

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Διερεύνηση Αντίδρασης Υλικών
στη Φωτιά με τη Μέθοδο Θερμιδομετρίας
Κώνου**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ: ΓΕΩΡΓΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ
ΜΠΟΥΧΕΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΡΩΜΑΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ – ΜΑΪΟΣ 2015

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Ρωμαίο Αλέξανδρο Επιστημονικό Συνεργάτη του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του τόσο κατά την εξοικείωση με τις πειραματικές τεχνικές, αλλά και για το χρόνο που μας διέθεσε και την υπομονή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά η συμπεριφορά υλικών αεροσκαφών (καμπίνας) ως προς την αντίδρασή τους σε συνθήκες φωτιάς. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Η μέθοδος δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε ήταν η θερμιδομετρία Κώνου, μια από τις πιο χαρακτηριστικά σύγχρονες πρακτικές, που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό υλικών γενικότερα ως προς τη συμπεριφορά τους έναντι συνθηκών φωτιάς. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα εργαστηρίου σε συνθήκες ακτινοβολίας των υλικών που προσομοιάζουν πειραματικά, πραγματικές συνθήκες φωτιάς, η ένταση των οποίων σχετίζεται με τα επίπεδα ακτινοβολίας που επιβάλλονται από τον κώνο του οργάνου (θερμιδόμετρο κώνου). Η ανάπτυξη της εργασίας ολοκληρώθηκε σε επτά κεφάλαια και ένα παράρτημα ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο δόθηκαν εν συντομία τα βασικά χαρακτηριστικά διάδοσης μιας φωτιάς σενάρια και ιδιότητες της φωτιάς από την έναυση έως και την πλήρη ανάπτυξή της. Συζητήθηκαν παράμετροι που επιδρούν στην ανάπτυξη του ρυθμού διάδοσης μιας φωτιάς σε σχέση με τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των υλικών (προσανατολισμός, πάχος επιφάνειας καύσης του υλικού) καθώς και σε σχέση με εξωτερικούς παράγοντες όπως τη σύνθεση και την πίεση της ατμόσφαιρας την κίνηση του ανέμου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο συζητήθηκαν οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας και ο τρόπος με τον οποίο μετέχουν στα διάφορα στάδια εξέλιξης μιας φωτιάς. Επίσης προκειμένου για την αντίδραση των υλικών στη φωτιά έγινε αντιληπτό ότι απαιτείται συνέργεια υπολογιστικών εργαλείων και εργαστηριακών δοκιμών προκειμένου να δίνεται μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στην αντιμετώπιση του θέματος, ενώ σημαντικός παράγοντας παραμένει πάντα και η κρίση του μηχανικού.

Στο τρίτο κεφάλαιο δόθηκαν τα γενικά χαρακτηριστικά συνθέτων υλικών τα οποία αποτελούν και σημαντικό τμήμα της καμπίνας. Εξετάστηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευής των σύνθετων υλικών, ενώ έγινε μια σύντομη ανασκόπηση των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιούνται ως σύνθετα στην καμπίνα του αεροσκάφους. Επίσης

Στο τέταρτο κεφάλαιο συζητήθηκαν τα διάφορα διεθνή πρότυπα που θα πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου να χαρακτηριστούν τα υλικά δοκιμών (κλάσεις). Επίσης αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν ως εξαγόμενα από ένα πείραμα αντίδρασης ενός υλικού στη φωτιά και τα οποία δίνουν πληροφορία για τη συμπεριφορά του υλικού κατά την αντίδρασή του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύθηκε η πειραματική συσκευή (το θερμιδόμετρο κώνου) ενώ στο έκτο κεφάλαιο, το κεφάλαιο των πειραματικών αποτελεσμάτων καταγράφηκαν τα κυριότερα μεγέθη ενδιαφέροντος. Δόθηκαν οι κατανομές μεγεθών και σχολιάστηκαν ως προς την εξέλιξή τους δυναμικά στο χρόνο.

Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της πειραματικής παραμετρικής μελέτης και εκτιμήθηκε η συμπεριφορά των υλικών δοκιμών ως προς τα επίπεδα της ακτινοβολούμενης ροής θερμότητας από τον κώνο.

Τέλος η εργασία ολοκληρώνεται με ένα παράρτημα που συντάχθηκε από τα μέλη του Εργ. Τεχνικής Θερμοδυναμικής προκειμένου πιο εύκολα ο ασκούμενος να μπορεί να ασκηθεί στη μέθοδο (on job training). Το παράρτημα ουσιαστικά είναι το έντυπο εσωτερική οδηγία του συστήματος διαχείρισης ποιότητας (ΣΔΠ) στο οποίο και καταγράφονται τα βασικά βήματα που απαιτούνται για την ορθή λειτουργία του οργάνου και επομένως την ποιότητα των αποτελεσμάτων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	19
1.1 Χαρακτηριστικά Διάδοσης Πυρκαγιάς.....	20
1.2 Σενάρια και Ιδιότητες Φωτιάς.....	21
1.2.1 Έναυση (στάδιο 1).....	22
1.2.2 Αναπτυσσόμενη φωτιά (Developing fire - στάδιο 2).....	23
1.2.3 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (Fully Developed Fire - στάδιο 3).....	23
1.2.4 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (Fully Developed Fire - στάδιο 3).....	23
1.3 Στάδια Ανάπτυξης Φωτιάς.....	23
1.4 Ρυθμός Διάδοσης Φωτιάς.....	25
1.4.1 Προσανατολισμός επιφάνειας - κατεύθυνση διάδοσης της φωτιάς.....	26
1.4.2 Πάχος του καιγόμενου υλικού.....	27
1.4.3 Φυσικές Ιδιότητες υλικού.....	28
1.5 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες.....	29
1.5.1 Σύνθεση και Πίεση της Ατμόσφαιρας.....	29
1.5.2 Εξαναγκασμένη Ροή Θερμότητας από Ακτινοβολία.....	29
1.5.3 Κίνηση του αέρα (άνεμος).....	30
Κεφάλαιο 2: Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας.....	31
2.1 Μετάδοση Θερμότητας με Αγωγή.....	31
2.2 Μετάδοση Θερμότητας με Συναγωγή.....	33
2.3 Μετάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία.....	34
2.4 Ανάγκη για μια Ολοκληρωτική Προσέγγιση.....	37
2.4.1 Υπολογιστικά εργαλεία.....	37
2.4.2 Εργαστηριακές Δοκιμές.....	38
2.4.3 Κρίση του Μηχανικού.....	38
Κεφάλαιο 3: Υλικά Αεροσκαφών – Σύνθετα Υλικά.....	41
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Σύνθετων Υλικών.....	42
3.2 Τεχνική ορολογία κατά τη σύνθεση νέων υλικών.....	45
3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Σύνθετων Νημάτων/Ρητίνης.....	46
3.4 Είδη Υφασμάτων.....	54
3.4.1 E - Υαλοϋφασμα.....	55
3.4.2 S - Υαλοϋφασμα.....	55
3.4.3 S2 - Υαλοϋφασμα.....	56
3.4.4 Κέβλαρ.....	56
3.4.5 Ανθρακονήματα (ή Νήματα Γραφίτη).....	58
3.5 Σύνθετα Στρωματοποιημένα (Σάντουιτς).....	59
3.6 Επισκευές Σύνθετων Υλικών.....	65
Κεφάλαιο 4: Βασικές Κατηγορίες Πρότυπων Δοκιμών.....	67
4.1 Πυραντίσταση (Fire Resistance).....	67
4.2 Πρότυπο CEN TSEN-45545-2.....	69
4.3 Το πρότυπο EN 13501.....	69
4.4 Το πρότυπο EN 13823.....	69
4.5 Ευρωπαϊκές κλάσεις δομικών υλικών ως προς την αντίδραση στη φωτιά.....	70
4.6 Δοκιμές αντίδρασης στη φωτιά (Reaction to fire Tests).....	71
4.7 Διαδικασία μετρήσεων Αντίδρασης Υλικών στη φωτιά.....	72
4.8 Μετρήσιμες Ποσότητες σε πείραμα θερμιδομέτρου.....	73

4.8.1 Heat Release Rate, (HRR) – Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας.....	73
4.8.2 Thermal stability index, (TSI) – Δείκτης θερμικής σταθερότητας.....	76
4.8.3 Limiting oxygen index (LOI).....	77
4.8.4 Extrinsic flammability index, (EFI).	79
4.8.5 Time to Ignition.....	79
4.8.6 Surface flame spread.	85
4.8.7 Mass Loss.....	86
4.8.8 Smoke Density.....	87
4.8.8 Smoke Toxicity.....	89

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Συσκευή – Θερμιδόμετρο Κώνου. 91

Κεφάλαιο 6: Πειραματικά Αποτελέσματα 97

6.1 Υλικό πατώματος αεροσκάφους (χαλί – carpet).....	98
6.1.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας	99
6.1.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας	100
6.1.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας	101
6.1.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.....	102
6.1.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.	103
6.1.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.	105
6.1.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.....	106
6.2 Υλικό οροφής αεροσκάφους (ceiling).....	107
6.2.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας	108
6.2.2 Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας.....	109
6.2.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας	110
6.2.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.....	111
6.2.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.	112
6.2.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.	114
6.2.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.....	115
6.3 Υλικό καθίσματος αεροσκάφους (seat)	117
6.3.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας	117
6.3.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας	119
6.3.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας	120
6.3.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.....	121
6.3.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.	122
6.3.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.	123
6.3.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.....	124
6.4 Υλικό ύφασμα (textile blue navy)	126
6.4.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας	127
6.4.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας	128
6.4.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας	129
6.4.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.	130
6.4.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.	131
6.4.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.....	132
6.4.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.....	133

Κεφάλαιο 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 135

7.1 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας – Heat Release Rate (HRR)	135
7.2 Ολική Έκλυση Θερμότητας – Total Heat Release (THR)	137
7.3 Ρυθμός Απώλειας Μάζας – Mass Loss Rate (MLR).	138
7.4 Παραγωγή CO.....	139
7.5 Θερμοκρασία δοκιμίου.....	140

7.6	Παραγωγή καπνού.....	141
Αναφορές.....		143
Παράρτημα.....		143
8.1	Βασικά Στάδια Προετοιμασίας του Καλορίμετρου Κώνου.....	147
8.2	Διαδικασία Ημερήσιας Βαθμονόμησης.....	147
8.2.1	<i>Βαθμονόμηση Παροχόμετρου Μεθανίου (Zero MFMs).....</i>	<i>149</i>
8.2.2	<i>Βαθμονόμηση Μανομέτρων και Παροχής Ανεμιστήρα (DPT & FLOW).....</i>	<i>150</i>
8.2.3	<i>Βαθμονόμηση Αναλυτή Αερίων Gas Analyzers.....</i>	<i>152</i>
8.2.4	<i>Βαθμονόμηση Συγκέντρωσης Καπνού (Smoke Calibration).....</i>	<i>155</i>
8.2.5	<i>Συνολικός Συντελεστής Βαθμονόμησης του Θερμιδομέτρου (C-factor).....</i>	<i>159</i>
8.2.6	<i>Βαθμονόμηση Μετρητή Ροής Θερμότητας (Heat Flux).....</i>	<i>167</i>
8.3	Διαδικασία Ελέγχων πριν τη Δοκιμή των Υλικών.....	168
8.4	Διαδικασία Δοκιμής των Υλικών.....	170
8.4.1	<i>Διαδικασία Συλλογής δεδομένων αναφοράς (baseline data).....</i>	<i>171</i>
8.4.2	<i>Τοποθέτηση δοκιμίου και έναρξη της δοκιμής.....</i>	<i>172</i>

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τα στάδια και οι ιδιότητες της πυρκαγιάς, το εύρος των περιπτώσεων πυρκαγιάς που συμπεριλαμβάνονται στη θερμιδομετρία κώνου (γκρι) [1].	22
Εικόνα 2: Η εξέλιξη μιας τυπικής φωτιάς σε κτίριο συναρτήσει του χρόνου.	25
Εικόνα 3: Περιπτώσεις εξάπλωσης φωτιάς ως προς την κλίση της επιφάνειας.[6].	28
Εικόνα 4: Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης φλόγας-πίεσης σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Από την εργασία των Magee,R.S, and McAlevy,R.F. 1971).	29
Εικόνα 5: Παράδειγμα Μονοδιάστατης Αγωγής θερμότητας [10].	33
Εικόνα 6: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα προς μια επιφάνεια [10].	33
Εικόνα 7: Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από μια θερμή επιφάνεια (φλόγα) σε ένα αντικείμενο σε απόσταση [10].	36
Εικόνα 8: Ομοιόμορφη ακτινοβολία από σημειακή πηγή, η οποία αντιπροσωπεύει μια φλόγα [10].	36
Εικόνα 9: Σχηματική παράσταση υφάσματος με (α) νήματα κατά μία μόνο διεύθυνση, και (β) με νήματα κατά δύο διευθύνσεις την διαμήκη (χ) και την εγκάρσια (y).	43
Εικόνα 10: Πλέξη υφάσματος μονής και διπλής διεύθυνσης [11].	48
Εικόνα 11: Κατασκευή συνθέτου μιας διεύθυνσης με 8 στρώσεις νημάτων [11].	50
Εικόνα 12: Κατασκευή συνθέτου σχεδόν ισότροπου, με 8 στρώσεις νημάτων κατά διευθύνσεις 0°, 90°, +45°, -45° [11].	52
Εικόνα 13: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης [11].	52
Εικόνα 14: Καμπύλες σ-ε για νήμα, ρητίνη και σύνθετο υλικό [11].	54
Εικόνα 15: Βασικότεροι τύποι υφασμάτων εσωτερικών χώρων αεροσκαφών [11].	54
Εικόνα 16: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω -1 κάτω [11].	55
Εικόνα 17: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω -1 κάτω [11].	56
Εικόνα 18: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοϋφάσμα-τος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω -1 κάτω, 3) τύπου HS1 επάνω - 4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω - 3 κάτω, 5) τύπου BMS [11].	57
Εικόνα 19: Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος κέβλαρ 49: α) Απλή πλέξη, 6) Πλέξη μπάσκετ, γ) σατέν, δ) λινό [11].	58
Εικόνα 20: Σχηματική παράσταση σύνθετου - σάντουιτς t: πάχος σάντουιτς, τε: πάχος επίστρωσης.	59
Εικόνα 21: Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του κυψελοειδή πυρήνα [11].	60
Εικόνα 22: Κατασκευή σύνθετου - σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα [11].	61
Εικόνα 23: Προφίλ ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης σύνθετου υλικού (γυαλιού/βινυλεστέρα) υπο σταθερή θερμική ροή [19].	74
Εικόνα 24: Μεταβολή της μέγιστης τιμής του HRR με τη θερμική ροή [18,20].	75
Εικόνα 25: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου με την ολική θερμική απελευθέρωση ανά μονάδα όγκου σύνθετου υλικού (Gibson A.G., et al, 1995).	75
Εικόνα 26: Γραφική παράσταση του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης με την προσπίπτουσα θερμική ροή, για δυο διαφορετικά υλικά (Egglesstone G.T., et al, 1994).	77
Εικόνα 27: Τιμές των LOI για διάφορα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου (Soratha U. et al, 1993, Allison D.M. et al, 1991).	78
Εικόνα 28: Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή LOI (Weil E.D. et al, 1992).	79

Εικόνα 29: Γραφική παράσταση του χρόνου ανάφλεξης ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία για τέσσερα διαφορετικά υλικά (Gibson A.G. et al, 1995).	81
Εικόνα 30: Επίδραση της θερμικής ροής στο χρόνο ανάφλεξης δυο σύνθετων υλικών σάντουιτς (Grenier A.T. et al, 1998).	82
Εικόνα 31: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου στο χρόνο ανάφλεξης σε ελάσματα γυαλιού/φαινολών δοκιμασμένες σε διάφορες θερμικές ροές (Scudamore M.J. et al, 1994).	84
Εικόνα 32: Διάδοση της φλόγας συναρτήσεϊ του χρόνου (Gibson A.G. et al, 1995). ...	86
Εικόνα 33: Τυπικές καμπύλες απώλειας μάζας για σύνθετα υλικά γυαλιού/βινυλεστέρα και γυαλιού/φαινολικών ρητινών [25, 48, 49].	87
Εικόνα 34: Παραγωγή καπνού συναρτήσεϊ του χρόνου για δυο σύνθετα υλικά ακτινοβολούμενα υπο σταθερή θερμική ροή των (Mouritz A.P. et al, 2006).	88
Εικόνα 35: Αναλυτική περιγραφή επιμέρους διατάξεων της συσκευής θερμιδομέτρου κώνου.	92
Εικόνα 36: Τυπική εικόνα καύσης δοκιμίου κατά την διαδικασία ελέγχου δοκιμίου ως προς την αντίδρασή του στη φωτιά.	94
Εικόνα 37: Διάταξη κώνου καλορίμετρου και μεταλλικό πλέγμα εφαρμογής στην επιφάνεια δοκιμίου.	95
Εικόνα 38: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	99
Εικόνα 39: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	101
Εικόνα 40: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	102
Εικόνα 41: Κατανομές Παραγωγής CO ₂ κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	103
Εικόνα 42: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	104
Εικόνα 43: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	105
Εικόνα 44: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	106
Εικόνα 45: Διάγραμμα 6.8 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15 kW/m ² , 30 kW/m ² , 50 kW/m ² , 60 kW/m ²	108
Εικόνα 46: Διάγραμμα 6.9 Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15 kW/m ² , 30 kW/m ² , 50 kW/m ² , 60 kW/m ²	109
Εικόνα 47: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15 kW/m ² , 30 kW/m ² , 50 kW/m ² , 60 kW/m ²	110
Εικόνα 48: Κατανομές Παραγωγής CO ₂ κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	112
Εικόνα 49: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	113
Εικόνα 50: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	115
Εικόνα 51: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	116

Εικόνα 52: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	118
Εικόνα 53: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	120
Εικόνα 54: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	121
Εικόνα 55: Κατανομές Παραγωγής CO ₂ κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	122
Εικόνα 56: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	123
Εικόνα 57: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	124
Εικόνα 58: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	125
Εικόνα 59: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	127
Εικόνα 60: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (THR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	128
Εικόνα 61: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	129
Εικόνα 62: Κατανομές Παραγωγής CO ₂ κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	130
Εικόνα 63: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	131
Εικόνα 64: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	132
Εικόνα 65: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m ² , 30 kW/m ² , 40 kW/m ² , 50 kW/m ²	133
Εικόνα 66: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.....	136
Εικόνα 67: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (THR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.....	137
Εικόνα 68: Κατανομές Ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.....	138
Εικόνα 69: Κατανομές παραγωγής CO κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.....	139
Εικόνα 70: Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.....	140

