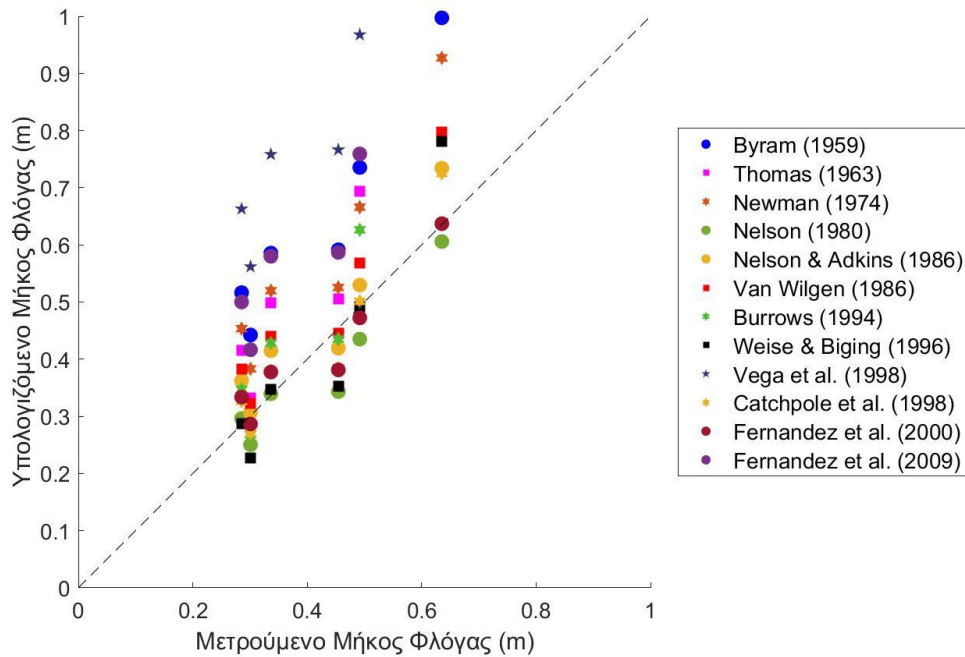
## 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με χρήση των 6 διαφορετικών πειραματικών δοκιμών του Πίνακα (5.1) (για κάθε ένα από τα 2 σετ των πειραμάτων επαναληψιμότητας επιλέχθηκε η προκύπτουσα μέση τιμή) αξιολογήθηκε η ακρίβεια των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων της Ενότητας (2.6.1) σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων. Οι βιβλιογραφικές σχέσεις των μεγεθών της γωνίας κλίσης και του ύψους της φλόγας των Ενοτήτων (2.6.2) και (2.6.3) δεν εξετάστηκαν καθώς περιέχουν την ταχύτητα του ανέμου, η οποία δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία. Να σημειωθεί ότι ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

### 6.1 Μήκος Φλόγας

Η σύγκριση και η αξιολόγηση των υπολογιζόμενων τιμών των σχέσεων της Ενότητας (2.6.1) με τις μετρούμενες μέσες τιμές του μήκους της φλόγας καταγράφηκαν στο συγκεντρωτικό και εποπτικό Σχήμα (6.1). Πιο συγκεκριμένα, η διχοτόμος ευθεία του διαγράμματος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι διακεκομμένη, υποδεικνύει πλήρη ταύτιση των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών. Αντιθέτως, σημεία που βρίσκονται πάνω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υπερεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του μήκους φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων, ενώ σημεία που βρίσκονται κάτω από την διακεκομμένη γραμμή δηλώνουν υποεκτίμηση των υπολογιζόμενων τιμών των εξισώσεων του μήκους φλόγας σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές των πειραμάτων.

Σχετικά με την χρήση των εξισώσεων, η ένταση της φωτιάς που περιέχουν οι εξισώσεις υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, την ποσότητα του καυσίμου επί ξηρής βάσης και τη μέση τιμή του ρυθμού εξάπλωσης που προέκυψε κατά την ανάλυση του κάθε πειράματος.



**Σχήμα 6.1** Διάγραμμα Μετρούμενου – Υπολογιζόμενου μήκους φλόγας των χαρακτηριστικότερων εξισώσεων.

**Πίνακας 6.1** Συγκεντρικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με το μετρούμενο μήκος της φλόγας των πειραμάτων.

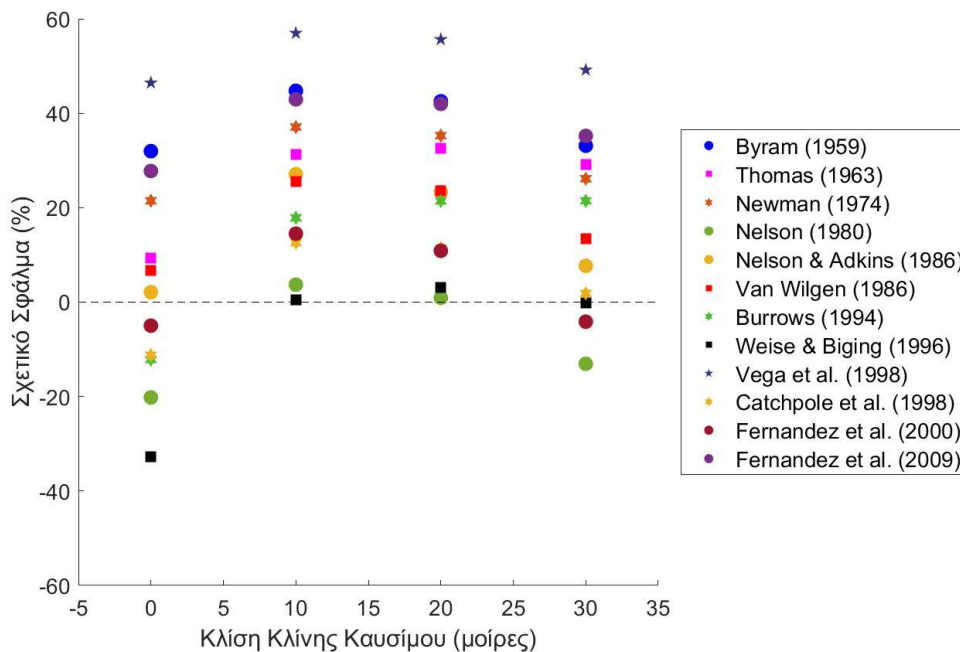
Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)
Byram (1959)	35	Van Wilgen (1986)	15
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	19
Thomas (1963)	26	Weise & Biging (1996)	14
Anderson et al. (1966)	71	Vega et al. (1998)	50
Newman (1974)	27	Catchpole et al. (1998)	11
Nelson (1980)	13	Fernandez et al. (2000)	9
Nelson & Adkins (1986)	14	Fernandez et al. (2009)	35
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 30%			

