

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς στη Φωτιά Σύνθετων Υλικών σε Κρυφές Περιοχές Αεροσκαφών



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΑΜΠΑΡΤΖΑΚΗ ΑΙΜΙΛΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Dr. ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ  
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

## **ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, εκπονημένη μέσα στα πλαίσια ευρύτερης ερευνητικής μελέτης του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και παρουσιάζει τη κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς σύνθετων υλικών στη φωτιά σε κρυφές περιοχές αεροσκαφών. Για τη γνώση και τη τεχνική βοήθεια που έλαβα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αλέξανδρο Ρωμαίο, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας με την καθοδήγηση του οποίου ασχολήθηκα με αυτό το ενδιαφέρον θέμα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη της ομάδας που συνέβαλαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου καθώς και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους καθόλη τη διάρκεια της φοίτησης μου.

Αμπαρτζάκη Αιμιλία  
Μάρτιος 2014

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τη διάρκεια πτήσεων σοβαρά περιστατικά έχουν κάνει την εμφάνιση τους λόγω πυρκαγιάς/φωτιάς σε δυσπρόσιτες περιοχές του αεροσκάφους, τα οποία οδήγησαν ακόμα και στο θάνατο επιβατών. Η φωτιά είναι ένας σημαντικός κίνδυνος, τόσο για την ασφάλεια των επιβατών όσο και για το ίδιο το αεροσκάφος, λόγω του περιορισμένου χρόνου αντιμετώπισής της. Οι φωτιές, που εκδηλώνονται σε μη προσβάσιμες περιοχές του αεροσκάφους, αυξάνουν την πιθανότητα θανατηφόρων ατυχημάτων, διότι όταν γίνουν αντιληπτές, έχουν ήδη εξαπλωθεί σε τέτοιο βαθμό, που περιορίζεται πολύ η δυνατότητα αντιμετώπισής τους.

Κρυφές ή μη προσβάσιμες περιοχές ονομάζονται αυτές στις οποίες δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης μόνιμων συστημάτων πυρόσβεσης, καθώς και το προσωπικό του αεροσκάφους δεν έχει τη δυνατότητα άμεσης πρόσβασης σε αυτές. Τέτοιες είναι τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά πεδία, οι περιοχές ελέγχου, τα πίσω πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου επιβατών, καθώς και το πάνω μέρος της καμπίνας.

Τα γεγονότα αυτά, οδήγησαν στην ανάπτυξη και την πειραματική δοκιμή υλικών όπως, μεταξύ άλλων, στα καλώδια, στα μονωτικά και διαχωριστικά, τα οποία περιορίζουν την εξάπλωση μιας πιθανής φωτιάς.

Επιδίωξη, λοιπόν, αυτής της πτυχιακής είναι να αξιολογηθεί το πιθανό όφελος που προκύπτει από την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται από τις κατασκευάστριες εταιρίες αεροσκαφών, κάτω από τα οποία η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί και να μεταδοθεί στο χώρο της καμπίνας, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τη ζωή των επιβατών, όσο και τον εντοπισμό των εμπλεκόμενων μηχανισμών και των συνεπειών αυτών στις κρυφές περιοχές του αεροσκάφους. Αυτή η γνώση θα παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση της διάδοσης της πυρκαγιάς που προέρχεται από μία μόνο πηγή ανάφλεξης.

Η ανάπτυξη του θέματος ολοκληρώνεται σε τέσσερα Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση ατυχημάτων, που προκλήθηκαν από φωτιές σε κρυφές περιοχές, καθώς και στατιστικά στοιχεία θανατηφόρων ατυχημάτων, τα οποία έχουν σημειωθεί στο πέρασμα του χρόνου. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό, εμφανίζονται οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή υλικών υπό διάφορες κλίμακες (μεγάλης μεσαίας και εργαστηριακής).

Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της φλόγας, όπως για παράδειγμα η διάδοση της (flame spreading), αλλά και η συμπεριφορά της σε συνθήκες περίσσειας αέρα (over ventilated), όσο και έλλειψης αέρα (under ventilated). Επίσης γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη τα τελευταία χρόνια.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της πειραματικής συσκευής και των επιμέρους τμημάτων της. Επίσης γίνεται αναφορά στις συσκευές και τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων όπως είναι το θερμιδόμετρο κώνου και το FTIR (φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier).

Στο τέταρτο και τελευταίο Κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν καθώς και χαρακτηριστικοί δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον χαρακτηρισμό της ευφλεκτότητας των υλικών όπως, ο Heat Release Rate, Flame Spread, Mass Loss, αλλά και δείκτες που αναφέρονται στα προϊόντα της καύσης των υλικών αυτών όπως, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO & CO<sub>2</sub>) και παραγωγή καπνού. Επίσης παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό της πειραματικής συσκευής καθώς και φωτογραφίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές δοκιμές πριν και μετά την καύση τους.

Η κύρια πρωτοτυπία της Εργασίας αυτής είναι η δημιουργία μιας πρωτότυπης εργαστηριακής συσκευής προσομοίωσης των κρυφών περιοχών του αεροσκάφους, με σκοπό τη δοκιμή συνθετών υλικών για τη θερμική θωράκιση των προαναφερομένων περιοχών.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	vii
<b>ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΟ</b> .....	ix
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	11
<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ</b> .....	11
1.1 Εισαγωγή .....	11
1.2 Ατυχήματα λόγω φωτιάς .....	13
1.3 Πυρκαγιά κατά τη διάρκεια της πτήσης .....	14
1.4 Γενικές διαμορφώσεις πυρκαγιάς .....	16
1.5 Καταγεγραμμένα Περιστατικά .....	22
1.6 Έρευνα πυρασφάλειας σε αεροσκάφη νέας γενιάς .....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	31
<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ</b> .....	31
2.1 Εισαγωγή .....	31
2.2 Φλόγες διάχυσης.....	31
2.3 Διάδοση της φωτιάς (flame spreading) .....	40
2.4 Υλικά που τοποθετούνται στα αεροσκάφη .....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	59
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ</b> .....	59
3.1 Εισαγωγή .....	59

3.2	Θερμιδόμετρο Κώνου (ISO 5660) .....	59
3.3	Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier .....	63
3.4	Πειραματική διάταξη .....	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>		<b>79</b>
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>		<b>79</b>
4.1	Εισαγωγή .....	79
4.2	Πειραματική διαδικασία .....	79
4.3	Πειραματικά αποτελέσματα .....	80
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>106</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Διαμόρφωση πυρκαγιάς σε κρυφές περιοχές .....	17
Εικόνα 2 Πυρκαγιά σε κρυφές περιοχές (Ενδιάμεση κλίμακα).....	17
Εικόνα 3 Εργαστήριο δοκιμών μεγάλης κλίμακας (RHP test) .....	18
Εικόνα 4 Περιβάλλον καμπίνας.....	19
Εικόνα 5 Απλοποιημένο σχήμα σήραγγας (FIST).....	20
Εικόνα 6 Σήραγγα και θάλαμος συγκράτησης (FIST) .....	20
Εικόνα 7 Πειραματική συσκευή - δοχείο πίεσης για την εξέταση της αποτελεσματικότητας της αποσυμπίεσης αεροσκαφών .....	21
Εικόνα 8 Αιτίες θανατηφόρων δυστυχημάτων επιβατικών αεροσκαφών μεταξύ 1987 και 1996 (πηγή FAA) .....	22
Εικόνα 9 Θανατηφόρα ατυχήματα επιβατικών αεροσκαφών μεταξύ των ετών 1992 και 2001 (πηγή FAA) .....	23
Εικόνα 10 Αθροιστική κατανομή πιθανότητας χρόνου για να γίνει μη-βιώσιμο (RGW Cherry et al.).....	25
Εικόνα 11 Κατανομή του ρυθμού εμφάνισης των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών σε κρυμμένες περιοχές (RGW Cherry et al.) .....	26
Εικόνα 12 Κατανομή του αριθμού των θανατηφόρων ατυχημάτων από φωτιά σε κρυφά μέρη (RGW Cherry et al.) .....	26
Εικόνα 13 Κατανομή συστατικών μέσα από τον κορμό μιας φλόγας διάχυση..	32
Εικόνα 14 Εξάρτηση της θερμοκρασίας από το κλάσμα μείγματος. (Burke και Schumann, 1928).....	34
Εικόνα 15 Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του καυσίμου από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).....	34
Εικόνα 16 Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του οξειδωτικού από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).....	35
Εικόνα 17 Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός διαδρόμου. (Drysdale, 1999).....	37
Εικόνα 18 Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός "τυπικού δωματίου". (Drysdale, 1999).....	38
Εικόνα 19 Φάσεις διάδοσης φλόγας. Φυσική: η φλόγα παρακινείται μόνο από την άντωση της ροής .....	41
Εικόνα 20 Μοντέλο διάδοσης της φλόγας. Τα σχήματα δεικνύουν την σταθερή διάδοση φλόγας.....	42
Εικόνα 21 Διαφορετικές περιπτώσεις εξάπλωσης της φωτιάς ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας.....	45
Εικόνα 22 Εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης φλόγας από το πάχος του υλικού (Περιοχές I και II: σταθερή μετάδοση, Περιοχή III: ασταθής μετάδοση, Περιοχή IV: μη μετάδοση (δεδομένα από Suzuki et al., 1994).....	46

Εικόνα 23 Τα στάδια και οι ιδιότητες της πυρκαγιάς, το εύρος των περιπτώσεων πυρκαγιάς που συμπεριλαμβάνονται στη θερμιδομετρία κώνου (Schartel B. and Hull T. R. 2007).....	51
Εικόνα 24 Σύνθετη δομή του αεροσκάφους κατά βάρος. (Mouritz, 2006), (Wilhelm, 2001).....	54
Εικόνα 25 Αναλυτική περιγραφή επιμέρους διατάξεων της συσκευής θερμιδόμετρου κώνου (κατασκευάστρια εταιρεία Fire Testing Technology, FTT UK).....	57
Εικόνα 26 Τυπική εικόνα καύσης δοκιμίου κατά την διαδικασία ελέγχου δοκιμίου ως προς την αντίδρασή του στη φωτιά.....	59
Εικόνα 27 Σχηματική εικόνα ενός τυπικού φασματοφωτομέτρου FT-IR και διάταξη των πηγών, καθρεπτών και ανιχνευτή.....	61
Εικόνα 28: FT-IR φασματοσκοπία: (α) φάσμα υδροχλωρικής μεθαδόνης με μία σάρωση, (β) σάρωση της ίδιας ουσίας 32 φορές (FT-IR) με αντίστοιχη μείωση του θορύβου.....	63
Εικόνα 29: Διαδικασία λειτουργίας φασματοφωτόμετρου. (US EPA).....	65
Εικόνα 30 Πειραματική συσκευή για φωτιά σε κρυφές περιοχές.....	66
Εικόνα 31: Κανάλι εισαγωγής του αέρα.....	67
Εικόνα 32: Φλάντζες σύνδεσης.....	68
Εικόνα 33: Τομή του θερμοπομπού με αρίθμηση των επιμέρους στοιχείων του.....	71
Εικόνα 34 : Τοποθέτηση φλόγιστρου.....	71
Εικόνα 35: Μορφή αγωγού εξόδου με τις οπές μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης.....	73
Εικόνα 36: Άποψη δοκιμίου πριν την καύση.....	75
Εικόνα 37: Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση. (α) Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία (β) Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία.....	78
Εικόνα 38: Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση. (α) Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία (β) Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία.....	83
Εικόνα 39: Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση. (α) Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία (β) Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία.....	88
Εικόνα 40: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.....	96
Εικόνα 41: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.....	97
Εικόνα 42: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.....	98



## **ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΟ**

<b>FAA:</b>	Federal Aviation Administration
<b>EASA:</b>	European Aviation Safety Agency
<b>CAA:</b>	Civil Aviation Authority
<b>ISF:</b>	Intermediate Scale Fire
<b>RHP:</b>	Radiant Heat Panel
<b>NTSB:</b>	National Transportation Safety Board
<b>FIST:</b>	Forced-flow Ignition and flame Spread Test
<b>FTIR:</b>	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
<b>APU:</b>	Auxiliary Power Unit
<b>HRR:</b>	Heat Release Rate

*“There is only one thing that makes a dream Impossible to achieve:  
The fear of failure”*

*PAOULO COELHO*

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

#### **1.1 Εισαγωγή**

Η ασφάλεια εντός του αεροσκάφους είναι πάντα μία από τις κύριες ανησυχίες των κατασκευαστών αεροσκαφών και των αεροπορικών εταιρειών. Ειδικότερα η πυρασφάλεια είναι ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά θέματα, τα οποία μελετώνται, ώστε να βελτιωθεί η ασφάλεια των επιβατών. Η φωτιά είναι μια πανταχού παρούσα απειλή για τη ζωή, η οποία μεγιστοποιείται στα αεροσκάφη λόγω των μεγάλων ποσοτήτων εξαιρετικά εύφλεκτων υλικών, αλλά και λόγω των πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων διαφυγής. Βέβαια έχουν εισαχθεί μεγάλες βελτιώσεις στην πυρασφάλεια των αεροσκαφών, κατά τα τελευταία 20 χρόνια. Οι προσπάθειες αυτές συνέβαλαν στη σημαντική μείωση του αριθμού των ατυχημάτων. Από το επίπεδο των 15 ατυχημάτων ανά εκατομμύριο ώρες πτήσης το 1959, έχουμε 2 ατυχήματα ανά εκατομμύριο ώρες πτήσης το 2000. Χάρη σε αυτές τις τεχνολογίες πυρασφάλειας, όπως για παράδειγμα με τα βελτιωμένα υλικά καμπίνας, η εκκένωση των αεροσκαφών έγινε πιο αποτελεσματική, ενώ βελτιώθηκε και η επί εδάφους πυρόσβεση. Κατά συνέπεια, τα τελευταία χρόνια η μεταφορά δια αέρος έχει γίνει το ασφαλέστερο μέσο μαζικής μεταφοράς. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να γίνονται περαιτέρω προσπάθειες στον τομέα της έρευνας για την πυρασφάλεια, προκειμένου να διατηρηθεί αυτή η μείωση των ατυχημάτων, η οποία τα τελευταία χρόνια τείνει στο μηδέν παρά την αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας.

Τα τελευταία 10 χρόνια, έχουν καταγραφεί πολλά ατυχήματα από φωτιά σε αεροσκάφη παγκοσμίως, με περίπου 40 από αυτά θανατηφόρα. Με την αναμενόμενη αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας, ο αριθμός των θανατηφόρων

πυρκαγιών αυξάνεται κατά τέσσερα τοις εκατό κάθε χρόνο. Η εξέλιξη των τεχνολογιών και του εξοπλισμού των αεροσκαφών νέας γενιάς, εν δυνάμει αναπτύσσει νέους κινδύνους, λόγω της ενσωμάτωσης σύνθετων υλικών, νέων εξοπλισμών και ηλεκτρονικών συστημάτων, τα οποία απαιτούν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Η βελτίωση των υφιστάμενων μέτρων πυρασφάλειας δεν μπορεί ακόμη να θεωρηθεί επαρκής, ώστε να αντιμετωπιστεί η αυξημένη σοβαρότητα και οι επιπτώσεις της πύρινης απειλής. Ένα τεχνολογικό εύρημα, που προέρχεται από τη νέα γνώση, σχετικά με τη συμπεριφορά της φωτιάς, και λαμβάνεται από τα αποτελέσματα της έρευνας, θα επιτρέψει την καλύτερη πρόληψη των πυρκαγιών. Προσεγγίζοντας την ασφάλεια με στόχο την έγκαιρη πρόβλεψη και επίλυση των προβλημάτων, οι κατασκευαστές αεροσκαφών μαζί με τις ομάδες έρευνας θα πρέπει να αποδείξουν ότι τα νέα κατασκευαστικά υλικά παρέχουν ένα ισοδύναμο ή και καλύτερο επίπεδο ασφάλειας σε σύγκριση με τα μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενα υλικά (κράμα αλουμινίου). Επιπλέον, οι νέοι κίνδυνοι πρέπει να αξιολογούνται με ακρίβεια από ενημερωμένες αναλύσεις φωτιάς. Κατά συνέπεια, για την πρόληψη ατυχημάτων οι κατασκευαστές αεροσκαφών θα πρέπει να βελτιώνουν τα συστήματα πυρασφάλειας, μέσα από την ανάπτυξη αποδοτικών τεχνολογιών, διατηρώντας όμως παράλληλα μια ισορροπία μεταξύ της οικονομίας αλλά και των επιδόσεων των πτήσεων

Οι προσεγγίσεις ασφαλείας που χρησιμοποιούνται από κατασκευαστές βασίζονται στην ανάπτυξη της θεωρίας Aircraft fire, η οποία έχει επιβληθεί από την FAA και την EASA. Ο κίνδυνος φωτιάς είναι διεθνές θέμα και η έρευνα συντονίζεται παγκοσμίως, με κύριες προεδρεύοντες ομάδες τις 1) Materials Fire Test Working Group και 2) International Aircraft Systems Fire Protection Working Group. Οι μεγάλοι κατασκευαστές αεροδιαστημικής, όπως η Boeing και η Airbus, σε συνεργασία με τα τεχνικά κέντρα κάνουν ουσιαστική προσπάθεια πάνω στην έρευνα των ατυχημάτων από φωτιά, χρησιμοποιώντας μια μεθοδολογία που καθορίζεται κυρίως από την εφαρμογή του κανονισμού (πυρασφάλειας). Η ανάγκη πρόσθετων γνώσεων βασίζεται κυρίως στη συνεργασία φορέων της αεροναυτικής και της ακαδημαϊκής έρευνας, η οποία θα πρέπει να εστιάζει στον εντοπισμό των νέων κινδύνων, με την

προσομοίωση υλικών αεροσκαφών, καθώς και με προτάσεις νέων λύσεων προς τους κατασκευαστές μέσα από την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των σημερινών κανονισμών, με δοκιμές, με διαδικασίες τεχνικής προσέγγισης, κλπ.

Συνοψίζοντας το πρόβλημα, το εκτιμώμενο ένα τοις εκατό της ετήσιας αύξησης της χρήσης ελαφρύτερων πολυμερών και άλλων εύφλεκτων σύνθετων υλικών εσωτερικών χώρων όπως και δομικών υλικών, τα οποία τοποθετούνται προκειμένου να μειωθεί το βάρος και η κατανάλωση καυσίμου, μπορεί να δημιουργήσει εύκολα σε μια ανοδική τάση ως προς την εμφάνιση θανάτων από φωτιά σε αεροσκάφη, η οποία να προέρχεται από αυτό το πρόσθετο “φορτίο πυρκαγιάς”.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να αναδείξει όσα πρέπει να γίνουν, μέσω της έρευνας, για τη μείωση των συνεπειών της φωτιάς κατά τη διάρκεια της πτήσης αλλά και μετά τη σύγκρουση. Απώτερος σκοπός είναι η επιβίωση των επιβατών της νέας γενιάς αεροσκαφών, όπου τα σύνθετα υλικά παίρνουν όλο και πιο σημαντική θέση. Η έρευνα αυτή, θα βελτιώσει την καινοτομία της παθητικής πρόληψης και προστασίας, την άμεση και συγκεκριμένη ανίχνευση, τα συστήματα πυρόσβεσης και τις διαδικασίες εκκένωσης, προκειμένου να εξαλειφθούν οι πιθανές συνέπειες ενός περιστατικού/ατυχήματος, που μπορεί να είναι και η μη επιβίωση των επιβατών, με μια ασφαλή προσγείωση και εκκένωσης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, η εργασία, θα επικεντρώσει την έρευνα σε προσομοιώσεις ανάπτυξης φωτιάς σε υλικά από το εσωτερικό της καμπίνας του αεροσκάφους, και την ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις πειραματικές δοκιμές.

## **1.2 Ατυχήματα λόγω φωτιάς**

Η ασφάλεια των αεροσκαφών και φυσικά του επιβατικού κοινού είναι από τις πρώτες προτεραιότητες των αρχών ασφαλείας των αεροπορικών εταιριών. Οι πυρκαγιές σε αεροσκάφη είναι εξαιρετικά επικίνδυνες επειδή υπάρχει

περιορισμένος χρόνος για την καταπολέμηση και κατάσβεση της πυρκαγιάς πριν το πλήρωμα και οι επιβάτες βρεθούν σε κίνδυνο. Ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα σοβαρός σε περίπτωση έκρηξης της καμπίνας, κάτι που μπορεί να συμβεί μέσα σε μερικά λεπτά αν δεν γίνεται χρήση κατάλληλων υλικών τα οποία είναι ανθεκτικά στη φωτιά. Κατά κανόνα, οι πιλότοι αλλά και το υπόλοιπο πλήρωμα, όταν εκδηλωθεί φωτιά στο φορτίο-αποσκευών, έχουν περίπου δύο λεπτά για να σβήσουν τις φλόγες. Αν ο χρόνος αντίδρασης είναι μεγαλύτερος από δύο λεπτά, υπάρχει ο κίνδυνος η φωτιά να επεκταθεί τόσο ώστε να είναι αδύνατη η κατάσβεση της από το σύστημα πυρόσβεσης. Σε περίπτωση που το αεροσκάφος έχει εγκατεστημένο σύστημα πυρόσβεσης, τότε οι πιλότοι έχουν περίπου 14 λεπτά για να προσγειώσουν και να εκκενώσουν το αεροπλάνο διότι υπάρχει μεγάλος κίνδυνος για την υγεία των επιβατών λόγω του καπνού και των αναθυμιάσεων.

### **1.3 Πυρκαγιά κατά τη διάρκεια της πτήσης**

Οι πυρκαγιές κατά τη διάρκεια της πτήσης είναι σχετικά συχνές, οι περισσότερες από αυτές είναι μάλλον ασήμαντες, αλλά όλες έχουν την δυνατότητα να οδηγήσουν σε καταστροφική απώλεια του αεροσκάφους αλλά και ανθρώπινων ζωών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πυρκαγιές που εμφανίζονται σε μη δυσπρόσιτες περιοχές όπως την κουζίνα, ανιχνεύονται και εξαλείφονται αμέσως. Η κατάσβεση τους βέβαια εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από το πλήρωμα του θαλάμου επιβατών και στο αν διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό και εκπαίδευση.

Εάν μια πυρκαγιά, κατά τη διάρκεια της πτήσης, τεθεί εκτός ελέγχου γύρω στα πρώτα 60 δευτερόλεπτα μετά την ανάφλεξη, υπολείπονται μόνο 15 λεπτά περίπου έως ότου έχουμε ολική απώλεια ελέγχου του αεροσκάφους. Σε σπάνιες περιπτώσεις, οι πυρκαγιές εν ώρα πτήσης, οι οποίες προέρχονται από κρυφές ζώνες γίνονται ανεξέλεγκτες και οδηγούν σε απώλεια του αεροσκάφους και φυσικά ανθρώπινων ζωών. Για παράδειγμα, μια πυρκαγιά στο χώρο του φορτίου προκάλεσε το θάνατο όλων των επιβατών (301 άτομα), όταν η φωτιά

διαπέρασε το πάτωμα της καμπίνας και πυροδότησε τα καθίσματα και άλλα υλικά. Κατά τη διάρκεια της πτήσης, περιστατικά πυρκαγιών προκαλούνται συνήθως από ηλεκτρικές βλάβες, υπερθέρμανση του εξοπλισμού, ανάφλεξη εντός της καμπίνας και αστάθμητους παράγοντες στο χώρο των αποσκευών.

Η συντριπτική πλειοψηφία των θανάτων οφείλεται σε πυρκαγιές και ατυχήματα που έχουν συμβεί μετά από σύγκρουση και οι περισσότερες από αυτές εκδηλώνονται κοντά σε αεροδρόμια. Σημαντικές προσπάθειες γίνονται για να διασφαλιστεί το γεγονός ότι τα αεροδρόμια διαθέτουν αποτελεσματικές πυροσβεστικές υπηρεσίες, που θα φτάνουν στον τόπο της συντριβής μέσα σε ένα μέσο χρόνο των τεσσάρων λεπτών (μέση τιμή για το 50% των ατυχημάτων).

Οι κανονισμοί απαιτούν την εκκένωση του αεροσκάφους εντός 90 δευτερολέπτων, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η εκκένωση θα πρέπει να γίνεται από το πλήρωμα του αεροσκάφους, το οποίο χρησιμοποιεί τον διαθέσιμο εξοπλισμό, που βρίσκεται μέσα στο αεροσκάφος. Είναι ζωτικής σημασίας η ικανότητα έγκαιρης κατάσβεσης της φωτιάς. Σε ένα αεροσκάφος, μετά τη σύγκρουση, η φωτιά ξεκινά τυπικά έξω από την καμπίνα, καθώς συνήθως οφείλεται σε διαρροή καυσίμων (fuel pool fire). Η φωτιά αναπτύσσεται και μερικές φορές εισχωρεί στη καμπίνα του αεροσκάφους μέσω των ρηγμάτων της ατράκτου ή λόγω της αυτανάφλεξης των εσωτερικών υλικών. Εκτιμάται ότι το 40% των θανάτων από πυρκαγιά μπορεί να αποδοθεί στον καπνό και τα τοξικά αέρια που προέρχονται από προϊόντα της καύσης των υλικών της καμπίνας, αλλά και των ίδιων των καυσίμων, όπως για παράδειγμα η ουρεθάνη (συστατικό των μαξιλαριών της καμπίνας), όπου στο παρελθόν συνέβαλλε σημαντικά στην ανάπτυξη πυρκαγιών.

Νεώτεροι κανονισμοί απαιτούν συγκεκριμένες βελτιώσεις της πυρασφάλειας στις καμπίνες των αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων των υλικών, της ευφλεκτότητας τους αλλά και των διάφορων αναβαθμίσεων που έχουν γίνει σε αεροσκάφη, που κατασκευάστηκαν μετά το 1990.

## 1.4 Γενικές διαμορφώσεις πυρκαγιάς

Επικίνδυνες είναι οι πυρκαγιές, που συνήθως εν ώρα πτήσης συμβαίνουν σε κρυφές περιοχές. Κάποιες από αυτές είναι η περιοχή πάνω από την οροφή της καμπίνας, πίσω από το πλευρικό τοίχωμα, κάτω από το δάπεδο ή σε ηλεκτρονικούς και ηλεκτρικούς όρμους, όπου είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να κατασβηστούν από το πλήρωμα.

Η FAA συνεχίζει τις έρευνες με στόχο την ανάπτυξη πιο αυστηρών μεθόδων δοκιμής πυρκαγιάς για τα υλικά που βρίσκονται σε κρυφές περιοχές. Η έρευνα αυτή στοχεύει στην ελάττωση της ευφλεκτότητας των υλικών, όπως μεταξύ άλλων, αγωγών, καλωδίων, πάνελ, και σφιγκτήρων που βρίσκονται σε κρυφές και δυσπρόσιτες περιοχές, αποσκοπώντας στην αναβάθμιση αυτών των υλικών σε ένα επιτρεπτό επίπεδο αντοχής σε φωτιά. Ο στόχος είναι να μειωθεί παθητικά η πιθανότητα εμφάνισης μιας πυρκαγιάς κατά την πτήση, μέσω της ουσιαστικής βελτίωσης της αντοχής των υλικών σε φωτιά στις κρυφές περιοχές.

Εξετάστηκαν πραγματικά δείγματα αεροσκαφών, χρησιμοποιώντας πλήρη κλίμακα ή ενδιάμεση κλίμακα φωτιάς (ISF). Η διάταξη δοκιμής για τον προσδιορισμό των επιδόσεων ευφλεκτότητας των υλικών καθώς εκτίθενται σε φωτιά απεικονίζεται στις Εικόνες 1 και 2. Ο στόχος αυτών των δοκιμών είναι να χρησιμοποιηθούν πλήρη ή ενδιάμεση κλίμακα, ώστε τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μιας εργαστηριακής κλίμακας δοκιμών για μελλοντικούς σκοπούς πιστοποίησης, αλλά και για τον προσδιορισμό της αντίστασης διάδοσης της φλόγας σε δομικά σύνθετα υλικά. (Reinhardt, 2008) , (Ochs, 2010), (Marker T.R, 2007)





**Εικόνα 1:** Διαμόρφωση πυρκαγιάς σε κρυφές περιοχές. (Ochs, 2010)



**Εικόνα 2:** Πυρκαγιά σε κρυφές περιοχές (Ενδιάμεση κλίμακα). (Ochs, 2010)

Παρά τη χρήση της ενδιάμεσης κλίμακας, τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν χρησιμοποιηθεί για να πιστοποιήσουν υλικά για χρήση σε αεροσκάφη. Η δοκιμή αυτή μπορεί να μην αρκεί για την λήψη πιστοποίησης, ωστόσο, είναι μια περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί χρόνο και χρήμα για να εκτελεστεί. Η δοκιμή στο εργαστήριο πρέπει να παρέχει την ίδια ευχέρεια όπως η δοκιμή της ενδιάμεσης κλίμακας, αλλά να είναι πιο αποτελεσματική στην εκτέλεση. Η πιο κοινή εργαστηριακή κλίμακα δοκιμής για αυτά τα υλικά είναι η RHP (Εικόνα 3). Το τεστ αυτό (ένα πάνελ που ακτινοβολεί θερμότητα πάνω στο υλικό) είναι πολύ χρήσιμο για την αξιολόγηση πολλαπλασιασμού της τάσης της φλόγας των υπό έλεγχο υλικών. Η δοκιμή αυτή δεν είναι απλά μια “δοκιμή επιφάνειας”,

καθώς η ακτινοβολούμενη θερμότητα και η πρόσκρουση του καυστήρα εφαρμόζονται στην επιφάνεια του υλικού. Το πάχος του υλικού και η θερμική του αγωγιμότητα παίζουν μεγάλο ρόλο σε αυτές τις δοκιμές. Οι παράμετροι δοκιμής όπως, μεταξύ άλλων, ο χρόνος προθέρμανσης, ο χρόνος έκθεσης στη φλόγα, και η ενέργεια ακτινοβολίας θερμότητας, πρέπει να ρυθμίζονται ανάλογα λόγω της ποικιλίας του πάχους των σύνθετων υλικών.