Εικόνα 71: Εικόνα 70: Κατανομές παραγωγής καπνού κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.	141
Εικόνα 72: Αρχικό Μενού Λογισμικού Δοκιμών.....	148
Εικόνα 73: Παράθυρο Βαθμονόμησης Θερμιδομέτρου Κώνου (Calibration Panel) ...	149
Εικόνα 74: Βαθμονόμηση Παροχόμετρου Μεθανίου (MFM Calibration Panel).....	149
Εικόνα 75: Βαθμονόμηση Μανομέτρου μέτρησης πίεσης (DPT Transducer Calibration Panel).	150
Εικόνα 76: Ρύθμιση κατάλληλης Παροχής αέρα.....	151
Εικόνα 77: Έλεγχος Παροχής στην έξοδο της καμινάδας.....	152
Εικόνα 78: Μενού βαθμονόμησης μετατροπένων ανάλυσης των καταγραφόμενων αερίων.....	152
Εικόνα 79: Βαθμονόμηση συστήματος καταγραφής του παραγόμενου καπνού	156
Εικόνα 80: Συνολική Εμφάνιση των επιμέρους ρυθμίσεων όλων των βαθμονομήσεων του οργάνου.....	158
Εικόνα 81: Μενού εύρεσης του C – factor. (Τύπος Αρχείου .csv)	159
Εικόνα 82: Πληροφορίες ελέγχου συνθηκών για τη βαθμονόμηση του οργάνου.....	160
Εικόνα 83: Αρχείο Αποθήκευσης της διαδικασίας βαθμονόμησης – εξαγωγή συντελεστή C-factor.	161
Εικόνα 84: Δυνατότητα επιλογής προελέγχων πριν τη διαδικασία της καύσης.....	161
Εικόνα 85: Διαδικασία συλλογής δεδομένων κατά τους προελέγχους (Pre-run Calibrations).....	161
Εικόνα 86: Πάνελ βαθμονόμησης του C-Factor (Έναρξη).....	162
Εικόνα 87: Διαδικασία Εύρεσης του Συνολικού συντελεστή βαθμονόμησης C-Factor – Βήμα 1.	163
Εικόνα 88: Διαδικασία συλλογής δεδομένων για την εύρεση του C-factor - Βήμα 3	164
Εικόνα 89: Προχωρημένο στάδιο συλλογής δεδομένων – κλείσιμο βάνας μεθανίου - Βήμα 4	165
Εικόνα 90: Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων για την τελική εκτίμηση του C – factor.	165
Εικόνα 91: Χρονική εξέλιξη των μετρούμενων ποσοτήτων κατά την καύση του μεθανίου.....	166
Εικόνα 92: Τελική εκτίμηση και επιλογή τιμής του C-Factor.....	167
Εικόνα 93: Πάνελ Ρύθμισης Ροής Θερμότητας.....	168
Εικόνα 94: Πάνελ Διαδικασίας δοκιμής κομματιού.....	170
Εικόνα 95: Διαδικασία προελέγχων (Pre-run Calibrations) πριν την έναρξη της δοκιμής.	170
Εικόνα 96: Έναρξη καταγραφής δεδομένων αναφοράς (baseline data) στο πάνελ Test Run.	171
Εικόνα 97: Διαδικασία καταγραφής δεδομένων αναφοράς (baseline data) στο πάνελ Test Run.....	172
Εικόνα 98: Χρονική Εξέλιξη της δοκιμής	173
Εικόνα 99: Πίνακας Αποτελεσμάτων μετά το τέλος της δοκιμής σε θερμιδόμετρο κώνου.	174

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράγοντες επίδρασης του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς [3].	26
Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα των Magee and McAlevy [6].	27
Πίνακας 3: Ενδεικτικός πίνακας εξέλιξης της χρήσης των υλικών στις αεροπορικές κατασκευές [12,13].	44
Πίνακας 4: Μείωση της μάζας των αεροσκαφών λόγω αντικατάστασης υλικών [12,13].	44
Πίνακας 5: Μηχανικά χαρακτηριστικά νημάτων και σύνθετων υλικών.	51
Πίνακας 6: Επίδραση του πάχους στα μηχανικά χαρακτηριστικά.	59
Πίνακας 7: Συνδυασμοί υλικών, πυρήνα και επιστρώσεων στα σύνθετα-στρωματοειδή για αεροπορικές εφαρμογές [12,13].	62
Πίνακας 8: Σύνοψη προτύπων δοκιμών [14, 15].	70
Πίνακας 9: Ευρωκλάσεις για όλα τα δομικά υλικά εκτός δαπέδων [14, 15].	71
Πίνακας 10: Ευρωκλάσεις για δομικά υλικά δαπέδων [14, 15].	71
Πίνακας 11: Συγκεντρώσεις αερίων από τη καύση των παρακάτω υλικών (Sastri S.B. et al, 1997),(Sorathia U. et al, 1991).	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 Εισαγωγή.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε κατασκευή επηρεάζουν τη μέθοδο κατασκευής, τη δομή, τη μορφή, την αισθητική, και το κόστος, κατασκευής, το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον. Για παράδειγμα οι θερμικές και οπτικές τους ιδιότητες παίζουν σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο της κατασκευής αλλά και του περιβάλλοντος χώρου, ενώ η τοξικολογική τους δράση επηρεάζει την ανθρώπινη υγεία.

Η επιλογή των υλικών σχετίζεται με την καταλληλότητά τους ως προς μια συγκεκριμένη κατασκευή και ελέγχεται ως προς ιδιότητες όπως η μηχανική και θερμική αντοχή - συμπεριφορά, η σταθερότητα, η ασφάλεια, το κόστος καθώς και η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, κατά τον κύκλο ζωής τους. Ειδικότερα η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον περιλαμβάνουν αποτελέσματα σε σχέση με την περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω της εξαγωγής πρώτων υλών, της διαδικασίας κατασκευής, της μεταφοράς, συντήρησης και τελικής απόρριψης σαν απόβλητα τους και τις αντίστοιχες ενεργειακές δαπάνες.

Οι βασικές ιδιότητες των υλικών αεροσκαφών που εξετάζονται από κατασκευάστριες εταιρείες είναι η αντίδραση και η αντίσταση στη φωτιά που σχετίζονται με κυρίως με την μηχανική και θερμική αντοχή των υλικών και πρέπει να είναι σύμφωνες με εθνικούς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς της Ε.Ε. όπως για παράδειγμα η Οδηγία Προϊόντων Κατασκευής (Construction Product Directive - CPD 89/106). Η αντίδραση στη φωτιά δομικών προϊόντων ιστορικά δίνεται με την ταξινόμηση τους με βάση εθνικά πρότυπα, όπως είναι το DIN 4102. Το σύστημα ταξινόμησης αντίδρασης σε φωτιά, σύμφωνα με το EN 13501-1 που ορίσθηκε από την Ε.Ε., απαιτεί εκτίμηση της αντίδρασης με βάση δοκιμές σε συνθήκες φωτιάς, σε

κλίμακα εργαστηρίου καταρχήν, που για παράδειγμα μπορούν να επιτευχθούν με τη διαδικασία ελέγχου χρησιμοποιώντας τη διάταξη Single Burning Item Test - SBI.

Στον τομέα της έρευνας της συμπεριφοράς των αεροπορικών υλικών σε συνθήκες φωτιάς, μεγάλη πρόοδος έγινε κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα. Οι συνθήκες φωτιάς αντιμετωπίστηκαν ως φαινόμενο που διέπεται από τους ίδιους νόμους της φύσης όπως άλλα φυσικά και χημικά φαινόμενα. Τα αποτελέσματα των πιο πρόσφατων ερευνών οδήγησαν στην ανάπτυξη εργαλείων πρόβλεψης διάδοσης της φωτιάς, με τα οποία οι μηχανικοί μπορούν να εκτιμήσουν τις επιπτώσεις της φωτιάς στη βάση διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης και διάδοσης αυτής. Οι πρόσφατες αλλαγές στους κανονισμούς πολλών χωρών άρχισαν να επιτρέπουν το σχεδιασμό πυροπροστασίας χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη «Προσέγγιση με Βάση τις Επιδόσεις» (Performance Based Approach), η οποία βασίζεται στη χρήση υπολογιστικών εργαλείων για πρόβλεψη ανάπτυξης και διάδοσης φωτιάς με βάση συγκεκριμένα σενάρια καθώς και τη διεξαγωγή προτύπων μετρήσεων για τη ταξινόμηση δομικών προϊόντων για αντίδραση σε φωτιά.

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται προσπάθεια αναγνώρισης της συμπεριφοράς των υλικών που απαρτίζουν τμήματα συγκεκριμένων περιοχών του αεροσκάφους, κατά την αντίδρασή τους στη φωτιά. Η μελέτη έχει σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την πρόληψη και αποφυγή διάδοσης της φωτιάς. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση της αντίδρασης των υλικών στην φωτιά είναι αυτή της θερμιδομετρίας κώνου με την οποία ελέγχεται η συμπεριφορά υλικών κατά την αντίδρασή τους στη φωτιά. Η μέθοδος δοκιμών που εφαρμόστηκε συνήθως αναφέρεται ως μέθοδος κλίμακας εργαστηρίου (lab scale tests) και τα εξαγόμενα ανάγονται σε πραγματικές συνθήκες με βάση την ένταση ακτινοβολίας που εφαρμόζεται στα δοκίμια.

1.1 Χαρακτηριστικά Διάδοσης Πυρκαγιάς.

Η προστασία από την απειλή της φωτιάς, η εκτίμηση της αντίδρασης στη φωτιά καθώς και η αντίσταση στη φωτιά είναι βασικές παράμετροι κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή και επομένως επιβεβλημένη απαίτηση, τόσο σε εθνικούς όσο και σε κανονισμούς της Ε.Ε., όπως για παράδειγμα στην Οδηγία Προϊόντων Κατασκευής (Construction Product Directive - CPD 89/106). Η αντίδραση στη φωτιά δομικών προϊόντων ιστορικά δίνεται με την ταξινόμηση τους με βάση εθνικά πρότυπα, όπως

είναι το DIN 4102. Το σύστημα ταξινόμησης αντίδρασης σε φωτιά, σύμφωνα με το EN 13501-1 που ορίσθηκε από την Ε.Ε., απαιτεί εκτίμηση της αντίδρασης στη βάση νεοεισαχθέντων δοκιμών φωτιάς, όπως το *Single Burning Item Test - SBI*.

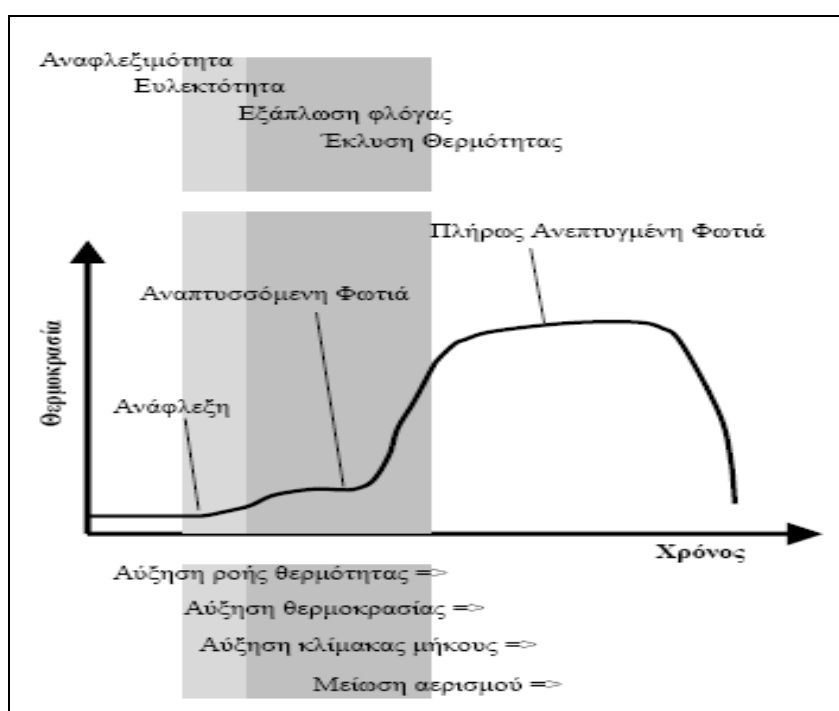
Η μεγάλη πρόοδος στην έρευνα του φαινομένου της φωτιάς κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα έκανε δυνατή την αντιμετώπιση της φωτιάς σαν μια κατάσταση που διέπεται από τους ίδιους νόμους της φύσης όπως άλλα φυσικά και χημικά φαινόμενα. Αποτελέσματα πρόσφατων ερευνών οδήγησαν στην ανάπτυξη εργαλείων πρόβλεψης διάδοσης της φωτιάς, με τα οποία οι μηχανικοί μπορούν να εκτιμήσουν τις επιπτώσεις της φωτιάς στη βάση διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης και διάδοσης της φωτιάς. Οι πρόσφατες αλλαγές στους οικοδομικούς κανονισμούς πολλών χωρών άρχισαν να επιτρέπουν σχεδιασμό πυροπροστασίας χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη «Προσέγγιση με Βάση τις Επιδόσεις» (Performance Based Approach), η οποία βασίζεται στη χρήση υπολογιστικών εργαλείων για πρόβλεψη ανάπτυξης και διάδοσης φωτιάς με βάση συγκεκριμένα σενάρια καθώς και τη διεξαγωγή προτύπων μετρήσεων για τη ταξινόμηση δομικών προϊόντων για αντίδραση σε φωτιά.

Σε αντίθεση με την αντίδραση σε φωτιά, η αντίσταση σε φωτιά συχνότατα εκτιμάται μόνο με βάση τυποποιημένες δοκιμές. Οι απαιτήσεις αντίστασης στη φωτιά για τα διαφορετικά τμήματα μιας κατασκευής ποικίλουν σημαντικά και μη συστηματικά ανάμεσα στις διάφορες χώρες και έχουν βασισθεί περισσότερο στην εμπειρία ιστορικά, παρά σε επιστημονικές προσεγγίσεις. Οι απαιτήσεις αντίστασης στη φωτιά συχνά επηρεάζουν σημαντικά το κατασκευαστικό κόστος. Τα πρόσφατα επιτεύγματα στη πυροπροστασία και η νέα τάση χρήσης της «Προσέγγισης με Βάση τις Επιδόσεις» στους κανονισμούς δίνουν νέες δυνατότητες για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κτιρίων χωρίς συμβιβασμούς στην ασφάλεια. Στα πλαίσια αυτά η εργασία παρουσιάζει μία σύντομη ανασκόπηση των χαρακτηριστικών ανάπτυξης και διάδοσης φωτιάς σε κτίρια καθώς και τις σημαντικότερες δοκιμές μέτρησης και πιστοποίησης συγκεκριμένων ιδιοτήτων δομικών υλικών έναντι της φωτιάς.

1.2 Σενάρια και Ιδιότητες Φωτιάς.

Οι περιπτώσεις φωτιάς (πυρκαγιάς) είναι γενικά διαφορετικές και ένα μεμονωμένο σενάριο ποτέ δεν καλύπτει όλο το εύρος των περιπτώσεων και της αντίστοιχης συμπεριφορά τους. Μερικές βασικές αρχές των σεναρίων φωτιάς και των

ιδιοτήτων τους, περιγράφονται στη συνέχεια 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 (Εικ.1). Καθένα από αυτά τα στάδια μπορεί να συνιστά και ένα διαφορετικό σενάριο φωτιάς στο οποίο τονίζονται διαφορετικές ιδιότητες της φωτιάς και των καύσιμων υλικών [2].



Εικόνα 1: Τα στάδια και οι ιδιότητες της πυρκαγιάς, το εύρος των περιπτώσεων πυρκαγιάς που συμπεριλαμβάνονται στη θερμιδομετρία κώνου (γκρι) [1].

1.2.1 Έναυση (στάδιο 1)

Η οδηγούμενη έναυση, συνιστά την έναρξη της καύσης παρουσία φλόγας (flaming combustion), που χαρακτηρίζεται από μια πηγή έναυσης, μια μικρή κλίμακα μήκους (της τάξης των cm), θερμοκρασία περιβάλλοντος στην περιοχή της θερμοκρασίας έναυσης (600 – 700 K) και υψηλά επίπεδα αερισμού [2]. 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), η θερμοκρασία ανάφλεξης T_{ig}).

1.2.2 Αναπτυσσόμενη φωτιά (Developing fire - στάδιο 2)

Η συνέχιση της καύσης παρουσία φλόγας που συμβαίνει σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης χαρακτηρίζεται από μια εξωτερική ροή θερμότητας (της τάξης των 20 – 60 kW/m²), μεγαλύτερες κλίμακες μήκους (της τάξης των dm – m), θερμοκρασία περιβάλλοντος υψηλότερη εκείνης της έναυσης (700 – 900K) και διατήρηση υψηλών επιπέδων αερισμού. Σε αυτό το στάδιο οι πιο σημαντικές παράμετροι ενδιαφέροντος είναι η εξάπλωση της φωτιάς (flame spread) σε αντίθετη ροή ανέμου και με υποβοήθηση ανέμου, ο ρυθμός ανάπτυξης της φωτιάς [2].

1.2.3 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (Fully Developed Fire - στάδιο 3)

Το στάδιο της αναπτυσσόμενης φωτιάς χαρακτηρίζεται από υψηλή εξωτερική ροή θερμότητας (>50kW/m²) μεγάλες κλίμακες μήκους (>m) θερμοκρασία περιβάλλοντος πάνω από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης (>900K) και χαμηλά επίπεδα αερισμού. Σε αυτό το στάδιο οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η διείσδυση της θερμότητας, η διείσδυση της φωτιάς, η αντίσταση στη φωτιά, η έκλυση θερμότητας και το φορτίο φωτιάς (fire load).

1.2.4 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (Fully Developed Fire - στάδιο 3)

Η περίοδος αποσύνθεσης (decay period) η οποία ορίζεται συνήθως ως αυτή η περίοδος κατά την οποία η μέση θερμοκρασία έχει πέσει στο 80% της μέγιστης τιμής της.

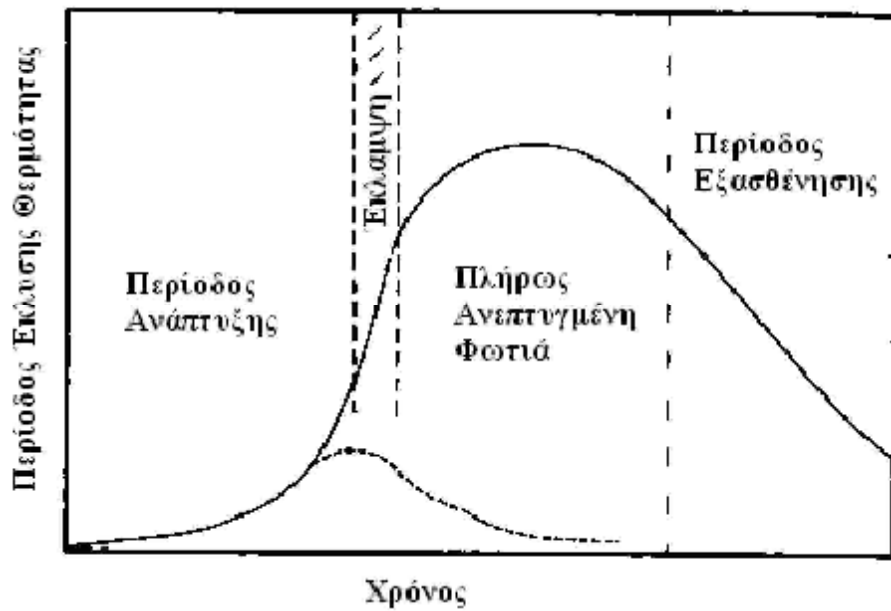
1.3 Στάδια Ανάπτυξης Φωτιάς.

Ο όρος ‘φωτιά’ σε μια κατασκευή χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μη-ελεγχόμενης καύσης σε κλειστό χώρο. Στην περίπτωση αυτή, η φωτιά εξελίσσεται ελεύθερα και οι ρυθμοί πυρόλυσης και έκλυσης θερμότητας επηρεάζονται αρχικά μόνο από τα φαινόμενα της καύσης και όχι από τα όρια του δωματίου, τα οποία επηρεάζουν την φωτιά μόνο όταν αυτή αυξηθεί σε μέγεθος όπως υποστηρίζει ο Drysdale [3]. Στην Εικ.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του

χρόνου. Στην περίπτωση που ο αερισμός είναι επαρκής, η φωτιά σε ένα χώρο μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια:

- **Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς (pre-flashover fire)**, κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του δωματίου είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά περιορίζεται κοντά στην περιοχή από την οποία ξεκίνησε,
- **Στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς (post-flashover fire)**, κατά το οποίο παρατηρείται καύση όλων των αναφλέξιμων αντικειμένων και οι φλόγες εξαπλώνονται σε όλο το χώρο,
- **Στάδιο εξασθένησης της φωτιάς**, το οποίο επιτυγχάνεται όταν η μέση θερμοκρασία του χώρου γίνει χαμηλότερη του 80% της μέγιστης τιμής της.