Από το Σχήμα (6.1) και τον Πίνακα (6.1) εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται καλή συσχέτιση των υπολογιζόμενων με των μετρούμενων τιμών. Με εξαίρεση τις εξισώσεις των Fons et al. (1963) και Anderson et al. (1966), οι οποίες παραλήφθηκαν να σχεδιαστούν λόγω των μεγάλων απόλυτων σφαλμάτων, καθώς και των Vega et al. (1998), όλες οι υπόλοιπες εξισώσεις παρουσιάζουν σχετικά καλή ακρίβεια στον υπολογισμό του μήκους της φλόγας. Επίσης, παρατηρείται ότι οι περισσότερες εξισώσεις έχουν την τάση να υπερεκτιμούν το μήκος της φλόγας καθώς τα πειραματικά σημεία βρίσκονται πάνω από τη διακεκομμένη γραμμή της διχοτόμου. Τέλος, παρατηρείται ότι

όσο αυξάνεται το μετρούμενο μήκος φλόγας τα πειραματικά σημεία απομακρύνονται μεταξύ τους για το ίδιο μετρούμενο μήκος φλόγας, ενώ αντιθέτως οι εξισώσεις συμφωνούν περισσότερο σε μικρότερα μετρούμενα μήκη φλόγας όπου τα σημεία είναι πιο πυκνά τοποθετημένα.

### 6.1.1 Αξιολόγηση Εξισώσεων ως προς την Γωνία Κλίσης της Κλίνης Καυσίμου

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της κλίσης της γωνίας κλίσης της κλίνης καυσίμου στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (6.2) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλες τις γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου που εξετάστηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος ορίζει την ταύτιση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων με τις μετρούμενες τιμές του μήκους φλόγας των πειραμάτων.



**Σχήμα 6.2** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την γωνία κλίσης της κλίνης του καυσίμου. Ειδικότερα, εξετάστηκαν τα πειράματα S0-FLO\_5-FM8, S10-FLO\_5-FM8, S20-FLO\_5-FM8 και S30-FLO\_5-FM8. Η ποσότητα καυσίμου και η περιεχόμενη υγρασία διατηρούνταν σταθερά.

**Πίνακας 6.2** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της γωνίας κλίσης της κλίνης στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

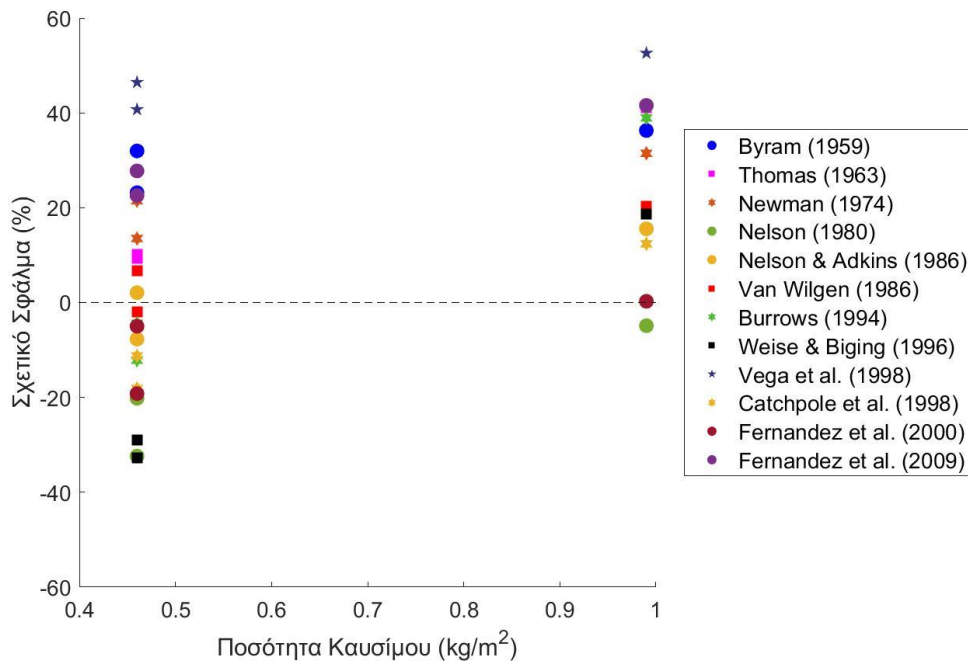
Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)
Byram (1959)	35	Van Wilgen (1986)	15
Fons et al. (1963)	84	Burrows (1994)	19
Thomas (1963)	26	Weise & Biging (1996)	14
Anderson et al. (1966)	71	Vega et al. (1998)	52
Newman (1974)	27	Catchpole et al. (1998)	9
Nelson (1980)	13	Fernandez et al. (2000)	9
Nelson & Adkins (1986)	14	Fernandez et al. (2009)	37
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 31%			

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρούνται μικρές τιμές σχετικού σφάλματος για τις περισσότερες εξισώσεις σε όλες τις γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου. Για γωνία κλίσης 0 μοιρών οι εξισώσεις υποεκτιμούν και υπερεκτιμούν το μήκος της φλόγας. Αντίθετα, για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης, όλες οι εξισώσεις παρέχουν κυρίως συντηρητικές προβλέψεις.

### *6.1.2 Αξιολόγηση Εξισώσεων ως προς την Περιεχόμενη Υγρασία και την Ποσότητα του Καυσίμου*

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας καυσίμου στην επαλήθευση των υπολογιζόμενων τιμών του μήκους φλόγας των εξισώσεων. Στο εποπτικό και συγκεντρωτικό Σχήμα (6.3) αποτυπώνεται το σύνολο των σημείων για όλες τις τιμές περιεχόμενης υγρασίας και ποσότητας καυσίμου.





**Σχήμα 6.3** Διάγραμμα του σχετικού σφάλματος της τιμής του μήκους της φλόγας ως προς την ποσότητα και την περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου. Ειδικότερα, εξετάστηκαν τα πειράματα S0-FLO\_5-FM1, S0-FL1-FM1 και S0-FLO\_5-FM8. Η γωνία κλίσης της κλίνης διατηρούνταν σταθερή.

**Πίνακας 6.3** Συγκεντρωτικός κατάλογος των απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων σχετικά με την επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας και της ποσότητας καυσίμου στο μετρούμενο μήκος φλόγας των πειραμάτων.

Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)	Εξίσωση	Απόλυτο Σφάλμα (%)
Byram (1959)	30	Van Wilgen (1986)	10
Fons et al. (1963)	83	Burrows (1994)	18
Thomas (1963)	20	Weise & Biging (1996)	27
Anderson et al. (1966)	69	Vega et al. (1998)	47
Newman (1974)	22	Catchpole et al. (1998)	14
Nelson (1980)	19	Fernandez et al. (2000)	8
Nelson & Adkins (1986)	8	Fernandez et al. (2009)	31
Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων = 29%			

Από το παραπάνω διάγραμμα και τον πίνακα εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρούνται μικρές τιμές σχετικού σφάλματος για τις περισσότερες εξισώσεις για όλους τους συνδυασμούς ποσότητας και περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου. Για το πείραμα που έγινε με ποσότητα καυσίμου  $1 \text{ kg/m}^2$  παρατηρείται υπερεκτίμηση των υπολογιζομένων τιμών του μήκους της φλόγας από τις εξισώσεις. Αντίθετα, για τα

πειράματα με ποσότητα καυσίμου  $0.5 \text{ kg/m}^2$  οι εξισώσεις υπερεκτιμούν και υποεκτιμούν την τιμή του μήκους της φλόγας παρουσιάζοντας μικρές διαφορές όταν μεταβάλλεται η περιεχόμενη υγρασία καυσίμου από 8% σε 1%.