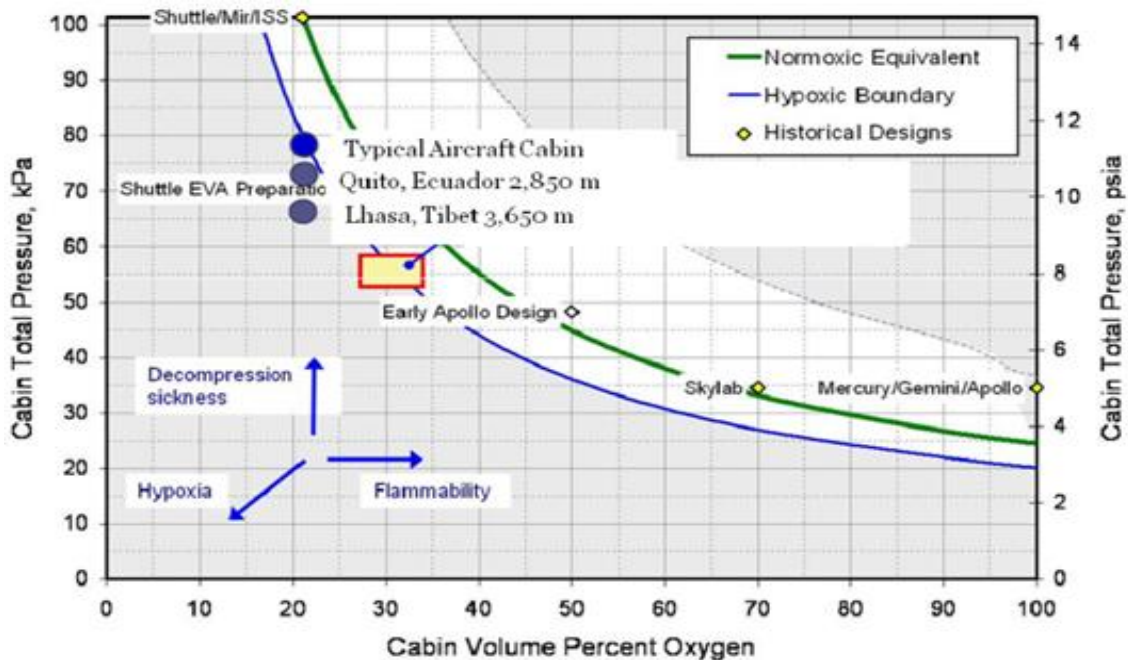


**Εικόνα 3:** Εργαστήριο δοκιμών μεγάλης κλίμακας (RHP test). (Ochs, 2010)

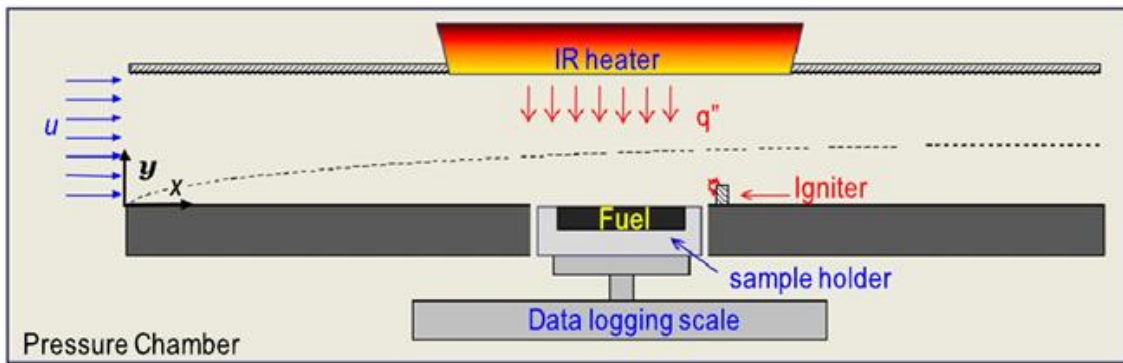
Μια άλλη σημαντική πτυχή της έρευνας είναι η συμπεριφορά των καυσίμων των φλεγόμενων αεροσκαφών σε φωτιά σε συνθήκες διαφορετικές από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι πυρκαγιές μπορεί να συμβούν σε συνθήκες πίεσης κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό συμβαίνει είτε σε φυσικό περιβάλλον υψηλού υψόμετρου, είτε σε πίεση στο εσωτερικό οχημάτων, όπως παρατηρείται στα διαστημόπλοια. Η πίεση της καμπίνας ενός αεροσκάφους τυπικά είναι υπό πίεση σε “ύψος καμπίνας” (cabin altitude) 8000 ποδιών (8000 ft) ή και λιγότερο ( $\approx 75$  kPa) (Εικόνα 4).

Είναι ιδιαίτερα σημαντική η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που ευθύνονται για την ανάφλεξη των στερεών καυσίμων υπό συνθήκες χαμηλής

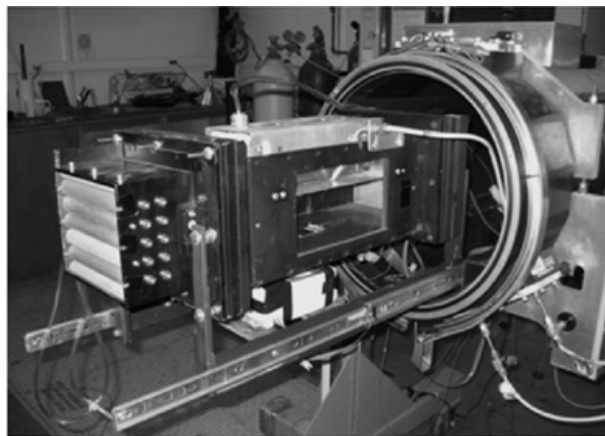
πίεσης. Πειραματικές δοκιμές ανάφλεξης έχουν πραγματοποιηθεί σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, με μια εφαρμοσμένη ροή θερμικής ακτινοβολίας και μια εξαναγκασμένη ροή αέρα. (Fereres S. et al., 2011). Η Εικόνα 5 παρουσιάζει μία απλοποιημένη σχηματική διάταξη της συσκευής. Αυτή, αποτελείται από μια μικρού μεγέθους αεροσήραγγα καύσης και υποστήριξης των οργάνων μέτρησης, η οποία είναι τοποθετημένη οριζόντια σε ένα σφραγισμένο δοχείο πίεσης (Εικόνα 6). Το δοχείο πίεσης επιτρέπει τις δοκιμές που πρέπει, να εκτελούνται σε διαφορετικές πιέσεις περιβάλλοντος.



**Εικόνα 4:** Περιβάλλον καμπίνας. (Fereres S, et al, 2010)



**Εικόνα 5:** Απλοποιημένο σχήμα σήραγγας (FIST). (Fereres S, et al, 2011)

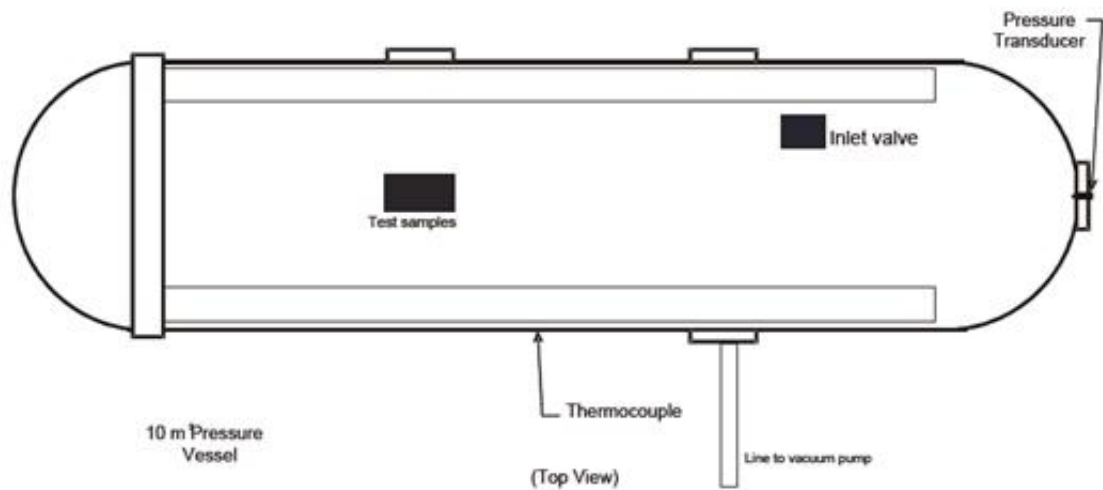


**Εικόνα 6:** Σήραγγα και θάλαμος συγκράτησης (FIST). (Fereres S, et al, 2011)

Έχοντας ως βάση μια σύσταση της NTSB μετά από μια καταστροφική πυρκαγιά σε φορτηγό πλοίο, ένα πρόγραμμα δοκιμών διεξήχθη σε ένα δοχείο πίεσης για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της αποσυμπίεσης αεροσκαφών. Πρόκειται για μια αποδεκτή διαδικασία από την FAA για τον έλεγχο των πυρκαγιών σε φορτηγά πλοία αλλά και αεροσκάφη (Hill, 2010). Κατά το πρόγραμμα αυτό, δύο σειρές δοκιμών διεξήχθησαν.

Στην πρώτη δοκιμή, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια με διαφορετικές πηγές φωτιάς, σε διάφορα υψόμετρα, ώστε να μετρηθεί η επίδραση του υψομέτρου (ατμοσφαιρική πίεση) ως προς την ένταση της φωτιάς και το χρόνο που χρειάζεται για την καύση. Στην δεύτερη δοκιμή, διαφορετικά σενάρια διεξήχθησαν, για να προσδιοριστεί η επίδραση της μεταβολής ύψους μετά την

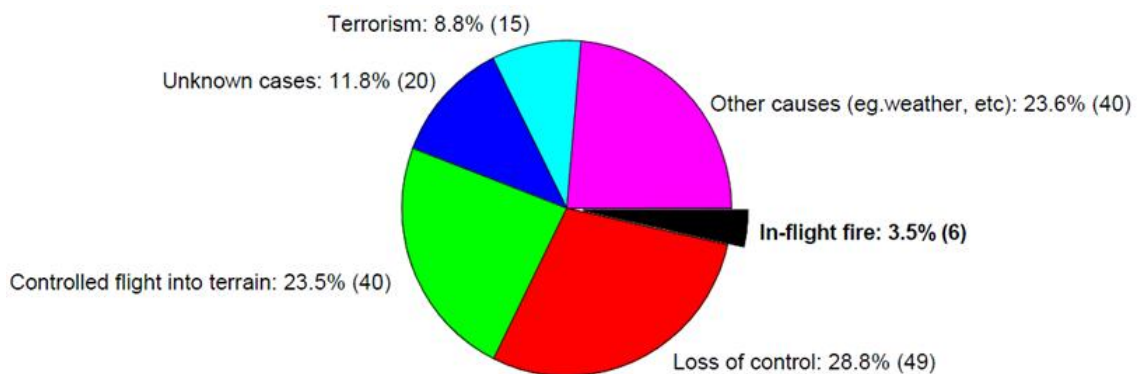
ανίχνευση πυρκαγιάς στο φορτίο. Μία σχηματική προσέγγιση της πειραματικής συσκευής παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.



**Εικόνα 7:** Πειραματική συσκευή - δοχείο πίεσης για την εξέταση της αποτελεσματικότητας της αποσυμπίεσης αεροσκαφών. (Hill, 2010).

## 1.5 Καταγεγραμμένα Περιστατικά

Η φωτιά είναι ένα σπάνιο γεγονός και αυτό λόγω των αυστηρών κανονισμών πυρασφάλειας και των αποτελεσματικών συστημάτων καταστολής της πυρκαγιάς εντός του αεροσκάφους<sup>1</sup>. Παρά τον σχετικά μικρό αριθμό των αεροπορικών δυστυχημάτων που προκαλούνται από πυρκαγιά, ένα άλλο σημαντικό στατιστικό στοιχείο είναι ότι η φωτιά είναι η τέταρτη κατά σειρά αιτία θανάτων (εξαιρουμένων των ατυχημάτων που οφείλονται σε άγνωστες αιτίες). Στην Εικόνα 8 απεικονίζονται οι αιτίες θανατηφόρων ατυχημάτων επιβατικών αεροσκαφών σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της μιας δεκαετίας (1987 - 1996). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου υπήρχαν 180 ατυχήματα, αλλά μόνο έξι (ή αλλιώς το 3,5%) από αυτά προκλήθηκαν από πυρκαγιά. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η φωτιά κατά την πτήση ήταν το δέκατο πιο συχνό αίτιο αεροπορικών δυστυχημάτων.<sup>2</sup>



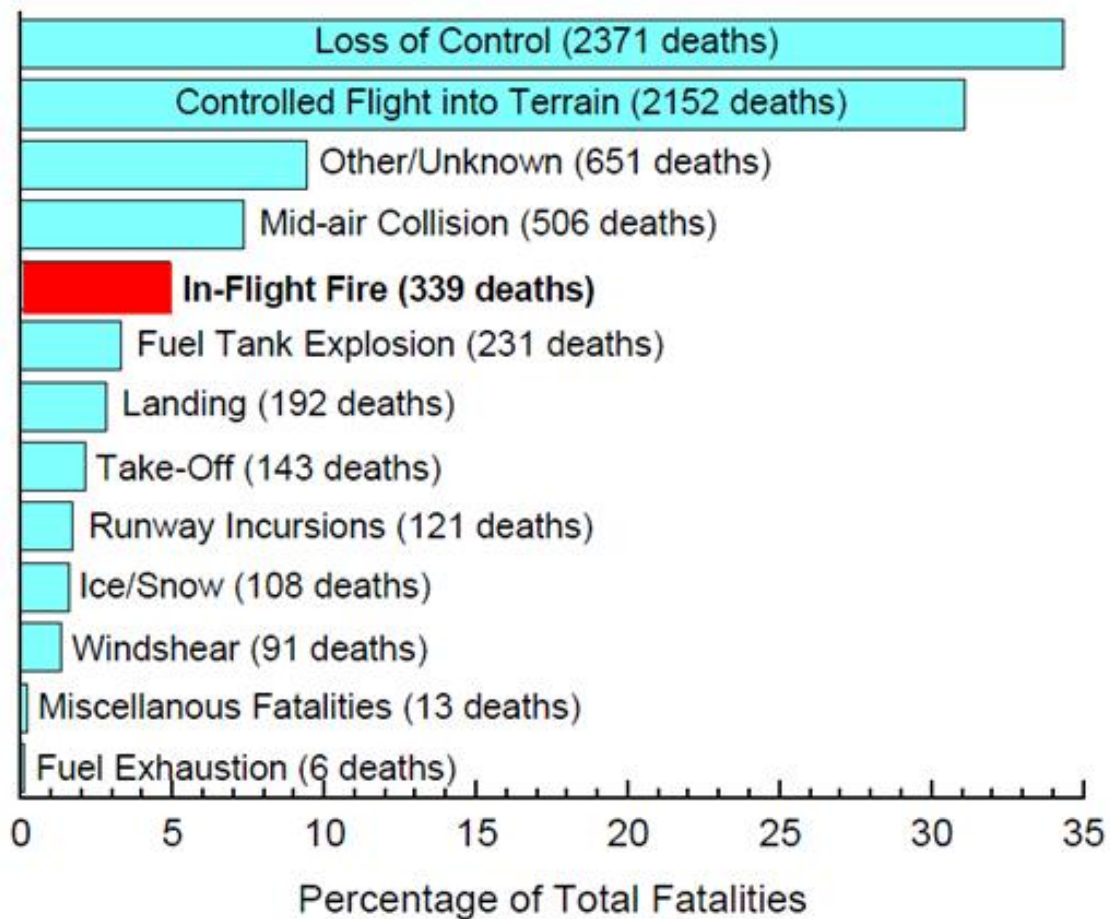
**Εικόνα 8:** Αιτίες θανατηφόρων δυστυχημάτων επιβατικών αεροσκαφών μεταξύ 1987 και 1996 (πηγή FAA).

<sup>1</sup> Data used in this section and presented in figure 1 and 2 was sourced from the FAA website in May 2003, <http://www.faa.gov>

<sup>2</sup> The Federal Aviation Administration Incident Data System - located on Federal Aviation Administration web-site at [www.faa.gov](http://www.faa.gov)



Η Εικόνα 9 απεικονίζει την κατανομή των αιτιών των αεροπορικών θανατηφόρων δυστυχημάτων μεταξύ των ετών 1992 και 2001, όταν 339 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους (4,9% του συνόλου των θανάτων) από πυρκαγιά κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα στατιστικά αυτά στοιχεία υπογραμμίζουν τον κίνδυνο για την ασφάλεια των αεροσκαφών από πυρκαγιά κατά τη διάρκεια της πτήσης, και τον υπερβολικά υψηλό αριθμό των θανάτων που μπορεί να προκαλέσει.



**Εικόνα 9:** Θανατηφόρα δυστυχήματα επιβατικών αεροσκαφών μεταξύ των ετών 1992 και 2001 (πηγή FAA).

Οι πολυετείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης από τους κατασκευαστές αεροσκαφών έχουν συμβάλει στη σημαντική μείωση του αριθμού των ατυχημάτων από φωτιά κατά τη διάρκεια της πτήσης, αλλά και μετά τη σύγκρουση. Η εμπειρία των προηγούμενων συμβάντων/δυστυχημάτων προώθησε την εξέλιξη των διαδικασιών και των συστημάτων. Η έρευνα που διενεργήθηκε από τις FAA, EASA και τις κατασκευάστριες εταιρίες αεροσκαφών οδήγησαν σε τεχνολογικές λύσεις, με βάση την έρευνα και την εξέταση των αποτελεσμάτων, τα οποία τώρα δεν μπορούν να επανεξεταστούν χωρίς σοβαρή αιτιολόγηση. Παρόλα αυτά, βάση αυτής της μεγάλης εμπειρίας, απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες στον τομέα της ασφάλειας, που πρέπει να καταβληθούν, προκειμένου να μειωθεί ή τουλάχιστον να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα ο κίνδυνος ατυχήματος.

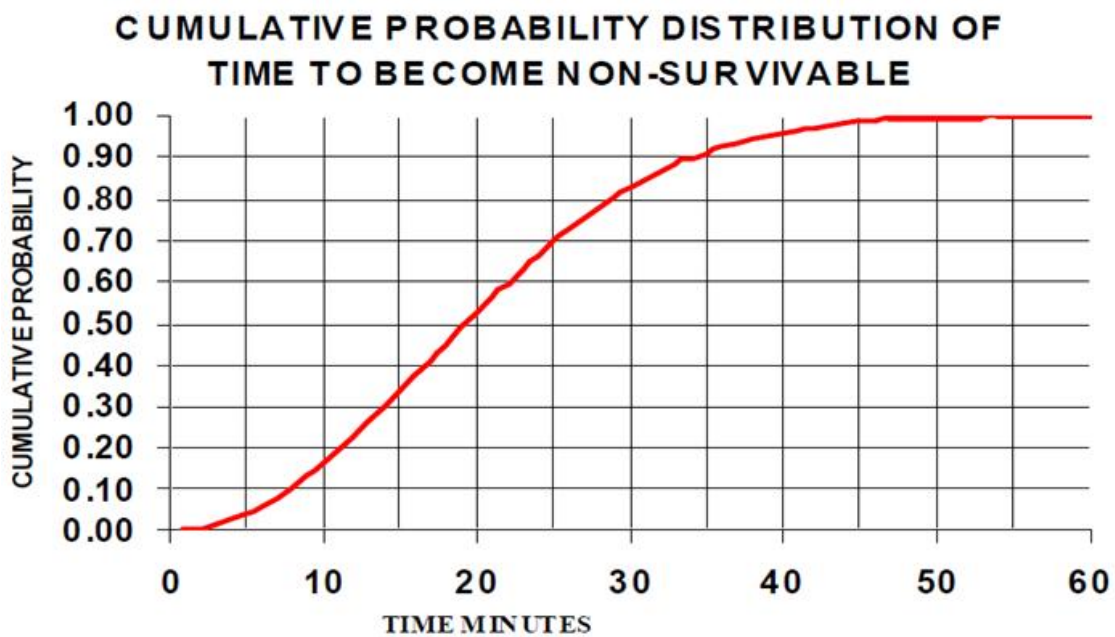
Η CAA έχει αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο για την αξιολόγηση του κινδύνου αλλά και το όφελος της ενισχυμένης προστασίας από τις πυρκαγιές σε κρυφές περιοχές της καμπίνας του αεροσκάφους. (RGW Cherry et al, 2002). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα που προέρχονται από την υπηρεσία αεροπορικών δυστυχημάτων και συμβάντων. Ο χρόνος για να γίνει μια πυρκαγιά επικίνδυνη, (Non-Survivable) λαμβάνεται από την στιγμή που εμφανίζεται στο πλήρωμα η πρώτη ένδειξη για παρουσία πυρκαγιάς σε κρυφή περιοχή, και η οποία τελικά μπορεί να γίνει καταστροφικά ανεξέλεγκτη<sup>3</sup> (RGW Cherry et al, 2002) (Εικόνα 10)<sup>4</sup>. Κατά την περίοδο 1991 - 2000, η εταιρία WESTERN ενσωμάτωσε προπέλες και στροβιλωθητές (turboprops & turbojets), οι οποίες εκτιμάται ότι μπορούν να αντέξουν για 331.140.000 ώρες πτήσης. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η κατανομή του ρυθμού εμφάνισης των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών σε κρυφές περιοχές. Επιπλέον, η κατανομή του αριθμού των θανάτων λόγω πυρκαγιάς σε κρυφές περιοχές, παρουσιάζεται στην Εικόνα 12. Είναι εμφανές, ότι περίπου το 17% των ατυχημάτων από πυρκαγιά σε κρυφές περιοχές εκτιμάται να μην έχει ως αποτέλεσμα κάποιο

<sup>3</sup> Cabin Safety Research Technical Group Accident Database Version 4.3 Issue 16,

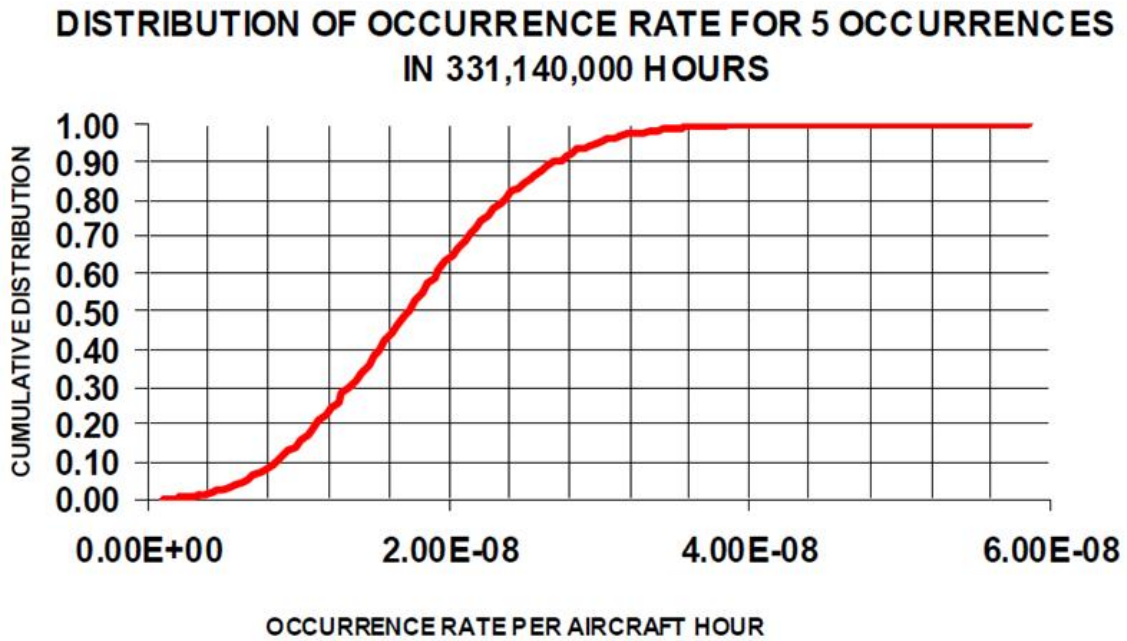
<sup>4</sup> Interim Air Safety Recommendations" dated 4th December 2000 NTSB Report relating to the Swiss Air Accident of the 2nd September 1998



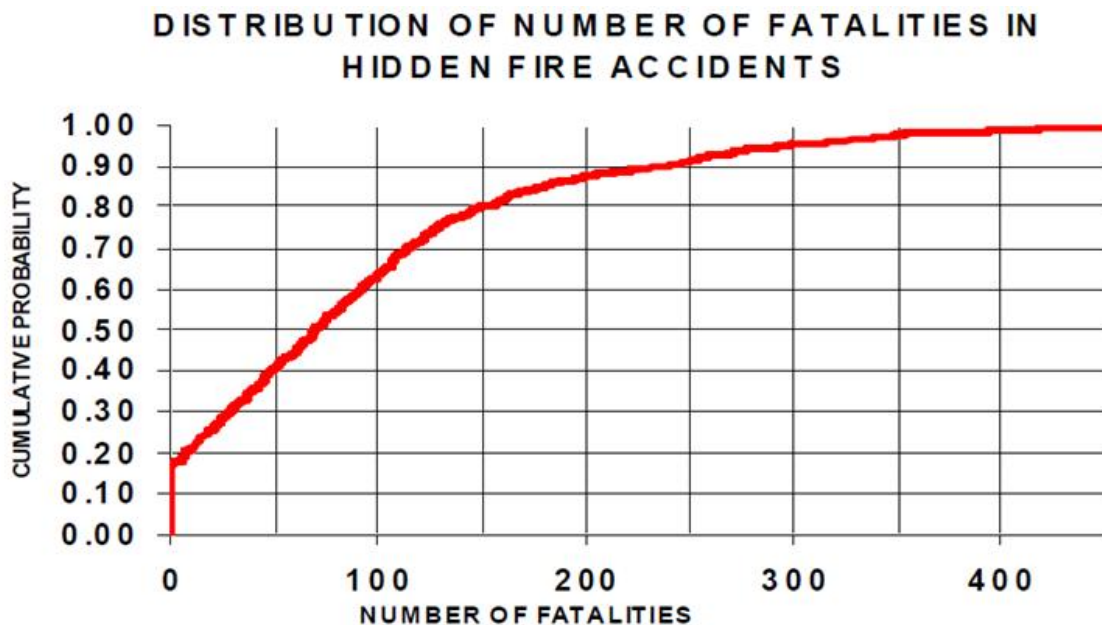
θανάσιμο τραυματισμό, ενώ ο μέσος αριθμός των θανάτων ανά ατύχημα εκτιμάται ότι είναι 92,8%.



**Εικόνα 10:** Αθροιστική κατανομή πιθανότητας χρόνου για να γίνει μη-βιώσιμο (RGW Cherry et al.).



**Εικόνα 11:** Κατανομή του ρυθμού εμφάνισης των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών σε κρυμμένες περιοχές (RGW Cherry et al.).