Το σημείο μετάβασης από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο, αναφέρεται ως **έκλαμψη** (flashover) και περιλαμβάνει την γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς από το αρχικό σημείο έναυσης προς όλες τις αναφλέξιμες επιφάνειες του δωματίου. Η έκλαμψη έχει μικρή χρονική διάρκεια σε σχέση με τα υπόλοιπα στάδια, αποτελεί όμως ένα κρίσιμο χρονικό σημείο, μετά από το οποίο μειώνονται δραματικά οι πιθανότητες επιβίωσης στο εσωτερικό του χώρου. Κατά το δεύτερο στάδιο, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και η φωτιά είναι δυνατόν να επεκταθεί και σε γειτονικά δωμάτια, μέσω των ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα), γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής. Τέλος, κατά το τρίτο στάδιο ο ρυθμός καύσης και η ένταση της φωτιάς μειώνονται καθώς η καύσιμη ύλη εξαντλείται, αλλά, κατά περίπτωση, τα αναφλέξιμα στερεά συνεχίζουν να καίγονται αργά, διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 2: Η εξέλιξη μιας τυπικής φωτιάς σε κτίριο συναρτήσει του χρόνου.

1.4 Ρυθμός Διάδοσης Φωτιάς.

Ο ρυθμός διάδοσης της φωτιάς εξαρτάται από την ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας από το σημείο ανάφλεξης σε άλλες αναφλέξιμες επιφάνειες που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Για την πλήρη ανάπτυξη μιας φωτιάς σε έναν κλειστό χώρο, πρέπει να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες (συνήθως μεγαλύτερες των 600°C) στο επίπεδο της οροφής. Ο συνολικός ρυθμός καύσης επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας όσο και από την αύξηση του όγκου που καταλαμβάνει η φωτιά κατά τον Thomas [4]. 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 1 κατά τον Friedman [5]. Αυξανόμενη της θερμοκρασίας του καυσίμου, αυξάνεται και ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας, γεγονός αναμενόμενο διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, τόσο λιγότερη θερμότητα απαιτείται για την ανάφλεξη του άκαυστου καυσίμου που βρίσκεται μακριά από το σημείο έναυσης της φωτιάς [4].

Πίνακας 1: Παράγοντες επίδρασης του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς [3].

Υλικό		Περιβάλλον
Χημικά Χαρακτηριστικά	Φυσικά Χαρακτηριστικά	
Χημική σύσταση, Παρουσία Επιβραδυντικών v Υλών	Αρχική θερμοκρασία, Κατεύθυνση διάδοσης φλόγας, Πάχος υλικού, Προσανατολισμός επιφάνειας, Θερμοχωρητικότητα, Θερμική αγωγιμότητα, Πυκνότητα, Σχήμα.	Σύσταση της ατμόσφαιρας, Ατμοσφαιρική πίεση, Θερμοκρασία, Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, Ταχύτητα αέρα.

1.4.1 Προσανατολισμός επιφάνειας - 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 σύμφωνα με τους Magee & McAlevy, [6]. Όταν η κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας είναι προς τα πάνω σε μια κάθετη επιφάνεια, η άνωση που δημιουργείται από την ίδια την φλόγα οδηγεί σε συμπίπτουσα πορεία του αέρα και της φλόγας, με αποτέλεσμα η φλόγα και τα θερμά αέρια να κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα διαδίδεται με αυξανόμενο ρυθμό.

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.

Τέλος, όσον αφορά την οριζόντια διάδοση της φλόγας (π.χ. σε μία οροφή), εάν δεν υπάρχει κάποιο άνοιγμα στον χώρο (π.χ. πόρτα, παράθυρο) που οδηγεί στην συνεχή εισαγωγή φρέσκου αέρα, δεν προκαλείται η γρήγορη εξάπλωσή της. Έτσι, τα θερμά αέρια παραμένουν αδραντοποιημένα κάτω από την οροφή, χωρίς να κινούνται προς κάποια κατεύθυνση.

Αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού, η φλόγα διαδίδεται γρηγορότερα κατά μήκος μιας ακμής ή σε μια γωνία απ'ότι πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια σύμφωνα με τους Markstein & de Ris [7]. Όσο μικρότερη είναι η γωνία μεταξύ δύο ακμών του αντικείμενου, τόσο περισσότερο το στερεό αυτό πλησιάζει την συμπεριφορά του 'λεπτού' καυσίμου.

Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα των Magee and McAlevy [6]

Κλίση(°)	Ρυθμός εξάπλωσης (mm/s)
0	3.6
+22.5	6.3
+45	11.2
+75	29.2
+90	46-74 (μη σταθερός)

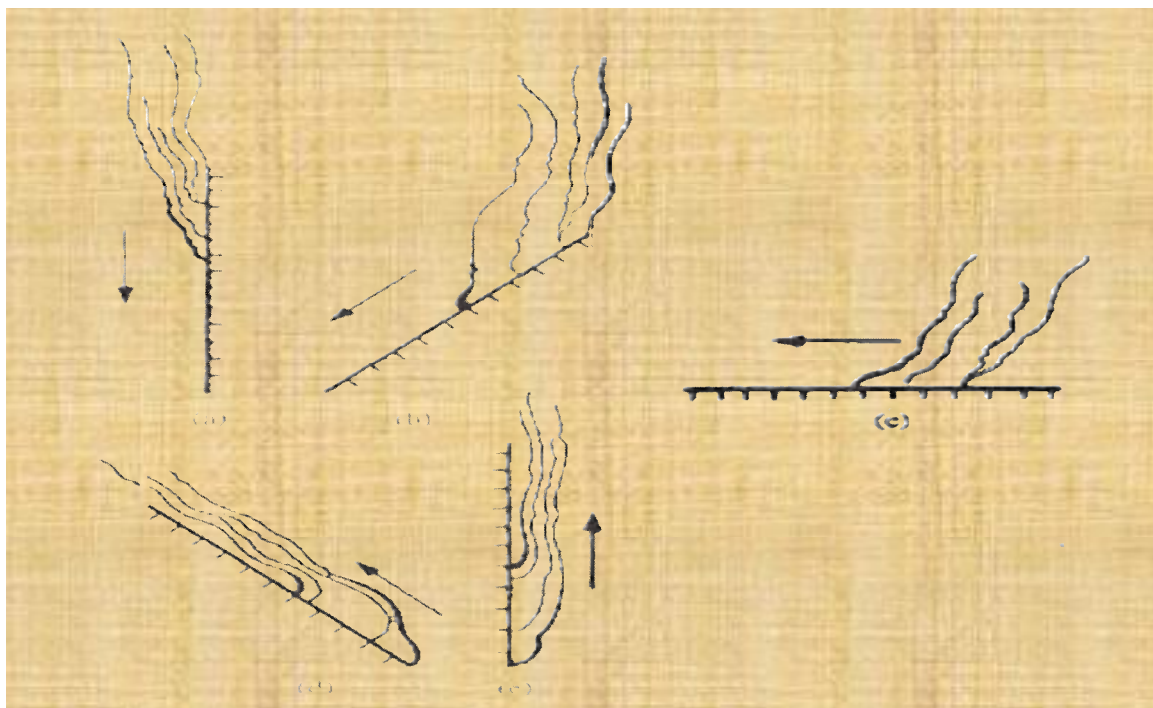
Ο λόγος για αυτό το φαινόμενο είναι ότι ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η φλόγα με το άκαυστο καύσιμο μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται και ο προσανατολισμός της επιφάνειας. Σε μια οριζόντια ή επικλινή προς τα κάτω επιφάνεια η εισροή αέρα (air entrainment) στη φλόγα οδηγεί σε «μετάδοση φλόγας αντίθετα προς το ρεύμα αέρα» ενώ στην περίπτωση ανοδικής κλίσης, λόγω της άνωσης, τόσο η φλόγα όσο και τα προϊόντα της καύσης κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση γεμίζοντας το οριακό στρώμα και δημιουργώντας υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στο μέτωπο της ζώνης καύσης.

1.4.2 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, σύμφωνα με τον Suzuki, 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 [8].

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 [4]. Η συμπεριφορά αυτή αφορά υλικά τα οποία δεν αλλάζουν φάση κατά τη διάρκεια της καύσης τους (π.χ. λιώσιμο του καύσιμου υλικού).



Εικόνα 3: Περιπτώσεις εξάπλωσης φωτιάς ως προς την κλίση της επιφάνειας.[6]

1.4.3 Φυσικές Ιδιότητες υλικού.

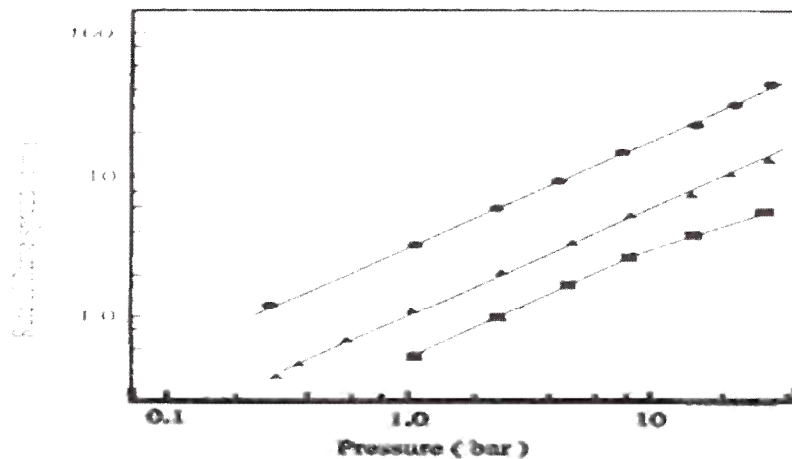
Ο ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η φλόγα σε ένα αντικείμενο είναι αντιστρόφως ανάλογος με το γινόμενο τριών βασικών φυσικών ιδιοτήτων του, δηλαδή της πυκνότητας, της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητάς του. Καθώς η θερμική αγωγιμότητα ενός στερεού (k) είναι γενικά ανάλογη με την πυκνότητά του, συνάγεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης της φλόγας εξαρτάται από την πυκνότητα του καυσίμου υλικού (προσεγγιστικά $V\alpha\rho^{-2}$). Αυτό εξηγεί γιατί στα υλικά χαμηλής πυκνότητας αναπτύσσεται πολύ εύκολα φωτιά αρκεί να θερμανθεί μόνο μια πολύ μικρή ποσότητα μάζας από την επιφάνεια του υλικού προκειμένου να εξαπλωθεί η φλόγα.

1.5 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες.

Ανάμεσα στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την πορεία μιας φωτιάς είναι η σύνθεση της ατμόσφαιρας και η ατμοσφαιρική πίεση, η ροή θερμότητας που δημιουργείται λόγω εξαναγκασμένης ακτινοβολίας καθώς και η κίνηση του αέρα. Στη συνέχεια αναλύονται πιο διεξοδικά οι παραπάνω παράγοντες που θεωρούνται υπεύθυνοι για την πορεία μιας φωτιάς.

1.5.1 Σύνθεση και Πίεση 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, (δηλ. μεγαλύτερη από 160mmHg περίπου). Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης φλόγας παρατηρούνται σε αυξημένη ατμοσφαιρική πίεση εξαιτίας του εμπλουτισμού σε οξυγόνο, το οποίο ενισχύει την σταθερότητα της φλόγας στην επιφάνεια. Σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικ.4.



Εικόνα 4: Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης φλόγας-πίεσης σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Από την εργασία των Magee, R.S, and McAlevy, R.F. 1971).

1.5.2 Εξαναγκασμένη Ροή Θερμότητας από Ακτινοβολία.

Μία εξαναγκασμένη ροή θερμότητας από ακτινοβολία προκαλεί αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης της φλόγας κυρίως επειδή προθερμαίνεται το καύσιμο μπροστά από το μέτωπο της φλόγας. Ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας οδηγεί σε ισχυρότερες φλόγες, οι οποίες οδηγούν με τη σειρά τους σε περαιτέρω μεταφορά θερμότητας προς τα εμπρός και έτσι ενισχύεται η διεργασία. Ακόμη και

σχετικά μικρές ποσότητες ακτινοβολίας είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικό αποτέλεσμα. Ο Alvares [9] το 1975 παρατήρησε ότι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία ισοδύναμη με 3-4 φορές την ακτινοβολία του καλοκαιρινού ήλιου στο Ηνωμένο Βασίλειο αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης της φλόγας κατά 70%. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι σημαντικό κατά τα πρώτα στάδια της φωτιάς σε ένα χώρο όταν τα επίπεδα ακτινοβολίας, από τα τοιχώματα του χώρου και από το ζεστό στρώμα καυσαερίων τα οποία είναι εγκλωβισμένα κάτω από το ταβάνι, αυξάνονται σταδιακά.

1.5.3 Κίνηση του αέρα (άνεμος).

Γενικά, η κίνηση του αέρα πάνω από μια φλόγα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσής της σε μια καύσιμη επιφάνεια. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει ώθηση της φλόγας προς τα εμπρός, η οποία συνδυασμένη με την ενισχυμένη καύση πίσω από το μέτωπο της φλόγας, θα αυξήσει το ρυθμό της μετάδοσης θερμότητας προς τα εμπρός. Αν η ροή του αέρα αντιτίθεται στην εξάπλωση της φλόγας το συνολικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Αρκετά υψηλές ταχύτητες προκαλούν μείωση του ρυθμού μετάδοσης (και τελικά σβήσιμο της φλόγας), ενώ οι μικρές ταχύτητες αυξάνουν την ταχύτητα μετάδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας.

Τα όσα περιγράφονται στο κεφάλαιο αυτό βρίσκονται σε οποιοδήποτε βασικό σύγγραμμα που αναφέρεται σε Μετάδοση Θερμότητας. Βασικό εγχειρίδιο που χρησιμοποιήθηκε για μια σύνοψη των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας, ήταν το βιβλίο των Cengel Yunus., Ghajar A Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α. ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε,2011. Είναι προφανές ότι κατά τα στάδια μια φωτιάς θερμότητα μεταφέρεται κατά τους διάφορους μηχανισμούς που την διέπουν όπως η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία. Οι επιμέρους μηχανισμοί αναπτύσσονται στη συνέχεια ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικότερα για την περίπτωση φωτιάς, η μεταφορά θερμότητας διέπεται από μεταβατικά φαινόμενα και οι εξισώσεις γίνονται πολύπλοκες, καθώς εξαρτώνται από τα είδη των υλικών, το σχήμα τους και το χρόνο. Μια εξίσωση, η οποία μπορεί να δώσει μια εκτίμηση του χρόνου, που χρειάζεται για να αποκατασταθεί μια μόνιμη και να αρχίσει να γίνεται αισθητή η επίδραση της θερμοκρασίας της άμεσα θερμαινόμενης επιφάνειας στην άλλη επιφάνεια, είναι η εξίσωση του χρόνου θερμικής διείσδυσης:

$$T_p = L^2 / 16\alpha \quad (1)$$

όπου α είναι η θερμική διαχυτικότητα ($\alpha = k/\rho c$ [m^2/s]), ρ η πυκνότητα και c η ειδική θερμοχωρητικότητα [$J/(kg \cdot K)$] του εκάστοτε υλικού.

2.1 Μετάδοση Θερμότητας με Αγωγή.

Σύμφωνα με τον μηχανισμό της αγωγής, θερμότητα μεταδίδεται από τα σωματίδια της ύλης που παρουσιάζουν υψηλότερη εσωτερική ενέργεια προς αυτά με τη χαμηλότερη. Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα στα υγρά, στα αέρια και στα

στερεά. Τόσο στα υγρά όσο και στα αέρια, η αγωγή είναι αποτέλεσμα συγκρούσεων και διαχύσεων των σωματιδίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά ο μηχανισμός αυτός οφείλει την ύπαρξή του στις συνδυασμένες ταλαντώσεις των μορίων ενώ η ενέργεια μεταδίδεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η αγωγή περιγράφεται μαθηματικά, στην μόνιμη κατάσταση, από τον νόμο του Fourier, η μαθηματική έκφραση του οποίου δίνεται:

$$\dot{q} = -k \nabla T \quad (2)$$

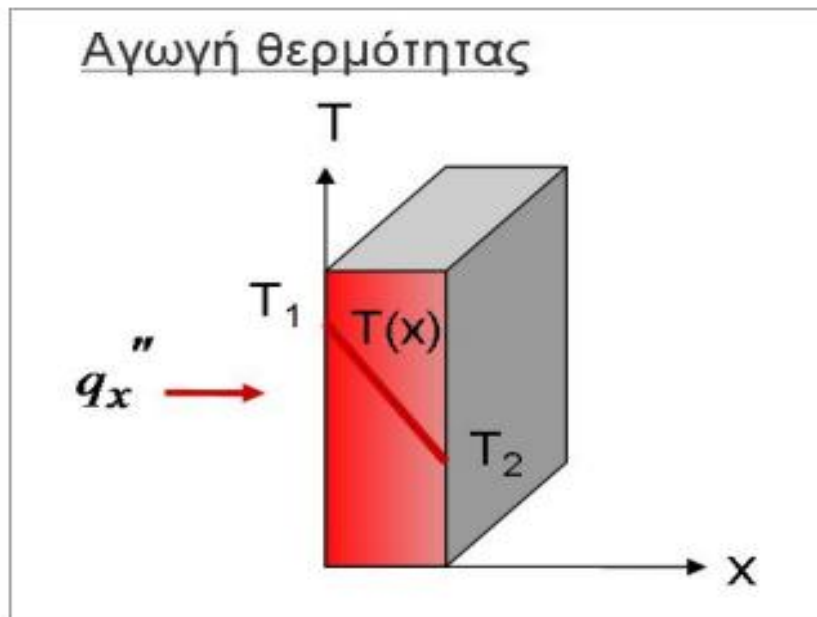
όπου \dot{q} είναι η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού της επιφάνειας και ο τρίτος όρος είναι η βαθμίδα της

θερμοκρασίας. Για την απλή περίπτωση μεταφοράς θερμότητας σε μία διάσταση, όπως για παράδειγμα σε ένα τοίχο, η εξίσωση γίνεται ως εξής:

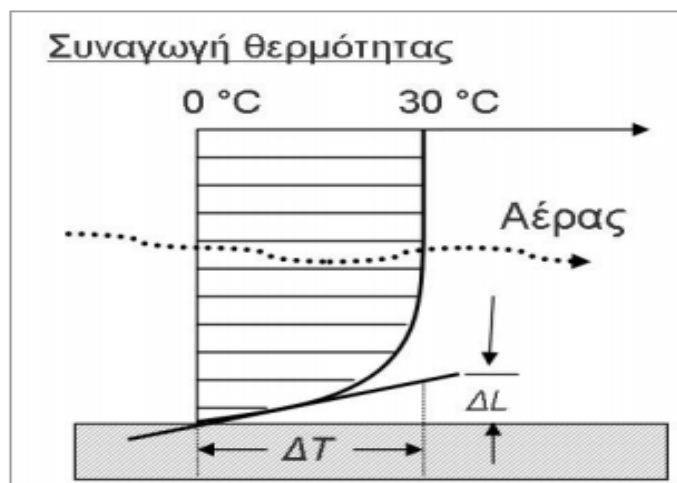
$$\dot{Q}_x = - \frac{k \times A}{L} \times \Delta T = - \frac{\Delta T}{R} \quad (3)$$

όπου η ροή θερμότητας \dot{Q}_x [W], είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασιών ΔT σε ένα σώμα, και αντιστρόφως ανάλογη της θερμικής αντίστασης R του υλικού του. Το αρνητικό πρόσημο ορίζει τη φορά της μεταφοράς θερμότητας από τις υψηλές στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις μπορεί κανείς να συγκρίνει την ικανότητα της θερμότητας να διαπεράσει δύο διαφορετικά υλικά, όπως τον μονωτικό αφρό πολυουρεθάνης ($k = 0.034$ W/m·K) και το χάλυβα ($k = 45.8$ W/m·K), για μια διαφορά θερμοκρασίας 20 βαθμών μεταξύ των δύο επιφανειών, πάχους 5 cm. Προκύπτει ότι το μονωτικό επιτρέπει επιφανειακή ροή θερμότητας 0.013 kW/m², ενώ ο χάλυβας 18.3 kW/m².



Εικόνα 5: Παράδειγμα Μονοδιάστατης Αγωγής θερμότητας [10].