### *6.1.3 Γενική Αξιολόγηση Εξισώσεων και Σύγκριση Αποτελεσμάτων με το Κεφάλαιο 3*

Σε γενική επισκόπηση, παρατηρείται καλή ακρίβεια του υπολογισμού του μήκους της φλόγας από τις περισσότερες εξισώσεις. Ειδικότερα, οι εξισώσεις των Nelson (1980), Nelson & Adkins (1986), Van Wilgen (1986), Weise & Biging (1996), Catchpole et al. (1998) και Fernandez et al. (2000) ξεχωρίζουν για την ακρίβεια υπολογισμών τους καθώς παρέχουν απόλυτο σφάλμα χαμηλότερο από 15%.

Επίσης, οι εξισώσεις των Catchpole et al. (1998) και Fernandez et al. (2000) ξεχωρίζουν καθώς παρέχουν το μικρότερο σχετικό σφάλμα και μη συντηρητικές προβλέψεις, κάτι που δείχνει μεγάλη ακρίβεια ερμηνείας του φυσικού φαινομένου, αλλά η χρήση τους για σχεδιασμό συστημάτων πυροπροστασίας κρίνεται επισφαλής.

Τέλος, παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία της ακρίβειας των εξισώσεων τόσο με τα πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών (Κεφάλαιο 3), όσο και με τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα, οι εξισώσεις των Nelson (1980), Nelson & Adkins (1986), Van Wilgen (1986), Catchpole et al. (1998) και Fernandez et al. (2000) είχαν ξεχωρίσει για την ακρίβεια των υπολογισμών του μήκους της φλόγας τόσο για τα πειραματικά σημεία του Κεφαλαίου 3 όσο και για τα πειραματικά σημεία της παρούσας εργασίας.

Καταληκτικά, η εξίσωση του Fernandez et al. (2000) είχε επιλεγεί στην ανάλυση του Κεφαλαίου 3 ως η ακριβέστερη μεταξύ των υπολοίπων εξισώσεων. Εξίσου και στα πειραματικά σημεία της παρούσας εργασίας παρουσιάζει το μικρότερο απόλυτο σφάλμα και ουσιαστικά τη μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς της. Επομένως, μπορεί να εκτιμηθεί ότι η εξίσωση του Fernandez et al. (2000) συνίσταται να χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη πρόβλεψη του μήκους της φλόγας.

Στον Πίνακα (6.4) παρουσιάζεται μια εποπτική παρουσίαση και σύγκριση των εξισώσεων για την ακρίβεια των υπολογισμών τους τόσο για την ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 3 όσο και για την ανάλυση του παρόντος Κεφαλαίου 6 και εξάγεται ο μέσος όρος τους.

**Πίνακας 6.4** Συνολικός μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων των εξισώσεων μήκους φλόγας για τα Κεφάλαια 3 και 6.

<b>Εξίσωση</b>	<b>Απόλυτα σφάλματα Κεφαλαίου 3 (%)</b>	<b>Απόλυτα σφάλματα Κεφαλαίου 6 (%)</b>	<b>Μέσος όρος απόλυτων σφαλμάτων των δύο κεφαλαίων (%)</b>
<b>Byram (1959)</b>	37	35	36
<b>Fons et al. (1963)</b>	85	84	84.5
<b>Thomas (1963)</b>	39	26	32.5
<b>Anderson et al. (1966)</b>	72	71	71.5
<b>Newman (1974)</b>	32	27	29.5
<b>Nelson (1980)</b>	29	13	21
<b>Nelson &amp; Adkins (1986)</b>	27	14	20.5
<b>Van Wilgen (1986)</b>	27	15	21
<b>Burrows (1994)</b>	43	19	31
<b>Weise &amp; Biging (1996)</b>	38	14	26
<b>Vega et al. (1998)</b>	51	50	50.5
<b>Catchpole et al. (1998)</b>	28	11	19.5
<b>Fernandez et al. (2000)</b>	26	9	17.5
<b>Fernandez et al. (2009)</b>	39	35	37

## 7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα. Ειδικότερα, τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο οι μελετητές προσπαθούν να κατανοήσουν όλες τις πτυχές του φαινομένου με απώτερο σκοπό την ενίσχυση της πυροπροστασίας και την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και του φυσικού περιβάλλοντος. Λόγω της έντονης πολυπλοκότητας και συνθετότητας του φαινομένου της δασικής πυρκαγιάς δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα που να καλύπτουν όλες τις συνιστώσες του φαινομένου και η μελέτη του χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται πειραματικά η επίδραση διάφορων παραγόντων στη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φωτιάς σε διάταξη κλίνης καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες που μελετήθηκαν για την επίδραση τους στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φωτιάς ήταν:

- Η γωνία κλίσης της κλίνης καυσίμου  $S$  (μοίρες)
- Η ποσότητα καυσίμου  $w_0$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
- Η περιεχομένη υγρασία καυσίμου  $FMC$  (%)

Ταυτόχρονα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας που προσδιορίστηκαν με τη χρήση της επεξεργασίας εικόνας (image processing) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες σχέσεις υπολογισμού διάφορων ερευνητών ήταν:

- Ύψος φλόγας  $h_F$  (m)
- Μήκος φλόγας  $L$  (m)
- Γωνία κλίση φλόγας  $A_T$  (μοίρες)

Τέλος, με την ανάλυση επεξεργασίας εικόνας προσδιορίστηκε και ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς  $r$  (m/s) αλλά δεν πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση του στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακές κάμερες τοποθετημένες σε κατάλληλα σημεία πίσω και πλάγια από την εγκατάσταση της κλίνης καυσίμου.

Με βάση την αξιολόγηση των Σχημάτων του Κεφαλαίου 5 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

### 1. Για το ύψος της φλόγας:

- Με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 0 σε 10 μοίρες δεν παρατηρείται μεταβολή στο ύψος της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 10 σε 20 μοίρες παρατηρείται μικρή αύξηση του ύψους της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 20 σε 30 μοίρες παρατηρείται έντονη αύξηση του ύψους της φλόγας (Σχήμα 5.12).
- Με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου από  $0.5 \text{ kg}/\text{m}^2$  σε  $1 \text{ kg}/\text{m}^2$  παρατηρείται αύξηση του ύψους της φλόγας (Σχήμα 5.13).