**Εικόνα 12:** Κατανομή του αριθμού των θανατηφόρων ατυχημάτων από φωτιά σε κρυφά μέρη (RGW Cherry et al.).

## 1.6 Έρευνα πυρασφάλειας σε αεροσκάφη νέας γενιάς

Η κύρια έρευνα για την πυρασφάλεια ενός αεροσκάφους της επόμενης γενιάς χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

### A) Έρευνα σε πυρκαγιά κατά τη διάρκεια πτήσης:

- Ø Επιστημονική ανάλυση των σεναρίων και των δυστυχημάτων από φωτιά σε αεροσκάφη τα τελευταία 10 χρόνια ώστε να καθοριστούν οι βασικές αρχές του προβλήματος.
- Ø Διαχωρισμός της πραγματικής φωτιάς σε διαφορετικά επιστημονικά προβλήματα και ο ορισμός γενικών σεναρίων τα οποία θα πρέπει να επιλυθούν μεμονωμένα βάσει της πειραματικής έρευνας και της αριθμητικής προσομοίωσης.
- Ø Απόκτηση δεδομένων και γνώσης μέσω του καθορισμού των φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων (ευφλεκτότητας, καύση, τοξικότητα και συμπεριφορά της φωτιάς) των αεροναυτικών σύνθετων υλικών, τα οποία είναι υποκατάστατα του αλουμινίου στα νέα αεροσκάφη.
- Ø Η αριθμητική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και της διάδοσης της κατά τη διάρκεια του επιλεγμένου σεναρίου.
- Ø Προσομοίωση της διάδοσης και της ανάφλεξης της πυρκαγιάς σε πραγματικές συνθήκες, για την αξιολόγηση των κινδύνων και το αντίκτυπο για ένα ασφαλές τέλος του συμβάντος.
- Ø Μέθοδοι για ταχεία και αποτελεσματική ανίχνευση των κινδύνων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία και την ανίχνευση των χημικών ουσιών, των προϊόντων καύσης (όπως τα αέρια) και τις αναθυμιάσεις που προέρχονται από τα καύσιμα.

A1) Έρευνα σε περιοχές που βρίσκονται υπό πίεση:

- Ø Πρόβλεψη κινδύνου, σε περιοχές υπό πίεση (χώρος αποσκευών, πιλοτήριο, καμπίνα των επιβατών), που οφείλονται στην ανάφλεξη και εξάπλωση της φωτιάς, ως αποτέλεσμα των ηλεκτρικών αστοχιών, της υπερθέρμανσης του χημικού ή μηχανικού εξοπλισμού, της σκόνης και άλλων αερο-ηλεκτρονικών συστημάτων.
- Ø Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων περιορισμού της πηγής της φωτιάς, με απομόνωση των σύνθετων τοιχωμάτων, ώστε να αποφευχθεί η διάδοσή της προς τα παρακείμενα διαμερίσματα.

A2) Έρευνα σε περιοχές που δεν βρίσκονται υπό πίεση:

- Ø Πρόβλεψη της απειλής πυρκαγιάς σε περιοχές που δεν βρίσκονται υπό πίεση, με στόχο να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του περιορισμού, ανίχνευσης και πυρόσβεσης (πυρκαγιές από πετρέλαιο ή καύσιμα, στον κινητήρα ή στη βοηθητική μονάδα ισχύος (APU) ).
- Ø Εκτίμηση της απειλής και των συνεπειών από το κτύπημα του πίδακα φλόγας στη καμπίνα, τα φτερά, τον πυλώνα του κινητήρα ή στα τοιχώματα, τα οποία περιέχονται σε μια περιοχή όπου έχει αναπτυχθεί φωτιά. Η έρευνα έχει ως στόχο να αξιολογήσει την εξέλιξη των φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών υπό συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα, αλλά και της πιθανής καύσης της επιφάνειας του υλικού.

B) Έρευνα μετά την συντριβή (η οποία προκλήθηκε από πυρκαγιά):

- Ø Προσδιορισμός και κατάταξη των πηγών φωτιάς, (για παράδειγμα, η φωτιά που προέρχεται από κηροζίνη ή πετρέλαιο), που επηρεάζουν την καμπίνα και τα φτερά.
- Ø Αξιολόγηση των διαφορετικών επιδράσεων της φλόγας, της θερμικής ακτινοβολίας της θερμότητας και της εξάπλωσης της φωτιάς (π.χ. από τον αέρα) στο αεροσκάφος. Επιπλέον, αξιολόγηση της δυνατότητας εισχώρησης της φλόγας από μία περιοχή σε μία άλλη (burn through), και της ανάφλεξης των εσωτερικών υλικών.
- Ø Ακεραιότητα της κατασκευής: Διατήρηση της μηχανικής ακεραιότητας της καμπίνας κατά τη ρήξη της ατράκτου η οποία ενδέχεται να οφείλεται σε βλάβη των πτερυγίων και τις δεξαμενής καυσίμου. Κατά τη διαρροή καυσίμου υπάρχει η πιθανότητα ανάφλεξης τόσο κατά τη συντριβή όσο και κατά το χτύπημα της ατράκτου.
- Ø Επίδραση της παραγωγής και της μετακίνησης του καπνού στην καμπίνα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ορατότητα και να προκαλείται καθυστέρηση κατά εκκένωση του αεροσκάφους.
- Ø Αξιολόγηση του χρόνου ανάφλεξης, που είναι ένα κρίσιμο σημείο μετά τη συντριβή, καθώς η πυρκαγιά αναπτύσσεται γρήγορα και τείνει να αναπτυχθεί σε ολόκληρη την καμπίνα. Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε όλη την καμπίνα των επιβατών, σηματοδοτεί συνήθως το τέλος της περιόδου υψηλού ποσοστού επιβίωσης των επιβατών.
- Ø Δυνατότητα επιβίωσης των επιβατών κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς πριν από την ανάφλεξη.
- Ø Ασφαλής εκκένωση των επιβατών και του πληρώματος.

Σημαντικές πτυχές για τη βελτίωση είναι οι εξής:

- Ø Προσδιορισμός των νέων δυνητικών ζωνών φωτιάς και των σχετικών κινδύνων.
- Ø Επιλογή και προσαρμογή των εργαλείων βέλτιστης προστασίας και, εάν είναι αναγκαίο, υπολογισμός του κινδύνου, κατά τον αρχικό σχεδιασμό των αεροσκαφών, με στόχο την πρόληψη και την καταπολέμηση της φωτιάς από:
  - i. Τη διαίρεση του αεροσκάφους σε ζώνες ή λειτουργικά όρια, αξιολογώντας τους κίνδυνους πυρκαγιάς σε καθένα από αυτά (ο όγκος του εύφλεκτου υλικού που περιέχεται και πρέπει να απομονώνεται από αναγνωρισμένες ομάδες πυρασφαλείας (στεγανοποίηση ζώνης)).
  - ii. Την αξιολόγηση των υφιστάμενων ολοκληρωμένων συστημάτων για την προστασία των ζωνών φωτιάς μέσω άμεσων και βελτιωμένων συστημάτων ανίχνευσης (διαρροή καυσίμου ή πετρελαίου, ατμούς υδρογονανθράκων, καπνός από φωτιά), σύμφωνα με την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και των ορίων των διαθέσιμων αισθητήρων.
  - iii. Την παροχή έξυπνων ειδοποιήσεων για την εμφάνιση μιας πρώτης εικόνας της κατάστασης, που να επιτρέπει την εκτίμηση του κινδύνου, τόσο για το πλήρωμα του αεροπλάνου, όσο και για εκείνο του εδάφους.
  - iv. Βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκκένωσης των επιβατών και του πληρώματος.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Η χρήση σύνθετων και πολυμερών υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των υλικών διόγκωσης, είναι όλο και συχνότερη στα σύγχρονα αεροσκάφη. Κατά συνέπεια, εναλλακτικά σχέδια πρέπει να εφαρμόζονται στα θερμικά και μονωτικά υλικά, της ατράκτου, των φτερών, στα εσωτερικά διακοσμητικά πάνελ, στις ηλεκτρονικές πλακέτες και τα ηλεκτρικά καλώδια, ώστε να πληρούν τα υψηλά πρότυπα πρόληψης και περιορισμού των πυρκαγιών στις αερομεταφορές.

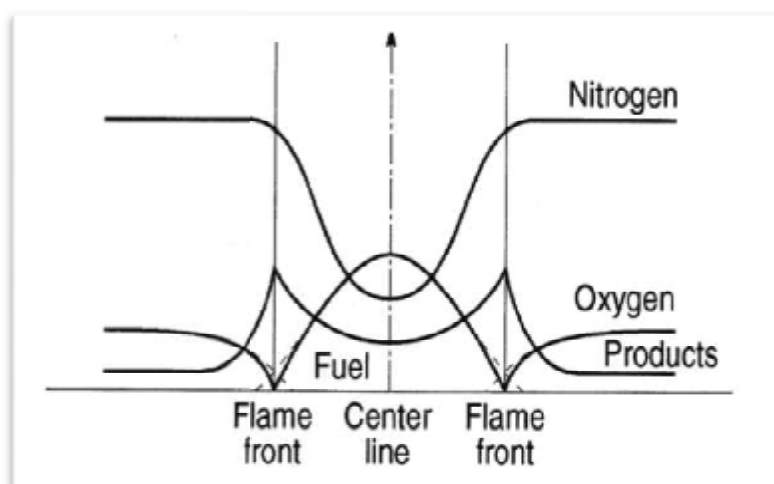
Στη ζώνη πυρός θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά, για τα οποία απαιτείται κατανόηση των θερμικών χαρακτηριστικών τους (διάδοση φλόγας) κατά τη διάρκεια της καύσης. Ο στόχος του έργου αυτού είναι ο θεμελιώδης χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς των δομικών υλικών στη φωτιά. Από τις γνώσεις που αποκτήθηκαν και συσσωρεύτηκαν μέσω της έρευνας και της μελέτης πυρκαγιών σε κτίρια, το έργο αυτό είναι συνδεδεμένο ιδιαίτερα με την ευφλεκτότητα και τις ιδιότητες των υλικών αυτών κατά την καύση.

#### **2.2 Φλόγες διάχυσης**

Σαν φλόγα διάχυσης μπορεί να καθορισθεί μια φλόγα όπου το καύσιμο και το οξειδωτικό είναι αρχικά διαχωρισμένα (μη προαναμιγμένα). Για παράδειγμα μια λεκάνη με πετρέλαιο που καίγεται στον αέρα, ένα αναμμένο κερί, μια σταγόνα καύσιμου που καίγεται σε οξυγόνο ή κάρβουνο που καίγεται στον αέρα, όλα αναπαράγουν μια φλόγα διάχυσης. Συνήθως στις φλόγες διάχυσης

θεωρείται ότι ο ρυθμός ανάμιξης είναι αργότερος από το ρυθμό χημικής αντίδρασης ο οποίος θεωρείται απειροστά γρήγορος. Οι φλόγες διάχυσης μπορεί να είναι είτε στρωτές είτε τυρβώδεις. Οι Burke-Schumann (B-S) όρισαν ένα σύστημα τροφοδοσίας συρρευουσών δεσμών καυσίμου και οξειδωτικού, μέσα από συγκεντρικούς σωλήνες. Μπορεί έτσι να προκύψουν δύο μορφές φλόγας, ανάλογα με το αν υπάρχει υπερεπάρκεια αέρα (υπέρ-αεριζόμενη φλόγα - over ventilated), ή έλλειψη αέρα (υπό-αεριζόμενη φλόγα - under ventilated).

Τυπικά χαρακτηριστικά της δομής μιας φλόγας διάχυσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 13. Θεωρούμε ότι, η χημική αντίδραση πραγματοποιείται στιγμιαία με την επαφή καυσίμου – οξειδωτή, επάνω σε μια λεπτή επιφάνεια, υπονοώντας έτσι, ότι η χημική αντίδραση πληρείται σε μια πολύ λεπτή ζώνη, και ότι πολύ λίγο καύσιμο και οξυγόνο διεισδύουν μέσω του λεπτού αυτού μετώπου της φλόγας. Η επιφάνεια της φλόγας μπορεί να προσδιορισθεί σαν την επιφάνεια, όπου καύσιμο και οξειδωτικό προσέρχονται υπό στοιχειομετρική αναλογία και αντιδρώντας με απειροστά γοργό ρυθμό, καταναλώνονται για την παραγωγή των προϊόντων (σ' αυτήν την επιφάνεια συνεπώς δεν μπορεί να υπάρχουν ούτε καύσιμο, ούτε οξειδωτικό, παρά μόνο προϊόντα).



**Εικόνα 13:** Κατανομή συστατικών μέσα από τον κορμό μιας φλόγας διάχυσης



Οι Burke και Schumann ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν την υπόθεση ότι καύσιμο και οξειδωτικό δεν μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα όταν συμβαίνει μια απείρως γρήγορη αντίδραση. Σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβλητές της φλόγας και το κλάσμα μείγματος σχετίζονται θέτοντας απλά  $Y_O=0$  (στην πλευρά του καυσίμου) και  $Y_F=0$  (στην πλευρά του οξειδωτικού) ως εξής:

- Στην πλευρά του καυσίμου ( $z > z_{st}$ ):

$$Y_F(z) = zY_F^\infty + (z - 1) \frac{Y_O}{S} = Y_F^\infty \frac{z - z_{st}}{1 - z_{st}}$$

$$Y_O(z) = 0$$

$$T(z) = zT_F^\infty + (1 - z)T_O^\infty + \frac{Q Y_F^\infty}{C_p} z_{st} \frac{1 - z}{1 - z_{st}}$$

- Στην πλευρά του οξειδωτικού ( $z < z_{st}$ ):

$$Y_F(z) = 0$$

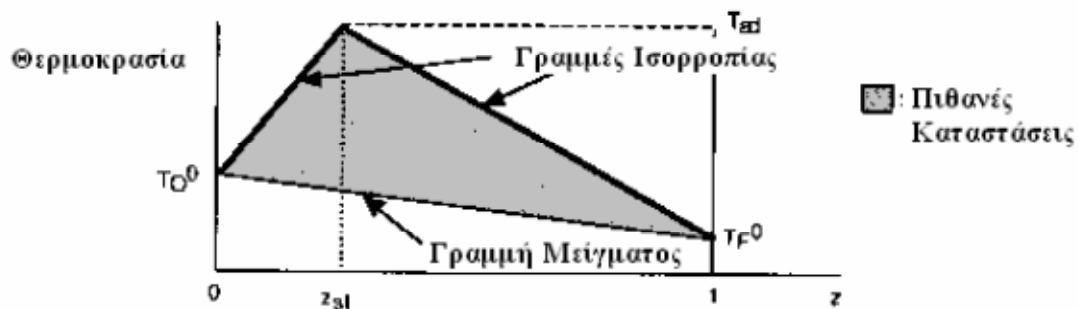
$$Y_O(z) = Y_O^\infty \left(1 - \frac{z}{z_{st}}\right)$$

$$T(z) = zT_F^\infty + (1 - z)T_O^\infty + \frac{Q Y_F^\infty}{C_p} z$$

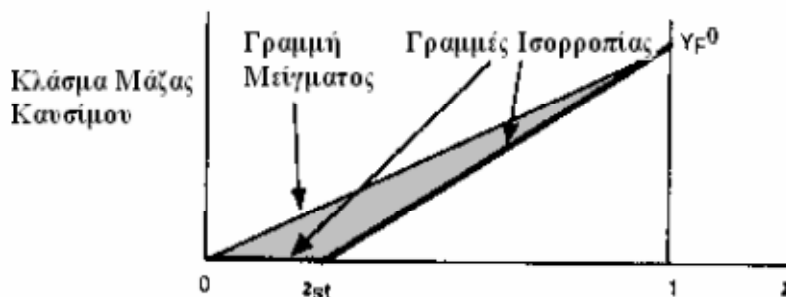
Ο ταυτόχρονος μηδενισμός της ποσότητας του καυσίμου και του οξειδωτικού ορίζει την επιφάνεια της φλόγας,  $z_{st}$ , όπου τα  $Y_F$  και  $Y_O$  είναι και τα δύο ίσα με μηδέν:

$$z_{st} = \frac{1}{1 + \frac{SY_F^\infty}{Y_O^\infty}} = \frac{1}{1 + \frac{v_O M_O Y_F^\infty}{v_F M_F Y_O^\infty}} = \frac{1}{1 + \phi}$$

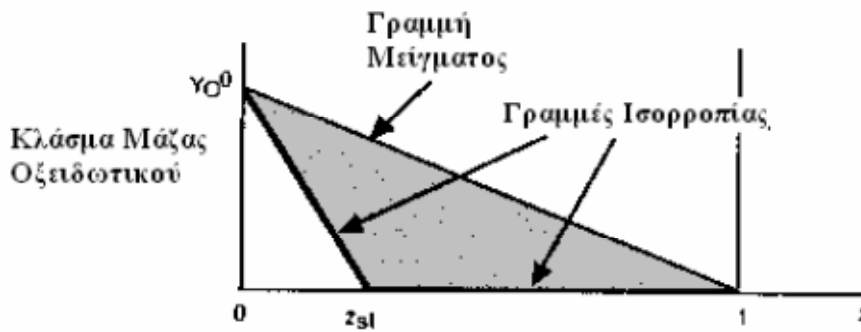
Όπως είναι λογικό, για μικρές τιμές του  $z_{st}$  η φλόγα βρίσκεται κοντά στην πλευρά του οξειδωτικού, ενώ για μεγάλες τιμές του  $z_{st}$  η φλόγα βρίσκεται κοντά στην πλευρά του καυσίμου. Η εξάρτηση της θερμοκρασίας, του κλάσματος μάζας του καυσίμου και του κλάσματος μάζας του οξειδωτικού από το κλάσμα μείγματος φαίνονται στις Εικόνες 14, 15 και 16 αντίστοιχα (Burke και Schumann, 1928). Σε αυτά τα σχήματα φαίνονται επίσης και οι 'γραμμές ανάμειξης' (mixing lines), που αντιστοιχούν σε καταστάσεις όπου καύσιμο και οξειδωτικό αναμειγνύονται χωρίς να αντιδρούν.



**Εικόνα 14:** Εξάρτηση της θερμοκρασίας από το κλάσμα μείγματος. (Burke και Schumann, 1928)



**Εικόνα 15:** Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του καυσίμου από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).



**Εικόνα 16.** Εξάρτηση του κλάσματος μάζας του οξειδωτικού από το κλάσμα μείγματος (Burke και Schumann, 1928).

Για μια δεδομένη στρωτή ή τυρβώδη φλόγα διάχυσης, η απεικόνιση των ποσοτήτων  $T$ ,  $Y_F$  και  $Y_O$  σε ένα  $z$  διάγραμμα, δίνει μια χρήσιμη εικόνα της φλόγας. Όλα τα σημεία βρίσκονται μεταξύ των 'γραμμών μείγματος' και των 'γραμμών ισορροπίας' (equilibrium lines), καθώς καμία άλλη κατάσταση δεν είναι δυνατή. Όταν τα περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά στην 'γραμμή μείγματος', η φλόγα είναι κοντά στο όριο έναυσης ή σβέσης. Αντιθέτως, σε ένα  $z$  διάγραμμα όπου τα σημεία βρίσκονται κοντά στην 'γραμμή ισορροπίας' η φλόγα έχει μεγάλη ένταση.

### **Ορισμός της έκλαμψης και απαραίτητες συνθήκες εμφάνισης της**

Η έκλαμψη είναι η χρονική περίοδος μετάβασης μιας περιορισμένης φωτιάς σε εκτεταμένη πυρκαγιά στο εσωτερικό ενός χώρου, όπου καίγονται όλες οι αναφλέξιμες επιφάνειες. Όταν υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και αέρα, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον χώρο και όλες οι εκτεθειμένες αναφλέξιμες επιφάνειες να καούν. Σε αυτήν την περίπτωση, η οποία είναι και η πλέον πιθανή σε πραγματικές συνθήκες φωτιάς, παίζουν σημαντικό ρόλο οι συνθήκες που επικρατούν στο χώρο κατά την έναρξη της έκλαμψης, αλλά κυρίως η χρονική διάρκεια ανάπτυξης της φωτιάς. Όσον αφορά την έκλαμψη, η διάρκειά της εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως για παράδειγμα το μέγεθος και το σχήμα του χώρου ή οι φυσικές ιδιότητες και η

χωρική κατανομή των αναφλέξιμων αντικειμένων. (Drysdale, 1999). Δεδομένου ότι η έκλαμψη σηματοδοτεί την έναρξη του σταδίου της πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς, είναι σημαντικό να οριστεί επ' ακριβώς η χρονική στιγμή εμφάνισής της ώστε να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης της φωτιάς.

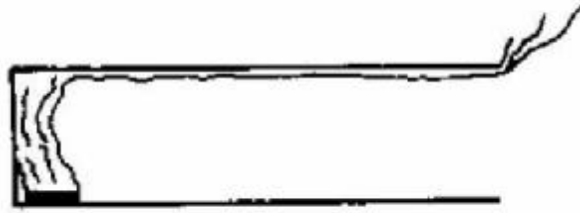
Όταν αναπτύσσεται μια φωτιά, εκτός από τις φλόγες πάνω ακριβώς από την φωτιά, εμφανίζονται και άλλες πηγές θερμικής ακτινοβολίας, όπως (Drysdale, 1999):

- Οι θερμές επιφάνειες που βρίσκονται στο ανώτερο μέρος του χώρου.
- Οι φλόγες κάτω από την οροφή.
- Τα θερμά προϊόντα καύσης που παγιδεύονται κάτω από την οροφή.

Η επίδραση της κάθε πηγής μεταβάλλεται, όσο αναπτύσσεται η φωτιά, καθώς η αιτία εμφάνισης της έκλαμψης εξαρτάται από τη φύση του καυσίμου και τον αερισμό του δωματίου. Αντίθετα, για την παραγωγή καπνού, καθοριστικό ρόλο παίζουν το ύψος και η θερμοκρασία του θερμού στρώματος των προϊόντων καύσης κάτω από την οροφή. Για λόγους ευκολίας θεωρείται ότι, υπάρχουν δύο περιπτώσεις αλληλεπίδρασης της φωτιάς με την οροφή, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 17 και 18.

Στην πρώτη περίπτωση (Εικόνα 17) ο χώρος είναι ουσιαστικά μονοδιάστατος μεγάλου μήκους σαν διάδρομος. Στη μία άκρη βρίσκεται η πηγή έναυσης της φωτιάς, ενώ η άλλη άκρη είναι ανοιχτή, ώστε να μην περιορίζεται η οριζόντια διάδοση της φωτιάς, κατά την κατεύθυνση της ροής. Έτσι, το ύψος του στρώματος που σχηματίζεται, εξαρτάται μόνο από το πλάτος του 'διαδρόμου' και το ρυθμό με τον οποίο ρέει το θερμό αέριο στο στρώμα που σχηματίζεται στην οροφή. Αν η φωτιά έχει επαρκές μέγεθος, με αποτέλεσμα οι φλόγες να απομακρύνονται, τότε σύμφωνα με τον Hinkley (1968) δύο πράγματα

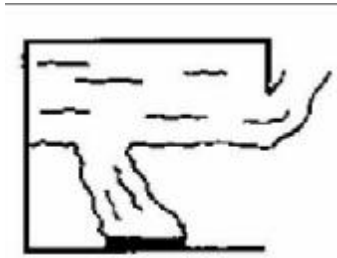
μπορούν να συμβούν: είτε να υπάρχει περίσσεια αέρα, επομένως και οξυγόνου, οπότε η καύση να είναι φτωχή σε καύσιμο, είτε ο αέρας να μην επαρκεί με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή συγκέντρωση οξυγόνου και επομένως μεγάλη ποσότητα άκαυστου καυσίμου στο στρώμα του καπνού, οπότε η καύση είναι πλούσια σε καύσιμο.



**Εικόνα 17:** Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός διαδρόμου. (Drysdale, 1999)

Στην δεύτερη περίπτωση (Εικόνα 18), φαίνεται ο σχηματισμός του στρώματος του καπνού κάτω από την οροφή. Αμέσως μόλις εμφανιστεί η φωτιά, και όσο αυτή μεγαλώνει, οι φλόγες ανεβαίνουν προς την οροφή και σχηματίζουν ένα ρεύμα που κινείται προς τα έξω, ώσπου να συναντήσει κάποιον τοίχο. Ταυτόχρονα, σχηματίζεται ένα στρώμα καπνού ακριβώς κάτω από την οροφή, το οποίο, όσο η φωτιά συνεχίζει να καίει, μεγαλώνει και κατεβαίνει προς τα κάτω. Όταν αυτό το στρώμα καπνού συναντήσει κάποιο άνοιγμα, σταθεροποιεί το ύψος του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (ουδέτερο επίπεδο – neutral level), με αποτέλεσμα να μειώνεται το ύψος, μέσω του οποίου εισάγεται ψυχρός αέρας στο δωμάτιο και η θερμοκρασία του στρώματος αυξάνεται όλο και περισσότερο (Quintiere, 1976). Στην περιοχή κοντά στους τοίχους, το αέριο που βρίσκεται εκεί ψύχεται, με αποτέλεσμα να γίνεται ελαφρύτερο από το υπόλοιπο αέριο. Συνεπώς, ξεκινάει να ακολουθεί μια καθοδική ροή, συμπαρασύροντας μαζί του και ένα μέρος του καπνού. Ο καπνός αυτός αναμειγνύεται με τον αέρα και συνεπάγεται με τη θερμοκρασία εκεί γίνεται μικρότερη σε σχέση με την οροφή, όπου παρουσιάζονται οι

υψηλότερες θερμοκρασίες. Η οροφή, καθώς και τα υψηλότερα σημεία των τοίχων, αρχικά θερμαίνονται λόγω της μεταφοράς θερμότητας, στη συνέχεια όμως, όσο η θερμοκρασία του στρώματος και η συγκέντρωση των σωματιδίων καπνού αυξάνει, κυριαρχεί η ακτινοβολία.



**Εικόνα 18:** Αλληλεπίδραση ενός πλουμίου φωτιάς με την οροφή ενός “τυπικού δωματίου”. (Drysdale, 1999)

Καθώς η φωτιά μεγαλώνει σε μέγεθος, η φλόγα αρχίζει να διαπερνά το στρώμα καπνού που έχει σχηματιστεί. Μόλις συμβεί αυτό, το ανώτερο μέρος της φλόγας εισάγει αέρα ο οποίος είναι ‘νοθευμένος’ με διάφορα προϊόντα καύσης. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού συγκέντρωσης καπνού, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας του στρώματος οδηγεί στην εντονότερη εκπομπή ακτινοβολίας προς τα κάτω. Έτσι, μεγαλώνει ο ρυθμός με τον οποίο καίει η ήδη υπάρχουσα φωτιά καθώς επίσης και ο ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η φλόγα στις διάφορες γειτονικές επιφάνειες. Ταυτόχρονα, το στρώμα καπνού κατεβαίνει, αν και με πιο αργό ρυθμό απ’ ότι προηγουμένως, περιβάλλοντας όλο και μεγαλύτερο τμήμα της φλόγας. Αυτή ακριβώς η κατάσταση είναι η πιο πιθανή να συμβεί κατά την εμφάνιση της έκλαμψης, όταν, δηλαδή, η φωτιά υφίσταται μια γρήγορη μετατροπή προς την πλήρως ανεπτυγμένη της μορφή.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι αν ο χώρος δεν αερίζεται επαρκώς και το οξυγόνο που καταναλώνεται κατά την διάρκεια της φωτιάς δεν ανανεώνεται,

τότε υπάρχει και η περίπτωση να μην γίνει έκλαμψη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση, που καίγεται αμέσως ολόκληρο το καύσιμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση ενός μικρού δωματίου, στο οποίο ο αέρας δεν ανανεώνεται συχνά, όπου μια φωτιά που έχει γρήγορο ρυθμό καύσης μπορεί να σβήσει από μόνη της, ή, το πιο πιθανό, να καίει σιγά σιγά με το ρυθμό που της επιβάλλει η είσοδος του αέρα. Υπό τις συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω, η καύση είναι ατελής και τα άκαυστα ή μερικώς καμένα προϊόντα της καύσης συσσωρεύονται στον χώρο.

Τέλος, σύμφωνα με τον Bullen (1978), εάν η φωτιά καίει για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα υπό τις παραπάνω συνθήκες και ξαφνικά εισαχθεί μια ποσότητα αέρα στο δωμάτιο, υπάρχει περίπτωση η είσοδος του φρέσκου αέρα να οδηγήσει στο κάψιμο διάφορων άκαυστων καταλοίπων του καυσίμου και στη ξαφνική 'φούντωση' της φλόγας. Παρά το ότι στη συνέχεια μπορεί να υπάρξει μια πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά, δεν θα είναι το ίδιο με την έκλαμψη, κατά την οποία δεν απαιτείται η ξαφνική είσοδος αέρα (Drysdale, 1999) και μπορεί να συμβεί και σε έναν καλά αεριζόμενο χώρο.