Εικόνα 6: Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα προς μια επιφάνεια [10].

2.2 Μετάδοση Θερμότητας με Συναγωγή.

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή βασίζεται στις ίδιες αρχές με την αγωγή, με την σημαντική διαφορά ότι η θερμότητα μεταφέρεται από ένα ρευστό που βρίσκεται σε κίνηση. Η εξίσωση της μόνιμης κατάστασης, που χαρακτηρίζει το φαινόμενο, είναι ο

νόμος της ψύξης του Newton:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -h \times A \times (T_s - T_\infty)$$

(4)

όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας k του ρευστού, με το πάχος Δl του οριακού στρώματος του ρευστού. Το ρευστό, που βρίσκεται στο οριακό στρώμα, κινείται με μικρή ταχύτητα. Σε αυτή την περιοχή, λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς θερμότητας (Σχήμα 5). Η τιμή του h εξαρτάται από την ταχύτητα και τις ιδιότητες του ρευστού. Επίσης, η διαφορά θερμοκρασίας ΔT είναι μεταξύ της επιφάνειας T_s και της κύριας μάζας του ρευστού T_∞ , μακριά από το οριακό στρώμα. Οι τυπικές τιμές του h , τις οποίες συναντά κανείς στο αντικείμενο της πυροπροστασίας, κυμαίνονται ως εξής [$W/^\circ C \cdot m^2$]: 5-10 για φυσικές ροές αέρα, ~30 για μια στρωτή φλόγα, ~20 για τυρβώδη φλόγα από λιμνάζων καύσιμο, 5-50 για την στήλη της φωτιάς στο ύψος της οροφής, ~10 για ταχύτητα αέρα 2 m/s και ~75 για ταχύτητα αέρα 35 m/s. Χρησιμοποιώντας το h μιας τυπικής τυρβώδους φλόγας (5-10 $W/^\circ C \cdot m^2$) και μια τυπική διαφορά θερμοκρασίας 780 βαθμών, μεταξύ της επιφάνειας και της μέσης θερμοκρασίας της φλόγας, μπορεί κανείς να υπολογίσει ότι η ροή θερμότητας είναι 3,9-7,8 kW/m^2 .

2.3 Μετάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία.

Ο τρίτος τρόπος μεταφοράς θερμότητας είναι η ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ δύο σωμάτων. Όλα τα σώματα, τα οποία έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός, εκπέμπουν εξαιτίας της, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτή βρίσκεται στο μήκος κύματος από 0,1 έως 100 μm , δηλαδή από το ορατό έως το μέσο υπεριώδες φάσμα. Η θερμότητα, που εκπέμπει μέσω ακτινοβολίας ένα σώμα,

περιγράφεται από τον Νόμο Stefan–Boltzmann:

$$q'' = \epsilon \times \sigma \times T^4$$

(5)

όπου q'' είναι η ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας [W/m^2], σ είναι η σταθερά Stefan–Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{11} kW/m^2 K^4$), T η θερμοκρασία του σώματος, που εκπέμπει την ακτινοβολία, και ϵ ο συντελεστής εκπομπής. Ο τελευταίος περιγράφει την ικανότητα ενός σώματος να εκπέμπει την μέγιστη δυνατή ακτινοβολία και κυμαίνεται από το 0 μέχρι 1 (μέλαν σώμα). Σε εφαρμογές πυρκαγιών, ο συντελεστής εκπομπής

είναι τυπικά κοντά στο (0.8 ± 0.2) , για επιφάνειες στερεών και ρευστών. Για αέρια και φλόγες, ο συντελεστής εξαρτάται από το πάχος τους και μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$\boxed{e = 1 - e^{-kl}} \quad (6)$$

όπου l είναι το πάχος της φλόγας και το k είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας της φλόγας, ο οποίος περιγράφει την ικανότητα του μέσου να εμποδίζει την ακτινοβολία να το διαπερνά.

Για τυρβώδεις φλόγες, το k τυπικά κυμαίνεται από το 0,1 έως 1 m^{-1} , ενώ για φλόγες με πάχος μεγαλύτερο των 2m, ο συντελεστής εκπομπής γίνεται πρακτικώς 1. Παρόλα αυτά, στις πολύ μεγάλες φωτιές, η ποσότητα αιθάλης, που παράγεται, εμποδίζει την εκπομπή ακτινοβολίας. Μπορεί κανείς να κάνει μια γενική εκτίμηση του κινδύνου για ανάφλεξη εξ' αποστάσεως, τον οποίο διατρέχει ένα αντικείμενο από την θερμική ακτινοβολία μιας πηγής με δύο προσεγγιστικές εξισώσεις. Η πρώτη αφορά στην ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, στην οποία εκτίθεται ένα αντικείμενο από μια θερμή επιφάνεια, όπως μια φλόγα, που βρίσκεται σε απόσταση (Εικόνα 6).

$$\boxed{\dot{q}'' = e \times \sigma \times T_2^4 \times F_{12}} \quad (7)$$

όπου T_2 η θερμοκρασία της φλόγας και F_{12} ο συντελεστής σχήματος. Αυτός αντιπροσωπεύει το κλάσμα των ακτινών της πηγής, που βλέπει το ίδιο το αντικείμενο. Η τιμή του εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής, τον προσανατολισμό των δύο σωμάτων και την απόσταση μεταξύ τους. Συνήθως, υπολογίζεται από σχετικά διαγράμματα και πίνακες.

Η δεύτερη εξίσωση (ροής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας), αφορά τις περιπτώσεις, όπου το αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον δύο φορές

μεγαλύτερης της διαμέτρου της φλόγας :

(8)

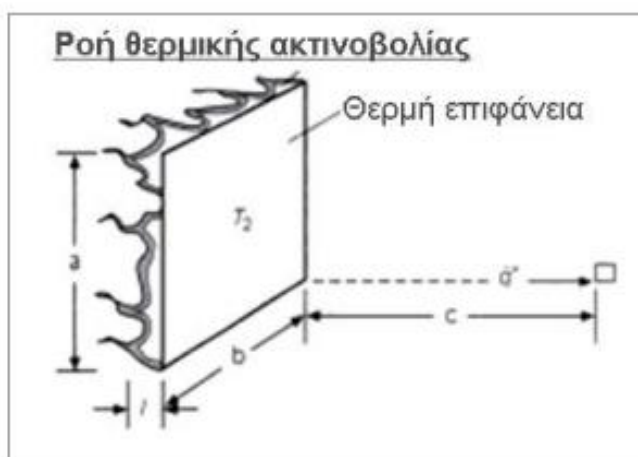
$$\boxed{\dot{q}'' = \frac{X_r \times \dot{Q}}{4\pi r^2}}$$

όπου \dot{Q} είναι ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας ή ισχύς της καύσης [kW],

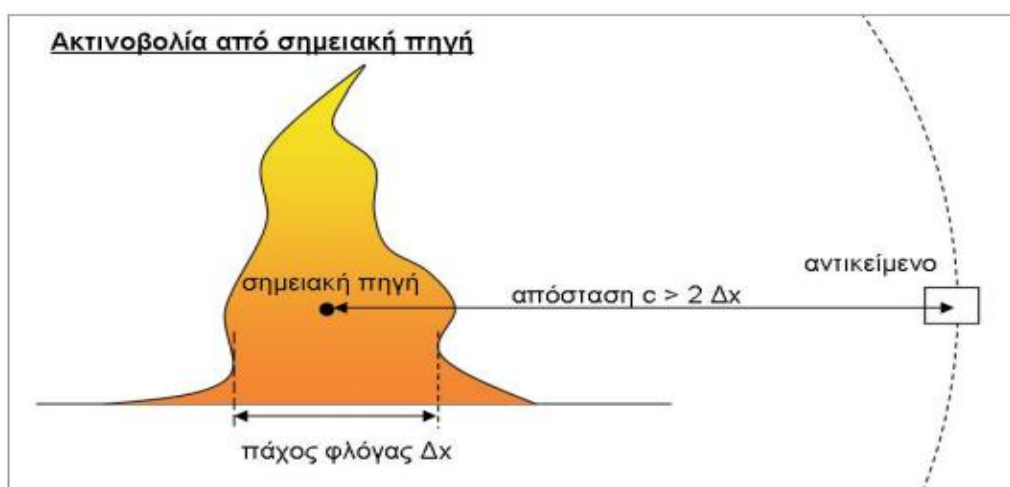
X_r είναι ο λόγος της ενέργειας, μορφής ακτινοβολίας, ως προς τη συνολική ενέργεια που εκλύεται,

r είναι η απόσταση του αντικειμένου από την πηγή, η οποία για αυτή την εξίσωση αντιπροσωπεύεται ως ένα σημείο (Εικ.7).

Η τιμή του X_r , για συγκεκριμένα καύσιμα, βρίσκεται από πίνακες και κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.60, αν και δεν είναι απαραίτητα σταθερές. Η προσεγγιστική αυτή εξίσωση βασίζεται στο ότι η ακτινοβολία, που δέχεται η επιφάνεια μιας σφαίρας με ακτίνα c , από μια σημειακή πηγή στο κέντρο της, είναι ομοιόμορφη. Τέλος, η ροή της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, στην οποία εκτίθεται ένα αντικείμενο, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση πιθανών κινδύνων. Η ακτινοβολία του Ήλιου γίνεται αντιληπτή στη Γη ως περίπου 1 kW/m^2 . Η ίδια επιφανειακή ροή, 1 kW/m^2 , είναι το ελάχιστο όριο, το οποίο μπορεί να προκαλέσει πόνο στο γυμνό δέρμα. Τα 4 kW/m^2 είναι η ελάχιστη θερμική ροή, η οποία μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στο γυμνό δέρμα, και τα 10 kW/m^2 το ελάχιστο όριο για την πρόκληση ανάφλεξης.



Εικόνα 7: Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από μια θερμή επιφάνεια (φλόγα) σε ένα αντικείμενο σε απόσταση [10].



Εικόνα 8: Ομοιόμορφη ακτινοβολία από σημειακή πηγή, η οποία αντιπροσωπεύει μια φλόγα [10].

2.4 Ανάγκη για μια Ολοκληρωτική Προσέγγιση.

Η συμπεριφορά δομικών συστημάτων ή στοιχείων/προϊόντων σε συνθήκες φωτιάς μπορεί να αξιολογηθεί με υπολογιστικά εργαλεία (προσομοίωση) και εργαστηριακές δοκιμές ανηγμένες σε μεγάλη κλίμακα των αποτελεσμάτων των δοκιμών, καθώς και με την κρίση και εμπειρία του μηχανικού. Το πρόβλημα της φωτιάς είναι πολυσύνθετο έτσι ώστε να απαιτείται συνδυασμός των παραπάνω εργαλείων [2].

2.4.1 Υπολογιστικά εργαλεία

Η χρήση υπολογιστικών εργαλείων είναι ένας γρήγορος και σχετικά φτηνός τρόπος - σε σχέση με τα πειράματα - να γίνει αντιληπτό και να προσδιοριστεί το φαινόμενο που συντελείται σε συνθήκες φωτιάς και να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των υλικών χρησιμοποιώντας διαφορετικά σενάρια διάδοσης φωτιάς. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων για προσομοίωση των φυσικών φαινομένων που επηρεάζουν την διάδοση φωτιάς στα δομικά υλικά κατασκευών με την ευρεία έννοια. Εντούτοις, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση των υπολογιστικών μεθόδων που μπορούν όμως να ξεπεραστούν με την σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές ελέγχου.

Οι υπάρχοντες περιορισμοί συμπεριλαμβάνουν:

- την περιορισμένη γνώση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες των υλικών που χρησιμοποιούνται στα δομικά στοιχεία,
- τον περιορισμένο αριθμό των τεκμηριωμένων υπολογιστικών μεθόδων. (Κυρίως είναι διαθέσιμες για ανεξάρτητα φέροντα στοιχεία από χάλυβα, για κατασκευές από τσιμέντο ή ξύλο, ενώ ο αριθμός των μεθόδων για ολόκληρες κατασκευές ή διαχωριστικά στοιχεία είναι περιορισμένος),
- τη δυσκολία μοντελοποίησης τρισδιάστατων κατασκευών που έχουν εκτεθεί στη φωτιά. Είναι σήμερα εφικτή με τη χρήση εξειδικευμένων υπολογιστικών προγραμμάτων με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία ή τους πεπερασμένους όγκους.

Η έλλειψη μεθόδων ακριβούς μοντελοποίησης μερικών φυσικών φαινομένων όπως εσωτερική καύση, θρυμματισμός, μεταφορά μάζας και μετακίνηση νερού εντός των δομικών στοιχείων [2].

2.4.2 Εργαστηριακές Δοκιμές

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα πειράματα σχετικά με την αντίδραση ή αντίσταση στη φωτιά έχουν μεγάλο κόστος, χαμηλή επαναληψιμότητα, πιο χαμηλή αναπαραγωγιμότητα και επομένως μικρή ευελιξία προσαρμογής. Επομένως, είναι γενικά απαραίτητο να μειωθεί ο αριθμός, το μέγεθος και ο όγκος καθώς και η πολυπλοκότητα των τμημάτων μιας κατασκευής που πρέπει να υποβληθούν σε πειραματικές δοκιμές.

2.4.3 Κρίση του Μηχανικού.

Οι πειραματιστές (ομάδες δοκιμών), προκειμένου να διαμορφώσουν μία άποψη και να πραγματοποιήσουν πλήρη εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς στη φωτιά, χρησιμοποιούν όλες τις πληροφορίες που διατίθενται από τα πειράματα ή και από υπολογισμούς καθώς και γνώσεις από συνθήκες πραγματικής φωτιάς. Από τις μεγαλύτερες ανησυχίες των εμπειρογνομόνων φωτιάς είναι η αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων διαφορετικών θερμικών επιδράσεων (ρυθμός θέρμανσης, μέγιστη επιτευχθείσα θερμοκρασία, φάση ψύξης) και των φυσικών φαινομένων, τα οποία δεν μπορούν ακόμα να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια.

Η παραδοσιακή άποψη της «αντίστασης της φωτιάς» που βασίζεται σε στατικά «παθητικά» εύρωστα στοιχεία πρέπει να επεκταθεί σε μια συμπληρωματική σχέση με «ενεργητικά» μέτρα πυροπροστασίας, για να προσφέρεται ασφάλεια σε πραγματικά κτίρια, σε πραγματικές συνθήκες φωτιάς. Κάτω από αυτό το πρίσμα πρέπει να εξασφαλίζονται:

- ∅ Διαχωρισμός της φωτιάς – Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η φωτιά, συμπεριλαμβανόμενου του καπνού και της θερμότητας, δεν μπορούν να διαδοθούν από ένα σημείο σε άλλο, σε χρόνο μικρότερο από αυτόν που προκαθορίζεται,
- ∅ Διαχωρισμός του καπνού - Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η διάδοση του καπνού είτε εμποδίζεται τελείως είτε περιορίζεται σημαντικά. Ο καπνός μπορεί να καλύψει πολύ γρήγορα μεγάλες αποστάσεις στο εσωτερικό ενός χώρου (π.χ

καμπίνα αεροσκάφους ή άλλους κρυφούς χώρους), όπως και να εμφανισθεί σε μη αναμενόμενα σημεία,

- ∅ Αντοχή του δομικού συστήματος - Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το δομικό σύστημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αποτελεσματικά κατά τη διάρκεια της φωτιάς αλλά και για ένα χρονικό διάστημα μετά το τερματισμό του φαινομένου.

Μία ορθολογική προσέγγιση για το σχεδιασμό της αντίδρασης και αντίστασης στη φωτιά είναι ο καθορισμός καθαρών αντικειμενικών στόχων για όλη την πυροπροστασία, και η εξέταση του ρόλου της αντίδρασης και αντίστασης στη φωτιά ώστε να συγκλίνει με αυτούς τους στόχους, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές εκδοχές.

Τα οφέλη που προκύπτουν από μία τέτοια προσέγγιση συμπεριλαμβάνουν:

- ∅ την παροχή καλύτερης και περισσότερο αξιόπιστης πυροπροστασίας,
- ∅ εφαρμογή μέτρων πυρασφάλειας με μικρότερο αντικειμενικό κόστος,
- ∅ περισσότερες δυνατότητες και εξειδίκευση σχετικά με την επιλογή μέτρων ασφάλειας και προστασίας που μπορούν να αποδώσουν έναν καλύτερο σχεδιασμό της κατασκευής [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Υλικά Αεροσκαφών – Σύνθετα Υλικά.

Το υλικό που παρατίθεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί έχει ληφθεί από την ηλεκτρονική διεύθυνση http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html (πρόσβαση ελεύθερη) όπου περιγράφονται γενικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών καθώς και τα διάφορα είδη υφασμάτων και άλλα στρωματοποιημένα υλικά σάντουιτς [11].

Η σχεδίαση και κατασκευή της πτητικής μηχανής προϋποθέτει την λύση σειράς προβλημάτων στους τομείς της αεροδυναμικής, της μηχανικής πτήσης, της δομικής ανάλυσης, των συστημάτων. Πρώτιστης σημασίας όμως είναι η επιλογή των κατάλληλων υλικών των οποίων η αξιοπιστία και η αναλογία της αντοχής προς το βάρος τους τα καθιστά ικανά να χαρακτηριστούν ως αεροπορικά υλικά ώστε να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή της μηχανής.

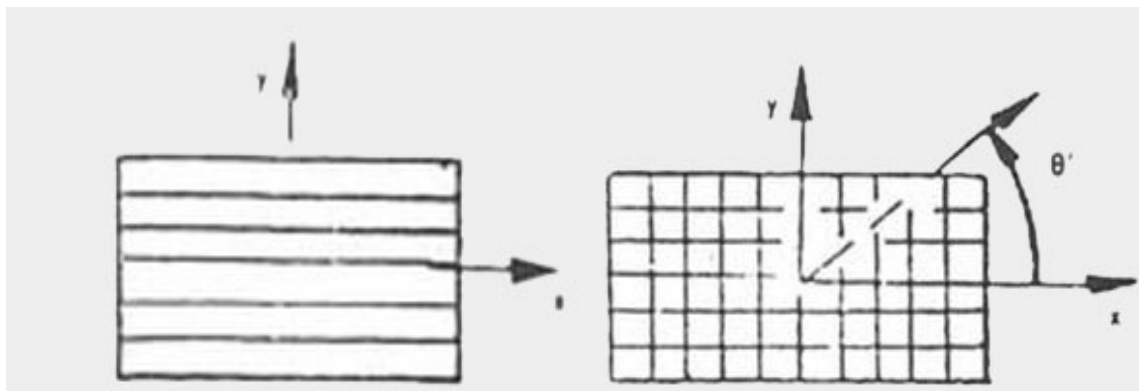
Η έρευνα επί των αεροπορικών υλικών άρχισε συγχρόνως με τις προσπάθειες του ανθρώπου για την κατασκευή της μηχανής η οποία θα του επέτρεπε να πετάξει. Τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις πρωτοπόρες πετομηχανές, ως γνωστό ήταν το ξύλο και το ύφασμα. Δύο υλικά τα οποία και σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή ελαφρών και υπερελαφρών πτητικών μηχανών (ΥΠΜ). Τα μεταλλικά υλικά, όπως τα κράματα του αλουμινίου, μαγνησίου, τιτανίου και τελευταία του αλουμινίου - λιθίου, είναι εκείνα των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά συνετέλεσαν στη καθιέρωση τους ως κύρια αεροπορικά δομικά υλικά και βάσει αυτών κατασκευάστηκε ο μεγαλύτερος αριθμός αεροναυπηγικών προϊόντων [11].