- Με τη αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 1% σε 8% παρατηρείται μείωση του ύψους της φλόγας (Σχήμα 5.13).

## 2. Για το μήκος της φλόγας:

- Με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 0 σε 10 μοίρες δεν παρατηρείται μεταβολή στο μήκος της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 10 σε 20 μοίρες παρατηρείται μικρή αύξηση του μήκους της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 20 σε 30 μοίρες παρατηρείται έντονη αύξηση του μήκους της φλόγας (Σχήμα 5.15).
- Με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου από 0.5 kg/m<sup>2</sup> σε 1 kg/m<sup>2</sup> παρατηρείται αύξηση του μήκους της φλόγας (Σχήμα 5.17).
- Με τη αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 1% σε 8% παρατηρείται μείωση του μήκους της φλόγας (Σχήμα 5.17).

## 3. Για τη γωνία κλίσης της φλόγας:

- Με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 0 σε 10 μοίρες παρατηρείται αύξηση της γωνίας κλίσης της φλόγας από τις αρνητικές στις θετικές μοίρες, κάτι που δείχνει ότι η φωτιά γέρνει ελαφρώς μπρος την κατεύθυνση εξάπλωσης της. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 10 σε 20 μοίρες δεν παρατηρείται μεταβολή στη γωνία κλίσης της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 20 σε 30 μοίρες παρατηρείται έντονη αύξηση της γωνίας κλίσης της φλόγας προς την κατεύθυνση εξάπλωσης της. (Σχήμα 5.18).
- Με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου από 0.5 kg/m<sup>2</sup> σε 1 kg/m<sup>2</sup> παρατηρείται αύξηση της γωνίας κλίσης της φλόγας (Σχήμα 5.20).
- Με τη αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 1% σε 8% παρατηρείται μικρή μείωση στην γωνία κλίσης της φλόγας (Σχήμα 5.20).
- Γενικά, δεν παρατηρείται σταθερή συμπεριφορά της γωνίας κλίσης της φλόγας για μικρά χρονικά διαστήματα για όλες τις εξεταζόμενες συνθήκες, κάτι που δείχνει ότι η φλόγα διαρκώς τρεμοπαίζει.

## 4. Για το ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας:

- Με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 0 σε 10 μοίρες παρατηρείται αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 10 σε 20 μοίρες παρατηρείται αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 20 σε 30 μοίρες παρατηρείται έντονη αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας. (Σχήμα 5.21).
- Με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου από 0.5 kg/m<sup>2</sup> σε 1 kg/m<sup>2</sup> παρατηρείται αύξηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας (Σχήμα 5.22).
- Με τη αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 1% σε 8% παρατηρείται μείωση του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς (Σχήμα 5.22).

Στον Πίνακα (7.1) γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της επίδρασης που προκαλεί η αύξηση των βασικών παραμέτρων που εξετάστηκαν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας.

**Πίνακας 7.1** Επίδραση αύξησης βασικών παραμέτρων στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας.

A/A		Γωνία κλίσης κλίνης καυσίμου (μοίρες)			Ποσότητα καυσίμου (kg/m <sup>2</sup> )	Περιεχόμενη υγρασία καυσίμου (%)
		0→10	10→20	20→30	0.5→1	1→8
1	Ύψος φλόγας	-	↑	↑	↑	↓
2	Μήκος φλόγας	-	↑	↑	↑	↓
3	Γωνία κλίσης φλόγας	↑	-	↑	↑	↓
4	Ρυθμός εξάπλωσης φλόγας	↑	↑	↑	↑	↓

Όσον αφορά τη σύγκριση των μετρούμενων πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες υπολογιζόμενες τιμές των εξισώσεων για το μήκος φλόγας εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εξίσωση του Fernandez et al. (2000) παρέχει τους ακριβέστερους υπολογισμούς για την τιμή του μήκους της φλόγας. Ειδικότερα για τη συγκεκριμένη εξίσωση:

- Με την αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 0 σε 10 μοίρες παρατηρείται αύξηση του σχετικού σφάλματος. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 10 σε 20 μοίρες παρατηρείται μείωση του σχετικού σφάλματος. Για αύξηση της γωνίας κλίσης της κλίνης του καυσίμου από 20 σε 30 μοίρες παρατηρείται μείωση του σχετικού σφάλματος (Σχήμα 6.2). Για γωνίες κλίσης της κλίνης καυσίμου 0 και 30 μοιρών οι προβλέψεις της εξίσωσης είναι μη συντηρητικές, ενώ για γωνίες 10 και 20 μοιρών οι προβλέψεις είναι συντηρητικές.
- Με την αύξηση της ποσότητας καυσίμου από 0.5 kg/m<sup>2</sup> σε 1 kg/m<sup>2</sup> παρατηρείται μείωση του σχετικού σφάλματος (Σχήμα 6.3). Για ποσότητα καυσίμου 1 kg/m<sup>2</sup> υπάρχει απόλυτη ακρίβεια της πειραματικής τιμής με την υπολογιζόμενη τιμή της εξίσωσης, ενώ για ποσότητα καυσίμου 0.5 kg/m<sup>2</sup> οι προβλέψεις της εξίσωσης είναι μη συντηρητικές.
- Με τη αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας από 1% σε 8% παρατηρείται αύξηση του σχετικού σφάλματος (Σχήμα 6.3). Για περιεχόμενη υγρασία 1% υπάρχει απόλυτη ακρίβεια της πειραματικής τιμής με την υπολογιζόμενη τιμή της εξίσωσης, ενώ για περιεχόμενη υγρασία 8% οι προβλέψεις της εξίσωσης είναι μη συντηρητικές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΕΛΛΗΝΙΚΗ)

- Αθανασίου, Μ. (2015). Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, Διδακτορική Εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Γκόφας, Α. (1992). Εγχειρίδιο δασοπυρόσβεσης. Υπουργείο Γεωργίας. Γενική Γραμματεία Δασών και Φυσικού Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη.
- Γκόφας, Α. (2001). Εγχειρίδιο δασοπυρόσβεσης. Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.
- Έκθεση της Ανεξάρτητης Επιτροπής για τις Προοπτικές Διαχείρισης Πυρκαγιών Δασών και Υπαίθρου στην Ελλάδα. (2019), Αθήνα.
- Καϊλίδης, Δ. Σ. και Καρανικόλα, Π. (2004). Δασικές Πυρκαγιές, 1900 - 2000. Εκδόσεις Χριστοδουλίδη, Θεσσαλονίκη.
- Καλαμποκίδης, Κ., Ηλιόπουλος, Ν., και Γλιγλίνος, Δ. (2013). Πυρο-Μετεωρολογία και Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών σε ένα Μεταβαλλόμενο Κλίμα. Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ, Αθήνα.
- Κατσάνος, Α. Μ. (1970). Συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών των δασών. Αθήνα, σελ 1-129.
- Κόντης, Χ., Τσίχλας Χ. (2018). Πειραματική Διερεύνηση Επίδρασης Γεωμετρίας Εξώστη στα Θερμικά και Ροϊκά Χαρακτηριστικά φωτιάς Εξερχόμενης από Άνοιγμα. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κωνσταντινίδης, Π. (2003). Μαθαίνοντας να ζούμε με τις Δασικές Πυρκαγιές, Εκδόσεις Χριστοδουλίδη. 312 σελ.
- Ξανθόπουλος, Γ. (1993). Η μετεωρολογία σε σχέση με τις δασικές πυρκαγιές. Σημειώσεις για το σεμινάριο εκπαίδευσης των στελεχών της Δασικής Υπηρεσίας, Αθήνα.
- Σιμόπουλος, Σ.Ε. (1989) Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών Β' Έκδοση, Εκδόσεις Πολυτεχνείου.
- Ταμπάκης, Σ. Καρανικόλα, Π. (2015). Δασικές Πυρκαγιές και Κοινωνία, Έκδοση Τμήματος Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Φούντη, Μ.Α., Κολαϊτή, Δ.Ι. (2004). Θεωρία Καύσης. Εκδόσεις Φούντας. Αθήνα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΞΕΝΗ)

- Albini, F.A. (1976). Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Albini, F.A. (1981). A model for the wind-blown flame from a line fire. *Combustion and Flame*, 43(C), 155–174. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(81\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(81)90014-6)
- Albini, F.A. (1985). A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Sci. Technol.*, 42(5&6), 229-258.
- Albini, F.A. (1986). Wildland fire spread by radiation-a model including fuel cooling by natural convection. *Combust. Sci. Technol.*, 45(1&2), 101-113.
- Albini, F.A., and B. J. Stocks (1986): Predicted and observed rates of spread of crown fires in immature jack pine. *Combustion Science and Technology* 48:65-76.
- Alexander, M.E. (1982). Erratum: Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany*, 60(10), 2185–2185. <https://doi.org/10.1139/b82-267>
- Alexander, M.E. (2000). Fire behaviour as a factor in forest and rural fire suppression. *Forest*



- Research, Rotorua, in association with the National Rural Fire Authority, Wellington. Forest Research Bulletin No. 197, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series, Report No. 5. 30 p.
- Alexander, M.E., & Cruz, M.G. (2012). Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire*, 26(4), 95–113. <https://doi.org/10.1071/WF11001>
- Anderson, H.E., Brackebusch, A.P., Mutch, R.W., & Rothermel, R.C. (1966). Mechanisms of fire spread research progress report 2. *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-28. (Ogden, UT).*
- Anderson, H.E. (1969). Heat transfer and fire spread. *USDA Forest Service Research Paper INT*, 69, 1-20.
- Anderson, W.R., E. Pastor, B. Butler, E. Catchpole, P. Fernandes, M. Guijarro, J.-M. Mendes-Lopes, and J. Ventura. (2006). Evaluating models to estimate flame characteristics for free-burning fires using laboratory and field data. *Forest Ecology and Management* 234 (Supplement): s77 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.113>.
- Andrews, P.L. and R.C. Rothermel (1982). Charts for interpreting wildland behavior characteristics. USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station, General Technical Report INT-131, Ogden, Utah. 21p.
- Burgan, R.E. and R.C. Rothermel. (1984). BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modelling system—FUEL subsystem. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.
- Burrows, N.D. (1994). Experimental development of a fire management model for jarrah (*Eucalyptus marginata* Donn ex Sm.) forest. PhD thesis, Australian National University, Canberra.
- Burrows, N.D. (1999). Fire behaviour in jarrah forest fuels: 1. Laboratory experiments. *CALMScience* 3(1), 31–56.
- Byram, G. (1959). Forest Fire Control and Use. *Ecology*, 42(3), 609–610. <https://doi.org/10.2307/1932261>
- Campbell-Lochrie, Z., Walker-Ravena, C., Gallagher, M., Skowronski, N., Mueller, E. V., & Hadden, R. M. (2020). Investigation of the role of bulk properties and in-bed structure in the flow regime of buoyancy-dominated flame spread in porous fuel beds. *Fire Safety Journal*, xxxx, 103035. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103035>
- Catchpole, W.R., Catchpole, E.A., Rothermel, R.C., Morris, G.A., Butler, B.W. and D.J. Latham. (1998). Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combust. Sci.Technol* 131, 1-37.
- Catchpole, W.R., Bradstock, R.A., Choate, J., Fogarty, L.G., Gellie, N., McCarthy, G., McCaw, W.L., Marsden-Smedley, J.B., Pearce, G. (1998) Cooperative development of equations for heathland fire behaviour. In 'Proceedings of 3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Volume II', 16–20 November 1998, Luso–Coimbra, Portugal. (Ed. DX Viegas) pp. 631–645. (University of Coimbra: Coimbra, Portugal)
- Cheney, N.P., Gould, J.S., Catchpole, W.R. (1993). The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands, *Int. J. Wildland Fire* 3 (1) 31.
- Cheney, N.P., Gould, J.S., Catchpole, W.R. (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 8, 1–13. [doi:10.1071/WF9980001](https://doi.org/10.1071/WF9980001)
- Clark, R.G. (1983) Threshold requirements for fire spread in grassland fuels. PhD dissertation, Texas Tech University, Lubbock.