### **2.3 Διάδοση της φωτιάς (flame spreading)**

Μετά την ανάφλεξη που δημιουργείται στο μίγμα αέρος και καύσιμης ύλης, το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη της φωτιάς είναι η διάδοση της επιφανειακής φλόγας (flame spreading). Διάδοση της φλόγας είναι η διαδικασία, όπου αυξάνεται η περίμετρος της. Θα μπορούσε να περιλαμβάνει και την διαδικασία των απομακρυσμένων αναφλέξεων, εάν αυτές ήσαν συνεχείς. Μια τέτοια διάδοση, συμπεριλαμβάνει και τη συμμετοχή της υγρής ή στερεάς καύσιμης ύλης. Ο ρυθμός με τον οποίο θα αναπτυχθεί μια φωτιά, θα εξαρτηθεί από το πόσο γρήγορα μπορεί να εξαπλωθεί η φλόγα, από το σημείο ανάφλεξης σε όλα τα κοντινά καύσιμα υλικά. Για το λόγο αυτό, για την καταγραφή της χρησιμοποιείται μονάδα μέτρησης ταχύτητας (m/sec). Παραδείγματα διάδοσης φλόγας, σε στερεές ή υγρές καύσιμες ύλες, μπορούν να παρουσιαστούν σε πολλές φωτιές και συγκεκριμένα, στην επέκταση της καιόμενης περιοχής. Δεν

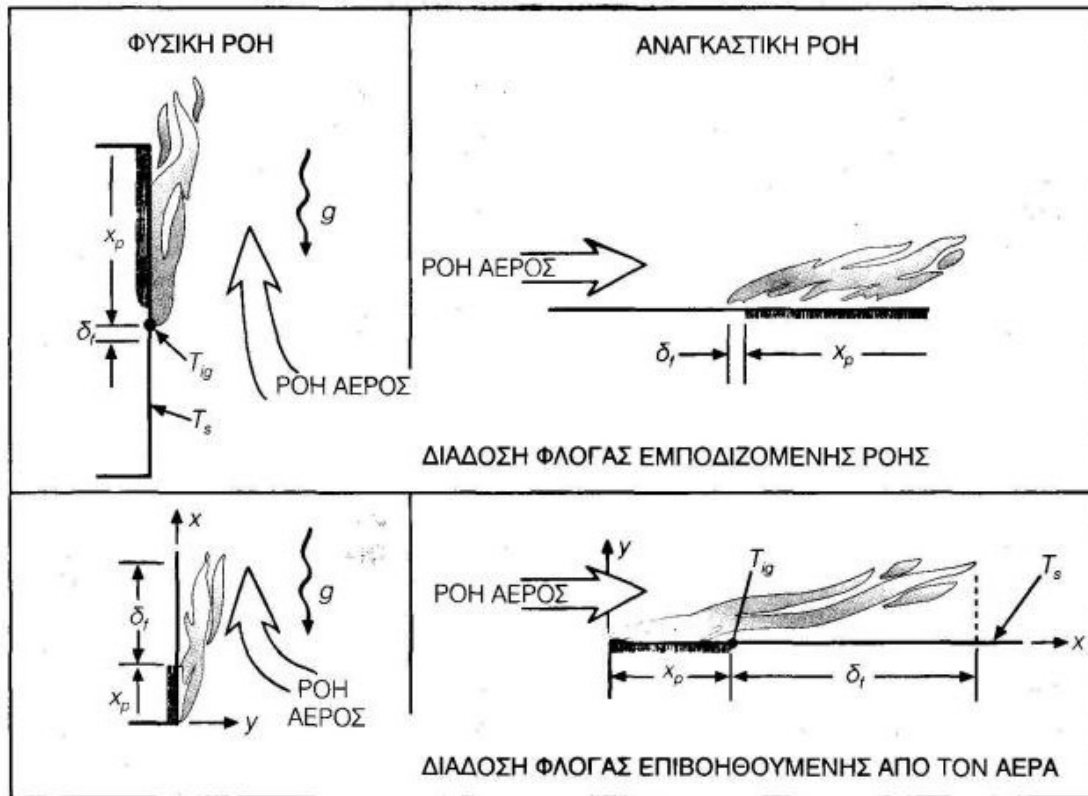


πρόκειται για επέκταση της φλόγας, αλλά εξάτμιση της περιοχής και τροφοδοσία της καύσιμης ύλης. Γενικά, μπορούμε να επωφεληθούμε από την ιδέα της διάδοσης της φλόγας. Η διάδοση της φωτιάς εφαρμόζεται, τόσο κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης της καύσης, συμπεριλαμβανομένης και της επιφανειακής διάδοσης της φλόγας, όσο και της ανάπτυξης της βραδείας καύσης και της πύρινης φλόγας κατά την ανάπτυξη προαναμεμιγμένης φλόγας. Κατά τη διάδοση της φλόγας και γενικά κατά την ανάπτυξη της φωτιάς, τα φαινόμενα βαρύτητας και ανέμων παίζουν μεγάλο ρόλο. Οι ροές, που απορρέουν από την άντωση της φωτιάς ή του φυσικού αέρος της ατμόσφαιρας, μπορούν να βοηθήσουν ή να καταπολεμήσουν τη διάδοση της φλόγας.

Η Εικόνα 19 απεικονίζει τις διάφορες φάσεις διάδοσης της φλόγας. Η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας ορίζεται ως ο ρυθμός κίνησης της περιμετρικής θέσης  $X_p$  το οποίο υποδηλώνει την έκταση της πυρόλυσης ή της αεροποποιημένης περιοχής. Πίσω από την περίμετρο της διαδιδόμενης πυρόλυσης, υπάρχει μια άλλη περίμετρος πέραν της οποίας η καύση ή οποιαδήποτε φλόγα έχει σταματήσει. Η περιοχή μεταξύ αυτών των δύο μετώπων ορίζει την κυρίως καύση ή την περιοχή πυρόλυσης. Η καύση αυτής της επιφάνειας πυρόλυσης και ο ρυθμός της πυρόλυσης σχετίζεται με το βασικό μεταβλητό είδος κινδύνου της φωτιάς. Αυτή η μεταβλητή ποσότητα, την οποία ορίζουμε ως ρυθμό καύσης, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον καθορισμό της θερμοκρασίας, της ορατότητας, της τοξικότητας και της διάβρωσης της φωτιάς. Για το λόγο αυτό, ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση του κινδύνου της φωτιάς.

Η εξάπλωση της φλόγας προς την κατεύθυνση της ροής του αέρος γενικά αναφέρεται ως βοηθούμενη από τον άνεμο εξάπλωση. Σ' αυτές τις περιπτώσεις ο άνεμος οφείλεται απλά στη ροή λόγω άντωσης που προκαλείται από την ίδια τη φωτιά. Η απαιτούμενη θέρμανση για την πρόκληση διασποράς της φλόγας, κυρίως, προκαλείται από τη μεταφορά θερμότητας από την επιμηκυμένη φωτεινή (καθαρή) φλόγα που είναι πλησίον της επιφάνειας. Η φλόγα προεκτείνεται καθ' όλο το μήκος δι' όπως δείχνεται στο σχήμα. Αυτή η

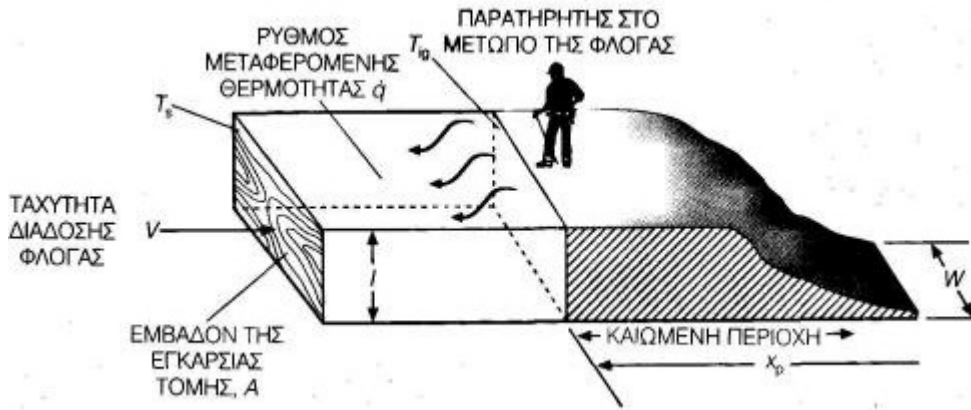
απόσταση εξαρτάται από το μήκος έκτασης της καύσης, το οποίο ακολούθως εξαρτάται, κυρίως από το ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας της φωτιάς, η οποία την προκαλεί.



**Εικόνα 19.** Φάσεις διάδοσης φλόγας. Φυσική: η φλόγα παρακινείται μόνο από την άντωση της ροής.

Η γενική ιδέα μιας θερμοκρασίας έναυσης είναι το κλειδί στην επεξήγηση της διάδοσης της φλόγας με απλούς, αλλά συμφωνά με τη φυσική, όρους. Στη διάδοση της φλόγας, εφαρμόζεται η θερμοκρασία του οδηγού έναυσης (φλόγιστρου) ,διότι πάντα θα υπάρχει ένα φλόγιστρο (ή η ίδια η φλόγα). Εάν εξετάσουμε την Εικόνα 20 έχουμε πάλι χαρακτηρίσει την θέση  $x_p$  στην θερμοκρασία έναυσης (ανάφλεξης) ως  $T_{ig}$ . Η θερμοκρασία μπροστά από τη φλόγα, χαρακτηρίζεται ως  $T_s$ . Η απόσταση κατά μήκος της επηρεασθείσας επιφανείας από τη μετάδοση θερμότητας της φλόγας χαρακτηρίζεται ως  $f$ . Γενικά, οι φλόγες μπορούν να θερμάνουν την μπροστινή περιοχή με πολλούς

τρόπους. Αυτοί οι τρόποι εξαρτώνται από τη φάση (τρόπο) διάδοσης - προσανατολισμό, άνεμο - και από τη φύση της στερεάς ή υγρής καύσιμης ύλης. Αυτή η διαδικασία, δείχνεται συμβολικά στο σχήμα.



**Εικόνα 20:** Μοντέλο διάδοσης της φλόγας. Τα σχήματα δεικνύουν την σταθερή διάδοση φλόγας.

Στην εξίσωση της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας αναφέρεται ότι ο ρυθμός της παρεχόμενης ενέργειας, προς την νεοθερμαινόμενη καύσιμη ύλη, προκειμένου να φθάσει στη θερμοκρασία  $T_{ig}$ , ισούται με το ρυθμό μετάδοσης της ωφέλιμης θερμότητας από την καίομενη περιοχή  $q$ . Για το λόγο αυτό, έχουμε μια ισορροπία της διάδοσης:

$$[\text{Ρυθμός απαιτούμενης ενέργειας}] = [\text{Ρυθμός παρεχόμενης θερμότητας}]$$

$$\rho V A c (T_{ig} - T_s) = q \quad (2-1)$$

όπου:

$\rho$  = η πυκνότητα της καύσιμης ύλης

$c$  = η ειδική θερμότητα της καύσιμης ύλης

$A$  = το εμβαδόν της εγκάρσιας τιμής, " $wl$ "

$T_s$  = η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης πέραν της διακύμανσης της θερμοκρασίας της φλόγας.

Άρα η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας θα είναι:

$$V = \frac{q}{\rho c A (T_{ig} - T_s)} \quad (2-2)$$

Οι περισσότερες παρόμοιες περιπτώσεις διάδοσης φλόγας, μπορεί να εξαχθούν απ' αυτόν τον τύπο, εφ' όσον προσδιορισθεί προσεκτικά το  $q$  και το  $A$ . Θα υποθέσουμε ορισμένους κατά προσέγγιση τύπους, οι οποίοι συμφωνούν με περισσότερο πολύπλοκες αναλύσεις, πέραν του ρόλου αυτού του κειμένου. Αυτοί οι τύποι πρέπει να θεωρηθούν ως προσεγγιστικοί μέθοδοι, αλλά στερούνται μεγάλης ακρίβειας για τις συνθήκες. Και εδώ, ο προσανατολισμός, ο άνεμος και η φύση της καύσιμης ύλης καθορίζουν τη διαφορά.

Διάφοροι παράγοντες παίζουν ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς:

### 1) Διάδοση Σε Στερεές Επιφάνειες.

Ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού και από την χημική του σύσταση. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς σε μια αναφλέξιμη στερεή επιφάνεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 (Friedman, 1977).

Πίνακας 2.1. Παράγοντες επίδρασης του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς.

Υλικό		Περιβάλλον
Χημικοί	Φυσικοί	
Χημική Σύσταση	Αρχική Θερμοκρασία	Σύσταση της ατμόσφαιρας
Παρουσία επιβραδυντικών υλών	Κατεύθυνση διάδοση φλόγας	Ατμοσφαιρική πίεση
	Πάχος υλικού	Θερμοκρασία
		Μετάδοση της ταχύτητας μέσω

	Προσανατολισμός επιφάνειας	ακτινοβολίας
	Θερμοχωρητικότητα	Ταχύτητα αέρα
	Θερμική αγωγιμότητα	
	Πυκνότητα	
	Σχήμα	

Για τη διάδοση πάνω από στερεές επιφάνειες, έχει παρατηρηθεί ότι ο πιο σημαντικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας εμφανίζεται σε ένα μήκος  $\delta_i$ , όπως δείχνεται στο σχήμα 13. Έτσι:

$$q = q'' \delta f w \quad (2-3)$$

όπου  $q''$  είναι η θερμική ροή της μπροστινής φλόγας και  $W$  είναι το πλάτος της καύσιμης ύλης όπως δείχνεται στην Εικόνα 14. Το εμβαδόν ροής  $A$  είναι  $wl$ , όπου  $l$  είναι το πάχος της καύσιμης ύλης. Εάν αντικαταστήσουμε αυτούς τους τύπους στην εξίσωση (2-2), λαμβάνουμε:

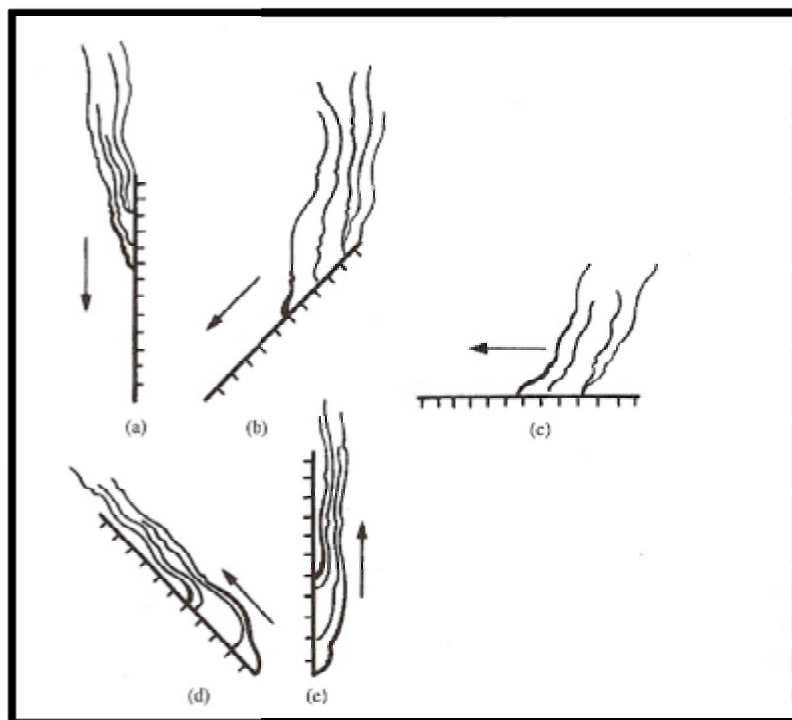
$$V = \frac{q'' \delta f}{\rho c l (T_{ig} - T_s)} \quad (2-4)$$

Και εδώ, αναφερόμενοι στην Εικόνα 13, το  $V$  είναι ο ρυθμός κίνησης της θέσης  $X_p$ . Ο προσανατολισμός και η φυσική ροή ή οι συνθήκες αναγκαστικής ροής, επηρεάζουν την απόσταση θέρμανσης  $\delta_i$  και της ανάλογης θερμικής ροής της φλόγας  $q''$ . Η επιφανειακή μεταφορά θερμότητας από τις φλόγες μπορεί μόνο να διεισδύσει μέχρι ένα σημείο συγκεκριμένου πάχους. Αυτή η, εις βάθος, θέρμανση γίνεται κατά τη διάρκεια θέρμανσης της επιφάνειας, από την αρχική της θερμοκρασία  $T_s$  μέχρι την θερμοκρασία ανάφλεξης  $T_{ig}$ . Αυτός ο χρόνος θέρμανσης είναι πράγματι ο χρόνος ανάφλεξης, που δημιουργείται από την θερμική ροή της διαδιδόμενης φλόγας.

2) Προσανατολισμός επιφάνειας και κατεύθυνση διάδοσης της φωτιάς.

Αν και μια στερεή επιφάνεια μπορεί να καεί ανεξαρτήτως του προσανατολισμού της, η εξάπλωση της φλόγας είναι ταχύτερη όταν το μέτωπο καύσης κινείται προς τα πάνω, σε μια κάθετη επιφάνεια. Όσο αυξάνεται η γωνία, που σχηματίζει μια επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, τόσο αυξάνεται και ο αντίστοιχος ρυθμός διάδοσης της φλόγας (Magee & McAlevy, 1971). Όταν η κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας είναι προς τα κάτω, η ανωστική ροή του θερμού αέρα έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτήν της φλόγας, με αποτέλεσμα να εμποδίζει την εξάπλωσή της. Στην περίπτωση αυτή, η φλόγα εξαπλώνεται με αργό αλλά σταθερό ρυθμό. Αντίθετα, όταν η κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας είναι προς τα πάνω σε σχέση με την κάθετη επιφάνεια, η άνωση που δημιουργείται από την ίδια την φλόγα οδηγεί σε συμπίπτουσα πορεία του αέρα και της φλόγας, με αποτέλεσμα η τελευταία, μαζί με τα θερμά αέρια, να κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα διαδίδεται με αυξανόμενο ρυθμό

Εικόνα 21.

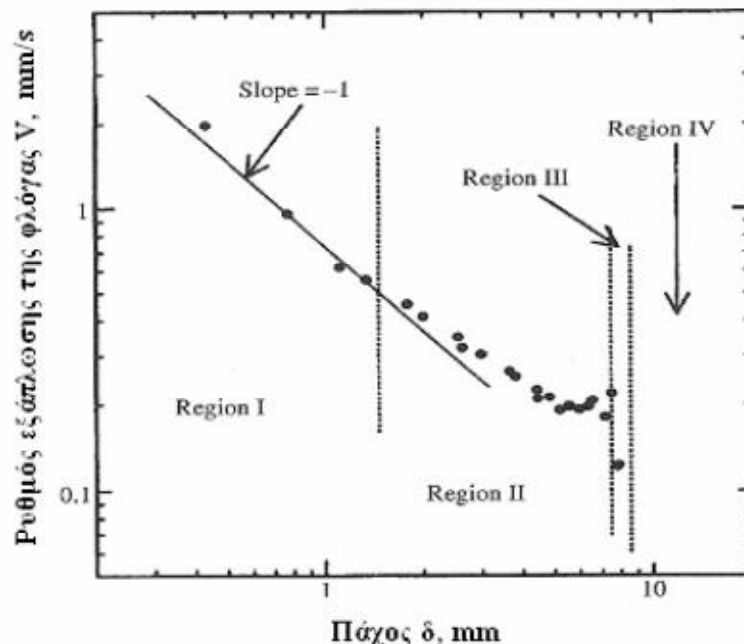


**Εικόνα 21:** Διαφορετικές περιπτώσεις εξάπλωσης της φωτιάς ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας

### 3) Πάχος του καιγόμενου υλικού

Εάν το καύσιμο αντικείμενο είναι πολύ λεπτό και έχει σε όλα τα σημεία του την ίδια θερμοκρασία, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι αντιστρόφως αναλόγως με το πάχος του υλικού. Πάντως, η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας από το πάχος γίνεται λιγότερο αισθητή για πάχη μεγαλύτερα των 1.5mm και ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας παραμένει σταθερός για πάχη υλικού μεγαλύτερα των 5.0-7.5mm (Suzuki et al., 1994).

Μεταβαίνοντας από 'λεπτά' σε 'παχιά' καύσιμα αντικείμενα, παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μακριά από την φλόγα. Στα 'λεπτά' καύσιμα αντικείμενα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής μέσω της αέριας φάσης, ενώ στα 'παχιά' καύσιμα αντικείμενα μέσω της στερεάς φάσης (Drysdale, 1999). Η συμπεριφορά αυτή αφορά υλικά τα οποία δεν αλλάζουν φάση κατά τη διάρκεια της καύσης τους (π.χ. λιώσιμο του καύσιμου υλικού).



**Εικόνα 22** : Εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης φλόγας από το πάχος του υλικού (Περιοχές I και II: σταθερή μετάδοση, Περιοχή III: ασταθής μετάδοση, Περιοχή IV: μη μετάδοση (δεδομένα από Suzuki et al., 1994)



#### 4) Γεωμετρία του αντικειμένου

α) Παρουσία γωνιών

Η φλόγα διαδίδεται γρηγορότερα κατά μήκος μιας ακμής ή σε μια γωνία, παρά πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια (Markstein & de Ris, 1972). Όσο μικρότερη είναι η γωνία μεταξύ δύο ακμών του αντικειμένου, τόσο περισσότερο το στερεό αυτό πλησιάζει την συμπεριφορά του ‘λεπτού’ καυσίμου.

β) Πλάτος.

Το πλάτος ενός αντικειμένου έχει μικρή ή καθόλου επίδραση στο ρυθμό μετάδοσης κατωφερούς φλόγας. Η κατάσταση είναι διαφορετική για φλόγα που κινείται προς τα πάνω. Οι Thomas and Webster (1960) κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση ύστερα από πειράματα σε κλωστές από βαμβάκι:

$$V \propto (\text{πλάτος})^{0.5} \quad (2-5)$$

#### 5) Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

α) Σύνθεση της ατμόσφαιρας.

Τα εύφλεκτα υλικά αναφλέγονται πιο εύκολα και η φλόγα εξαπλώνεται γρηγορότερα εάν η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι υψηλή (π.χ. βιομηχανίες παραγωγής οξυγόνου). Για να θεωρηθεί ότι μια περιοχή είναι πλούσια σε οξυγόνο πρέπει η μερική πίεση του οξυγόνου στην περιοχή αυτή να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της κανονικής ατμόσφαιρας, δηλαδή μεγαλύτερη από 160mmHg.

β) Θερμοκρασία του καυσίμου.

Αυξανόμενη της θερμοκρασίας του καυσίμου, αυξάνεται και ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας (Drysdale, 1999), γεγονός αναμενόμενο, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, τόσο

---

λιγότερη θερμότητα απαιτείται για την ανάφλεξη του άκαυστου καυσίμου, το οποίο βρίσκεται μακριά από το σημείο έναυσης της φωτιάς.

γ) Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.

Η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας, διότι με αυτόν τον τρόπο προθερμαίνεται το καύσιμο μακριά από το μέτωπο της φλόγας. Όμως, ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας, οδηγεί στην εμφάνιση ισχυρότερων φλογών, οι οποίες αυξάνουν την μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ενισχύοντας ταυτόχρονα την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Drysdale, 1999).

δ) Ατμοσφαιρική πίεση.

Έχει παρατηρηθεί ότι όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι αυξημένη, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι γρηγορότερος και αυτό οφείλεται στον εμπλουτισμό του αέρα με οξυγόνο, το οποίο ενισχύει την σταθερότητα της φλόγας σε μια επιφάνεια. (McAlevy and Magee, 1969)

ε) Κίνηση του αέρα.

Γενικά, όταν η κίνηση του αέρα έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή της φλόγας, ενισχύεται ο ρυθμός εξάπλωσής της σε μια εύφλεκτη επιφάνεια. Αν όμως η κίνηση του αέρα αντιτίθεται στην εξάπλωση της φλόγας, τότε το πώς θα επηρεάσει την φλόγα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Όταν ο αέρας κινείται με μεγάλη ταχύτητα, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα μειώνεται. Αν όμως η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά μικρή, η εξάπλωση της φλόγας ενισχύεται (Drysdale, 1999).

## Παραγωγή και κίνηση καπνού

Ο καπνός, ουσιαστικά, είναι διάφορα σωματίδια άκαυστου άνθρακα που οφείλονται στην ατελή καύση. Εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, σε όλες τις φωτιές παρατηρείται παραγωγή καπνού. Ο καπνός προκαλεί μείωση της ορατότητας, με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η εκκένωση του χώρου, προκαλώντας επιμήκυνση του χρόνου, κατά τον οποίο οι επιβάτες είναι εκτεθειμένοι στα προϊόντα της καύσης. Τα προϊόντα της καύσης αποτελούν πολλές φορές ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα χημικών ενώσεων, μερικές από τις οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν ακόμα και το θάνατο, είτε λόγω μικρής χρονικής έκθεσης σε υψηλής συγκέντρωσης δηλητηριώδη αέρια, όπως για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα, είτε λόγω μεγάλης χρονικής έκθεσης σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Αυτό που είναι σημαντικό, είναι η δόση του αερίου που εισπνέεται, δηλαδή η συγκέντρωση των προϊόντων κάθε χρονική στιγμή. Αν η συγκέντρωση αυτή ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή (Purser, 1995), τότε η εκκένωση ενός χώρου χωρίς εξωτερική βοήθεια είναι αδύνατη. Η διάρκεια της έκθεσης μεγαλώνει, εάν η ορατότητα είναι περιορισμένη ή αν τα προϊόντα της καύσης προκαλούν ερεθισμούς στα μάτια και την αναπνοή.

Υπάρχουν δύο ξεχωριστά στάδια όσον αφορά τον καπνό που παράγεται (Drysdale, 1999):

1. Τα πρώτα στάδια της φωτιάς, όπου η φωτιά είναι μικρή σε μέγεθος και καίγεται μόνο ένα αντικείμενο.
2. Η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (αφού έχει παρατηρηθεί έκλαμψη), όπου καίγονται όλα τα αντικείμενα.

Όσον αφορά το πρώτο στάδιο, αυτό σχετίζεται με την ανίχνευση του καπνού σε ένα χώρο. Στο δεύτερο στάδιο, παράγονται μεγάλες ποσότητες καπνού, οι οποίες είναι ικανές να μετατρέψουν σημεία, τα οποία βρίσκονται μακριά από την φωτιά σε μη προσβάσιμα.

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς σε ένα χώρο είναι οι λόγοι κίνησης του καπνού και ο τρόπος κίνησής του από την στιγμή που αρχίζει να παράγεται. Ο καπνός, όπως συμβαίνει και με κάθε ρευστό, κινείται λόγω της επίδρασης δυνάμεων που ασκούνται σε ολόκληρο τον όγκο του. Τέτοιες δυνάμεις δημιουργούνται από (Drysdale, 1999):

- Ø Την άνωση που δημιουργείται άμεσα από την φωτιά.
- Ø Την άνωση που προκύπτει από διαφορές ανάμεσα στην
- Ø εσωτερική και την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Ø Την επίδραση εξωτερικών ανέμων και την κίνηση του αέρα.
- Ø Το σύστημα διακίνησης του αέρα μέσα στο χώρο.

Σχετικά με τον τρόπο κίνησης του καπνού, παρατηρούνται τα εξής (Drysdale, 1999): Κατά τα πρώτα στάδια μιας φωτιάς, τα προϊόντα της καύσης αρχίζουν να αραιώνουν, καθώς κινούνται κάθετα, με φορά προς τα πάνω, ώσπου να φτάσουν στην οροφή. Στη συνέχεια, ο θερμός καπνός κινείται οριζόντια, ώσπου να συναντήσει κάποιο άνοιγμα και να συνεχίσει την ανοδική του πορεία ή, όπως είναι πιο πιθανό, ώσπου να συναντήσει κάποιο εμπόδιο, όπως για παράδειγμα έναν τοίχο, το οποίο θα τον αναγκάσει να σταματήσει την πορεία του. Έτσι, το στρώμα καπνού, που είχε δημιουργηθεί, αρχίζει να γίνεται πυκνότερο και να εκτείνεται πιο χαμηλά, ενώ ο όγκος που καταλαμβάνει περιορίζεται από την οροφή και τα τοιχώματα. Ο ρυθμός, με τον οποίο πυκνώνει αυτό το στρώμα καπνού, εξαρτάται εν μέρει από το ρυθμό της καύσης, αλλά κυρίως από την ποσότητα αέρα, που εισάγεται στο πλούμιο της φωτιάς (fire plume).