Η καθιέρωση αυτών των ελαφρών μεταλλικών κραμάτων, δεν μπόρεσε ποτέ να σταματήσει την έρευνα για ανεύρεση υλικών με τεχνικά χαρακτηριστικά ακόμα καλύτερα καθώς και κατασκευαστικών μεθόδων που θα επέτρεπαν την τόσο αναγκαία εξοικονόμηση βάρους στην αεροπορική κατασκευή. Σε αυτή την έρευνα των υλικών, η

χημεία έκανε μεγαλύτερα βήματα από ότι η μεταλλουργία, παρουσιάζοντας ένα πλήθος προϊόντων τα οποία αρχίζουν από τις ειδικές αεροπορικές κόλλες, τις εποξειδικές ρητίνες, τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα, τις πολυουρεθάνες, τις πολυστερίνες, τα θερμοπλαστικά και καταλήγουν στα ειδικά κεραμικά υλικά. Με τον κατάλληλο συνδυασμό ορισμένων εξ' αυτών των υλικών είναι δυνατόν να αποκτηθεί ένα "σύνθετο υλικό" το οποίο θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά όπως, αντοχή στα στατικά ή δυναμικά φορτία, ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στις καιρικές συνθήκες, θερμική αγωγιμότητα, ακουστική μόνωση, ειδικό βάρος, μέτρο ελαστικότητας κτλ., με τιμές πολύ πιο επιθυμητές από εκείνες των μεμονωμένων υλικών που το συνθέτουν. Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά είναι τα διάφορα υφάσματα ή νήματα εμποτισμένα με ρητίνες και τα στρωματοειδή (σάντουιτς) τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια [11].

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Σύνθετων Υλικών.

Εξ' ορισμού, σύνθετα υλικά, ονομάζονται τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την απόκτηση καλύτερων και χρησιμότερων ιδιοτήτων. Το σύνθετο υλικό είναι ανομοιογενές και ανισότροπο. Ανομοιογενές είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές από σημείο σε σημείο, ενώ το ανισότροπο συμπεριφέρεται με διαφορετική αντοχή όταν το φορτίο εφαρμόζεται υπό διαφορετικές διευθύνσεις. Επομένως τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι συναρτήσεις του προσανατολισμού σε έκαστο σημείο του υλικού. Για να αποκτηθεί ένα ισότροπο σύνθετο υλικό, επί παραδείγματι από υαλοϋφασμα, είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν περισσότερες στρώσεις υφάσματος υπό διαφορετικές κύριες διευθύνσεις αντοχής έτσι ώστε το υλικό που θα προκύψει να παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά υπό οποιαδήποτε διεύθυνση του εφαρμοστεί το φορτίο. Αντιθέτως με τα σύνθετα υλικά, τα μεταλλικά υλικά θεωρούνται ομοιογενή και ισότροπα [11].



Εικόνα 9: Σχηματική παράσταση υφάσματος με (α) νήματα κατά μία μόνο διεύθυνση, και (β) με νήματα κατά δύο διευθύνσεις την διαμήκη (x) και την εγκάρσια (y).

Στον Πίνακα 3 καταγράφονται εταιρείες κατασκευής αεροσκαφών και περιεκτικότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών από το 1985 έως το 2000 όπου το σημαντικότερο χαρακτηριστικό είναι η σημαντική αύξηση της χρήσης των σύνθετων υλικών με ταυτόχρονη μείωση των παραδοσιακών υλικών όπως χάλυβα και αλουμίνιο.

Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι ενώ και τα μεταλλικά κράματα προκύπτουν από τη σύνθεση διαφορετικών μετάλλων, αυτή η διαδικασία γίνεται σε μικροσκοπική κλίμακα και έτσι μακροσκοπικώς παρουσιάζονται και λαμβάνονται ως ομοιογενή υλικά. Ένα πολύ γνωστό σύνθετο υλικό είναι εκείνο το οποίο αποκτάται εμποτίζοντας υαλοϋφασμα με πολυεστερική ή εποξειδική ρητίνη. Όταν η ρητίνη στερεοποιηθεί, τότε το σύνθετο υλικό που θα προκύψει θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία θα είναι συναρτήσεις των δύο επιμέρους υλικών (υαλοϋφάσματος - ρητίνης), του τρόπου εμποτισμού, της αναλογίας βάρους υφάσματος/ρητίνης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό την οποία έγινε η εργασία, της θερμοκρασίας υπό την οποία θα γίνει η σκλήρυνση της ρητίνης, τη διεύθυνση των κυρίων νημάτων του υφάσματος σε σχέση με την διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου, κτλ [11].

Πίνακας 3: Ενδεικτικός πίνακας εξέλιξης της χρήσης των υλικών στις αεροπορικές κατασκευές [12,13].

Κατασκευαστική Εταιρεία	Airbus Industry -		McDonnell-Douglas		Boeing -	
	1985	2000	1985	2000	1985	2000
Υλικό / έτος						
Αλουμίνιο	76%	35%	82%	-	80%	11%
Χάλυβας	8%	6%	13%	20%	14%	11%
Τιτάνιο	6%	9%	4%	3%	2%	12%
Σύνθετα	5%	46%	1%	13%	3%	65%
Αλουμίνιο/Λίθιο	-	-	-	34%	-	-
Αλουμίνιο/Λίθιο	-	-	-	30%	-	-
Διάφορα	5%	4%	-	-	1%	1%

Πίνακας 4: Μείωση της μάζας των αεροσκαφών λόγω αντικατάστασης υλικών [12,13].

Αεροσκάφος	Συνολικό βάρος σύνθετων υλικών	Συνολικό κέρδος βάρους
A300-310	6.200 kg	1.400 kg
A320	4.500	1.100
ATR 42	900	190
ATR 72	1.700	360
*ATR XX	2.800	660

* Νέος τύπος, υπό εξέλιξη, της σειράς των ATR.

Γίνεται επομένως σαφές ότι εάν το σύνθετο υλικό δεν προμηθεύεται έτοιμο αλλά κατασκευάζεται από τον εκάστοτε χρήστη, τότε είναι πολύ πιθανό να παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά από χρήστη σε χρήστη. Αυτό βέβαια δε συμβαίνει με τα μεταλλικά υλικά τα οποία ο χρήστης προμηθεύεται έτοιμα από τον παραγωγό και πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Είναι σαφές ότι για να αποκτηθούν οι μέγιστες επιθυμητές τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού, απαιτείται πολύ μεγάλη εμπειρία τόσο στην επιλογή των δύο υπό σύνθεση υλικών, όσο και στη διεργασία σύνθεσης [11].

Εάν δεν υπάρχει εμπειρία τότε τα τεχνικά χαρακτηριστικά και γενικώς η συμπεριφορά του προκύψαντος σύνθετου υλικού θα είναι σίγουρα τυχαία. Οι δυσκολίες που συναντώνται ειδικά στον σωστό εμποτισμό του υφάσματος με την κατάλληλα και άριστα παρασκευασμένη ρητίνη, τείνουν να μειωθούν με την εμφάνιση των προεμποτισμένων υφασμάτων. Αυτά τα υφάσματα αφού εμποτιστούν με τη σωστή ποιότητα και ποσότητα ρητίνης, τοποθετούνται σε ξηρό πάγο όπου υπό τη χαμηλή θερμοκρασία η σκλήρυνση της ρητίνης σταματά σε μία προκαθορισμένη φάση. Όταν αυτό το εργοστασιακά προεμποτισμένο, σύνθετο υλικό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τότε μεταφέρεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπου και συνεχίζεται η σκλήρυνση της ρητίνης [11].

3.2 Τεχνική ορολογία κατά τη σύνθεση νέων υλικών.

Για την ανάλυση της δομής των υλικών που θα συζητηθούν στη συνέχεια, είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να περιγραφούν οι συνηθέστεροι όροι που αναφέρονται στη διαδικασία σύνθεσης και δομής των νέων υλικών. Πιο αναλυτικά

- ∅ **Σύνθετο υλικό** χαρακτηρίζεται το υλικό που προκύπτει από τη σύνθεση, ή συνεργασία, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων διαφορετικών υλικών με σκοπό την απόκτηση υψηλών, επιλεγμένων, μηχανικών ιδιοτήτων. Τα σύνθετα υλικά είναι ανομοιογενή και ανισότροπα. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα σύνθετων υλικών είναι, το υαλοϋφασμα εμποτισμένο με εποξειδική ή άλλου είδους ρητίνη, το οπλισμένο σκυρόδεμα (σιδερόβεργες εντός σκυροδέματος), τα ανθρακονήματα εμποτισμένα με ρητίνη, τα στρωματοειδή (σάντουιτς) με πυρήνα μεταλλικό ή άλλο υλικό και επιστρώσεις ανάλογου υλικού.
- ∅ **Συνθετικό Υλικό** ονομάζεται το υλικό που προκύπτει από την χημική - μοριακή - ένωση, δύο ή περισσότερων υλικών, με σκοπό την απόκτηση συγκεκριμένων χημικών ή μηχανικών ιδιοτήτων. Τα συνθετικά υλικά είναι ομοιογενή και ισότροπα. Παραδείγματα συνθετικών είναι τα συνήθη πλαστικά οικιακής ή άλλης χρήσης, τα ελαστικά, τα συνθετικά λιπαντικά έλαια.
- ∅ **Ομοιογενές** καλείται το υλικό που έχει τις ίδιες φυσικές ή χημικές ιδιότητες σε οποιοδήποτε σημείο της μάζας του. Σε διαφορετική περίπτωση ονομάζεται "ανομοιογενές".

- ∅ **Ισότροπο** χαρακτηρίζεται ένα υλικό όταν παρουσιάζει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τα μέταλλα και τα κράματα αυτών, λαμβάνονται ως ομοιογενή υλικά διότι έχουν την αυτή πυκνότητα (ή ειδικό βάρος), μαγνητίζονται ή όχι, έχουν το ίδιο χρώμα κτλ. σε οποιοδήποτε σημείο της μάζας τους. Είναι επίσης ισότροπα διότι παρουσιάζουν την ίδια αντοχή και συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο, όταν τους εφαρμοστεί φορτίο υπό οποιαδήποτε κατεύθυνση. **Ορθότροπο** είναι το υλικό που έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες κατά διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους.
- ∅ Ως προς τη δομή, ένα υλικό αναφέρεται ως **στρωματοειδές** (σάντουιτς), όταν αποτελείται από πυρήνα του οποίου οι εξωτερικές επιφάνειες επιστρώνονται με υλικό που έχει συνήθως διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του πυρήνα. Οι επιστρώσεις πρέπει να διαθέτουν μεγάλη αντοχή στα φορτία εφελκυσμού ή θλίψης, ενώ ο πυρήνας στα διατμητικά φορτία.
- ∅ **Επίστρωση** είναι το υλικό που επικολλάται στις επιφάνειες του πυρήνα έτσι ώστε να αποκτηθεί το σύνθετο στρωματοειδές υλικό. Το μέσο, οργανικό, χημικό προϊόν, με το οποίο εμποτίζεται το υαλοϋφασμα ή τα ανθρακονήματα είναι η **ρητίνη**. Με τη στερεοποίηση της ρητίνης αποκτάται το σύνθετο υλικό. Συνηθέστεροι τύποι ρητινών είναι οι πολυεστερικές και οι εποξειδικές.
- ∅ Η παράμετρος που χαρακτηρίζει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται στις εξωτερικές δυνάμεις που τείνουν να το επιμηκύνουν ή να το συμπιέσουν (εφελκυσμός – θλίψη) είναι το γνωστό **μέτρο ελαστικότητας**. Όσο μικρότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας τόσο περισσότερο ελαστικό είναι το υλικό [11].

3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Σύνθετων Νημάτων/Ρητίνης.

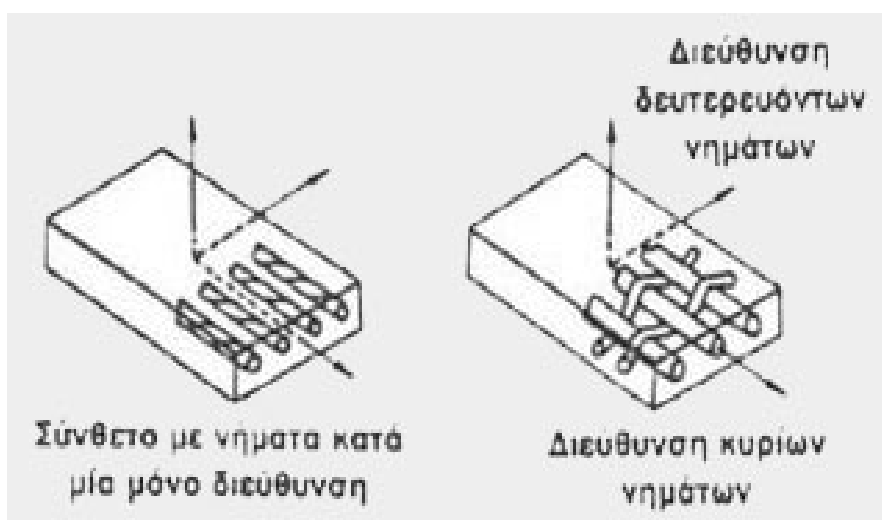
Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά αποκτώνται με υφάσματα ή νήματα εμποτισμένα σε ρητίνη. Τα υαλοϋφάσματα, τα ανθρακονήματα, το Kevlar της DuPont και άλλα γνωστά εμπορικά ονόματα, συνιστούν τη μεγαλύτερη οικογένεια των σύνθετων υλικών. Ανάλογα με τη δομή του σύνθετου υλικού που δημιουργείται από υφάσματα ή νήματα ειδικότερα, αυτό χαρακτηρίζεται ως:

- ∅ **Ύφασμα μονής διεύθυνσης**, στο οποίο όλα τα νήματα είναι παράλληλα μεταξύ τους. Η πλέξη επιτυγχάνεται με κλωστές συγκράτησης, αμελητέας σημασίας, που έχουν διεύθυνση κάθετη προς τα νήματα.

- ∅ **Ύφασμα διπλής διεύθυνσης**, στο οποίο τα νήματα είναι διευθετημένα σε δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Η αντοχή του υφάσματος αυτού, είναι ίδια και κατά τις δύο, κάθετες μεταξύ τους, διευθύνσεις.
- ∅ **Υαλοβάμβακας**, που ως τέτοιο υλικό αναφέρεται το σύνολο από υαλονήματα ή ίνες ύαλου χωρίς ουδεμίας μορφής, πλέξη. Εμποτιζόμενος με ρητίνη αποκτάται ένα σύνθετο υλικό ιδανικό για επίγειες - κατασκευές.
- ∅ **Προεμποτισμένο ύφασμα** είναι το ύφασμα, ή απλώς νήματα, που εμποτισμένα με τη σωστή ποιότητα και ποσότητα ρητίνης διατηρούνται σε ξηρό πάγο, όπου η σκλήρυνση της ρητίνης σταματά σε μία προκαθορισμένη φάση. Όταν το προεμποτισμένο, εύπλαστο, ύφασμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τότε μεταφέρεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπου και επέρχεται η πλήρης σύνθεση του σύνθετου υλικού.
- ∅ **Πιεστικός θερμοθάλαμος** είναι ο κλειστός χώρος (κυλινδρικής μορφής) εντός του οποίου δημιουργούνται συνθήκες πίεσης (θετικής πίεσης ή κενού) και θερμοκρασίας, κατάλληλες για τη σύνθεση του σύνθετου υλικού.
- ∅ **Πυρήνας** είναι το υλικό με μικρό ειδικό βάρος κατάλληλο για τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων στο σύνθετο σάντουιτς.
- ∅ **Κυψελοειδής πυρήνας** είναι το υλικό με γεωμετρία παρόμοια της φυσικής κυψέλης των μελισσών, το οποίο χρησιμοποιείται ως πυρήνας στα σύνθετα στρωματοειδή (σάντουιτς).
- ∅ **Επικάλυψη** είναι το υλικό, σε μορφή ελάσματος, που καλύπτει την κύρια δομή, του αεροσκάφους (άτρακτο, πτέρυγα, ουραίο πτέρωμα, κτλ.) και μέσω αυτού διαμορφώνονται οι αεροδυναμικές επιφάνειες. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι έλασμα ξύλου, ύφασμα, έλασμα κράματος αλουμινίου, σύνθετο υλικό υαλοϋφασμα/ρητίνη, σύνθετο σάντουιτς κτλ.
- ∅ **Θερμοπλαστικά** είναι τα οργανικά υλικά χαμηλού κόστους, με μικρό ειδικό θάρος και μεγάλη αντοχή στη θερμοκρασία. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα θερμοπλαστικά με βάση τον πολυεθέρα. Είναι υλικά που έχουν πολύ καλές ιδιότητες αντοχής στη κρούση (είναι κατά 8-10 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του γραφίτη/εποξειδική ρητίνη), παρέχουν δυνατότητες οικονομικής παραγωγής, δεν έχουν περιορισμούς στις συνθήκες αποθήκευσης και μακροζωίας, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση από το νερό και άλλα υγρά και το σπουδαιότερο διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες στις υψηλές θερμοκρασίες (διατηρούν το

90% του μέτρου ελαστικότητας των (E) στους 150° C. Προς το παρόν όμως τα σύνθετα υλικά και όχι τα θερμοπλαστικά έχουν το προβάδισμα στις αεροναυπηγικές κατασκευές [11-13].

Το βασικότερο πλεονέκτημα των σύνθετων έναντι άλλων υλικών (μεταλλικών, πλαστικών, κεραμικών), είναι η δυνατότητα απόκτησης της επιθυμητής αντοχής κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου μέσω της απλής διεύθυνσης, προσανατολισμού, των νημάτων του υφάσματος. Εάν η διεύθυνση του φορτίου είναι σταθερή, τότε είναι εύλογο να χρησιμοποιηθεί ύφασμα μίας κύριας διεύθυνσης στο οποίο τα κύρια νήματα είναι τοποθετημένα κατά μία μόνο διεύθυνση έτσι ώστε η μέγιστη αντοχή του υφάσματος να είναι κατά τη διεύθυνση αυτή. Σε αυτό τον τύπο υφάσματος υπάρχουν και λίγα δευτερεύοντα, αμελητέας σημασίας νήματα κάθετα προς την κύρια διεύθυνση με σκοπό να συγκρατούν με απλή πλέξη τα κύρια νήματα. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι στο επίπεδο και κατά δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε στην κατασκευή του σύνθετου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ύφασμα με κύρια νήματα τοποθετημένα κατά δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Σ' αυτή την περίπτωση ο αριθμός νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι ακριβώς ίσος με τον αριθμό νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά τη διαμήκη διεύθυνση [11].



Εικόνα 10: Πλέξη υφάσματος μονής και διπλής διεύθυνσης [11].

Επομένως και η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις και είναι η μέγιστη. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου της ορθής γωνίας που σχηματίζουν τα κύρια νήματα, δηλαδή κατά τη διεύθυνση που σχηματίζει γωνία $\theta^\circ = 45^\circ$ με τις κύριες διευθύνσεις. Ένα τέτοιο επίπεδο, σύνθετο υλικό, που παρουσιάζει την ίδια αντοχή κατά διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους και ονομάζεται "**ορθότροπο**". Παρομοίως ονομάζεται ορθότροπο και το τριδιάστατο σύνθετο υλικό που έχει τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων ελαστικότητας του και γενικότερα των μηχανικών του ιδιοτήτων. Το σύνθετο υλικό που υπό οποιαδήποτε διεύθυνση (ή γωνία θ) στο επίπεδο του παρουσιάζει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες, ονομάζεται δισδιάστατο "**ισότροπο**" υλικό. Τέτοιο σύνθετο υλικό μπορεί να κατασκευαστεί τοποθετώντας πολλές στρώσεις υφάσματος με τις κύριες διευθύνσεις των νημάτων κατάλληλα διευθετημένες έτσι ώστε το σύνθετο που θα προκύψει να συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο υπό οποιαδήποτε διεύθυνση στο επίπεδο (xy) του εφαρμοστεί το φορτίο.