- Countryman, C.M. (1972). The fire environment concept. Berkeley, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- Cruz, M.G., Butler B.W. and M.E. Alexander. (2006). Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: Model behavior and evaluation. *International Journal of Wildland Fire* 15: 61–72.
- Deeming, J.E., Lancaster, J.W. Forsberg, M.A., Furman R.W. and M.J. Schroeder. (1972). The National Fire Danger Rating System, Report No. RM-84. USDA, Forest Service, Ogden, UT.
- Deeming, J.E., Burgan, R.E. and J.D Cohen. (1977). The National Fire-Danger Rating System - 1978. USDA, Forest Service, General Technical Report INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden Utah. 63 p.
- Drysdale, D. (1998). An introduction to fire dynamics. 2nd ed. (Wiley: Chi Chester, UK).
- Dupuy, J.L. (1995). Slope and fuel load effects on fire behavior: Laboratory experiments in pine needles fuel beds. *Int J Wildland Fire* <http://dx.doi.org/10.1071/WF9950153>.
- Dupuy, J.L, Maréchal, J, Portier, D, Valette, J-C (2011). The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire* 20. 272–288.
- Fernandez, P.M, Catchpole, W.R., Rego, F.C. (2000). Shrubland fire behaviour modeling with micro plot data. *Canadian Journal of Forest Research* 30. 889–899. doi: 10.1139/X00-012
- Fernandez, P.M., Botelho, H.S., Rego, F.C., Loureiro, C. (2009). Empirical modeling of surface fire behaviour in maritime pine stands. *International Journal of Wildland Fire* 18, 698–710. doi:10.1071/WF08023
- Fons, W.L. (1946). Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*. 72: 93-121.
- Fons, W. L., H. B. Clements, E. R. Elliott, and P.M. George. (1963). Project fire model summary progress report, II. Nat. Bur. Stand. with USDA For. Serv., Southeast. For. Exp. Stn., South. For. Fire Lab., Macon, Ga .. 55 p.
- Foster, T. (1976). Bushfire, History, Prevention, Control A. H. and A. W. Reep pp. 1-127 Sydney, Wellington, London.
- Gisborne, H.T. (1929). The complicated controls of fire behaviour. *Journal of Forestry* 27(3), 311–312.
- Hawley, L.F. (1926). Theoretical considerations regarding factors which influence forest fires. *Journal of Forestry* 24(7), 756–763.
- Luke, R.H. and A.G. McArthur. (1978). Bushfires in Australia. Aust. Gov. Publ. Serv., Canberra, ACT. 359 p.
- Marcelli, T., Balbi, J.-H., Moretti, B., Rossi, J.-L., & Chatelon, F.-J. (2011). Flame height model of a spreading surface fire. *Seventh Mediterranean Combustion Symposium, December 2014*, 11–15.
- McArthur, A.G. (1958). The preparation and use of fire danger tables. In Proceedings of the Fire Weather Conference. Commonw. Aust., Bureau Meteor., Melbourne, Australia. 18 p.
- McArthur, A.G. (1962). Control burning in eucalyptus forests. Commonw. Aust., For. Timber Bureau, Canberra, ACT. Leaflet. 80. 31 p.
- McArthur, A. G., & Cheney, N. P. (1966). The Characterization of Fires in Relation to Ecological Studies. *Fire Ecology*, 11(1), 3–9. <https://doi.org/10.1007/bf03400629>
- McArthur, A.G. (1967). Fire behaviour in eucalypt forests. Dep. of Nat. Dev., For. and Timber Bur. Leaflet. No. 107. Canberra, Australia. 36 p.

- McArthur, A.G. (1973). Forest fire danger meter Mk.5. Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau, Canberra, Australia.
- Mendez-Lopez JMC, Ventra JMP, Amaral JMP (2003). Flame characteristics, temperature-time curves, and rate of spread of fires propagating in a bed of *Pinus pinaster* needles. *Int J Wildland Fire* 12:67–84
- Nelson, R.M.Jr., (1980). Flame characteristics for fires in southern fuels. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-205. Southeast. For. Exp. Station, Asheville, NC, USA.
- Nelson, R.M. and C.W. Adkins. (1986). Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Can. J. For. Res.* 16, 1293-1300.
- Nelson, R.M. (2002). An effective wind speed for models of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 11, 153–161.
- Newman, M. (1974): Toward a common language for aerial delivery mechanics. *Fire Manage. Notes*, 35(1), 18-19.
- Pagni, P.J. (1972). *Flame spread through porous fuels*. Symp. (Int.) Combust., [Proc.], 14, 1099-1107.
- Peet, G.B. (1972). Fire studies in jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest. M.Sc. Thesis, Univ. Melbourne, Melbourne.
- Putnam, A.A. (1965). A model study of wind-blown free-burning fires. In: proceedings of the 10th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1039-1046.
- Rossa, C.G. (2017). The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope. *International Journal of Wildland Fire*. 26(1): 24–31.
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.
- Rothermel, R.C. and J.E. Deeming. (1980). Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects. U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-93.
- Rothermel, R.C. (1991b). Crown fire analysis and interpretation, pp.253-263. In: Andrews P.I., Potts D.F., (eds.), Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology. Society of American Foresters, Missoula, Montana, USA.
- Scott, J.H. (2012). Introduction to Wildfire Behavior Modeling. National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer. Available: [www.nifftt.gov](http://www.nifftt.gov).
- Show, S.B. (1919). Climate and forest fires in northern California. *J. For.* 17: 965-979.
- Simard, A.J., Blank, R.W. and S.L. Hobrle. (1989). Measuring and interpreting flame height in wildland fires. *Fire Technology*, p. 114-133.
- Simeoni, A. (2016). Wildland Fires. , in: Hurley, M.J. (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY. Springer New York, pp. 3283–3302. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_87](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_87)
- Simms, D.L. (1963). On the pilot ignition of wood by radiation. *Combust. Flame*, 7(3), 253-261.
- Sneeuwjagt, R.J. and W.H. Frandsen. (1977). Behavior of experimental grass fires vs. predictions based on Rothermel's fire model. *Can. J. For. Res.* 7: 357-367.
- Sullivan, A.L. (2009). Improving operational models of fire behavior. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009. <http://mssanz.org.au/modsim09>
- Sullivan, A.L. (2017a). Inside the Inferno: Fundamental Processes of Wildland Fire Behaviour: Part 1: Combustion Chemistry and Heat Release. *Current Forestry Reports*, 3(2), 132–149. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0057-0>
- Sullivan, A.L. (2017b). Inside the Inferno: Fundamental Processes of Wildland Fire Behaviour:

- Part 2: Heat Transfer and Interactions. *Current Forestry Reports*, 3(2), 150–171. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0058-z>
- Tarifa, C.S., and A.M. Torralbo I. (1967). Flame propagation along the interface between a gas and a reacting medium. P. 533-544, illus., In : Eleventh Symposium (International) on Combustion (Berkeley, California 1967). Pittsburgh: The Combust. Inst.
- Taylor, G.I. (1961). Fire under influence of natural convection. International Symposium on The Use of Models in Fire Research, Publication 786, National Academy of Sciences—National Research Council (Washington, D.C.), 10.
- Thomas, P. H. (1963). The size of flame from natural fires. *Proceedings of the Combustion Institute*, 9, 844–859.
- Thomas, P.H. 1967. Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Journal of Forestry* 40. 139–164. doi:10.1093/FORESTRY/40.2.139.
- Tihay, V., Morandini, F., Santoni, P. A., Perez-Ramirez, Y., & Barboni, T. (2014). Combustion of forest litters under slope conditions: Burning rate, heat release rate, convective and radiant fractions for different loads. *Combustion and Flame*, 161(12), 3237–3248. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.06.003>
- Van Wagner, C.E. (1967). Calculations on forest fire spread by flame radiation. *Special paper for the 6th world forestry conference*: 1-14.
- Van Wagner, C.E. (1968). Fire behaviour mechanisms in a Red Pine plantation: field and laboratory evidence. *Forestry Branch Departmental Publication No. 1229*, 1, 747–781. <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications/?id=24753%5Cnhttp://cfs.nrcan.gc.ca/publications/download-pdf/24753>
- Van Wagner, C.E. (1972). Heat of combustion, heat yield and fire behaviour. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Information Report PS-X-35, Chalk River
- Van Wagner, C.E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*. 7: 23–34.
- Van Wagner, C.E. (1988). Effect of slope on fires spreading downhill. *Can. J. For. Res.* 18:818-820.
- Van Wilgen, B.W. (1986) A simple relationship for estimating the intensity of fires in natural vegetation. *South African Journal of Botany* 52, 384–385.
- Vega, J.A., Cuinas, P., Fonturbel, T., Perez-Gorostiaga, P., Fernandez, C. (1998) Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes. In ‘Proceedings of 3rd International Conference on Forest R *Int. J. Wildland Fire* M. E. Alexander and M. G. Cruz Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Volume II’, 16–20 November 1998, Luso–Coimbra, Portugal. (Ed. DX Viegas) pp. 713–728. (University of Coimbra: Coimbra, Portugal)
- Viegas, D.X., Varela, V. and Borges, C. M. (1994). On the Evolution of a Linear Fire Front on a Slope - *Proc. II Int. Conference on Forest Fire Research*, Coimbra.
- Viegas, D.X., Ribeiro, P.R., Cruz, M.G. (1998). Characterization of the combustibility of forest fuels. In ‘Proceedings of III International Conference on Forest Fire Research’, 16–20 November 1998, Vol. B.17. (Ed. DX Viegas) pp. 467–482. (ADAI, University of Coimbra: Portugal)
- Viegas, D.X. and L.P. Pita. (2004). Fire spread in canyons. *IJWF*, 13, 253-274.
- Viegas, D.X. (2002). Fire line rotation as a mechanism for fire spread on a uniform slope. *International Journal of Wildland Fire* 11, 11–23. doi:10.1071/WF01049.
- Viegas, D.X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International*