### **Σενάρια και ιδιότητες φωτιάς<sup>5</sup>**

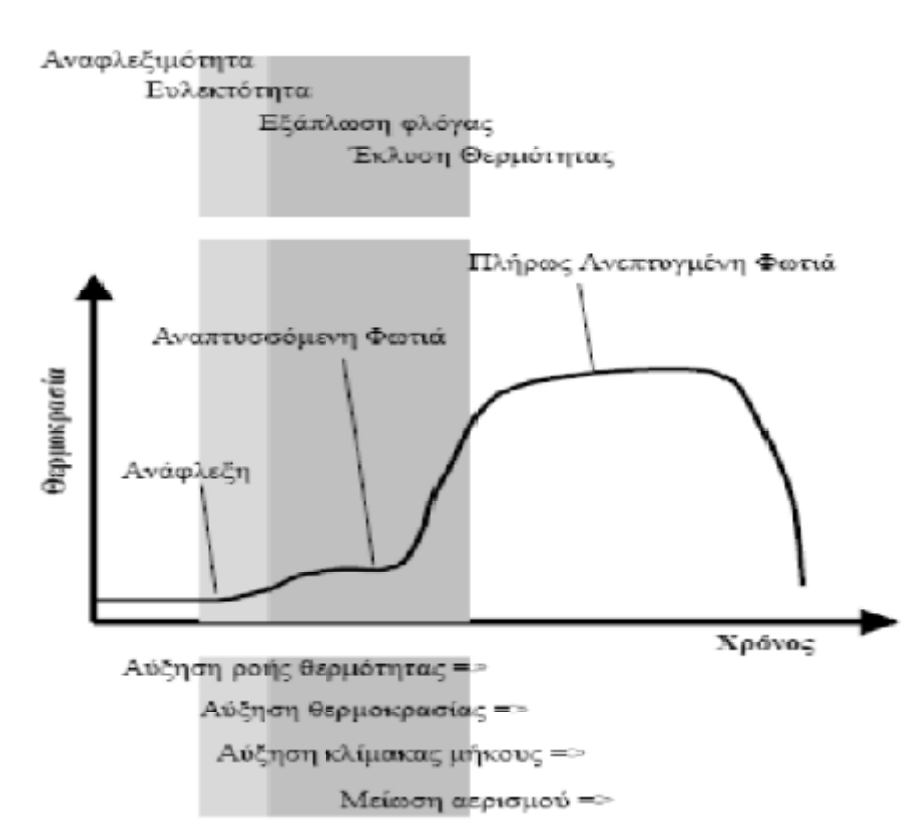
Οι περιπτώσεις φωτιάς (πυρκαγιάς) είναι γενικά διαφορετικές και ένα μεμονωμένο σενάριο, ποτέ δεν καλύπτει όλο το εύρος των περιπτώσεων και

---

<sup>5</sup> Πηγή: Εργαστήριο θερμοδυναμικής

της αντίστοιχης συμπεριφορά τους. Στη συνέχεια, περιγράφονται μερικές βασικές αρχές των διαφόρων σεναρίων φωτιάς και των ιδιοτήτων τους, ως βάση για την εφαρμογή της μεθόδου θερμιδομετρίας κώνου.

Οι περιπτώσεις φωτιάς (σενάρια) διαφέρουν σημαντικά ως προς τους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας και θερμότητας που καθορίζονται από χαρακτηριστικά όπως την εφαρμοζόμενη ροή θερμότητας, τη θερμοκρασία, τις κλίμακες μήκους και τον αερισμό. Η συμπεριφορά της φωτιάς μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρία στάδια (Εικόνα 23). Καθένα από αυτά τα στάδια μπορεί να συνιστά και ένα διαφορετικό σενάριο φωτιάς στο οποίο τονίζονται διαφορετικές ιδιότητες της φωτιάς και των καύσιμων υλικών.



**Εικόνα 23:** Τα στάδια και οι ιδιότητες της πυρκαγιάς, το εύρος των περιπτώσεων πυρκαγιάς που συμπεριλαμβάνονται στη θερμοδομετρία κώνου  
(Schartel B. and Hull T. R. 2007)

A. Έναυση (Στάδιο 1)

Η οδηγούμενη έναυση συνιστά την έναρξη της καύσης με παρουσία φλόγας (flaming combustion) που χαρακτηρίζεται από μια πηγή έναυσης, μια μικρή κλίμακα μήκους (της τάξης των cm), την θερμοκρασία περιβάλλοντος στην περιοχή έναυσης και τα υψηλά επίπεδα αερισμού. Σε αυτό το στάδιο οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η αναφλεξιμότητα (χρόνος ανάφλεξης  $t_{ig}$ ), ο κρίσιμος ρυθμός απώλειας μάζας (critical mass loss rate) ή η απαιτούμενη ροή θερμότητας για την ανάφλεξη (heat release rate for ignition) και η θερμοκρασία ανάφλεξης  $T_{ig}$ .

B. Αναπτυσσόμενη φωτιά (Developing fire - Στάδιο 2)

Η συνέχιση της καύσης παρουσία φλόγας, που εκδηλώνεται σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης, χαρακτηρίζεται από μια εξωτερική ροή θερμότητας με μεγαλύτερες κλίμακες μήκους (της τάξης των dm–m), από θερμοκρασία περιβάλλοντος υψηλότερης από εκείνης της έναυσης και από διατήρηση υψηλών επιπέδων αερισμού. Σε αυτό το στάδιο, οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η εξάπλωση της φωτιάς (flame spread) σε αντίθετη ροή ανέμου αλλά και με υποβοήθηση ανέμου, καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξης της φωτιάς.

Γ. Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (Fully Developed Fire - Στάδιο 3)

Το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς, χαρακτηρίζεται από υψηλή εξωτερική ροή θερμότητας, θερμοκρασία περιβάλλοντος πάνω από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης και χαμηλά επίπεδα αερισμού. Σε αυτό το στάδιο, οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η διείσδυση της θερμότητας, η διείσδυση της φωτιάς ή η αντίσταση στη φωτιά, η έκλυση θερμότητας και το φορτίο φωτιάς (fire load).

#### Δ. Η περίοδος αποσύνθεσης (decay period – Στάδιο 4)

Ως περίοδος αποσύνθεσης ορίζεται η περίοδος κατά την οποία η μέση θερμοκρασία έχει πέσει στο 80% της μέγιστης τιμής της.

### **2.4 Υλικά που τοποθετούνται στα αεροσκάφη**

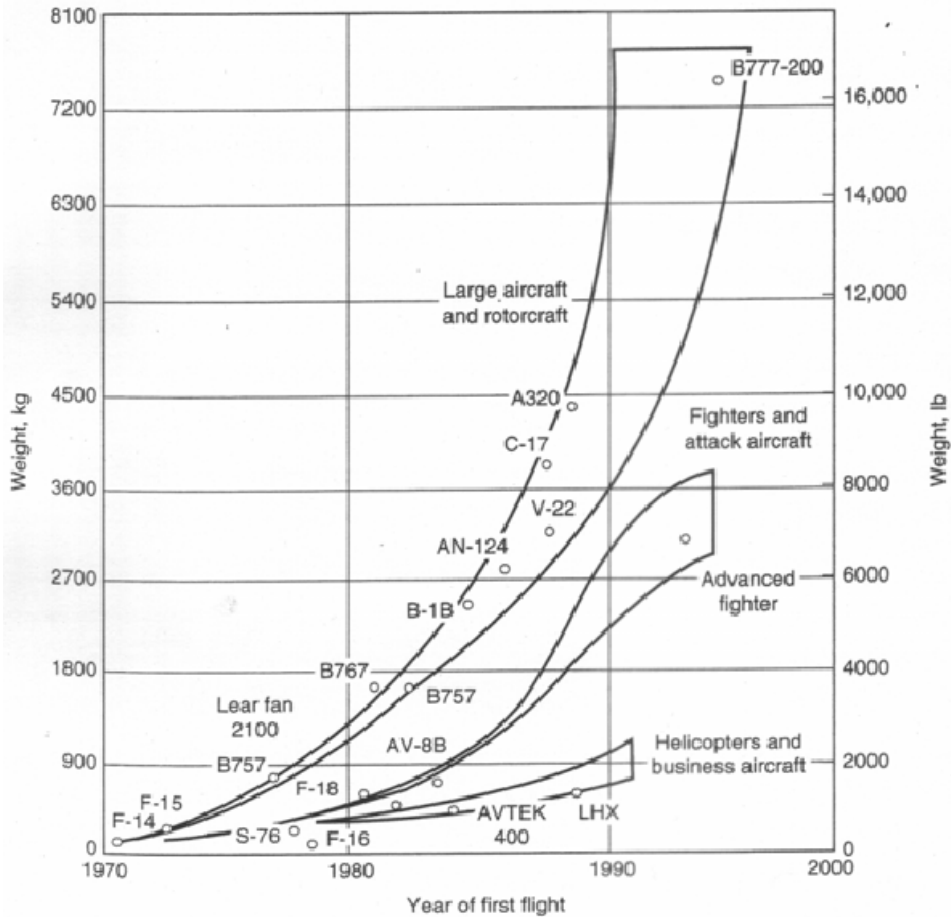
Το ποσοστό των σύνθετων πολυμερών υλικών που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη και ελικόπτερα έχει αυξηθεί δραματικά από τη δεκαετία του 1970. Η ταχεία ανάπτυξη της χρήσης σύνθετων υλικών σε μεγάλα πολιτικά αεροσκάφη, στρατιωτικά αεροσκάφη και ελικοφόρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Και στις τρεις κατηγορίες των αεροσκαφών, η χρήση των σύνθετων υλικών έχει αυξηθεί κατακόρυφα τα τελευταία τριάντα χρόνια και η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί, καθώς τα υλικά αυτά συνεχίζουν να αντικαθιστούν το αλουμίνιο και άλλα κράματα της αεροδιαστημικής τεχνολογίας σε πρωτογενείς δομές και στις επιφάνειες ελέγχου.

Ένας σημαντικός κίνδυνος με τη χρήση πολλών τύπων σύνθετων πολυμερών σε καμπίνες αεροσκαφών αλλά και των δομών, είναι η ευφλεκτότητα τους. Η θερμότητα, ο καπνός και τα αέρια που απελευθερώνονται από την καύση ενός σύνθετου υλικού και η υποβάθμιση της δομικής του ακεραιότητας, μπορεί γρήγορα να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια ενός αεροσκάφους. Η ευαισθησία πολλών συμβατικών σύνθετων υλικών στη φωτιά ήταν ο κύριος λόγος για τον περιορισμό της χρήσης τους σε πολλές εφαρμογές των αεροσκαφών. Η FAA καθορίζει τους κανονισμούς πυρασφάλειας για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ, για το σχεδιασμό και τη κατασκευή πολιτικών αεροσκαφών. Οι κανονισμοί αυτοί εφαρμόζονται παγκοσμίως, σε όλον τον τομέα των αερομεταφορών.

Όλα τα μη-μεταλλικά υλικά, που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό των εμπορικών αεροσκαφών, υπόκεινται στους κανονισμούς ευφλεκτότητας της FAA. Υπάρχουν αρκετές δοκιμές σε φωτιά, οι οποίες παραγγέλθηκαν από την FAA για την αξιολόγηση της ευφλεκτότητας και την αντίδραση των υλικών στη



φωτιά, καθώς και αυτά που ορίζονται στο FAR (FAR 25.853). Η FAA θέτει τα όρια για την απόδοση των ιδιοτήτων των υλικών, ώστε να καθυστερήσει η ανάφλεξη της καμπίνας και έτσι να αυξηθεί ο χρόνος διαφυγής για τους επιβάτες.



**Εικόνα 24:** Σύνθετη δομή του αεροσκάφους κατά βάρος. (Mouritz A.P, 2006),

(Wilhelm, 2001)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Πρόσφατες δοκιμές πλήρους κλίμακας σε αεροσκάφη, έδειξαν ότι η περαιτέρω σταδιακή βελτίωση του συστήματος πυρασφάλειας θα αυξήσει ελάχιστα το χρόνο διαφυγής των επιβατών. Κατά συνέπεια αναμένεται ότι, ο στόχος των δοκιμών αυτών είναι να εξαλείψουν τα δυστυχήματα που προκαλούνται από την καύση υλικών, που ενδεχομένως να είναι και αιτία θανάτου. Βάση των παραπάνω κατασκευάστηκε μια πειραματική συσκευή προσομοίωσης της μη-προσβάσιμης περιοχής (hidden zone), στην οποία θα διεξαχθούν πειράματα, όπως είναι η καύση σύνθετων υλικών, που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό της καμπίνας επιβατών, και θα γίνει η ανάλυση των προϊόντων καύσης.

#### 3.2 Θερμιδόμετρο Κώνου (ISO 5660)<sup>6</sup>

Το όνομα του οργάνου προέρχεται από το κωνικό σχήμα του θερμαντήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας στο υπό εξέταση υλικό με ροή θερμότητας έως και της τάξης των 100 kW/m<sup>2</sup>.

Το θερμιδόμετρο κώνου σήμερα είναι ίσως το πιο σημαντικό όργανο στον τομέα μετρήσεων των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των υλικών, κατά την αντίδρασή τους στη φωτιά. Η βασική παράμετρος με βάση την οποία εκτιμάται η ανάπτυξη μιας φωτιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR). Ο προσδιορισμός αυτής της παραμέτρου σε πραγματικές

---

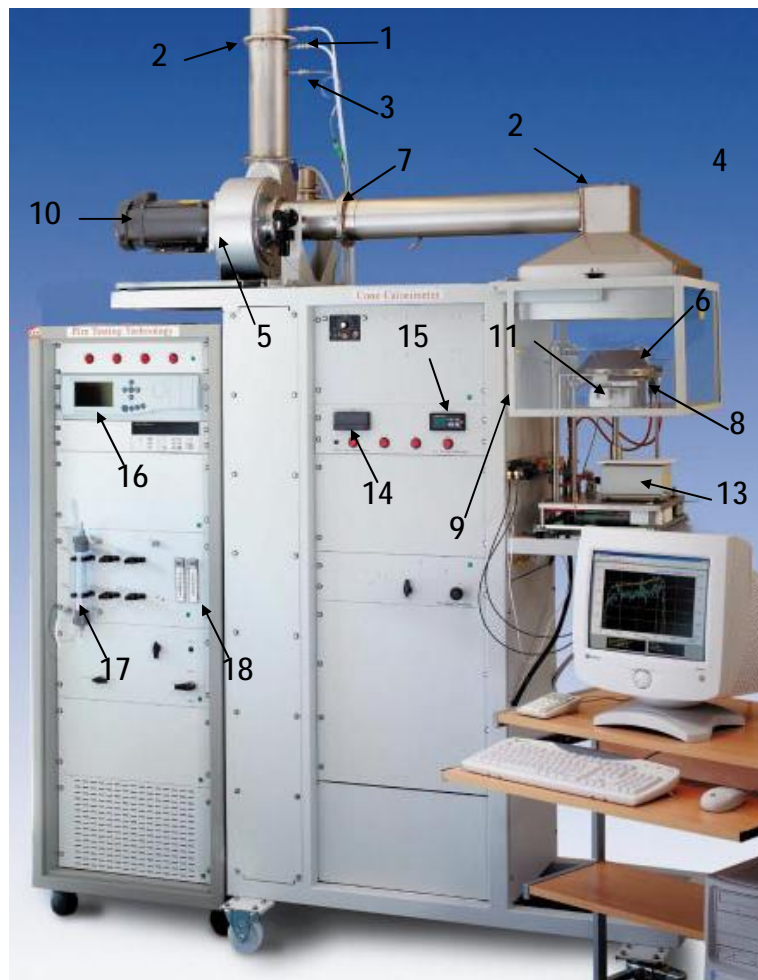
<sup>6</sup> Πηγή: Εργαστήριο θερμοδυναμικής

συνθήκες καθίσταται δύσκολος, ενώ επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση του εν λόγω οργάνου σε εργαστηριακή κλίμακα. Η μέθοδος προσδιορισμού του HRR βασίζεται στη μέτρηση του ελλείμματος οξυγόνου, που παρατηρείται κατά την καύση του υπό εξέταση δοκιμίου – υλικού, ή αντίθετα η θερμότητα που εκλύεται από την καύση ενός υλικού είναι ευθέως ανάλογη προς την ποσότητα οξυγόνου, το οποίο κατακρατείται κατά τη διαδικασία της καύσης, Εικόνα 26.

Τα βασικά στοιχεία της διάταξης είναι:

- Ø θερμαντήρας κώνου με μέγιστη εκλυόμενη θερμότητα  $100 \text{ kW/m}^2$ , που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο προσανατολισμό,
- Ø σπινθηριστής (igniter)  $10\text{kV}$  που χρησιμοποιείται για την ανάφλεξη του υλικού,
- Ø μετρητής ροής θερμότητας (heat flux meter) για την ρύθμιση – βαθμονόμηση της παρεχόμενης θερμότητας στο υπό εξέταση δοκίμιο,
- Ø σύστημα απαγωγής καυσαερίων το οποίο αποτελείται από μία καμινάδα και όργανα καταγραφής των αερίων της καύσης,
- Ø αναλυτές των αερίων της καύσης ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ),
- Ø αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη),
- Ø φωτόμετρο για τον προσδιορισμό της ποσότητας του παραγόμενου καπνού,
- Ø ζυγός ακριβείας για τον προσδιορισμό του ρυθμού απώλειας μάζας του υπό δοκιμή υλικού,
- Ø αισθητήρες μέτρησης διαφορικής πίεσης και
- Ø σύστημα αφύγρανσης.

Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται μια τυπική διάταξη κωνικού θερμιδομετρητή.



1. Μέτρηση διαφορικής πίεσης	10. Κινητήρας φυσητήρα
2. Στόμιο διαμορφωμένο σε πλάκα (orifice plate)	11. Πλαίσιο τοποθέτησης δοκιμίου
3. Θερμοζεύγος	12. Βάση στήριξης δοκιμίου
4. Κάλυπτρο Κώνου	13. Ζυγός
5. Φυσητήρας	14. Ψηφιακή ένδειξη ζυγού
6. Θερμική Αντίσταση	15. Όργανο ελέγχου θερμικής

	αντίστασης
<b>7. Δακτυλιοειδής καθετήρας δειγματοληψίας αερίων</b>	<b>16. Αναλυτής αερίων</b>
<b>8. Ηλεκτρικός Σπινθηριστής</b>	<b>17. Αφυγραντής</b>
<b>9. Πλευρικά προστατευτικά τοιχώματα</b>	<b>18. Ροόμετρα ελέγχου αερίων</b>

**Εικόνα 25:** Αναλυτική περιγραφή επιμέρους διατάξεων της συσκευής θερμιδόμετρου κώνου (κατασκευάστρια εταιρεία Fire Testing Technology, FTT UK)<sup>7</sup>.

Η διαδικασία μέτρησης με χρήση του οργάνου έχει οριστεί ως πρότυπο από το 1993 και πραγματοποιείται με βάση το ISO 5660 (Reaction to fire). Το Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής (ΕΤΘ) εφαρμόζει τα τελευταία χρόνια την παραπάνω διαδικασία (ISO 5660), ενώ πρόσφατα έχει διαπιστευτεί από τον ΕΛΟΤ, η εφαρμογή συστήματος ποιότητας EN ISO/IEC 17025, αναφορικά με παροχή μετρήσεων – παραμέτρων υλικών και ως προς την αντίδραση αυτών σε συνθήκες φωτιάς.

Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν το χρόνο ανάφλεξης (time to ignition), το χρόνο απόσβεσης (time to flameout), το ολικό ποσό έκλυσης θερμότητας (total heat release), τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας (heat release rate), την ολική ποσότητα κατανάλωσης οξυγόνου (total oxygen consumed), την απώλεια μάζας (mass lost), το ρυθμό απώλειας μάζας (mass lost rate), την συνολική παραγωγή καπνού (total smoke production), την παραγωγή καπνού στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας (πριν και κατά τη διάρκεια παρουσίας φλόγας) και την ενεργή θερμότητα καύσης (effective heat of combustion). Επιπλέον, αναφορικά με την έκλυση τοξικών ρύπων στα αποτελέσματα των

<sup>7</sup> Πηγή: Εργαστήριο θερμοδυναμικής

μετρήσεων δίνουν ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) κατά την καύση ενός υλικού.



**Εικόνα 26:** Τυπική εικόνα καύσης δοκιμίου κατά την διαδικασία ελέγχου δοκιμίου ως προς την αντίδρασή του στη φωτιά.

### 3.3 Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier

Η περιοχή εφαρμογών της φασματοσκοπίας υπερύθρου έχει επεκταθεί σημαντικότερα τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ανάπτυξης της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην θεαματική ανάπτυξη των υπολογιστών και στην βαθμιαία χρήση τους και σε θέματα φασματοσκοπίας.

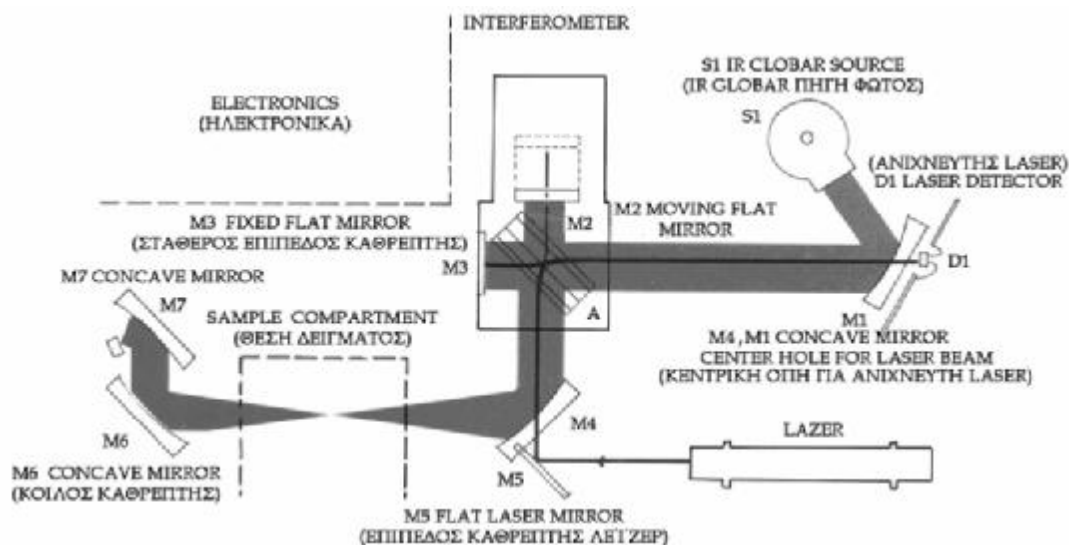
Στην συνήθη φασματοσκοπία υπερύθρου (dispersive IR spectroscopy) η πολυχρωματική ακτινοβολία της πηγής αναλύεται με χρήση μονοχρωμάτων (πρίσμα ή φράγμα) και ανιχνεύεται κατά συχνότητες  $\nu + \Delta\nu$ , όπου το  $\Delta\nu$  καθορίζεται από το εύρος των σχισμών του φωτόμετρου. Η φασματοσκοπία IR χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή  $4000\text{-}650\text{ cm}^{-1}$ . Ωστόσο αρκετά χρήσιμες

πληροφορίες για τη δομή πολλών οργανικών ενώσεων, μπορούν να συλλεχθούν και στην περιοχή  $400-10\text{ cm}^{-1}$ , που καλείται άπω υπέρυθρη (far infrared). Η άπω υπέρυθρη περιοχή είναι η περιοχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπου απορροφούνται, μεταξύ άλλων, το δευτέριο, το τρίτιο, οι παραμορφώσεις του σκελετού οργανικών ενώσεων, οι δονήσεις στρέβλωσης του κορμού διαφόρων οργανικών ενώσεων, οι δονήσεις διαφόρων μοριακών δομών, και οι δεσμοί υδρογόνου.

Στην περιοχή όμως αυτή η ευαισθησία του φασματοφωτομέτρου IR είναι περιορισμένη και οι εντάσεις των απορροφήσεων πολύ μικρές, με αποτέλεσμα ο “θόρυβος” να σκεπάζει τις ταινίες απορρόφησης. Η αδυναμία των κοινών φασματοφωτομέτρων IR (και άλλων μεθόδων φασματοσκοπίας) υπερνικήθηκε με τη φασματοσκοπία IR με μετασχηματισμό Fourier (Fourier Transform IR Spectroscopy, FT-IR). Η ανάλυση κατά Fourier ή μετασχηματισμός Fourier είναι η ανάλυση μιας μαθηματικής συνάρτησης ή μιας πειραματικά λαμβανομένης καμπύλης με τη μορφή μιας τριγωνομετρικής σειράς. Αυτή χρησιμοποιείται ως μέθοδος προσδιορισμού των αρμονικών συστατικών, ενός πολύπλοκου περιοδικού κύματος

Η μέθοδος βασίζεται στην καταγραφή του φάσματος με συμβολομετρικές μετρήσεις (interferometric measurements) οι οποίες υπερτερούν των κοινών μηχανισμών σάρωσης του φάσματος. Η διάταξη του μηχανισμού στο φασματοφωτόμετρο για τη διεργασία Fourier απεικονίζεται στην Εικόνα 27.





**Εικόνα 27:** Σχηματική εικόνα ενός τυπικού φασματοφωτομέτρου FT-IR και διάταξη των πηγών, καθρεπτών και ανιχνευτή.

Το συμβολόμετρο (interferometer) είναι μια πλάκα (A) κατασκευασμένη από ημιδιαφανές υλικό, συνήθως KBr που δεν απορροφά την IR, και κατεργασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλά το 50% της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω της. Η πλάκα διαιρεί την ακτινοβολία σε δύο ίσα μέρη και στέλνει το  $\frac{1}{2}$  στον καθρέπτη M1 και το άλλο  $\frac{1}{2}$  στον καθρέπτη M2. Οι δύο δέσμες ανακλώνται στους καθρέπτες και γυρνούν στην πλάκα-διαχωριστή (plate-beam splitter) της δέσμης του φωτός, όπου συνενώνονται πάλι σε μια δέσμη φωτός με κατεύθυνση το δείγμα της ουσίας και μετά στον ανιχνευτή.

Η μονοχρωματική δέσμη φωτός που εκπέμπεται από την πηγή και συνενώνεται στην πλάκα A υπόκειται σε θετική ή αρνητική συμβολή ανάλογα με τις αποστάσεις του από τους καθρέπτες M1 και M2. Εάν οι αποστάσεις αυτές είναι ίσες ή διαφέρουν κατά πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (ακέραιοι αριθμοί) της μονοχρωματικής δέσμης, τότε δημιουργείται θετική συμβολή που δίνει μια δέσμη φωτός μεγάλης έντασης. Εάν όμως οι αποστάσεις της A από τους M1 και M2 είναι πολλαπλάσιοι κατά το ήμισυ ( $1/2$ ,  $-1/2$ , κτλ.) του μήκους

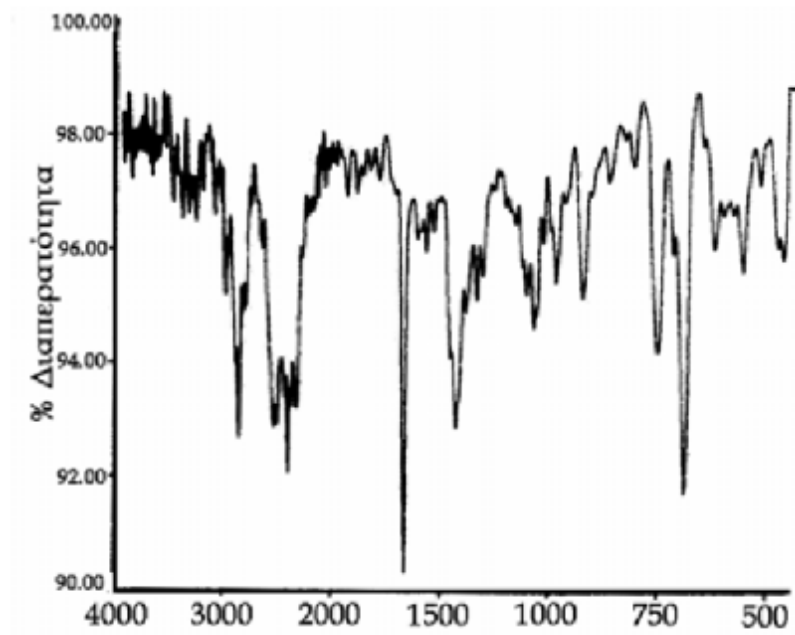
κύματος, τότε οι δέσμες φωτός ανακλώνται στους καθρέπτες, επανέρχονται στην A και αλληλοεξουδετερώνονται.