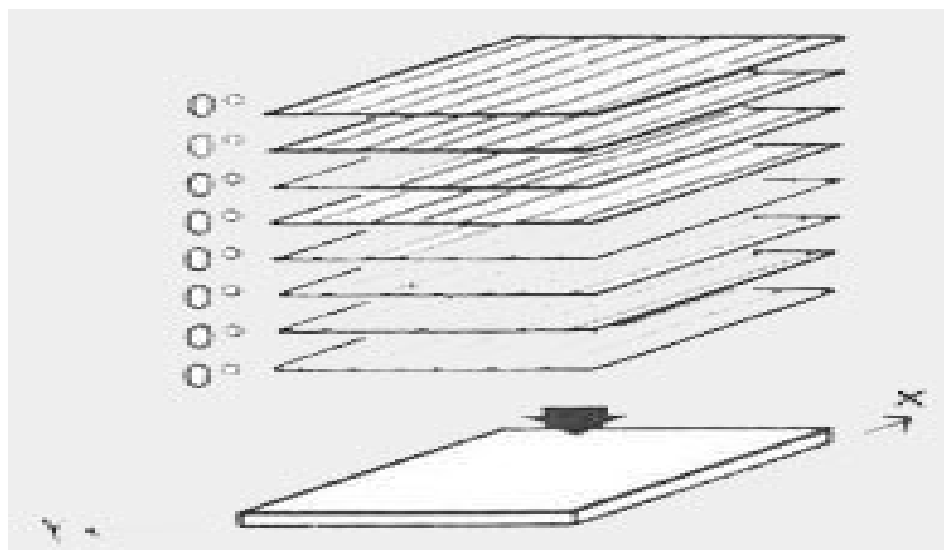
Συνήθως ένα "**σχεδόν-ισότροπο**" σύνθετο υλικό μπορεί να αποκτηθεί τοποθετώντας κατ' ελάχιστο τρία στρώματα ορθότροπου υφάσματος, με το διαμήκη άξονα να σχηματίζει γωνίες $+60^\circ$, 0° , -60° , με τον άξονα αναφοράς x, όπου 0° , σχηματίζει ο διαμήκης άξονας του μεσαίου στρώματος με τον άξονα x. Το υλικό που παρουσιάζει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες υπό οποιαδήποτε διεύθυνση στο χώρο, ονομάζεται "**τέλειο ισότροπο**" ή απλώς "**ισότροπο υλικό**". Ισότροπα υλικά είναι τα μέταλλα, ενώ δεν μπορούν να γίνουν τα σύνθετα των οποίων σε αυτή την περίπτωση τα νήματα θα έπρεπε να είναι προσανατολισμένα προς κάθε διεύθυνση στο χώρο, πράγμα αδύνατο [11].

Είναι ευνόητο επομένως ότι τα σύνθετα υλικά είναι γενικώς "**ανισότροπα**" υλικά, ενώ μπορούν να γίνουν με τον κατάλληλο αριθμό στρωμάτων και διεύθυνση των νημάτων, υλικά "δισδιάστατα ισότροπα" ή αλλιώς υλικά "τριδιάστατα σχεδόν ισότροπα". Η ρητίνη παίζει σημαντικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου. Η ποσοστιαία αναλογία του βάρους της ρητίνης προς το συνολικό βάρος του σύνθετου (ρητίνης και υφάσματος) είναι ένα βασικό στοιχείο της σύνθεσης. Συνήθως το ποσοστό του βάρους της ρητίνης κυμαίνεται σε ποσοστό 25-50% του συνολικού βάρους. Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι ρητινών, οι πουεστερικές και οι εποξειδικές. Οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες από τις

εποξειδικές και γι' αυτό δε χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές, αλλά αντιθέτως είναι ο κύριος τύπος ρητίνης για τις ναυτικές κατασκευές. Μερικές γνωστές εποξειδικές ρητίνες, εμποτισμού του εμπορίου είναι η Shell Epon 828, η Ciba Geigy 604, η Dow Der 331, η Safe-T-Poxy 2410 της Arco, η EA 9309 της Hysol, και άλλες.

Στον Πίνακα 5, δίδονται ορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων νημάτων και σύνθετων υλικών. Όπου δεν αναφέρεται η εποξειδική ρητίνη τότε τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι του νήματος μόνο. Τα πηλίκα E/γ (Ειδικό μέτρο ελαστικότητας) και σ/γ (ειδική τάση), είναι βασικές παράμετροι για τη σωστή επιλογή του υλικού στην αεροπορική κατασκευή (όπου γ είναι το ειδικό βάρος). Υπάρχουν υλικά τα οποία έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E) και άλλα που έχουν υψηλή τιμή της μέγιστης τάσης εφελκυσμού (σ). Η κλίση της καμπύλης (σ - ϵ), τάσης (σ) - επιμήκυνσης (ϵ), προσδιορίζει την ελαστικότητα του υλικού.

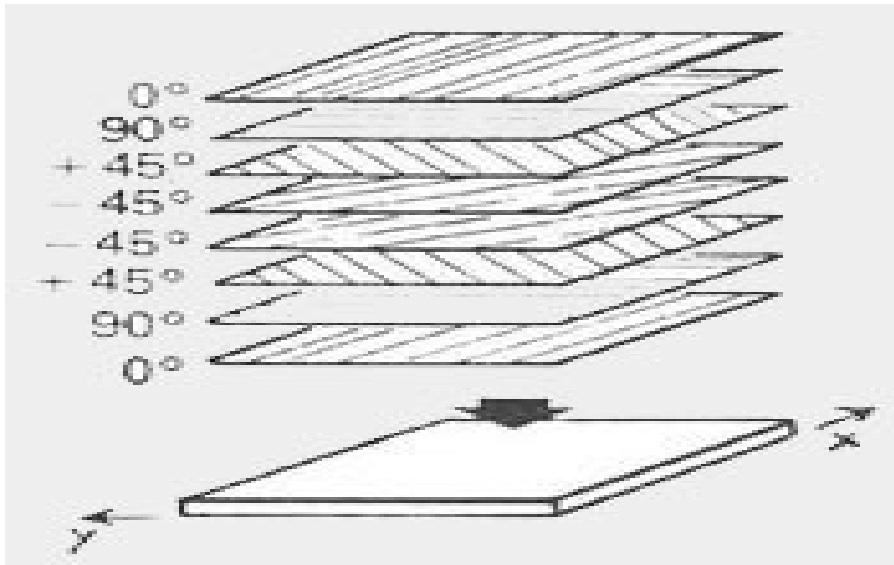
Για σύγκριση στον πίνακα αναφέρονται και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γνωστότερων αεροπορικών μεταλλικών υλικών. Τα συνηθέστερα και χαμηλότερου κόστους σύνθετα υλικά που συναντώνται στις απλές αεροπορικές κατασκευές είναι τα E-Υαλοϋφασμα/Εποξειδική και τα S-Υαλοϋφασμα/Εποξειδική. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση εφελκυσμού των υαλονημάτων μόνο είναι σχεδόν επταπλάσιες του κράματος αλουμινίου AL 7075-T6.



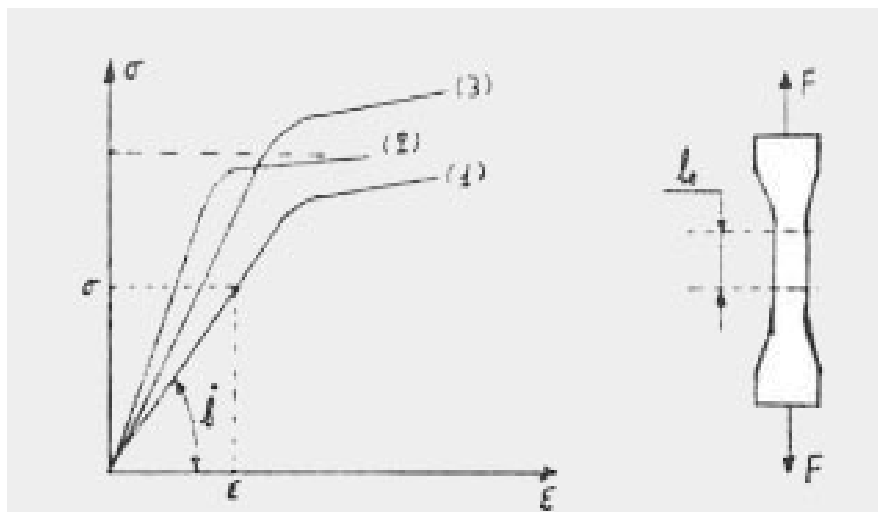
Εικόνα 11: Κατασκευή συνθέτου μιας διεύθυνσης με 8 στρώσεις νημάτων [11].

Πίνακας 5: Μηχανικά χαρακτηριστικά νημάτων και σύνθετων υλικών.

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας E (kg/mm ²)	Μέγιστη τάση εφελκυσμού σ (kg/mm ²)	Ειδικό βάρος (Kg/m ³)	Ειδικό μέτρο E/γ (m) 10 ⁵	Ειδική τάση σ/γ (m) 10 ⁵
E- Υαλονήματα	7350	320	2550	2.9	1.25
S- Υαλονήματα	8400	380	2490	3.4	1.53
E-Υαλονήματα Εποξ.	5250	140	1940	2.7	0.72
S-Υαλονήματα Εποξ.	5250	210	1940	2.7	1.08
Κέβλαρ 29	6300	350	1440	4.4	2.43
Κέβλαρ 49	14000	350	1660	8.4	2.11
Κέβλαρ 49/Εποξ.	8400	200	1520	5.5	1.32
HM Νήματα Γραφίτη	38500	210	1910	20.2	1.10
HS Νήματα Γραφίτη	24500	245	1770	13.8	1.38
HM Γραφίτη Εποξ.	21000	95	1605	13.1	0.59
HS Γραφίτη Εποξ.	15400	145	1495	10.3	0.97
Νήματα Βορίου	42000	280	2630	16.0	1.06
Νήματα Βορίου/Εποξ.	21700	155	2075	10.5	0.75
Αλουμίνιο 7075-T6	7200	55	2685	2.7	0.20
Αλουμίνιο 6061-T6	7200	30	2685	2.7	0.11
Τιτανίο Ti-6Al-4V	11200	105	4430	2.5	0.24
Χρώμιο Μολυβδενιούχο	20300	95	7830	2.6	0.12
Χάλυβας 4130					



Εικόνα 12: Κατασκευή συνθέτου σχεδόν ισότροπου, με 8 στρώσεις νημάτων κατά διευθύνσεις 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° [11].



Εικόνα 13: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης [11].

Στην Εικ.12 δίνονται διαγράμματα της μέγιστης τάσης εφελκυσμού ως συνάρτηση της επιμήκυνσης ϵ . Οι καμπύλες δείχνουν διαφορετική συμπεριφορά. Για παράδειγμα η καμπύλη (1) δείχνει ότι μικρή επιμήκυνση συνοδεύεται από μικρή μέγιστη τάση εφελκυσμού. Στην καμπύλη (2) φαίνεται ότι πολύ μεγάλη επιμήκυνση αντιστοιχεί σε μέτριες τιμές της μέγιστης τάσης εφελκυσμού. Τέλος η καμπύλη (3) υποδεικνύει ότι μεσαίες τιμές της επιμήκυνσης αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλη τιμή της

μέγιστης τάσης εφελκυσμού. Στην Εικόνα 12 οι καμπύλες εκφράζονται ως συνάρτηση της σχετικής επιμήκυνσης, οι τιμές της οποίας προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (9)$$

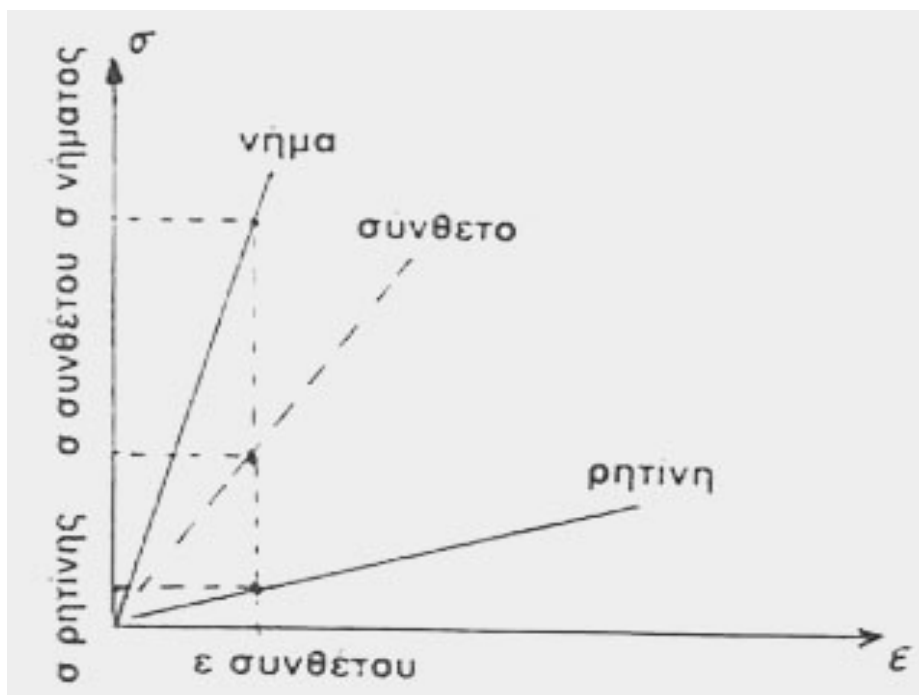
όπου l_0 είναι το αρχικό μήκος αναφοράς του δοκιμίου (mm),

l = τιμή του μήκους αναφοράς κατά τη μέτρηση της τάσης σ .

Δl είναι η διαφορά μήκους (mm).

Υπενθυμίζεται ότι Τάση είναι το πηλίκο της δύναμης F (σε Kg) δια του εμβαδού A (σε mm^2) επί του οποίου εξασκείται δηλ.: τάση = δύναμη/εμβαδόν επιφάνειας. Επίσης ως Μέγιστη τάση εφελκυσμού είναι η μέγιστη τάση στην οποία αντέχει το υλικό πριν τη θραύση του, κατά την δοκιμή σε εφελκυσμό. Ένας συνηθισμένος τρόπος παρουσίασης της αποτελεσματικής αντοχής ενός αεροπορικού υλικού είναι η συσχέτιση των μηχανικών του χαρακτηριστικών με το ειδικό βάρος του.

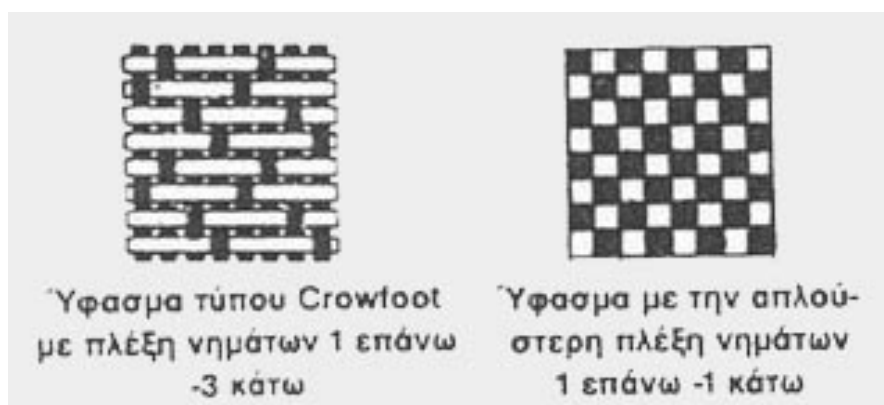
Η καμπύλη (σ - ϵ) του σύνθετου υλικού ευρίσκεται πάντοτε μεταξύ των καμπύλων (σ - ϵ) του νήματος και της ρητίνης, ενώ η κλίση της εξαρτάται από την αναλογία σε βάρος ρητίνης-νήματος. Εάν το ποσοστό βάρους της ρητίνης είναι μεγαλύτερο, τότε η καμπύλη (σ - ϵ) του σύνθετου θα είναι πλησιέστερη προς την (σ - ϵ) της ρητίνης και παρομοίως εάν το ποσοστό βάρους του νήματος είναι μεγάλο τότε η (σ - ϵ) του σύνθετου θα είναι πλησιέστερη προς την (σ - ϵ) του νήματος [11].



Εικόνα 14: Καμπύλες σ - ϵ για νήμα, ρητίνη και σύνθετο υλικό [11].

3.4 Είδη Υφασμάτων.

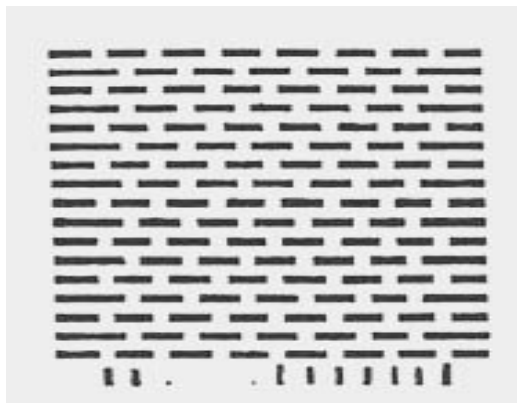
Τα Βασικότερα είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές, είναι τα ακόλουθα, δηλ. το ύφασμα τύπου Crowfoot με πλέξη νημάτων 1 επάνω – 3 κάτω και το ύφασμα με την απλούστερη πλέξη νημάτων 1 επάνω – 1 κάτω. Στα επόμενα περιγράφονται οι βασικότεροι τύποι νημάτων –υαλονημάτων που χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευής σύνθετων υλικών για εσωτερικούς χώρους αεροσκαφών.



Εικόνα 15: Βασικότεροι τύποι υφασμάτων εσωτερικών χώρων αεροσκαφών [11]

3.4.1 E - Υαλοϋφασμα.

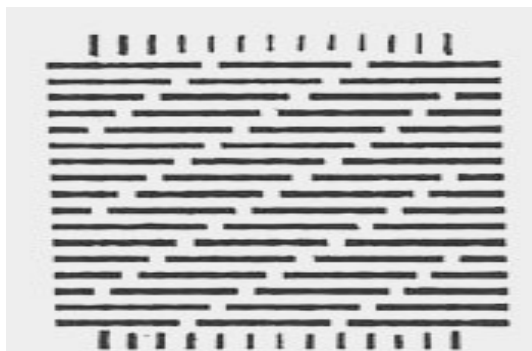
Το υαλοϋφασμα είναι το συνηθέστερο υλικό (ανόργανο) που χρησιμοποιείται στις σύνθετες κατασκευές. Είναι υλικό που δεν καίγεται, δε σαπίζει, δεν απορροφά υγρασία και δεν αλλοιώνεται με το χρόνο. Επίσης, έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη (σ - ϵ) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης και παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή αντοχή στα φορτία. Ευρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ρινιαίου κώνου.



Εικόνα 16: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω -1 κάτω [11].

3.4.2 S - Υαλοϋφασμα.

Το υλικό αυτό έχει τις ίδιες περίπου ιδιότητες με το E-Υαλοϋφασμα (E:για Electrical, S: για Structural) αλλά υπερέχει αυτού κατά 20% περίπου στην αντοχή και 15% στο μέτρο ελαστικότητας. Ο τύπος S-ΥΥ (ΥαλοΥφασμα) είναι ελαφρότερος από τον E-ΥΥ, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην κρούση και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τον E-ΥΥ. Χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία και σε συνδυασμό με το E-ΥΥ για εξωτερικές δεξαμενές, για δοχεία καυσίμων, για δοχεία υψηλής πίεσης, κτλ.



Εικόνα 17: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω -1 κάτω [11].