Journal of Wildland Fire 15(2) 169-177.

- Weise, D.R., Biging, G.S. (1996). Effects of wind velocity and slope on flame properties. *Canadian Journal of Forest Research* 26, 1849–1858. doi:10.1139/X26-210
- Weise, D.R. and G.S. Biging. (1997). A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Science* 43 (2), p. 170-180.
- Xie, X. , N. Liu, J. Lei, Y. Shan, L. Zhang, H. Chen, X. Yuan, H. Li, (2017). Upslope fire spread over a pine needle fuel bed in a trench associated with eruptive fire, *Proc. Combust. Inst.* 36 3037–3044.
- Xie, X. Naian, Liu, Jorge, R. Raposo, Domingos, X. Viegas, Xieshang Yuan, Ran Tu, (2020). An experimental and analytical investigation of canyon fire spread, *Proc. Combust Inst.* 212 367-376.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Α

Παρατίθεται ο χρησιμοποιούμενος κώδικας αναγνώρισης φλόγας:

```
%selection of the world limits
WX=[0 1.643];
WY=[0.034 0.8700];

%WX: It is a 2x1 vector with the world coordinate values at the left and
%right side of the image. For example from 0 to 1 meter, [0 1]

%WY: It is a 2x1 vector with the world coordinate values at the bottom
%and top side of the image. For example from 0 to 0.6 meters, [0 0.6]

%The script assumes that the I0s and Is are saved in defined folders(e.g. 'raw' and
'processed' respectively) that
%will be used to read the data. Additionally, an empty folder (e.g.
%'result') should be created for the final results to be saved at, later in the code.

% A set is defined through the path to the location of the respective
% folder.
I0s=dir('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Όλα τα πειράματα\20210531-S00-FL0_5-
FMC08\photos5\all5\*.jpg');
Is=dir('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Όλα τα πειράματα\20210531-S00-FL0_5-
FMC08\photos5\all5\*.jpg');

%The dir function recognizes and reads the name of all the elements in the specified folder,
%that are of .jpg kind ( So if the folder raw contains images and for
%example, excel files, the function will read only the images.). The latter
%is done via the /*name coding.

N=length(Is); % The number of images in the 'processed' folder, it is assumed that it is the
same with that of the 'raw' folder.

%identification of pixel value via matrix size, on the first processed
%image, conventionally chosen.
I=strcat('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Όλα τα πειράματα\20210531-S00-FL0_5-
FMC08\photos5\all5\',Is(1).name);
% now I is the name (and the location) of the above mentioned image
I=imread(I);
%now I is the mxn3 matrix that represents that image
s=size(I);
m=s(1); % # of pixel in the vertical direction ( i= 1:m).
n=s(2); % # of pixel in the horizontal direction (j= 1:n).
o=s(3); % o is always 3, referring to the three colorless images
%corresponding to the three colors Red, Green and Blue.

slope=0; %angle of inclination of fuel bed
Dt=0.2; %time step
Ds=zeros(m,2*N); %Initialization of the matrix that will contain the flame dimension data of
the set of I images (Is)
X=zeros(N,1);
T=zeros(N,1);
H=zeros(N,1);
L=zeros(N,1);
AT=zeros(N,1);

for k=1:N
    if k==1
        T(k,1)=0;
    else
        T(k,1)=T(k-1,1)+Dt;
    end
    I0=strcat('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Όλα τα πειράματα\20210531-S00-FL0_5-
FMC08\photos5\all5\',I0s(k).name);
    I0=imread(I0);
    I=strcat('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Όλα τα πειράματα\20210531-S00-FL0_5-
FMC08\photos5\all5\',Is(k).name);
    I=imread(I);
    % I0 and I is the kth image of the 'raw' and 'processed' folder,
    % respectively

%1st step: executed above
```

```

%2nd step: flame detection via a color criterion

% At this step, a matrix (m x n) Iflame, representing a colorless image
% of the same dimensions (m x n), will be produced containing black (0) and
% white elements (255) only. The white elements should correspond to the
% pixels that represent flame. For that to happen, a color criterion
% should be selected. A number of criteria are comparing the values of the
% three colors (Red Green Blue) for each pixel. Other criteria require
% transformation from the Red Green Blue color model (RGB) to a
% different color model. For example Yellow-Cyan-Magenta (YCM)

%In this case a Y-U-V model will be utilized, specifically the Y'Cb Cr. Y
%represents the luminance of the color, which is related to the
%('black-and-white') brightness of the subject color. Chrominance is
%related to the color information, untangled by luminance (mathematically
%explained below). U and V
%or (Cb and Cr) represent the chrominance components, where Cb (or U) is
%the blue projection and Cr (or V) is the red projection. Cb
%and Cr are defined mathematically as: Cb=B'-Y' and Cr=R'-Y'. In the subject model,
% instead of Luminance (Y), Luma
%(Y') is utilized. The latter is the luminance related to the
%gamma-compressed RGB (also noted R'G'B') components of a color image. It is
%interesting to note that the YUV models are a better simulation of the
%eyesight, since our eyesight is more sensitive to differences of luminance
%than those of chrominance [https://en.wikipedia.org/wiki/Luma_(video)]

YCbCr=double(rgb2ycbcr(I));%this function converts the color image
%matrix m x n x 3 to a m x n x 3 matrix containing the Y', Cb and Cr data,
% respectively.

Y=double(YCbCr(:,:,1)); % isolate the luma matrix
Cb=double(YCbCr(:,:,2)); % isolate the chrominance (blue projection matrix)
Cr=double(YCbCr(:,:,3)); % isolate the chrominance (red projection matrix)

Iflame=zeros(m,n,1); % initialization of Iflame.

for i=1:m
    for j=1:n
        if Y(i,j)>=Cb(i,j) % The selected flame identification criterion
            Iflame(i,j)=255;
        end
    end
end

%3rd step flame dimensions extraction
dx=(WX(2)-WX(1))/n; % the world distance between two horizontal pixels
dy=(WY(2)-WY(1))/m; % the world distance between two vertical pixels

D=zeros(m,2); % initialization of the matrix that will contain for a
%given height, the x coordinate of the first point of
%the flame.

for i=1:m
    jm=n+1;
    a=0;
    for j=1:n
        if Iflame(i,j)==255 && a==0
            jm=j;
            a=1;
        end
    end
    D(i,:)=[(WY(1)+(m-i+1)*dy) (WX(1)+(n-jm+1)*dx)];
    %The formulas of the vector are transformation from the pixel space, to
    %the real world space.
end
Ds(:,(2*k-1):(2*k))=D;
X(k)=D(m,2);

% after the code finds the specific height of the fire
b=0;
g=0;
for i=m:-1:1
    if b==0 && D(i,2)==0
        H(k,1)=D(i+1,1);
        b=1;
    end
end