Στη μονάδα συμβολομέτρου, ο καθρέπτης M2 κινείται αργά προς την πλάκα A ή απομακρύνεται από αυτή. Με τον τρόπο αυτό ο ανιχνευτής θα δέχεται ακτινοβολία εναλλασσόμενης έντασης λόγω του φαινομένου της συμβολής. Η πηγή μπορεί να εκπέμπει μια σειρά από μονοχρωματικές ακτινοβολίες ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , κλπ.) που θα δημιουργήσουν στον ανιχνευτή ένα περίπλοκο μίγμα ακτινοβολιών με εναλλασσόμενες εντάσεις. Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier τα κενά αυτά μετατρέπονται στο κανονικό φάσμα IR.

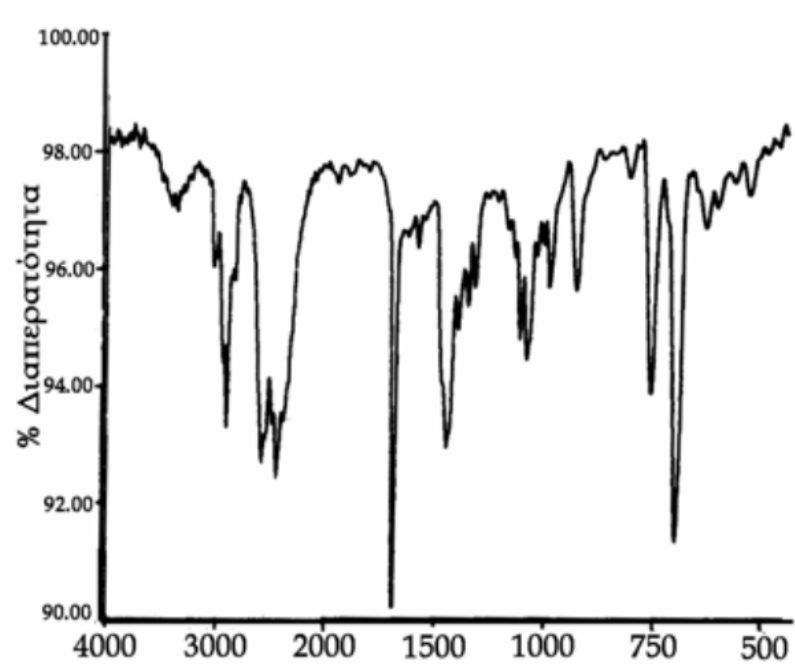
Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες (εντάσεις απορροφήσεων σε διάφορες συχνότητες), εκτελεί τους μετασχηματισμούς Fourier σε ελάχιστα sec και παρουσιάζει κανονικό φάσμα, που έχει αναλυθεί σε σημεία, έτοιμο για καταγραφή στο βαθμολογημένο φασματογραφικό χαρτί

Το κύριο πλεονέκτημα του FT-IR είναι η ταχύτητά του. Ενώ στη συμβατική μέθοδο κάθε σημείο εξετάζεται διαδοχικά, στο συμβολόμετρο όλα τα σημεία εξετάζονται συγχρόνως και μετά διαχωρίζονται με ταχύτατο υπολογισμό από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Με FT-IR μπορεί, μεταξύ άλλων, να γίνει σάρωση όσες φορές χρειαστεί, για την εξουδετέρωση του "θορύβου", να αφαιρεθεί το ένα φάσμα από κάποιο άλλο (διάλυμα, προσμίξεις), να μεγεθυνθούν τμήματα του φάσματος και να επεξεργασθούν στην οθόνη του υπολογιστή. Είναι προφανές ότι τα FT-IR θα αντικαταστήσουν σε λίγα χρόνια τα συμβατικά φασματοφωτόμετρα IR, Εικονα 28.



(α)



(β)

**Εικόνα 28:** FT-IR φασματοσκοπία: (α) φάσμα υδροχλωρικής μεθαδόνης με μία σάρωση, (β) σάρωση της ίδιας ουσίας 32 φορές (FT-IR) με αντίστοιχη μείωση του θορύβου.

## Δυνατότητες Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Φασματοσκοπίας FT-IR

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι φασματοφωτομέτρων FT-IR, τα οποία παρουσιάζουν διαφορές ως προς το είδος του συμβολομέτρου Michelson που χρησιμοποιούν όπως για παράδειγμα το είδος του διαχωριστή δέσμης, την σχεδίαση της οπτικής διαδρομής και το είδος των ανιχνευτών. Η χρήση των υπολογιστών στην φασματοσκοπία FT-IR προσφέρει την δυνατότητα ταχείας λήψης πολλαπλών φασμάτων, υπολογισμού του μέσου όρου τους, επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων. Τούτο συνεπώς οδηγεί στην μέτρηση φασμάτων υψηλής ποιότητας. Είναι δυνατή επίσης, η αφαίρεση φασμάτων (difference spectroscopy) και επομένως η ακριβής ανίχνευση πολύ μικρών μεταβολών, οι οποίες οφείλονται τόσο στην μεταβαλλόμενη σύσταση, όσο και στην φυσική κατάσταση του δείγματος.

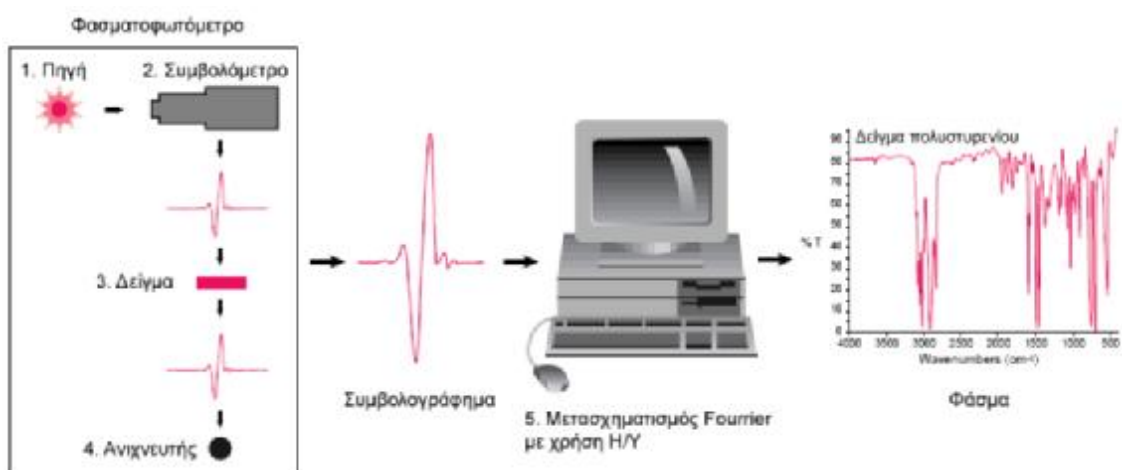
Η ύπαρξη “βιβλιοθήκης” φασμάτων υπερύθρου, παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης του φάσματος ενός μείγματος συστατικών, σε αυτά των επί μέρους συστατικών, και επομένως τη δυνατότητα ποσοτικής ανάλυσης του μείγματος. Τέλος, είναι δυνατή η μελέτη μοριακών αλλαγών και αλληλεπιδράσεων. Για παράδειγμα, οι δεσμοί υδρογόνου και οι ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις προκαλούν συνήθως, είτε μετατοπίσεις στη συχνότητα απορρόφησης, είτε αλλαγή στο συντελεστή μοριακής απορρόφησης. Και οι δύο αυτές φασματικές διαφορές μπορούν να μελετηθούν λεπτομερώς, με την τεχνική των φασμάτων διαφοράς.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά φασματοφωτόμετρα, που δίνουν κακής ποιότητας αλλά χρησιμοποιήσιμα φάσματα όταν δεν είναι καλώς ρυθμισμένα, τα φωτόμετρα FT-IR δεν παρέχουν καμία πληροφορία όταν δεν έχουν καλή ρύθμιση. Η υπεροχή των FT-IR φασματοφωτομέτρων οφείλεται στα βασικά χαρακτηριστικά κατασκευής και λειτουργίας τους, που έχουν ως αποτέλεσμα:

- ∅ όλες οι συχνότητες που εκπέμπονται από την πηγή να φθάνουν ταυτόχρονα στον ανιχνευτή,
- ∅ ένα μεγάλο εμβαδόν της δέσμης να περνά μέσα από το δείγμα, και

Ø η θέση του κινούμενου καθρέπτη να προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια.

Η μεγάλη ευαισθησία που χαρακτηρίζει την φασματοσκοπία FT-IR μετατρέπεται σε μειονέκτημα στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα του φωτόμετρου δεν έχει πλήρως εκκενωθεί, ή αντικατασταθεί με άζωτο. Σε αυτή την περίπτωση, το φάσμα υπερέθρου παρουσιάζει έντονες απορροφήσεις, οι οποίες οφείλονται στο H<sub>2</sub>O και στο CO<sub>2</sub> του χώρου του φωτόμετρου. Το κυριότερο όμως μειονέκτημα της φασματοσκοπίας FT-IR, είναι η απαιτούμενη ακριβής ρύθμιση των οπτικών του οργάνου, κυρίως του συμβολομέτρου Michelson, Εικόνα 29 (Griffiths P.R,1986).



Εικόνα 29: Διαδικασία λειτουργίας φασματοφωτόμετρου.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> US EPA, Open Path Technologies: Measurement at a Distance (OP-FTIR)

### 3.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική συσκευή κατασκευάστηκε με σκοπό την προσομοίωση των κρυφών περιοχών ενός αεροσκάφους για τη μελέτη των μηχανισμών που διέπουν την ανάφλεξη και την εξάπλωση της φωτιάς καθώς και τον περιορισμό της εξάπλωσής της, με χρήση σύνθετων υλικών. Για τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης έπρεπε να ανατρέξουμε σε υπάρχουσες κατασκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη υλικών σε φωτιά. Η κύρια ιδέα στην κατασκευή της πειραματικής συσκευής βασίστηκε στη πρότυπη διάταξη (FIST) πάνω στην οποία προστέθηκαν τα επιμέρους στοιχεία τα οποία διαμόρφωσαν τη πειραματική συσκευή ως μια κρυφή περιοχή κατάλληλα διαμορφωμένη για τη καταγραφή των απαραίτητων θερμικών μεγεθών, και παρουσιάζεται στην Εικόνα 30. (Χριστόπουλος Α. ,2013)



**Εικόνα 30:** Πειραματική συσκευή για φωτιά σε κρυφές περιοχές.

Η πειραματική συσκευή αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους συστήματα:

1) Κανάλι εισαγωγής αέρα.

Το κανάλι εισαγωγής σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελέγχονται οι συνθήκες εισόδου του πειράματος. Αρχικά το κανάλι εισαγωγής είναι κυκλικής διατομής, το οποίο φέρει έναν μετρητή διαφράγματος, ο οποίος θα μετρά έμμεσα τη παροχή του ρευστού. Στο άνω μέρος του αγωγού προβάλλουν τρεις οπές, από τις οποίες η κάθε μια εξυπηρετεί και ένα διαφορετικό σκοπό. Στη πρώτη οπή συνδέεται ένας θερμοκρασιακός μετρητής thermocouple τύπου K. Στην δεύτερη οπή συνδέεται ο ένας εκ των δυο σωλήνων μέτρησης του διαφορικού μετρητή πίεσης, όπου από το συγκεκριμένο σημείο λαμβάνεται η πίεση της ανάντη πλευράς του μετρητή (upstream), ενώ στην τρίτη και τελευταία οπή συνδέεται ο δεύτερος σωλήνας μέτρησης του μετρητή πίεσης, από το οποίο λαμβάνεται η πίεση στη κατάντη πλευρά του μετρητή διαφράγματος (downstream), Εικόνα 31. (Χριστόπουλος Α. ,2013)



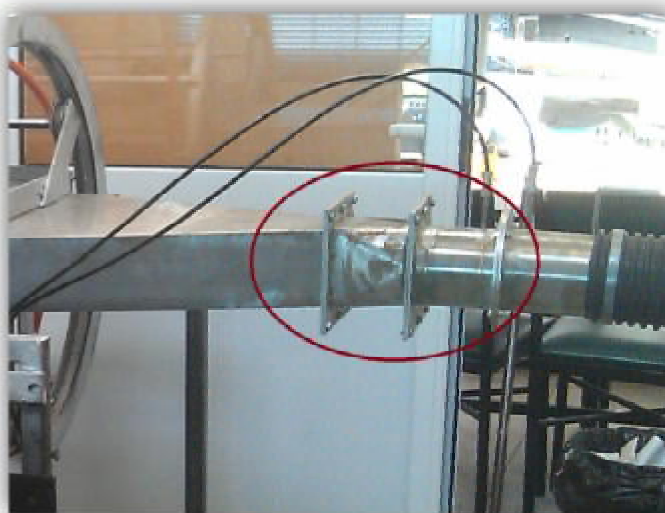
**Εικόνα 31:** Κανάλι εισαγωγής του αέρα





2) Αποκλίνων αγωγός ροής (Διαχύτης).

Καθώς η ροή διέρχεται από τον κυκλικό αγωγό εισαγωγής, όπου και πραγματοποιείται η μέτρηση της παροχής του, πρέπει να εισαχθεί στον θάλαμο καύσης των υπό δοκιμής υλικών. Όμως, καθώς η ροή διέρχεται από το μετρητή διαφράγματος, αποκολλείται από τα τοιχώματα του αγωγού με τη δημιουργία στροβίλων ανακυκλοφορίας, κατά μήκος του αγωγού, Εικόνα 32. Επομένως, αναπόφευκτα το ρευστό οδηγείται στο θάλαμο καύσης με τυρβώδες χαρακτήρα. Για την αποφυγή του φαινομένου αποκόλλησης, καθώς και την αποκατάσταση του ροϊκού χαρακτήρα του ρευστού, υπάρχουν δυο λύσεις. Η πρώτη, απαιτεί επιμήκυνση του αγωγού σύνδεσης μεταξύ μετρητή παροχής και θαλάμου καύσης, προκειμένου το ρευστό να έχει αρκετό μήκος για να ομαλοποιηθεί η ροή του, ενώ η δεύτερη λύση αναφέρεται στη χρήση ενός διαχύτη για τη σύνδεση των δυο μερών, μειώνοντας σημαντικά την απόσταση μεταξύ τους, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα ομοιόμορφη κατανομή και σταθερή τιμή παροχής αέρα σε όλο το θάλαμο μετρήσεων. Στην περίπτωση μας, θα χρησιμοποιηθεί ο διαχύτης για την σύνδεση των κομματιών αφού δε θέλουμε η πειραματική συσκευή να αποκτήσει μεγάλο μήκος.



**Εικόνα 32:** Φλάντζες σύνδεσης

### 3) Θάλαμος καύσης.

Ο θάλαμος καύσης προσομοιώνει το στενό πέρασμα του αέρα στις κρυφές περιοχές των αεροσκαφών. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θαλάμου ανέρχονται στο τμήμα ελέγχου της σήραγγας το οποίο είναι περίπου 1m μήκος, 0,40m πλάτος και 0,10m ύψος. Ένας ανεμιστήρας τοποθετημένος στην είσοδο της σήραγγας μπορεί να επάγει μία εξαναγκασμένη ροή αέρα. Η ροή του αέρα εισόδου και εξόδου της σήραγγας ελέγχεται προκειμένου να παραχθεί μια περιορισμένη ατμόσφαιρα στο εσωτερικό του τμήματος δοκιμής. Δείγματα υλικών διαστάσεων περίπου 0,30m μήκος, 0,20m πλάτος και 0,01m πάχος, είναι τοποθετημένα στο κάτω τοίχωμα της σήραγγας ροής και ακτινοβολούνται με ομοιόμορφη ροή θερμότητας από ένα θερμοπομπό ακτινοβολίας τοποθετημένο απευθείας πάνω από το δείγμα. Τα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου καύσης φέρουν ειδικά θερμικά τζάμια, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η παρατήρηση των φαινομένων που εξελίσσονται εντός του θαλάμου, ενώ όλοι οι υπόλοιποι χώροι είναι θερμικά μονωμένοι για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Επίσης θερμοζεύγη τύπου K θα τοποθετηθούν στο κάτω μέρος του υλικού για την καταγραφή της κατανομής της θερμοκρασίας στο υλικό σε περίπτωση διαπέρασης της φωτιάς από το υλικό (burnthrough). Ο έλεγχος όλων των μετρητικών οργάνων επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος ελέγχου FieldPoint, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή της συσκευής την εποπτεία τους μέσα από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για την διεξαγωγή του πειράματος, ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται, ο αέρας διέρχεται από το κανάλι εισαγωγής όπου μετράται η μαζική παροχή του και στη συνέχεια περνά από το διαχύτη όπου η ροή ομαλοποιείται. Ο θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας, ανά περίπτωση δοκιμής ενεργοποιείται για ένα χρονικό διάστημα, για την ακτινοβολία του υλικού, ενώ την ίδια στιγμή, με τη διακοπή της λειτουργίας του, ενεργοποιείται το φλόγιστρο. Τα αέρια της πυρόλυσης αφήνουν την επιφάνεια του δοκιμίου και διαχέονται προς το φλόγιστρο, όπου το μίγμα αέρα/αερίων πυρόλυσης μπορεί να αναφλεγεί, εάν και μόνο αν, οι συνθήκες πίεσης είναι κατάλληλες. Σε διαφορετική περίπτωση, αναφλέγονται με την έναρξη του φλόγιστρου. Ο χρόνος ανάφλεξης μετράται ως

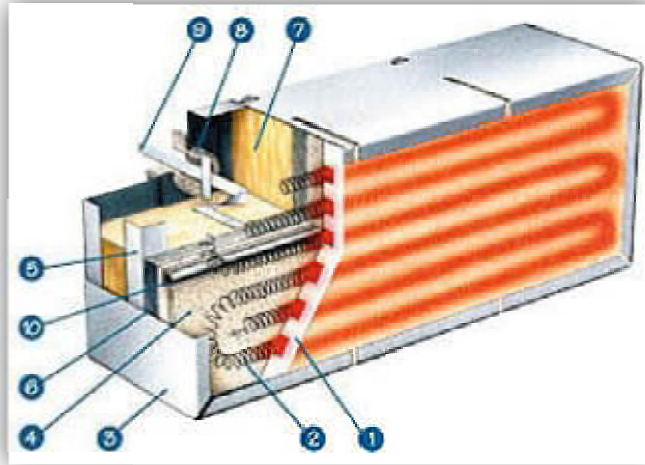
ο χρόνος, που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης της θερμικής ροής, μέχρι την εμφάνιση φλόγας επάνω στο υλικό. Η διάρκεια της ανάφλεξης (time to ignition) κρίνεται οπτικά και προσδιορίζεται με την επιθεώρηση της θερμοκρασιακής τιμής των θερμοζευγών, αλλά και από τις μεταβολές της απώλειας μάζας του υλικού.

4) Μονωτικές πλάκες.

Στο θάλαμο καύσης της πειραματικής συσκευής αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασιακές τιμές από τη καύση των υλικών, γι' αυτό το λόγο ο θάλαμος καύσης πρέπει να είναι θερμικά μονωμένος σε όλες του τις πλευρές ώστε να μειωθούν οι θερμικές απώλειες από το θάλαμο καύσης προς το περιβάλλον.

5) Θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης το εκάστοτε υπό δοκιμή υλικό θα ακτινοβολείται με υπέρυθρη ακτινοβολία από ένα επίπεδο θερμοπομπό ο οποίος θα είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω από το υλικό. Η ακτινοβολήση του υλικού συμβάλλει στην ταχύτερη εμφάνιση του φαινομένου της πυρόλυσης στο υλικό Εικόνα 33. (Χριστόπουλος Α. ,2013)



**Εικόνα 33:** Τομή του θερμοπομπού με αρίθμηση των επιμέρους στοιχείων του.

6) Φλόγιστρο.

Αφού το υλικό ακτινοβοληθεί μέσω του θερμαντικού πάνελ για ένα χρονικό διάστημα τότε θα ξεκινήσει η λειτουργία του φλόγιστρο προκειμένου να αναπτυχθεί μια εστία φωτιάς επάνω στο υλικό. Το φλόγιστρο λειτουργεί με παροχή εξωτερικού αέρα και είναι τοποθετημένο στη κάτω μεριά του υλικού.



**Εικόνα 34 :** Τοποθέτηση φλόγιστρο.

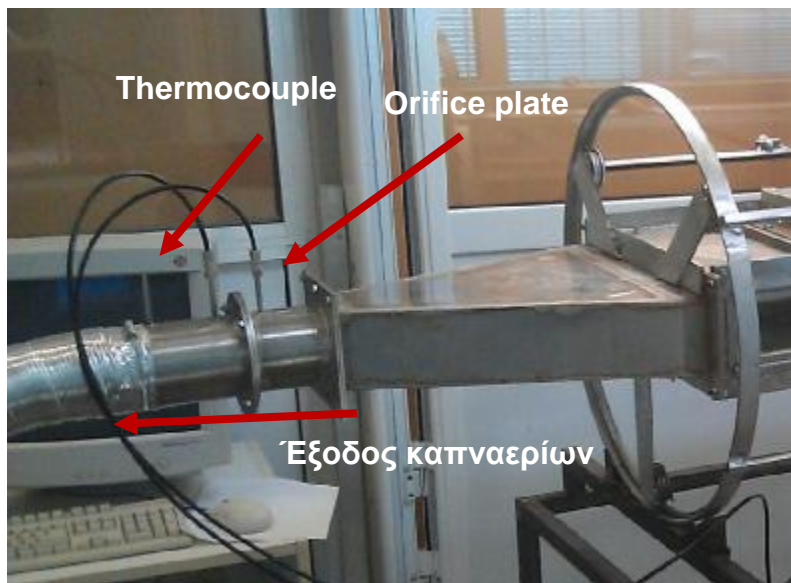
7) Συγκλίνων αγωγός ροής (Συγχύτης).

Στο θάλαμο καύσης, λαμβάνει χώρα η ακτινοβολήση του υπό δοκιμή υλικού, μέσω ενός θερμοπομπού, με σκοπό την έναρξη φωτιάς επάνω στο υλικό. Αφού εξελιχθεί η φωτιά μέσω του ανεμιστήρα, τα καπναέρια εξαναγκάζονται να κινηθούν από το θάλαμο καύσης στο κανάλι εξόδου, με στόχο την περαιτέρω ποσοτική και ποιοτική ανάλυσή τους, μέσω των κατάλληλων διατάξεων, όπως το θερμιδόμετρο κώνου (cone calorimeter), το φασματοσκόπιο υπέρυθρης ακτινοβολίας με μετασχηματισμό fourier (FT-IR) και το θερμοβαρύμετρο (TGA).

8) Κανάλι εξαγωγής αέρα.

Ο αγωγός εξόδου είναι κατασκευαστικά όμοιος με τον αγωγό εισόδου και φέρει τα ίδια μετρητικά όργανα για τον έλεγχο της ροής. Τα εγκατεστημένα μετρητικά όργανα είναι ο μετρητής διαφορικής πίεσης και ο μετρητής θερμοκρασίας.

Ο πρώτος, παρέχει τον έλεγχο της παροχής εξόδου, με σκοπό η παροχή του ρευστού να μην υπερβαίνει τη κρίσιμη μέγιστη τιμή, η οποία μπορεί να δεχτεί το θερμιδόμετρο κώνου και να την επεξεργαστεί αποτελεσματικά. Ο δεύτερος μετρητής, χρησιμοποιείται για την καταγραφή της θερμοκρασίας εξόδου, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διόρθωση της ροής. Καθώς ο αέρας εισέρχεται στον αγωγό εισόδου, θα έχει μια θερμοκρασιακή τιμή A και διερχόμενος από το θάλαμο καύσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εκεί, η θερμοκρασία του θα αυξηθεί και θα μεταβληθεί σε B. Κατά αυτόν τον τρόπο, η θερμοκρασία εισόδου θα είναι διαφορετική από την θερμοκρασία εξόδου, και έτσι η τιμή θα διορθωθεί μέσω του θερμοκρασιακού μετρητή στον αγωγό εξόδου. Τέλος τα καπναέρια θα οδηγηθούν στις κατάλληλες συσκευές, για την ποσοτική και ποιοτική τους ανάλυση, Εικόνα 34. (Χριστόπουλος Α. ,2013)



**Εικόνα 35:** Μορφή αγωγού εξόδου με τις οπές μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Ολοκληρώνοντας την πειραματική συσκευή διεξήχθησαν δοκιμές σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή του εσωτερικού της καμπίνας του αεροσκάφους. Σκοπός των πειραμάτων είναι η περιγραφή της εξέλιξης της φωτιάς σε σχέση με το συγκεκριμένο υλικό μέσα από την μέτρηση βασικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν μία φωτιά, καθώς και η εκτίμηση πιθανού κίνδυνου εξάπλωσης της φωτιάς στα υπόλοιπα μέρη ενός αεροσκάφους.

Οι μετρητικές διατάξεις που συνέβαλαν σημαντικά στην διεξαγωγή των πειραμάτων αλλά και στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι το καλορίμετρο κώνου, το φασματοσκόπιο υπέρυθρης ακτινοβολίας με μετασχηματισμό fourier (FT-IR) καθώς και η θερμική κάμερα. Η πειραματική διάταξη είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να επιτρέπει στα προϊόντα της καύσης (καπναέρια) την περαιτέρω ανάλυσή τους μέσω του καλορίμετρο κώνου.

#### **4.2 Πειραματική διαδικασία**

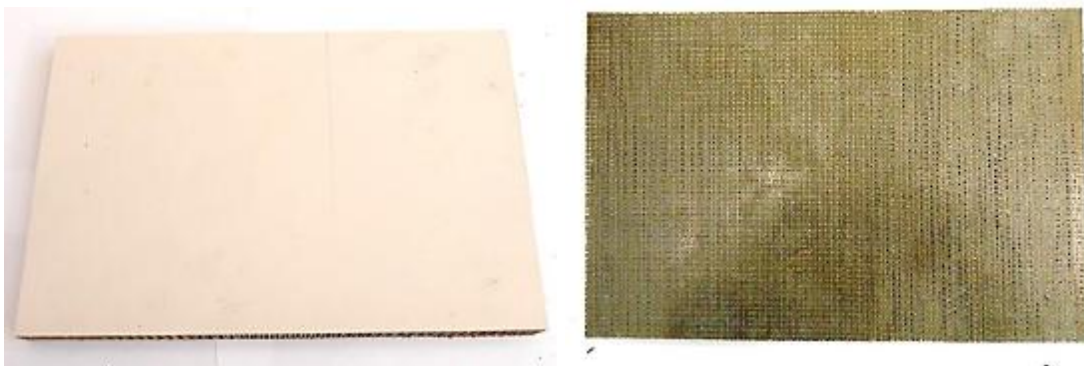
Η πειραματική διάταξη δίνει τη δυνατότητα επιλογής σεναρίου σχετικά με εμφάνιση φωτιάς σε κρυφές περιοχές και τη διεξαγωγή του αντίστοιχου πειράματος. Οι παράμετροι που θα πρέπει να ελεγχθούν, συσχετίζονται με τον προσανατολισμό του θαλάμου (οριζόντια, κατακόρυφη), το επίπεδο ακτινοβολίας από το θερμαντήρα, την είσοδο ροής, την εξέλιξη του χρόνου, καθώς και τη συμπεριφορά κατά την καύση των υλικών. Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε το Σενάριο "Φυσικός αερισμός του θαλάμου με το άνοιγμα

της εισόδου”. Για τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν έγιναν οι παρακάτω καταγραφές μεγεθών και ιδιοτήτων για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

- Ø Μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμοζεύγη.
- Ø Ρυθμός ροής του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο.
- Ø Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate)
- Ø Συγκεντρώσεις CO% , CO<sub>2</sub>%.
- Ø Διάδοση φλόγας (Flame spreading.)
- Ø Χαρακτηρισμό του Burnthrough.

### 4.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα συγκεκριμένα πειράματα είναι σύνθετο υλικό οροφής της καμπίνας του αεροσκάφους. Στη μία επιφάνεια φέρει ένα λευκό λεπτό φινίρισμα πάχους περίπου 0.5 mm, στη συνέχεια κυψελίδες εμποτισμένες με ρητίνη και στην πίσω επιφάνεια ένα λεπτό στρώμα περίπου 1 mm από ανθρακονήματα. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του υλικού φαίνονται παρακάτω (εικόνα 35). Πριν την διεξαγωγή κάθε πειράματος καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων και προκαθορίστηκαν οι παράμετροι του πειράματος. Οι παράμετροι αυτοί αναφέρονται στην ένταση ακτινοβολίας του θερμαντικού πάνελ, το χρόνο προθέρμανσης του υλικού και τη διάρκεια της λειτουργίας του φλόγιστρου.