3.4.3 S2 - Υαλοϋφασμα.

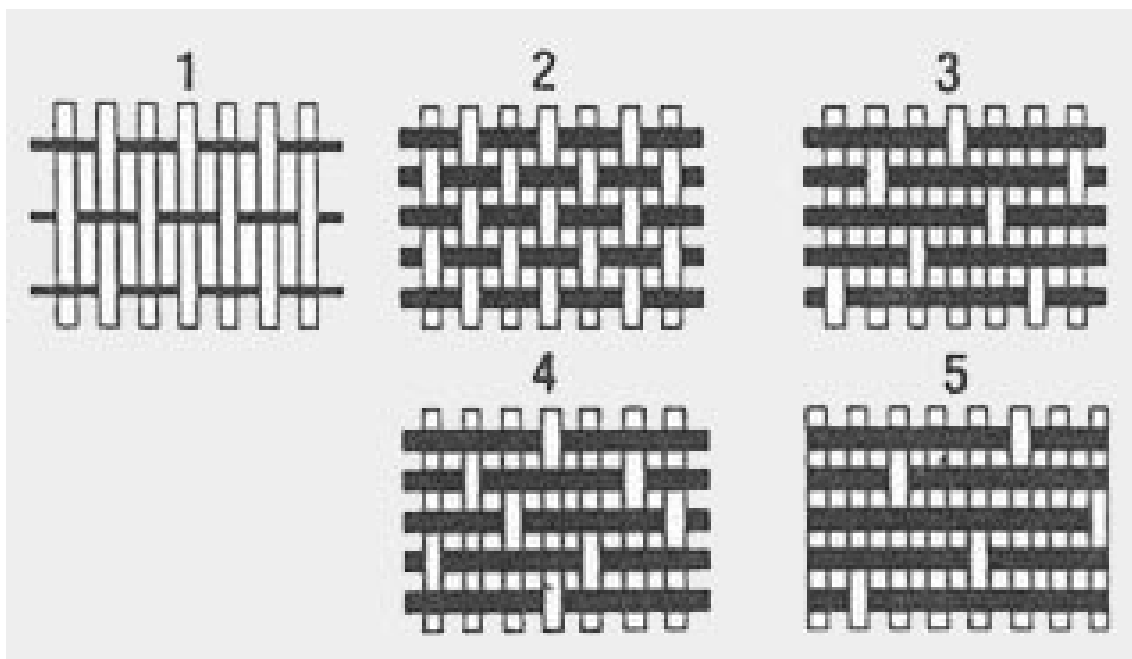
Είναι παραλαγή του S-ΥΥ με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά είναι ποιοτικώς περισσότερο ευέλικτο και δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στις προδιαγραφές MIL-SPEC., όπως αντιθέτως συμβαίνει με τον τύπο S-ΥΥ. Χρησιμοποιείται σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές (συνδυασμός δύο ή περισσότερων διαφορετικών υφασμάτων, π.χ. (E-ΥΥ + S2-ΥΥ + Κέβλαρ) / Εποξειδική), για δομικά στοιχεία που απαιτούν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, για δοχεία υψηλής πίεσης και για τμήματα που καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι το S2-ΥΥ διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και άνω των 800 C [11].

3.4.4 Κέβλαρ.

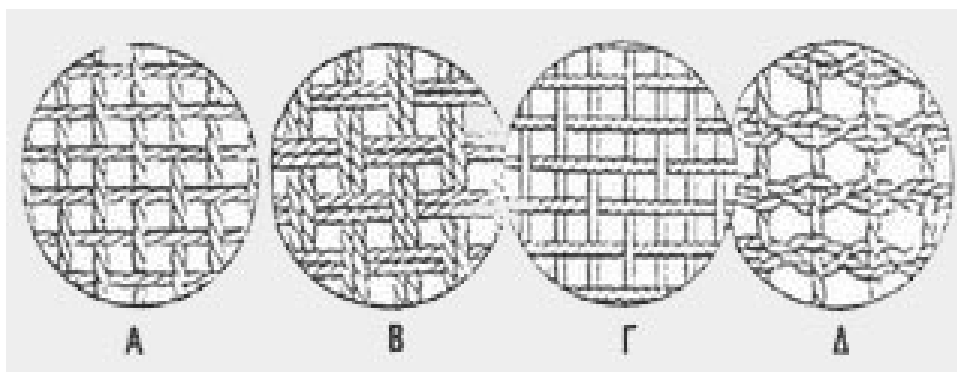
Το υλικό κέβλαρ είναι ένα αρωματικό πολυαμίδιο (Αραμιδ), (ανόργανο υλικό) με πολύ στερεούς μοριακούς δεσμούς και έχει την υψηλότερη σχέση αντοχής προς Βάρος (σ/γ) από οποιοδήποτε άλλο ύφασμα. Διατίθεται από την εταιρεία DuPont σε δύο Βασικούς τύπους. Τον τύπο Κέβλαρ 29 που έχει χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας και τον τύπο 49 που έχει υψηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Το Κέβλαρ είναι κατά 35% - 40% περίπου ελαφρύτερο από το υαλοϋφασμα, έχει μεγαλύτερη ειδική τάση (σ/γ) και μεγαλύτερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ γ), από οποιοδήποτε υαλοϋφασμα, έχει περίπου τον αυτό συντελεστή θερμικής διαστολής με τον γραφίτη, επομένως μπορούν να συνεργαστούν σε υβριδικές συνθέσεις, δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητες του και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου και τέλος έχει κατά δέκα φορές περίπου μεγαλύτερη ειδική τάση από το αλουμίνιο. Το Κέβλαρ εμποτίζεται όπως και το υαλοϋφασμα με εποξειδικές ρητίνες

αλλά το σύνθετο υλικό που αποκτάται είναι κατά 20% περίπου ελαφρύτερο από το αντίστοιχο με υαλοϋφασμα. Όλες οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου με Κέβλαρ είναι πολύ καλές εκτός από την αντοχή του σε φορτία θλίψης όπου παρουσιάζει μικρές τιμές.

Για τέτοιου είδους φορτία γίνονται υβριδικές συνθέσεις υφασμάτων Κέβλαρ και γραφίτη, ή υαλοϋφάσματος, με τις οποίες αποκτώνται οι επιθυμητές αντοχές. Το Κέβλαρ έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κρούση από το υαλοϋφασμα, μεγάλη αντοχή στην κόπωση, καλή αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών και καλή απόσβεση των κραδασμών. Το Κέβλαρ χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές για την κατασκευή δομικών στοιχείων, για την κατασκευή ελίκων οι οποίες γίνονται ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες του αλουμινίου και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην κόπωση. Επίσης το Κέβλαρ 49 χρησιμοποιείται στην κατασκευή πυραυλοκινητήρων με σημαντική μείωση του βάρους.



Εικόνα 18: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοϋφάσμα-τος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω -1 κάτω, 3) τύπου HS1 επάνω - 4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω - 3 κάτω, 5) τύπου BMS [11].



Εικόνα 19: Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος κέβλαρ 49: α) Απλή πλέξη, β) Πλέξη μπάσκετ, γ) σατέν, δ) λινό [11].

3.4.5 Ανθρακονήματα (ή Νήματα Γραφίτη).

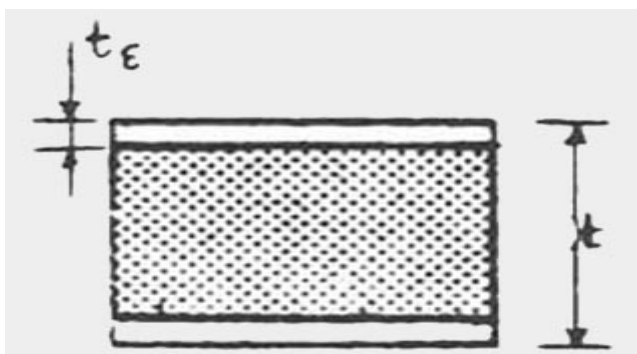
Τα ανθρακονήματα καθώς και τα υφάσματα τους είναι υλικά (οργανικά) τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, δηλαδή υψηλή τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας (E/γ). Τα ανθρακονήματα έχουν περισσότερο από το διπλάσιο ειδικό μέτρο ελαστικότητας από εκείνο του Κέβλαρ 49 και πάνω από τέσσερις φορές των υαλοϋφασμάτων. Είναι το ακριβότερο υλικό για σύνθετα, εφ' όσον κοστίζει περίπου πέντε φορές περισσότερο από το Κέβλαρ, το οποίο με τη σειρά του κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από το υαλοϋφασμα. Τα σύνθετα υλικά που αποκτώνται με ανθρακονήματα παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση στην παραμόρφωση, έχουν πολύ μεγάλη αντοχή στην κόπωση, αλλά είναι σχετικά εύθραυστα και δεν εμποδίζουν την ανάπτυξη ρωγμών. Η χρήση των ανθρακονημάτων και των υφασμάτων τους είναι πολύ δυσκολότερη από εκείνη των άλλων υφασμάτων, απαιτεί ειδικές μεθόδους εφαρμογής, μεγάλη εμπειρία, ειδικό τρόπο σχεδίασης ώστε να αποφεύγονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και γνώσεις για υβριδικές συνθέσεις εφ' όσον θα χρειαστεί να συνδυαστούν οι ιδιότητες και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά μετά αντίστοιχα άλλων υφασμάτων. Τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ισχυρών δομικών στοιχείων, για την κατασκευή των δοκών της πτέρυγας, στα αεροδιαστημικά οχήματα, αλλά και σε πολλές άλλες Βιομηχανικές εφαρμογές [11].

3.5 Σύνθετα Στρωματοποιημένα (Σάντουιτς).

Εκτός από τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν με τον εμποτισμό σε ρητίνες των διαφόρων τύπων νημάτων και υφασμάτων, σύνθετα υλικά αποκτώνται και με κατάλληλο μηχανικό συνδυασμό εντελώς διαφορετικών υλικών. Ο γνωστότερος και επικρατέστερος μηχανικός συνδυασμός είναι εκείνος βάση του οποίου αποκτώνται σύνθετα υλικά υπό τη μορφή στρωμάτων.

Αυτά τα υλικά συνίστανται από ένα πυρήνα και τις επιστρώσεις των δύο κύριων επιφανειών του. Ο πυρήνας είναι από ελαφρό υλικό που κύριο σκοπό έχει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο επιστρώσεων, οι οποίες με τη σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης εφαρμοσμένες στο επίπεδο τους. Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του στρωματοειδούς.

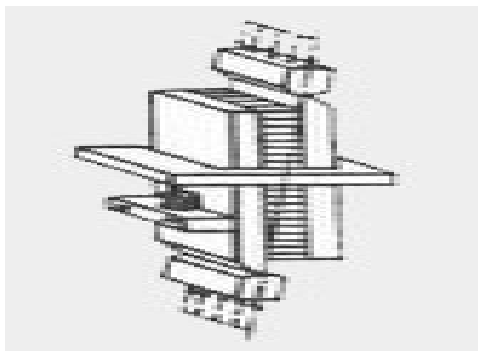
Με αναφορά την Εικ.20, παρατίθεται συγκριτικός πίνακας όπου φαίνεται η επίδραση του πάχους t του σάντουιτς, ήτοι του πυρήνα, στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Φαίνεται επίσης μια αντίστοιχη πολύ μικρή αύξηση του βάρους.



Εικόνα 20: Σχηματική παράσταση σύνθετου - σάντουιτς t : πάχος σάντουιτς, $t_ε$: πάχος επίστρωσης.

Πίνακας 6: Επίδραση του πάχους στα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Πάχος	t	$2t$	$4t$
Ακαμψία	1,0	7,0	37,0
Αντοχή	1,0	3,5	9,2
Βάρος	1,0	1,03	1,06

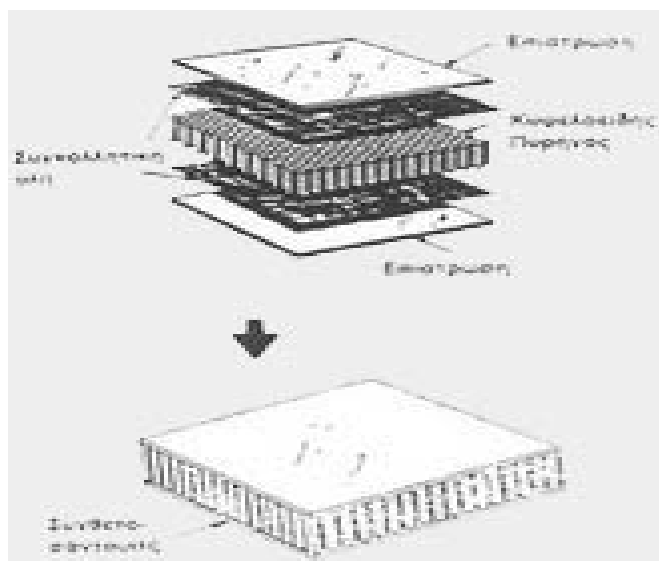


Εικόνα 21: Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του κυψελοειδή πυρήνα [11].

Το υλικό και το πάχος των επιστρώσεων, το υλικό του πυρήνα, το πάχος του πυρήνα, δηλ. η απόσταση μεταξύ των δύο επιστρώσεων και το επικολλητικό μέσο, επιστρώσεων - πυρήνα, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου αυτού.

Εάν η επικόλληση δεν είναι ιδανική, τότε υπάρχει περίπτωση να παύσει η συνεργασία των επί μέρους υλικών και επομένως να απολεσθούν τα αναμενόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου στρωματοειδούς. Σκοπός της επικόλλησης είναι να μην επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ επιστρώσεων και πυρήνα καθώς και την παρεμπόδιση

δημιουργίας ρυτιδώσεων στην επίστρωση κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου. Οι επιστρώσεις είναι πολύ λεπτές επιφάνειες (μεταλλικού ελάσματος, κοντραπλακέ, υαλοϋφάσματος) εξαιρετικά χαμηλής αντοχής σε όλα τα φορτία που δεν εφαρμόζονται στο επίπεδο τους και υψηλή αντοχή στα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους [11].



Εικόνα 22: Κατασκευή σύνθετου - σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα [11].

Ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση της διαφοράς αυτής στην αντοχή, γίνεται μέσω ενός φύλλου χαρτιού το οποίο παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση τραβώντας το από τις απέναντι πλευρές του, και έχει μηδέν αντοχή σε φορτία κάθετα προς την επιφάνεια του. Όλα τα άλλα φορτία που δημιουργούνται και δεν ευρίσκονται στο επίπεδο των επιστρώσεων, πρέπει να αντιμετωπίζονται από τον πυρήνα.

Επομένως, ο συνδυασμός του πυρήνα και των επιστρώσεων προς σχηματισμό του σύνθετου στρωματοειδούς υλικού έχει τα ακόλουθα θετικά αποτελέσματα, α) Τα φορτία μεταφέρονται στο επίπεδο των επιστρώσεων, β) οι επιστρώσεις συγκρατούνται από τον πυρήνα ώστε τοπικά τουλάχιστον να παραμένουν επίπεδες, γ) η απόσταση μεταξύ των επιστρώσεων παραμένει σταθερή και δ) παρεμποδίζεται η δημιουργία κυματώσεων ή ρυτιδώσεων ένεκα θλιπτικών φορτίων στις επιστρώσεις, που γενικά είναι πολύ λεπτά ελάσματα. Έτσι αποκτάται ένα υλικό στο οποίο γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πυρήνα και των επιστρώσεων. Στην περίπτωση που το φορτίο εφαρμόζεται συγκεντρωμένο "τοπικά", επί παραδείγματι μέσω κοχλιώσεων, τότε ο πυρήνας θα πρέπει να είναι τοπικά ενισχυμένος με ισχυρότερο υλικό από αυτόν, το οποίο θα αντέξει στη σύνθλιψη της κοχλίωσης.

Συνήθως ο πυρήνας ενισχύεται τοπικά με έκχυση εποξειδικής κόλλας, ή με την εγκατάσταση χιτωνίου κατάλληλου για το φορτίο της κοχλίωσης. Κατά παρόμοιο τρόπο πρέπει να αντιμετωπίζεται και η περίπτωση των ηλώσεων οι οποίες

διαφορετικά δεν επιτρέπεται να εκτελούνται επί των λεπτών επιστρώσεων. Παραδείγματα σύνθετων στρωματοειδών υλικών δίδονται στον Πίνακα 7.

Σύνηθες στρωματοειδές αεροπορικό υλικό είναι το σύνθετο με πυρήνα από λεπτό έλασμα αλουμινίου (π.χ. AL 5056-H39) με κυψελοειδή διαμόρφωση και επιστρώσεις από έλασμα αλουμινίου. Αυτός ο τύπος του σύνθετου χρησιμοποιείται για την κατασκευή δαπέδων αεροσκαφών, για την κατασκευή των πτερυγίων του στροφίου ελικοπτέρων, για επικαλύψεις της ατράκτου, της πτέρυγας ή του ουραίου πτερώματος, καθώς επίσης για τοπικές ενισχύσεις της επικάλυψης σε θυρίδες ή άλλες περιοχές όπου απαιτείται αυξημένη ακαμψία.

Πίνακας 7: Συνδυασμοί υλικών, πυρήνα και επιστρώσεων στα σύνθετα-στρωματοειδή για αεροπορικές εφαρμογές [12,13].

Πυρήνας	Επιστρώσεις	Υλοκό συγκόλ.
Πολυουρεθάνη	Υαλοϋφασμα	Εποξειδική
Πολυστ. Foam		
Πολυστ. Foam	Κόντρα-πλακέ	Εποξειδική
Πολυστ. Foam	Έλασμα αλουμινίου	-
Ξύλο μπάλα	Κόντρα-πλακέ	-
Ξύλο μπάλα	Έλασμα αλουμινίου	-
Ξύλο μπάλα	Υαλοϋφασμα	-
Κυψελ. αλουμίνιο	Έλασμα αλουμινίου	-
Κυψελ. αλουμίνιο	Υαλοϋφασμα	-
Κυψ. χάρ. Kraft	Έλασμα αλουμινίου	-
Κυψ. χάρ. Kraft	Υαλοϋφασμα	-
Κυψ. χάρ. Kraft	Χάρτης Kraft	-
Χάρτου Nomex	Υαλοϋφασμα	-

Επίσης, σύνθετα με κυψελοειδή πυρήνα χάρτου Kraft ή άλλου παρόμοιου χάρτου και επίστρωση υαλοϋφάσματος πάχους 0.25 χλσ, χρησιμοποιούνται συχνά στις εσωτερικές επενδύσεις, τοιχώματα και οροφές, των επιβατικών αεροσκαφών. Η κατασκευή του κυψελοειδή πυρήνα γίνεται με τις ακόλουθες δύο μεθόδους.

α) Με τη **μέθοδο της ανάπτυξης**, ή του τεντώματος, όπου προβλέπεται η επάλειψη με κόλλα κατά λωρίδες των λεπτών μεταλλικών (ή μη μεταλλικών) ελασμάτων, τα οποία κομμένα στις επιθυμητές διαστάσεις τοποθετούνται το ένα επάνω στο άλλο ώστε να κολλήσουν κατά μήκος των λωρίδων και κατόπιν αφού κοπούν στο συγκεκριμένο πάχος τεντώνονται (όπως το ακορντεόν), έτσι ώστε να σχηματισθεί ο κυψελοειδής πυρήνας. Με αυτή τη μέθοδο κατασκευάζονται κυψελοειδείς πυρήνες με ειδικό βάρος από 30 χλγ/μ³ που είναι αρκετά χαμηλή τιμή έως και 190 χλγ/μ³ που είναι σχετικά μέτρια τιμή.

β) Η δεύτερη μέθοδος κατασκευής κυψελοειδή πυρήνα, ονομάζεται **μέθοδος της ρυτίδωσης** και συνίσταται στη διέλευση του ελάσματος μέσω οδοντωτών κυλίνδρων οι οποίοι του προσδίδουν ρυτιδωτή ή κυματοειδή μορφή, το οποίο αφού κοπεί στο επιθυμητό μήκος τοποθετείται προς κόλληση σε μπλοκ ρυτιδωμένων ελασμάτων απ' όπου αποκτάται ο κυψελοειδής πυρήνας.