```



```

        g=i+1;
    end
end
D2=zeros(m-g,1);
D3=zeros(m-g,1);

v=0;
if b==1
for i=m:-1:g
    v=v+1;
    D2(v,1)=D(i,1);
    D3(v,1)=D(i,2);
end
else
    for i=m:-1:1
        v=v+1;
        D2(v,1)=D(i,1);
        D3(v,1)=D(i,2);
    end
end

%eradicate flame balls and wing fire information
bet=0;
for i=1:v-1
    one=D2(i,1)/D3(i,1);
    duo=D2(i+1,1)/D3(i+1,1);
    if bet==0 && (one/duo<0.8875 || one/duo>1.25) %selected distance criterion
        ter=i;
        bet=1;
        D4=zeros(ter,1);
        D5=zeros(ter,1);
    end
end

%%%find flame angle AT
if bet==0
    AT2=zeros(v-1,1);
    AT3=zeros(v-1,1);
for i=2:v
    if D3(1,1)==D3(i,1)
        AT2(i-1,1)=90;
    else
        AT2(i-1,1)=atand((D2(i,1)-D2(1,1))/(D3(i,1)-D3(1,1)));
    end
    if AT2(i-1,1)<0
        AT3(i-1,1)=-AT2(i-1,1)-90;
    else
        AT3(i-1,1)=90-AT2(i-1,1);
    end
end
else
    AT2=zeros(ter-1,1);
    AT3=zeros(ter-1,1);
    H(k,1)=D2(ter,1);
    for i=1:ter
        D4(i,1)=D2(i,1);
        D5(i,1)=D3(i,1);
    end

    for i=2:ter
        if D5(1,1)==D5(i,1)
            AT2(i-1,1)=90;
        else
            AT2(i-1,1)=atand((D4(i,1)-D4(1,1))/(D5(i,1)-D5(1,1)));
        end
        if AT2(i-1,1)<0
            AT3(i-1,1)=-AT2(i-1,1)-90;
        else
            AT3(i-1,1)=90-AT2(i-1,1);
        end
    end
end
ATmean(k,1)=mean(AT3);

%find flame length L
L(k,1)=H(k,1)/cosd(ATmean(k,1));

```

```

%4th step: results presentation
figure (1)
subplot(2,2,1), imshow(I0)
subplot(2,2,2), imshow(I)
subplot(2,2,3), imshow(Iflame)
subplot(2,2,4), plot(D(:,2),D(:,1))
axis equal
xlim(WX)
ylim(WY)
xlabel('Height [m]')
ylabel('Distance [m]')
legend('left flame limit')
set(gca, 'XDir','reverse')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% naming and saving the above figure
k=num2str(k); % the k becomes from a number element, a string element
FigureName=strcat('C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\Ολα τα περιγραμματα\20210601-S00-
FL01-FMC01\photos4\results4\','figure_',k, '.jpg');
saveas(gcf,FigureName)
% saved in the empty folder that was mentioned in the beginning of the
% script
end

% find ROS
Dx=zeros(N-1,1);
ROS=zeros(N-1,1);

for i=1:N-1
    if i==1
        Tr(i,1)=0;
    else
        Tr(i,1)=Tr(i-1,1)+Dt;
    end
    Dx(i,1)=X(i+1,1)-X(i,1);
    ROS(i,1)=Dx(i,1)/Dt;
end

% find mean values and standard deviations
mesoH=mean(H);
deviH=std(H);
mesoL=mean(L);
deviL=std(L);
mesoAT=mean(ATmean);
deviAT=std(ATmean);
mesoROS=mean(ROS);
deviROS=std(ROS);

% method of moving average
ave=120; % points of moving average
Hn=zeros(N-ave,1);
ATn=zeros(N-ave,1);
Ln=zeros(N-ave,1);
ROSn=zeros(N-1-ave,1);
tn=T(ave:N);
tnROS=Tr(ave:N-1);

index=0;
for i=ave:N
    ma1=0;
    ma2=0;
    ma3=0;
    index=index+1;
    for j=1:ave
        ma1=ma1+H(i+1-j,1);
        ma2=ma2+ATmean(i+1-j,1);
        ma3=ma3+L(i+1-j,1);
    end
    Hn(index)=ma1/ave;
    ATn(index)=ma2/ave;
    Ln(index)=ma3/ave;
end

index2=0;
for i=ave:N-1
    ma4=0;

```

```

        index2=index2+1;
        for j=1:ave
            ma4=ma4+ROS(i+1-j,1);
        end
        ROSn(index2)=ma4/ave;
    end

%plot the characteristic graphs
figure(2)
plot(tn,Ln)
xlabel('Χρόνος t (s)')
ylabel('Μήκος Φλόγας L (m)')
set(gca,'FontSize',14)

figure(3)
plot(tn,Hn)
xlabel('Χρόνος t (s)')
ylabel('Ψυος Φλόγας h_F (m)')
set(gca,'FontSize',14)

figure(4)
plot(tnROS,ROSn)
xlabel('Χρόνος t(s)')
ylabel('Ευθμός Εξάπλωσης Φλόγας r (m/s)')
set(gca,'FontSize',14)

figure(5)
plot(tn,ATn)
hold on
xlabel('Χρόνος t (s)')
ylabel('Γωνία Κλίσης Φλόγας A_T (μοίρες)')
set(gca,'FontSize',14)

%write the results to an excel document
writematrix(tn,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\time5.xls')
writematrix(Hn,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\height5.xls')
writematrix(Ln,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\length5.xls')
writematrix(ATn,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\angle5.xls')
writematrix(tnROS,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\timeros5.xls')
writematrix(ROSn,'C:\Users\AIKATEPINH\OneDrive\Υπολογιστής\exp\ROS5.xls')

```