**Εικόνα 36:** Άποψη δοκιμίου πριν την καύση.



Πίνακας 4.1: Πειραματικές μετρήσεις και συνθήκες διεξαγωγής

α/α	Όνομα	Επιβαλλόμενη ακτινοβολία Q (kW/m <sup>2</sup> )	Χρόνος προθέρμανσης t (sec)	Προσαν/σμός	Συνθήκες ροής εισόδου	Εξάπλωση φωτιάς
1	T1_25	25	180	Οριζόντιος με την εκτιθέμενη στην ακτινοβολία επιφάνεια προς τα επάνω	Ανοικτή είσοδος χωρίς επιβαλλόμενη ροή	X
2	T2_25	25	30			X
3	T1_28	28	180			X
4	T2_28	28	30			X
5	T1_30	30	180			✓
6	T2_30	30	38			✓
7	T3_30	30	30			✓
8	T4_30	30	30			✓
9	T1_32	32	30			✓
10	T2_32	32	30			✓
11	T1_35	35	180			✓
12	T2_35	35	180	✓		
13	T3_35	35	30	✓		
14	T4_35	35	30	✓		
15	T5_35	35	30	✓		

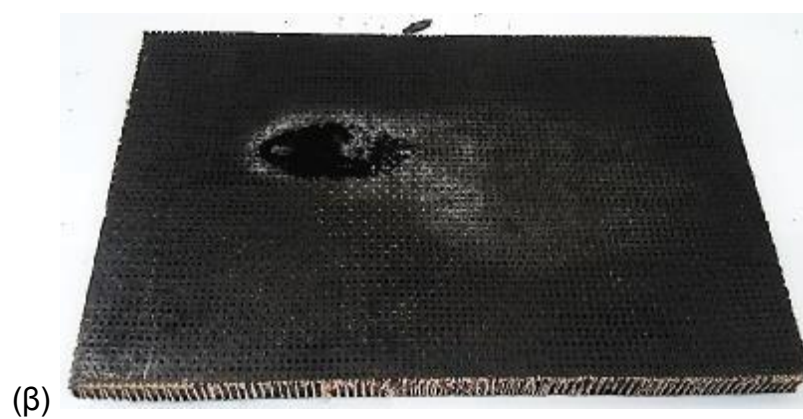
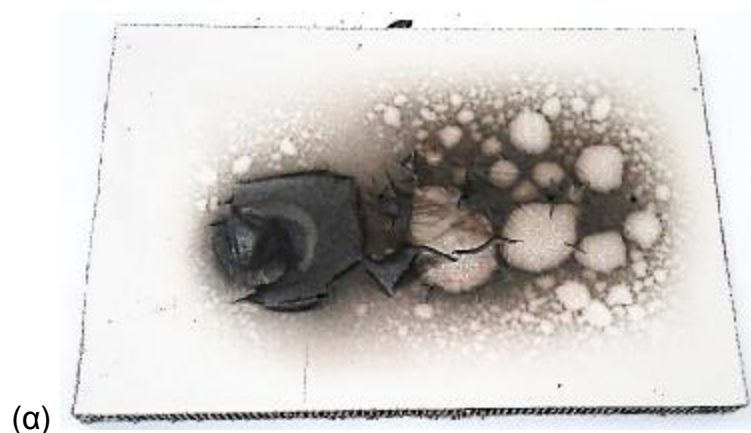
Από την ανάλυση των πειραμάτων, προέκυψε ότι εξάπλωση της φωτιάς στην επιφάνεια του δοκιμίου προέκυψε μόνο για τις περιπτώσεις που η επιβαλλόμενη ακτινοβολία ήταν μεταξύ 30 – 35 kW/m<sup>2</sup>. Τα πειραματικά αποτελέσματα για αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### Περίπτωση 1 - 30 kW/m<sup>2</sup>

Το υπό δοκιμή υλικό προθερμάνθηκε για 30 sec σε θερμική ισχύς ακτινοβολούμενη από τον θερμοπομπό στα 30 kW/m<sup>2</sup> προτού ενεργοποιηθεί το φλόγιστρο. Στον πίνακα 4.2, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

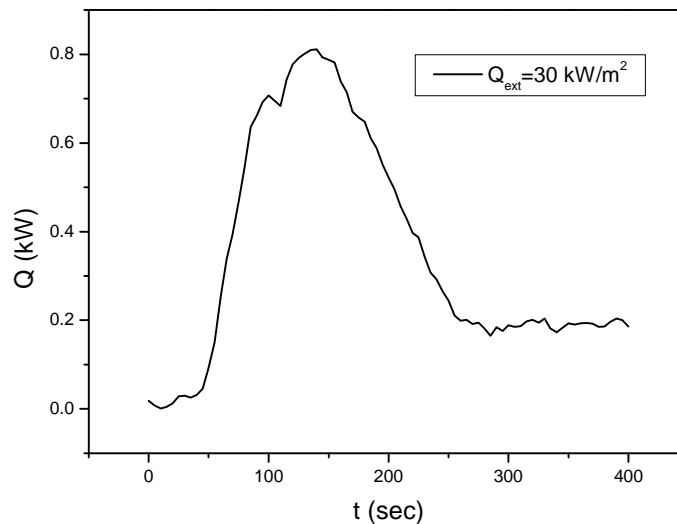
Πίνακας 4.2: Δεδομένα πρώτης περίπτωσης

ΥΛΙΚΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΜΠΙΝΑΣ	
Όνομασία δοκιμίου	T#_30
Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	19x29
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων πριν την καύση (gr)	145,7
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων μετά την καύση (gr)	132,7
Απώλεια μάζας (gr)	13,0
Θερμική ισχύς θερμοπομπού, Q (kW/m <sup>2</sup> )	30
Χρόνος προθέρμανσης (sec)	30
Διάδοση της φλόγας, V_spread (mm/sec)	1,0
Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, Total HRR (kJ)	142,78
Μέγιστο HRR (kW)	0,8114
Χρόνος εμφάνισης μέγιστου HRR, t (sec)	140

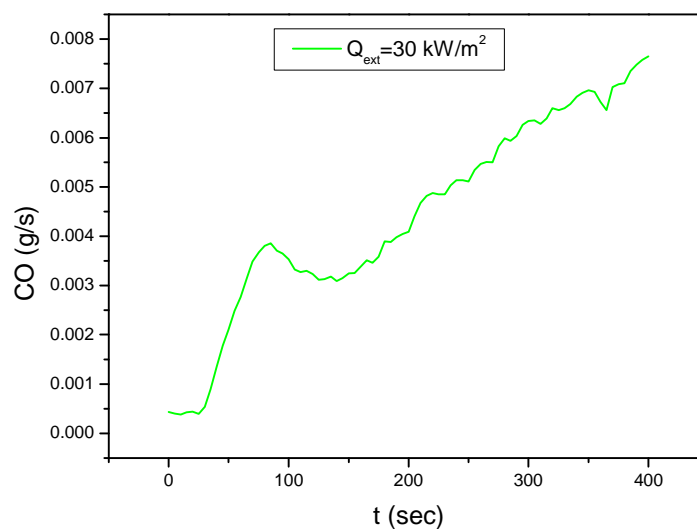


**Εικόνα 37:** Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση.  
**(α)** Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία  
**(β)** Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία

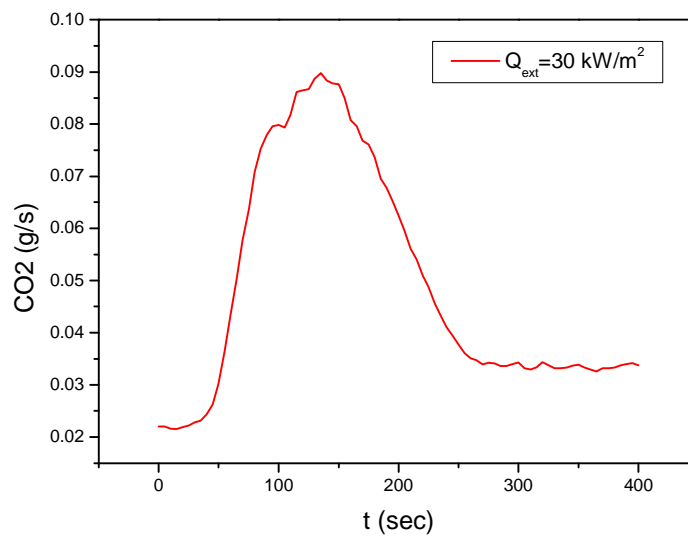
Στο υλικό είχαμε την εμφάνιση διάδοσης της φλόγας κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του εκεί όπου τοποθετήσαμε και το φλόγιστρο, η οποία μετά από λίγα δευτερόλεπτα έσβησε μόνη της. Δεν είχαμε την εμφάνιση φλόγας στην πίσω πλευρά (Burnthrough), δηλαδή την διαπέραση του υλικού από τη φωτιά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμικών μετρήσεων της καύσης.



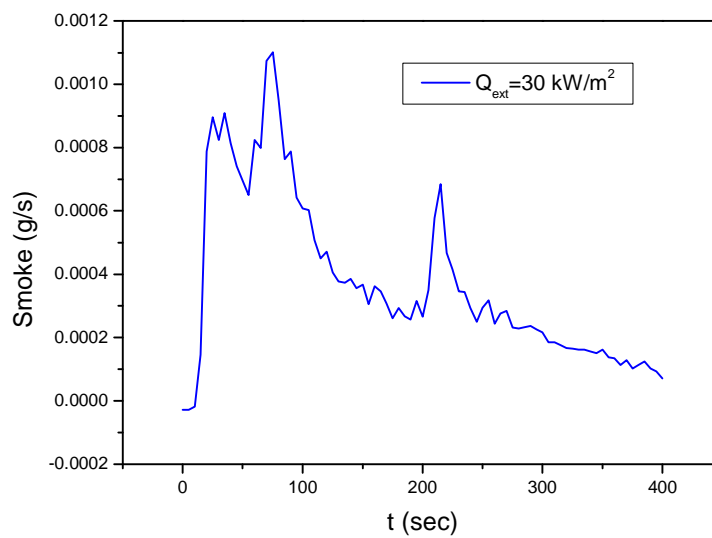
**Σχήμα 4.1:** Χρονική εξέλιξη απελευθέρωσης θερμότητας.



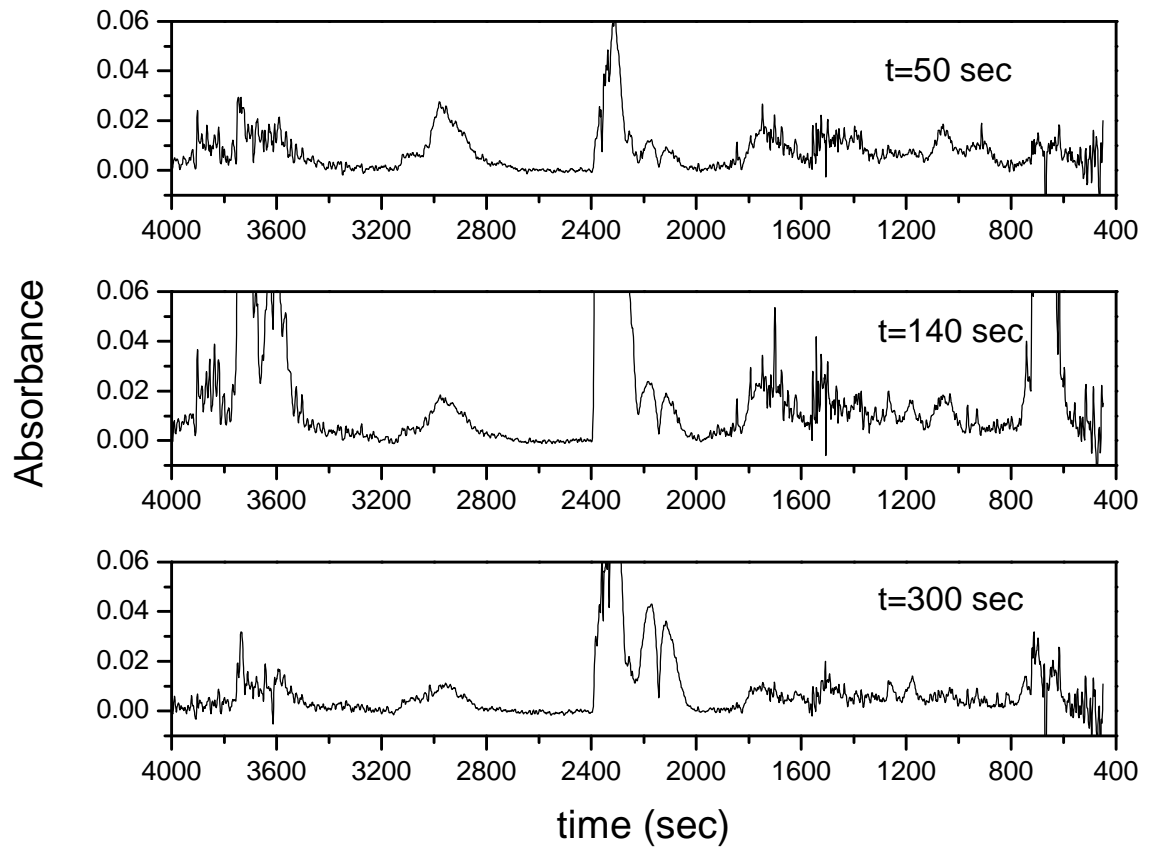
**Σχήμα 4.2:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 4.3:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα



**Σχήμα 4.4:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.



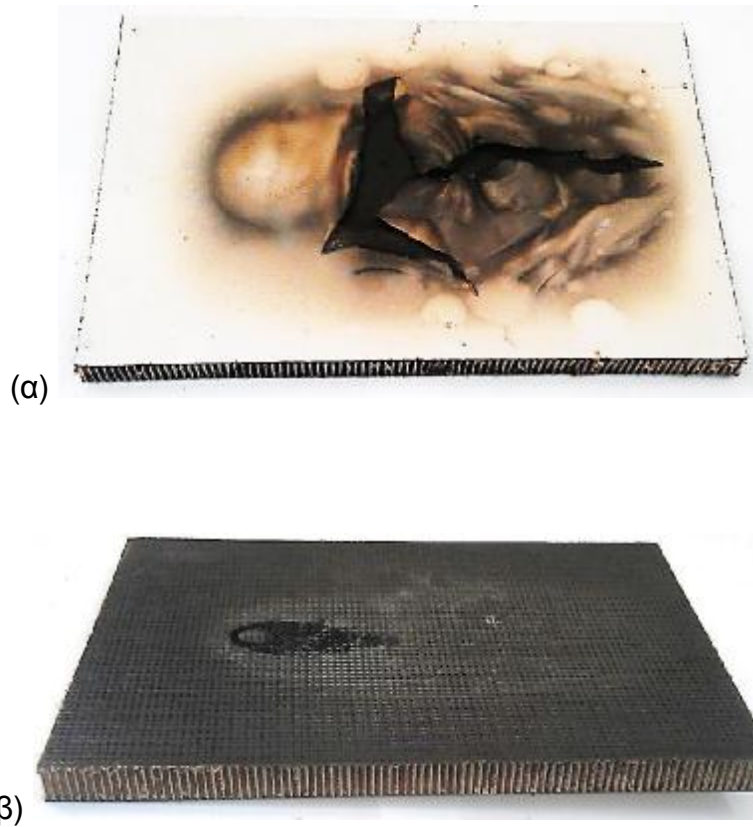
Σχήμα 4.5: Φάσματα FTIR, των αέριων προϊόντων της καύσης,  $Q=30 \text{ kW/m}^2$

## Περίπτωση 2 - 32 kW/m<sup>2</sup>

Το υπό δοκιμή υλικό προθερμάνθηκε για 30 sec σε θερμική ισχύς ακτινοβολούμενη από τον θερμοπομπό στα 30 kW/m<sup>2</sup> προτού ενεργοποιηθεί το φλόγιστρο. Στον πίνακα 4.3, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

Πίνακας 4.3: Δεδομένα δεύτερης περίπτωσης

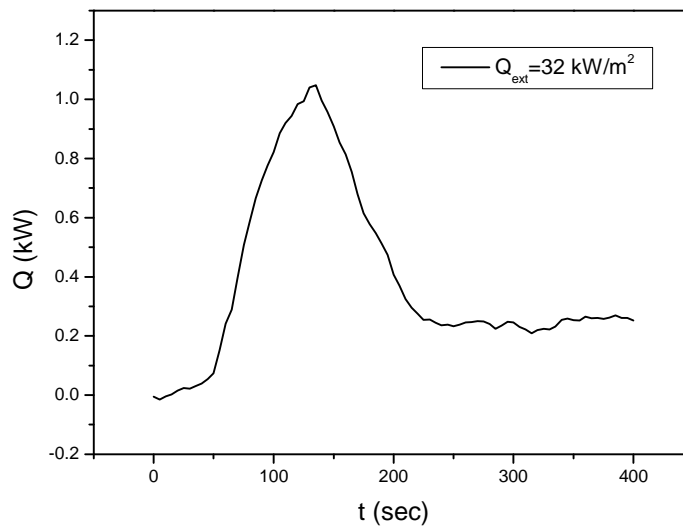
ΥΛΙΚΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΜΠΙΝΑΣ	
Όνομασία δοκιμίου	T#_32
Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	19x29
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων πριν την καύση (gr)	147,4
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων μετά την καύση (gr)	131,2
Απώλεια μάζας (gr)	16,2
Θερμική ισχύς θερμοπομπού, Q (kW/m <sup>2</sup> )	32
Χρόνος προθέρμανσης (sec)	30
Διάδοση της φλόγας, V_spread (mm/sec)	1,7
Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, Total HRR (kJ)	156,84
Μέγιστο HRR (kW)	1,0478
Χρόνος εμφάνισης μέγιστου HRR, t (sec)	135



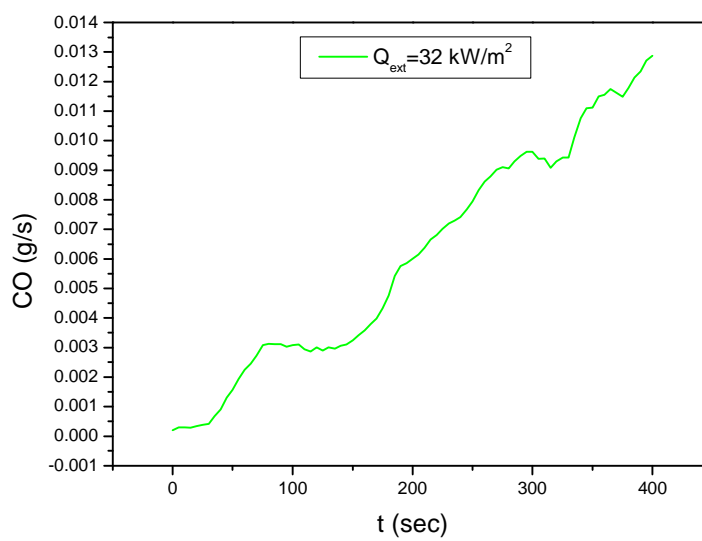
**Εικόνα 38:** Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση.  
**(α)** Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία  
**(β)** Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία

Και σε αυτή τη δοκιμή είχαμε εμφάνιση διάδοση της φλόγας κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου εκεί όπου τοποθετήσαμε και το φλόγιστρο. Η φλόγα αυτή μετά από λίγα δευτερόλεπτα έσβησε μόνη της χωρίς να έχουμε εμφάνιση Burnthrough. Παρατηρούμε επίσης ότι στο δοκίμιο αυτό έχει επέλθει μεγαλύτερη ζημία στην εξωτερική του όψη σε σχέση με το δοκίμιο του πρώτου πειράματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμικών μετρήσεων της καύσης.

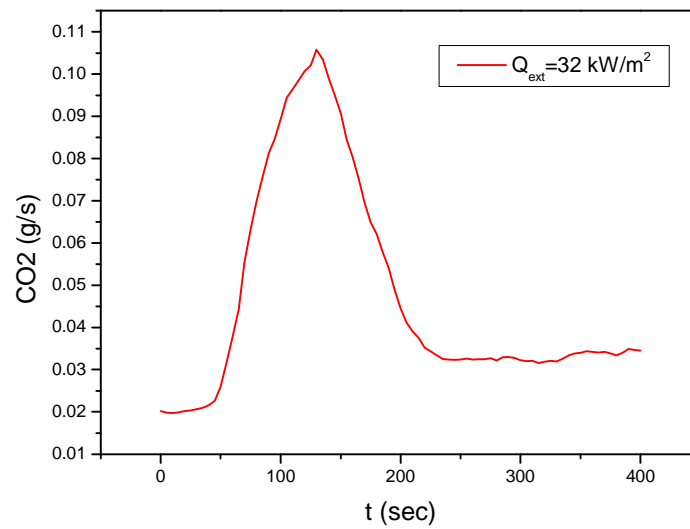




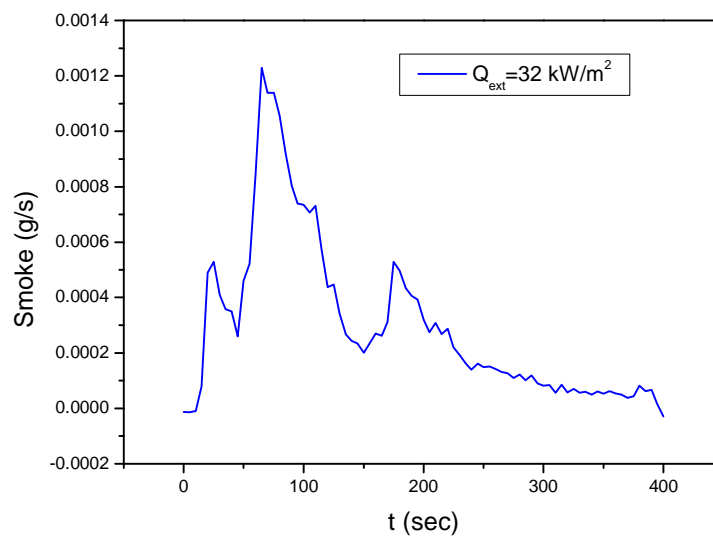
Σχήμα 4.6: Χρονική εξέλιξη απελευθέρωσης θερμότητας.



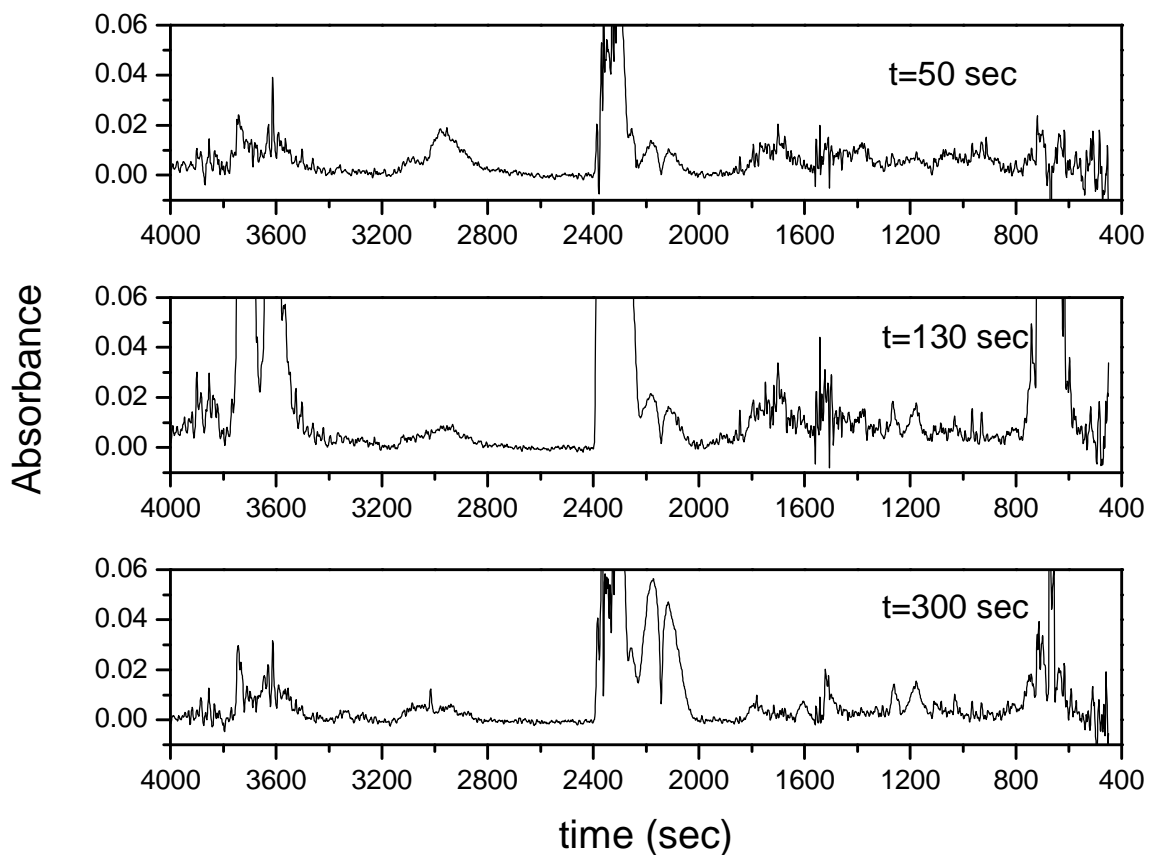
Σχήμα 4.7: Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 4.8:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 4.9:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.



**Σχήμα 4.10:** Φάσματα FTIR, των αέριων προϊόντων της καύσης,  $Q=32$   $\text{kW/m}^2$

### Περίπτωση 3 - 35 kW/m<sup>2</sup>

Το υπό δοκιμή υλικό προθερμάνθηκε για 30 sec σε θερμική ισχύς ακτινοβολούμενη από τον θερμοπομπό στα 30 kW/m<sup>2</sup> προτού ενεργοποιηθεί το φλόγιστρο. Στον πίνακα 4.4, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

Πίνακας 4.4: Δεδομένα δεύτερης περίπτωσης

ΥΛΙΚΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΜΠΙΝΑΣ	
Όνομασία δοκιμίου	T#_35
Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	19x29
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων πριν την καύση (gr)	155,6
Μέση τιμή μάζας δοκιμίων μετά την καύση (gr)	135,7
Απώλεια μάζας (gr)	19,9
Θερμική ισχύς θερμοπομπού, Q (kW/m <sup>2</sup> )	35
Χρόνος προθέρμανσης (sec)	30
Διάδοση της φλόγας, V_spread (mm/sec)	3,5
Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, Total HRR (kJ)	185,93
Μέγιστο HRR (kW)	1,73
Χρόνος εμφάνισης μέγιστου HRR, t (sec)	100



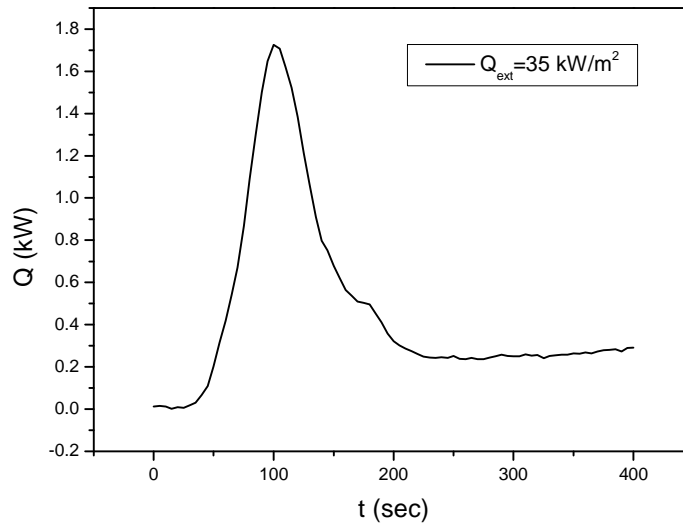
(α)



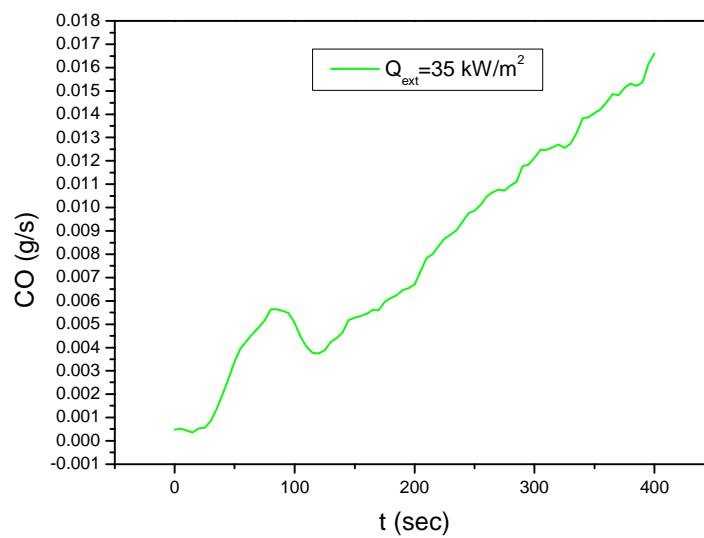
(β)

**Εικόνα 39:** Άποψη δοκιμίου μετά τη καύση.  
**(α)** Μη εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία  
**(β)** Εκτεθειμένη επιφάνεια στην ακτινοβολία

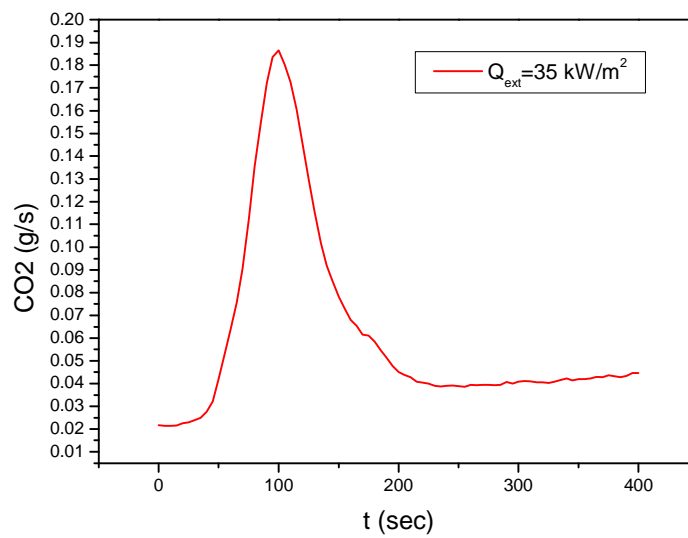
Σε αυτή τη δοκιμή είχαμε εμφάνιση διάδοση της φλόγας σε μεγαλύτερο κομμάτι της εσωτερικής επιφάνειας, η οποία μετά από λίγα δευτερόλεπτα έσβησε μόνη. Και σε αυτή την περίπτωση δεν είχαμε εμφάνιση διαπέρασης του υλικού από τη φλόγα (Burnthrough). Παρατηρούμε επίσης ότι στο δοκίμιο αυτό έχει επέλθει ακόμα μεγαλύτερη ζημία στην εξωτερική του όψη σε σχέση με τα δοκίμιο των δυο προηγούμενων δοκιμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμικών μετρήσεων της καύσης.



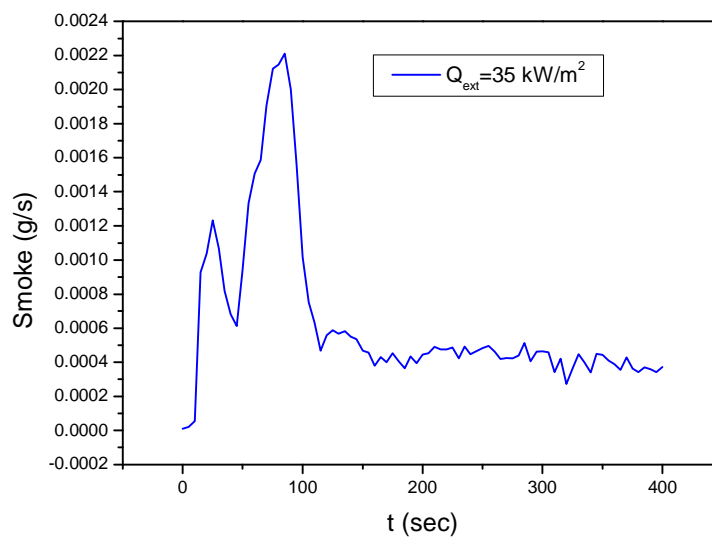
Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη απελευθέρωσης θερμότητας.



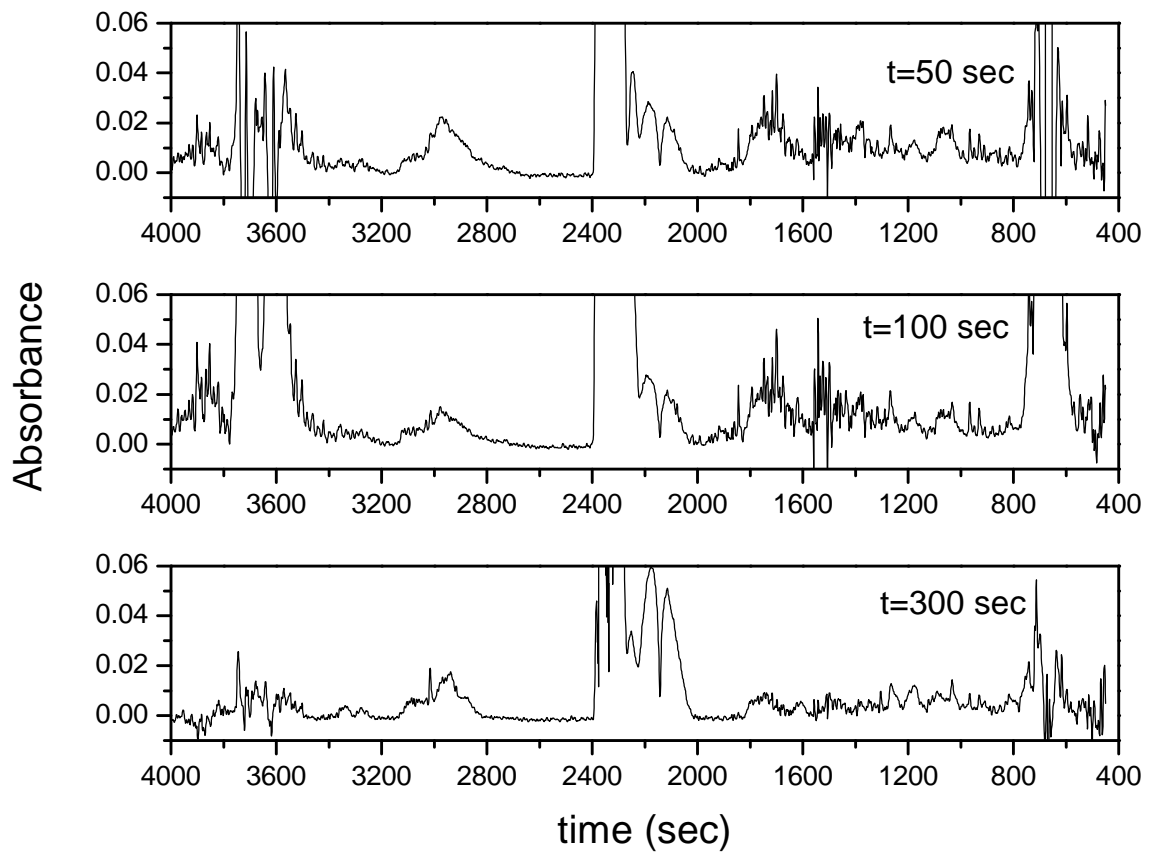
Σχήμα 4.12: Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 4.13:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα.



**Σχήμα 4.14:** Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.



**Σχήμα 4.15:** Φάσματα FTIR, των αέριων προϊόντων της καύσης,  $Q=32 \text{ kW/m}^2$



## Συγκριτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

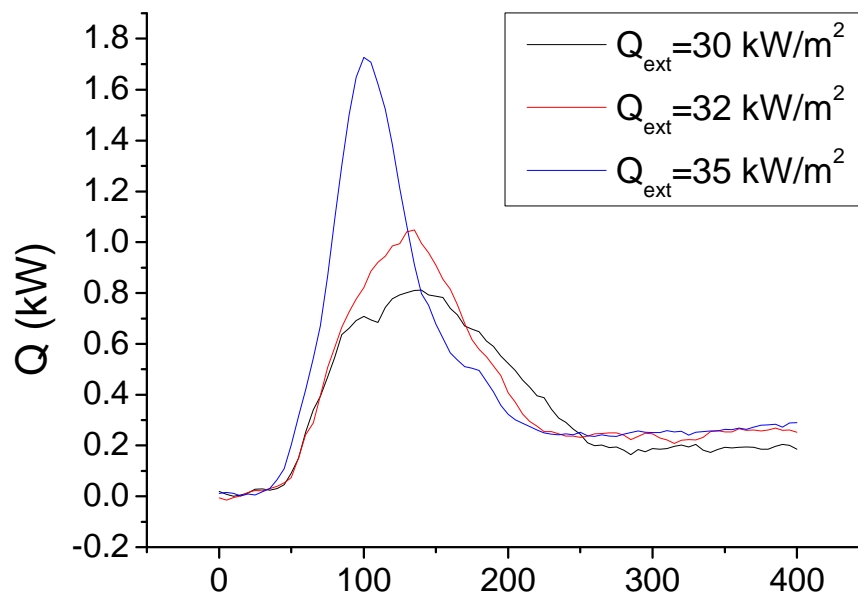
Συγκριτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων των θερμικών μετρήσεων της καύσης και των τριών πειραματικών περιπτώσεων παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (Σχ. 4.16 – 4.19). Στον πίνακα 4.5, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών κατά τη διάρκεια της καύσης. Η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας,  $V_{spread}$ , έχει προκύψει μετά από επεξεργασία των εικόνων του βίντεο, πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε η μετατόπιση του μετώπου της φλόγας σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Επίσης χαρακτηριστικές φωτογραφίες της διάδοσης της φλόγας στην επιφάνεια του υλικού παρουσιάζονται στις εικόνες 40 – 42.

Βάση των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση τους προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

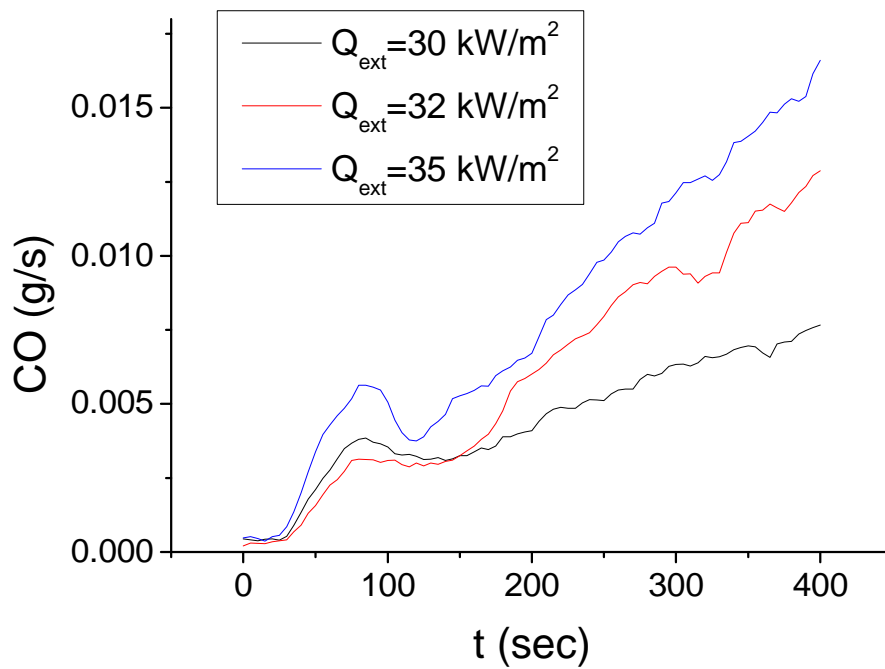
- Η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας φαίνεται να είναι σταθερή ανάλογα με την ένταση της επιβαλλόμενης ακτινοβολίας. Για τις περιπτώσεις ακτινοβολίας 25 και 28  $\text{kW/m}^2$  δεν είχαμε την εμφάνιση διάδοσης (spreading) επάνω στην επιφάνεια του υλικού. Από τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κρίσιμη ακτινοβολία για τη διάδοση της φλόγας (flame spreading) στο συγκεκριμένο υλικό είναι στην περιοχή μεταξύ 28-30  $\text{kW/m}^2$ .
- Η επιβαλλόμενη ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της καύσης του υλικού, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και από τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate, HRR), (Σχ. 4.16). Καθώς αυξάνει η ακτινοβολία η κατανομή γίνεται υψηλότερη με αντίστοιχη μείωση του πλάτους της, ένδειξη ταχύτερης εξάπλωσης. Η συνολική θερμότητα που εκλύεται είναι μεγαλύτερη όπως φαίνεται και από τα συγκριτικά αποτελέσματα στον πίνακα 4.5.
- Η κατανομή έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) είναι αναμενόμενη και συμπίπτει γραφικά με αυτή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.
- Στη κατανομή του μονοξειδίου ( $\text{CO}$ ) παρατηρούμε ότι συνεχίζει να αυξάνει η καμπύλη ακόμα και όταν έχει σβήσει η φλόγα και αυτό γίνεται διότι το υλικό συνεχίζει να ακτινοβολείται και να έχουμε οξειδωση του.
- Στην κατανομή του καπνού παρατηρούμε την εμφάνιση δυο χαρακτηριστικών κορυφών. Η πρώτη εμφανίζεται στα πρώτα στάδια της καύσης λόγω του φλόγιστρου και η δεύτερη και πιο σημαντική στη φάση της πλήρους ανάπτυξης της φλόγας στην επιφάνεια του υλικού.

Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και υπολογισμοί

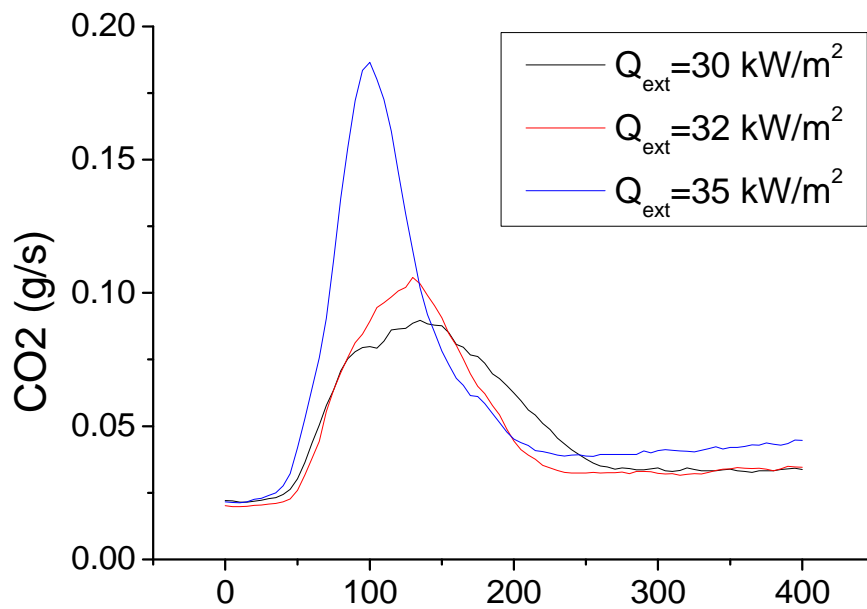
$Q_{ext}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$V_{spread}$ (mm/sec)	Total HR (kJ)	Peak HRR (kW)	t (sec)	Initial Mass (gr)	Mass Loss (gr)
30	1.0	142.78	0.8114	140	145.7	13.0
32	1.7	156.84	1.0478	135	135.4	16.2
35	3.5	185.93	1.7259	100	155.6	20.0



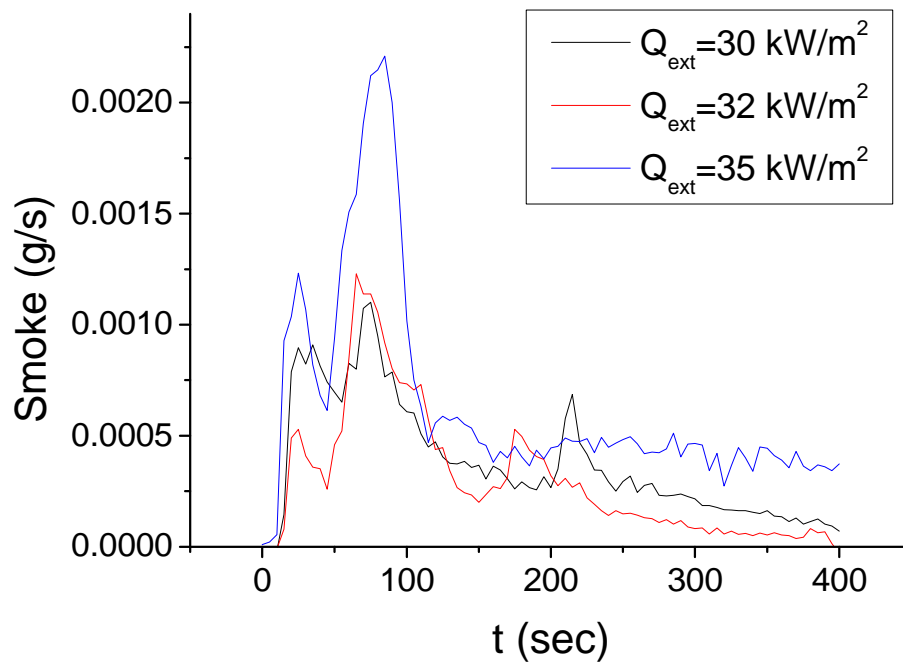
Σχήμα 4.16: Χρονική εξέλιξη απελευθέρωσης θερμότητας.



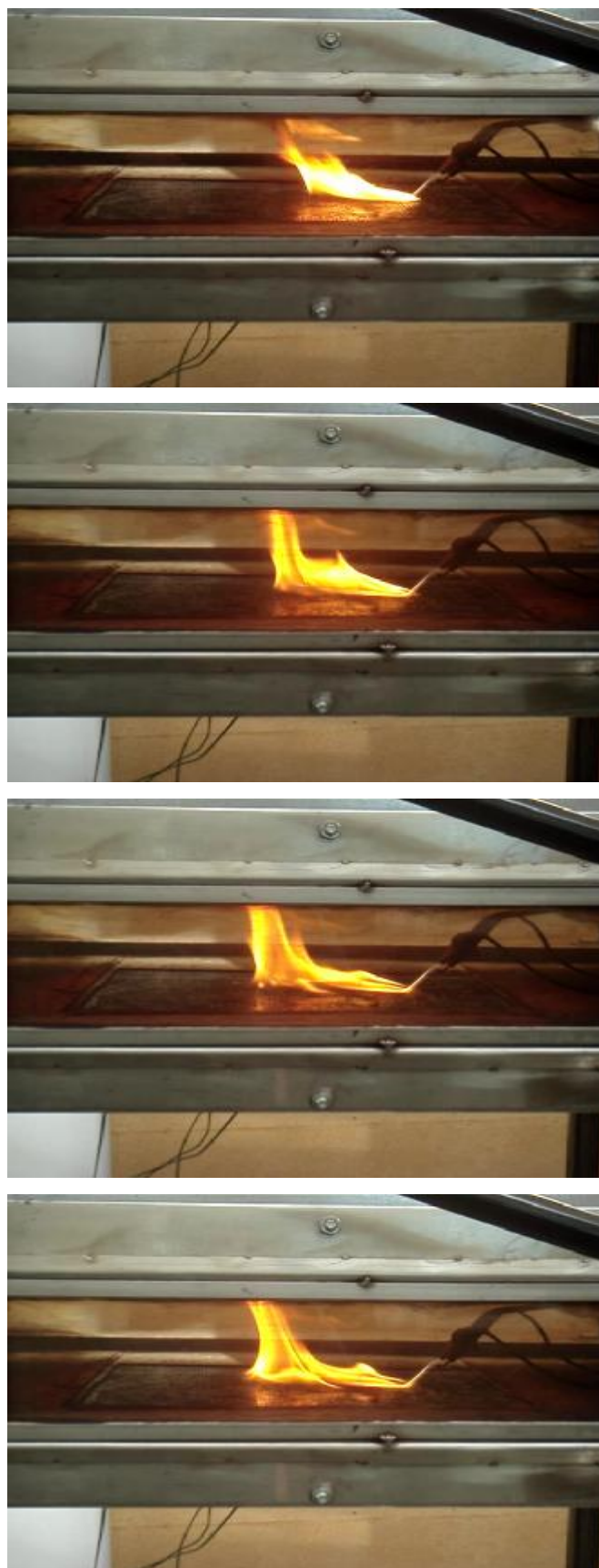
Σχήμα 4.17: Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 4.18: Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα.

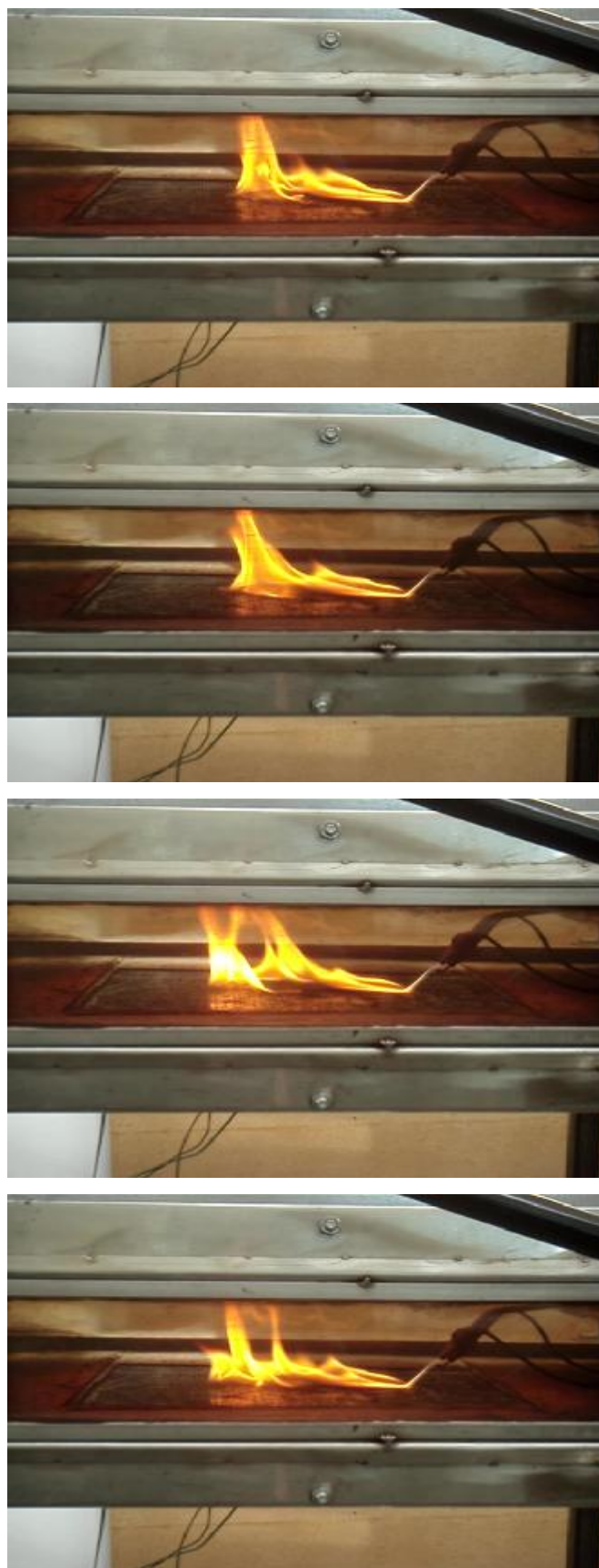


Σχήμα 4.19: Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.

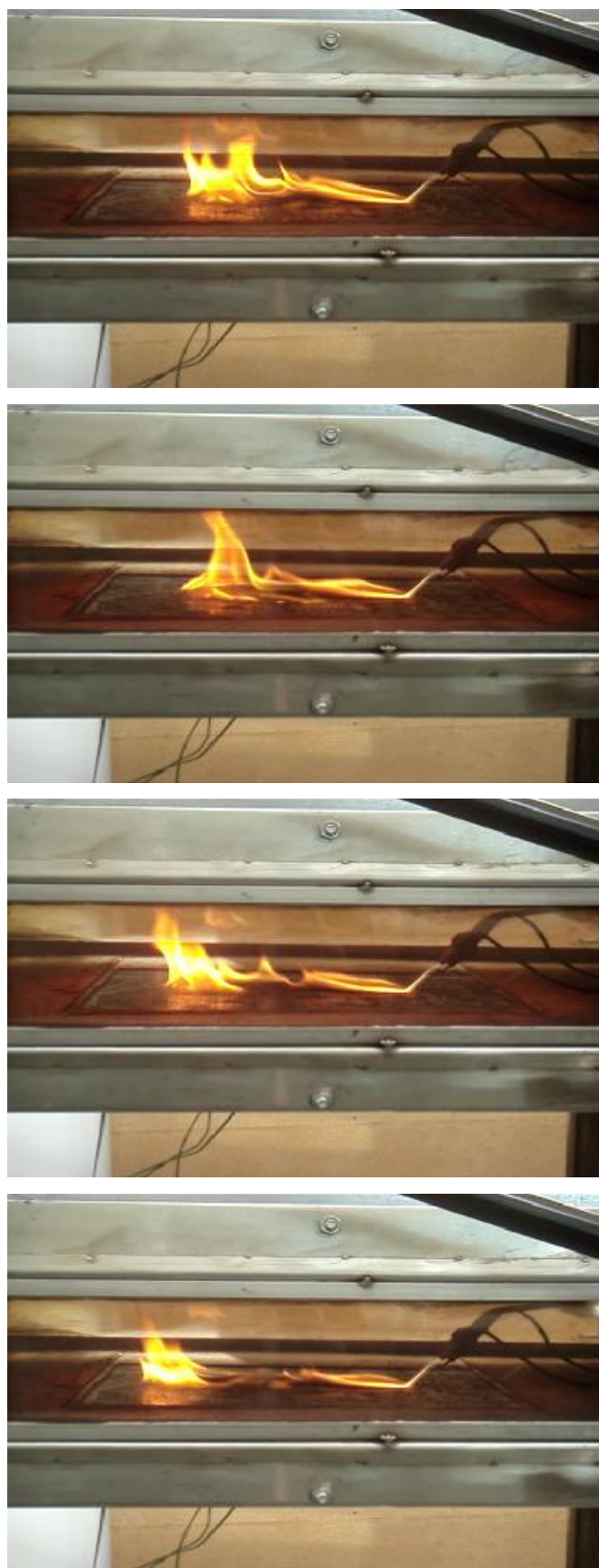


**Εικόνα 40:** Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.





**Εικόνα 41:** Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.



**Εικόνα 42:** Χαρακτηριστικές φωτογραφίες εξέλιξης της φωτιάς.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Burke S.P. & Schumann T.E., "Diffusion flames". *Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (1928)

Bullen M.L., "The ventilation required to permit growth of a room fire". *Building Research Establishment* (1978)

Drysdale D., "An Introduction to Fire Dynamics", John Wiley & Sons Ltd., Sussex, England (1999)

Griffiths P.R., J.A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, Wiley-Interscience, Vol. 83, New York, 1986

Fereres S., et al., "Effect of Cabin Pressure on the Piloted Ignition of Combustible Solids", *The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, Atlantic City, NJ, USA, 2010

Fereres S. et al., "Mass flux at ignition in reduced pressure environments", *Combustion and Flame*, doi:10.1016/j.combustflame.2010.11.013, 2011

Hill R., "Cargo Fire Suppression by Depressurization", *The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, Atlantic City, NJ, USA, 2010

Hinkley P.L., Wraight H.G.H. & Theobald C.R., "The contribution of flames under ceilings to fire spread in compartments. Part 1: Incombustible ceilings". *Fire Research Note* 712 (1968)

*International Fire & Cabin Safety Research Conference*, Atlantic City, NJ, USA, 2010

Marker T.R., "A Preliminary Examination of the Effectiveness of Hand-Held Extinguishers Against Hidden Fires in the Cabin Overhead Area of Narrow-

Body and Wide-Body Transport Aircraft”, Technical note, FAA, DOT/FAA/AR-TN04/33, 2007

McAlevy, R.F. Magee, R.S, and 1971, ‘The mechanism of flame spread’. J.Fire and Flammability, 2 , 271-297

Mouritz A.P., “Fire Safety of Advanced Composites for Aircraft”, ATSB Research and Analysis Report, Aviation Safety Research Grant – B2004/0046, (2006)

Ochs R.I., “Development of a Flame Propagation Test Method for Structural Composite Materials in Inaccessible Areas”, The Sixth Triennial

Purser D.A., “Toxicity assessment of production products”. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Society of Fire Protection Engineers, Boston (1995)

Quintiere J.G., “Growth of fire in building compartments”. Fire Standards and Safety, American Society for Testing and Materials, STP 614 (1976)

R.G.W. Cherry and Associates, “A Benefit Analysis for Enhanced Protection from Fires in Hidden Areas on Transport Aircraft”, CAA paper 2002/01, FAA reference DOT/FAA/AR-02/50

Reinhardt J.W., “Development of an Improved Fire Test Method for Aircraft Ducting Materials”, FAA, DOT/FAA/AR-08/4, 2008

Wilhelm M., “Aircraft applications”, ASM Handbook, Vol. 21: Composites, ASM International, 2001

Χριστόπουλος Α., “ Πειραματική Διερεύνηση Εξέλιξης Φωτιάς Σε Κρυφές Περιοχές Αεροσκαφών” Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα (2013)