Με τη μέθοδο της ρυτίδωσης κατασκευάζονται κυψελοειδείς πυρήνες με ειδικό βάρος από 130 χλγ/ μ³ έως και 880 χλγ/ μ³, εφ' όσον υπάρχει η δυνατότητα ρυτίδωσης μέσω των κυλίνδρων και παχύτερων ελασμάτων. Έχοντας κατασκευάσει με μία από αυτές τις δύο μεθόδους τον κυψελοειδή πυρήνα, κατόπιν η επικόλληση των επιστρώσεων γίνεται μέσω ειδικού κολλητικού υλικού και συνήθως σε θερμοθαλάμους κενού. Η πυκνότητα του κυψελοειδή πυρήνα καθορίζει την αντοχή του στα διατμητικά φορτία, ενώ η γεωμετρία της κυψέλης προσδιορίζει την κύρια διεύθυνση αντοχής του πυρήνα σε αυτά τα φορτία. Η συνηθέστερη και σχεδόν καθιερωμένη γεωμετρία κυψέλης είναι η εξάγωνη, για μεταλλικούς και μη, κυψελοειδείς πυρήνες. Η γεωμετρία της κυψέλης επηρεάζει οπωσδήποτε και το συνολικό βάρος του πυρήνα, εφόσον οι επιφάνειες μίας κυψέλης που έρχονται σε επαφή με τις γειτονικές κυψέλες, δηλαδή οι κοινές πλευρές, καθορίζουν και την ποσότητα της κόλλας που θα απαιτηθεί. Σε πολλές περιπτώσεις το βάρος της κόλλας φθάνει το 1%-4% του συνολικού βάρους του πυρήνα κατασκευασμένου με τη μέθοδο της ανάπτυξης και το 10%-25% για πυρήνα κατασκευασμένο με τη μέθοδο της ρυτίδωσης. Με τη μέθοδο της ανάπτυξης, όπου το μπλοκ των ελασμάτων συμπιέζεται ώστε να κολλήσουν οι λωρίδες μεταξύ τους, η κόλλα συναντάται στην ελάχιστη δυνατή ποσότητα της. Αντιθέτως στη μέθοδο της ρυτίδωσης όπου δεν είναι δυνατή παρόμοια συμπίεση των ήδη ρυτιδωμένων ελασμάτων, εκεί η κόλλα στις κοινές πλευρές των κυψελών συναντάται σε μεγαλύτερη ποσότητα και πάχος. Για τις αεροπορικές

εφαρμογές, ο πυρήνας καθώς και οι επιστρώσεις είναι από κράματα αλουμινίου, συνήθως AL5056-H39 ή AL2024-T3. Νεώτερο υλικό για κατασκευή πυρήνα, είναι ο εμποτισμένος σε κατάλληλες ρητίνες χάρτης Nomex της εταιρείας Dupont, ο οποίος είναι από τους πλέον γνωστούς, παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στις τοπικές φορτίσεις και δεν υπόκειται εύκολα σε μόνιμες παραμορφώσεις όπως συμβαίνει με τον πυρήνα αλουμινίου. Σύνθετα με πυρήνα Nomex χρησιμοποιούνται για τα εσωτερικά τοιχεία και επενδύσεις των επιβατικών αεροσκαφών. Το ειδικό θάρος του πυρήνα Nomex ποικίλει από 24 χλγ/ μ3 έως 144 χλγ/μ3, το πάχος πλευράς της κυψέλης από 0,04 χλσ έως 0,13 χλσ και το άνοιγμα (διάμετρος) της κυψέλης από 3,3 χλσ έως 9,5 χλσ. Με ειδικό βάρος άνω των 70 χλγ/ m³ χρησιμοποιείται για πατώματα αεροσκαφών.

Η επιλογή του πυρήνα, των επιστρώσεων, και της κόλλας είναι τα δύσκολα βήματα στην κατασκευή του σύνθετου εφ' όσον υπάρχει περίπτωση να επιλεγεί πυρήνας αρκετά ελαστικός και επιστρώσεις αρκετά άκαμπτες, ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνεργασία στην κατανομή των φορτίων μεταξύ πυρήνα και επιστρώσεων. Σε παρόμοιο αποτέλεσμα καταλήγει και η επιλογή της κόλλας που μπορεί να είναι πολύ ελαστική ή πολύ σκληρή και εύθραυστη. Εάν η κόλλα είναι ισχυρότερη από το υλικό του πυρήνα, τότε στην περίπτωση αναγκαστικής αποκόλλησης της επίστρωσης καταστρέφεται τμήμα του πυρήνα. Εάν η κόλλα είναι πολύ ελαστική, τότε θα επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ πυρήνα και επίστρωσης με αποτέλεσμα μείωση της αντοχής του σύνθετου στην κάμψη.

Στις φορτίσεις σε κάμψη, όπως επί παραδείγματι συμβαίνει στις περιπτώσεις των δαπέδων, τότε η άνω επίστρωση τίθεται σε θλίψη ενώ η κάτω σε εφελκυσμό. Η επίστρωση υπό θλίψη αντιμετωπίζει το ενδεχόμενο σχηματισμού κυματώσεων, αποκόλλησης από τον πυρήνα και γενικώς φαινόμενα δομικής αστάθειας. Σε αυτές τις καταστάσεις ο πυρήνας και η κολλητική ύλη λαμβάνουν πρωτεύοντα ρόλο.

Ο κυψελοειδής πυρήνας αλουμινίου χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή επιφανειών ελέγχου και πτερυγίων γενικότερα, όπου ακολουθούνται δύο τρόποι κατασκευής [11].

- Ø Με τον πρώτο τρόπο, που είναι κατασκευαστικά ο δυσκολότερος διότι αφορά λεπτά πτερύγια κυρίως μαχητικών αεροσκαφών, το πτερύγιο αποτελεί εξ' ιδίου το σύνθετο στρωματοειδές με πυρήνα που έχει το σχήμα του πτερυγίου και τις αντίστοιχες επιστρώσεις. Η κατασκευή ενός τέτοιου πτερυγίου απαιτεί κατάλληλες συσκευές και πιεστικούς Θερμοθαλάμους, όπου υπό καθορισμένες

συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας γίνεται η σύνθεση του σύνθετου πτερυγίου. Κατά παρόμοιο τρόπο κατασκευάζονται τα πτερύγια του στροφείου ελικοπτέρου.

- Ø Εάν τα πτερύγια ελέγχου έχουν διατομή μεγάλου σχετικού πάχους (μέγιστο σχετικό πάχος = μέγιστο πάχος διατομής προς χορδή διατομής) όπως συνήθως αυτό συμβαίνει στα επιβατικά αεροσκάφη, τότε η επικάλυψη αυτών των πτερυγίων συμφέρει να γίνεται όχι με λεπτά ελάσματα αλουμινίου, αλλά με σύνθετο στρωματοειδές, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακαμψία της επικάλυψης και συγχρόνως να γίνεται εξοικονόμηση Βάρους. Με τον τρόπο αυτό το πτερύγιο δεν αποτελεί εξ ιδίου ένα σύνθετο στρωματοειδές, αλλά χρησιμοποιεί "ελάσματα" σύνθετου στρωματοειδούς ως επικάλυψη. Παρομοίως κατασκευάζονται και τα πτερύγια ανεμογεννητριών μεγάλης διαμέτρου. Εκτός από τον κυψελοειδή πυρήνα, μπορεί σε συνδυασμό με την κατάλληλη επίστρωση, να χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας το ξύλο Μπάλας, η πολυουρεθάνη, η πολυοτερίνη (όπως το γνωστό Styrofoam της Dow Chemical), ή άλλα παρόμοια μικρής πυκνότητας υλικά. Στην περίπτωση κατασκευής δοκού με σύνθετο υλικό, όπου η εξοικονόμηση Βάρους είναι ένα από τα Βασικά στοιχεία, θα πρέπει η ανάλυση κατανομής των φορτίων να προσδιορίζει το ύψος του πυρήνα και την κατανομή των επιστρώσεων. Λογικό είναι ότι στη ρίζα της δοκού η επίστρωση θα έχει μεγαλύτερο πάχος, το οποίο αποκτάται με περισσότερες στρώσεις της επίστρωσης.

3.6 Επισκευές Σύνθετων Υλικών.

Τα σύνθετα υλικά εκτός από την προσοχή, προγραμματισμό και επιμέλεια που απαιτούν κατά τη σύνθεση τους, έχουν και συγκεκριμένες διαδικασίες για τον τρόπο επισκευής τους οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να αποκατασταθεί η ζημιά και συγκεκριμένα η αντοχή της ζημιωμένης περιοχής. Ανάλογα με το είδος και έκταση της ζημιάς, εφαρμόζεται και η αντίστοιχη μέθοδος επισκευής. Δυσκολότερη επισκευή είναι εκείνη που απαιτεί κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Ο βασικός εξοπλισμός για τέτοιου είδους επισκευές περιλαμβάνει, μία αντλία για τη δημιουργία κενού, μία ή περισσότερες βεντούζες αναρρόφησης αναλόγως της επιφάνειας προς

επισκευή, ένα σύστημα θέρμανσης που συνήθως είναι λεπτό κάλυμμα με εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση, όργανα ελέγχου και ρύθμισης της υποπίεσης και θερμοκρασίας, υφάσματα θερμομόνωσης, διάτρητα νάυλον και απορροφητικά υφάσματα χρήσιμα για την αντιμετώπιση περισσεύματος κόλλας που θα εμφανιστεί με την υποπίεση, κολλητική ταινία για στεγανοποίηση και ίσως άλλα εξαρτήματα που θα χρειαστούν ανάλογα με την περίπτωση επισκευής. Πάνω από όλα όμως απαιτείται εμπειρία που θα αποκτηθεί μόνο κατόπιν συνεχούς πειραματισμού και εξάσκησης, ειδικά στις επισκευές των σύνθετων υλικών για αεροπορικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Βασικές Κατηγορίες Πρότυπων Δοκιμών

Οι πρότυπες δοκιμές υλικών ως προς τη συμπεριφορά τους έναντι της φωτιάς αναφέρονται σήμερα σε δύο βασικές κατηγορίες, την **αντίσταση (resistance)** και την **αντίδραση (reaction)** των υλικών στη φωτιά. Στη συνέχεια καταγράφονται τα πρότυπα που αναφέρονται στις κατηγορίες της αντίστασης και αντίδρασης [2]. Βασική πηγή για τα όσα διαπραγματεύονται στο κεφάλαιο αυτό αποτέλεσε η εργασία των Παπαϊωάννου Κ.Κ., Φούντη Μ., και η βιβλιογραφία που αναφέρεται εκεί.

4.1 Πυραντίσταση (Fire Resistance).

Ο όρος πυραντίσταση ορίσθηκε από τον Ελληνικό Κανονισμό Πυροπροστασίας (Π.Δ 71/1988). Αφορά στα δομικά στοιχεία και όχι στα δομικά υλικά. Σύμφωνα με τη βασική Ευρωπαϊκή Κατευθυντήρια Οδηγία 89/106/ΕΟΚ-CPD (Construction Products Directive). Σύμφωνα με αυτήν

- **προϊόν** του τομέα δομικών κατασκευών ονομάζεται κάθε προϊόν το οποίο έχει κατασκευασθεί για να ενσωματωθεί κατά τρόπο μόνιμο σε δομικά έργα εν γένει, που καλύπτουν τόσο τα κτίρια, όσο και τα άλλα έργα πολιτικού μηχανικού (μεταφορές, υδραυλικά, εδαφοτεχνικά κλπ. Τα ονομαζόμενα «έργα πολιτικού μηχανικού» καλύπτουν επίσης και εγκαταστάσεις για θέρμανση, κλιματισμό, ηλεκτροδότηση και επίτευξη γενικότερα συνθηκών υγιεινής, καθώς και για αποθήκευση ορισμένων βλαπτικών προς το περιβάλλον ουσιών, όπως και διάφορες προκατασκευές (κτίρια, γκαράζ αυτοκινήτων, σιλό κλπ.).
- **βαθμός** ή σωστότερα ο **δείκτης πυραντίστασης** ενός δομικού στοιχείου με συγκεκριμένη σύνθεση αλλά και λειτουργία μέσα σε μία κατασκευή προσδιορίζεται μετά από δοκιμασία σε πειραματικό φούρνο, όπου ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, αλλά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα στο

φούρνο προσομοιάζουν, όσο αυτό είναι δυνατό, με τις συνθήκες λειτουργίας του δομικού στοιχείου στην αντίστοιχη κατασκευή.

Το δοκίμιο εισάγεται σε καθορισμένες από το πρότυπο διαστάσεις μέσα σε φούρνο και υφίσταται την επίδραση μιας αυξανόμενης θερμοκρασίας σύμφωνα με μία πρότυπη καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής (της γνωστής καμπύλης ISO 834 του 1975, που υιοθετήθηκε κατόπιν και από την CEN) με προσομοίωση των οριακών συνθηκών στήριξης, φόρτισης και θερμοκρασιακής μεταβολής, με αυτές τις συνθήκες που αναμένονται να επικρατήσουν σε μία πυρκαγιά [2].

Τρία είναι τα βασικά κριτήρια που θα καθορίσουν τελικά το δείκτη πυραντίστασης, **η ευστάθεια** (stability), **η ακεραιότητα** (integrity) και **η θερμομονωτική ικανότητα** (insulation).

Δεν θα αναφερθούν άλλες σημαντικές λεπτομέρειες, όπως η ύπαρξη και άλλων καμπυλών θερμοκρασιακής μεταβολής για ειδικές περιπτώσεις, στοιχεία της βαθμονόμησης των φούρνων και ιδιαίτερα των τοιχωμάτων τους, οι οριακές καταστάσεις των 3 βασικών κριτηρίων κ.α. Τα κριτήρια της ακεραιότητας **RI** και της θερμομόνωσης **RE** αναφέρονται κυρίως σε δομικά στοιχεία που λειτουργούν για την παρεμπόδιση της εξάπλωσης της φωτιάς (διαχωριστικά τοιχώματα και δάπεδα), ενώ το κριτήριο της ευστάθειας **RS** αναφέρεται κυρίως στα φέροντα δομικά στοιχεία όπως στύλοι και φέροντα τοιχώματα, δοκοί, πλάκες κλπ. Οι Κανονισμοί επιβάλλουν έναν ελάχιστο δείκτη πυραντίστασης για φέροντα, αλλά και διαχωριστικά δομικά στοιχεία, αναλόγως με το βαθμό επικινδυνότητας του κτιρίου (μέγεθος, πυροθερμικό φορτίο, χρήση κλπ.). Οι απαιτήσεις πυραντίστασης των δομικών στοιχείων του κελύφους ενός «πυροδιαμερίσματος», μεταβάλλονται αναλόγως της επιφανείας του πυροδιαμερίσματος, της ύπαρξης μέτρων ενεργητικής πυροπροστασίας και της επικινδυνότητας της κατασκευής [14, 15].

Στις μέρες μας η επιστημονική πρόοδος είναι αρκετά σημαντική, ώστε οι Κανονισμοί να αποδέχονται αναλυτικούς υπολογισμούς για τον καθορισμό της πυραντίστασης, αντί των πειραματικών δοκιμών, καθώς και τη θεωρία της αναλογικότητας, που απαλλάσσει τη δαπανηρή επανάληψη δοκιμών στο Εργαστήριο για παρόμοιες από άποψη κυρίως διαστάσεων περιπτώσεις με την υιοθέτηση ειδικών προτύπων (extended application tests).

4.2 Πρότυπο CEN TSEN-45545-2.

Οι ακόλουθοι πέντε παράγοντες είναι οι κρίσιμοι για τα υλικά των οχημάτων :

- **F** Εξάπλωση της φλόγας (*Flame spread*)
- **I** Αναφλεξιμότητα (*Ignitability*)
- **R** Ρυθμός (ταχύτητα) έκλυσης θερμότητας (*Heat Release Rate*)
- **S** Παραγωγή καπνού (*Smoke production*)
- **T** Τοξικότητα του καπνού (*Toxicity of smoke*)

Οι πρότυπες δοκιμές που εφαρμόζονται είναι κυρίως δοκιμές του ISO (Πίνακας 8).

4.3 Το πρότυπο EN 13501

Η ταξινόμηση των δομικών προϊόντων (υλικών και στοιχείων) γίνεται με το πρότυπο EN 13501 το οποίο αποτελείται από 5 μέρη. Το πρώτο τμήμα του EN 13501-1 αφορά την κατηγοριοποίηση (classification) με βάση την συμπεριφορά των υλικών σχετικά με την αντίδρασή τους στη φωτιά (reaction to fire). Τα 13501-2,3,4 αφορούν την κατηγοριοποίηση (classification) των δομικών στοιχείων με βάση την πυραντίστασή τους.

Το 13501-5 αφορά την κατηγοριοποίηση των στεγών σε προσβολή εξωτερικής φωτιάς. Για τις διαδικασίες κατηγοριοποίησης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες πρότυπες δοκιμές:

- Δοκιμή ακαυστότητας (prEN ISO 1182)
- Δοκιμή προσδιορισμού θερμαντικής αξίας (prEN ISO 1716)
- Δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιόμενο αντικείμενο (EN 13283-SBI-Single Burning Item)
- Δοκιμή αναφλεξιμότητας (prEN ISO 11925-2)
- Συμπεριφορά δαπέδων σε καύση με τη χρήση πηγής ακτινοβολούμενης θερμότητας (prEN ISO 9239-1)

4.4 Το πρότυπο EN 13823

Το Ευρωπαϊκό αυτό πρότυπο με την ονομασία «Δοκιμές αντίδρασης σε φωτιά δομικών προϊόντων-Δομικά προϊόντα, εκτός δαπέδων, που εκτίθενται σε θερμική προσβολή από μεμονωμένο καιόμενο αντικείμενο», μετά από αμοιβαίες αμφισβητήσεις και συμβιβασμούς μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ (κυρίως Γερμανίας, Γαλλίας και

Βρετανίας), επιτυγχάνει την τελική ταξινόμηση σε Ευρωπαϊκές κλάσεις (Euroclasses) ενός μεγάλου αριθμού υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευαστική Βιομηχανία. Τα φυσικοχημικά μεγέθη που προσδιορίζονται σε αυτήν τη δοκιμή με τη βοήθεια και άλλων προτύπων, κυρίως του ISO, είναι τα εξής:

- ∅ THR (Total Heat Release) – Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας,
- ∅ LFS (Lateral Flame Spread) – Πλευρικός Ρυθμός Εξάπλωσης φωτιάς,
- ∅ TSP (Total Smoke Production – Ολική Παραγωγή Καπνού,
- ∅ FIGRA (Fire Growth Rate) – Ρυθμός Ανάπτυξης φωτιάς,
- ∅ SMOGRA (Smoke Growth Rate) – Ρυθμός Ανάπτυξης Καπνού.

Πίνακας 8: Σύνοψη προτύπων δοκιμών [14, 15]

Υλικό	Εξάπλωση φλόγας	Αναφλεξιμότητα	Έκλυση θερμότητα	Παραγωγή ή καπνού	Τοξικότητα καπνού
Κατασκευή και επενδύσεις	ISO 5658-2 radiant panel	ISO 5660-1 Cone Calorimeter	ISO 5660-1 Cone Calorimeter	ISO 5659-2 Smoke Chamber	
Επίπλωση καθίσματα	Πλήρη καθίσματα ISO 9705 Furniture calorimeter Δοκιμή στοιχείου ISO 5660-1			ISO 5659-2 Smoke Chamber	
Ηλεκτροτεχνικά	ISO 4589-1			ISO 5659-2 / NF X 70-11	
Καλώδια	EN 50266 Vertical cable test		-----	NF X 70-100 Tube furnace	

4.5 Ευρωπαϊκές κλάσεις δομικών υλικών ως προς την αντίδραση στη φωτιά.

Οι κλάσεις για όλα τα υλικά εκτός δαπέδων δίδονται στον Πίνακα 2. Ενώ οι Ευρωκλάσεις για τα υλικά επικαλύψεων δαπέδων δίνονται στον Πίνακα 3. Κατ' αντιστοιχία, τα αναφερόμενα πρότυπα καθορίζουν και την κατάταξη των υλικών σε μία από τις παραπάνω Ευρωκλάσεις [14, 15].

Πίνακας 9: Ευρωκλάσεις για όλα τα δομικά υλικά εκτός δαπέδων [14, 15].

Κλάση	Πρότυπα
A1	prEN ISO1182,prEN ISO 1716
A2	prEN ISO1182,prEN ISO 1716,prEN
B	prEN ISO 9239-1,prEN 11925-2
C	prEN ISO 9239-1, prEN 11925-2
D	prEN ISO 9239-1, prEN 11925-2
E	prEN 11925-2
F	Δεν προσδιορίζονται

Πίνακας 10: Ευρωκλάσεις για δομικά υλικά δαπέδων [14, 15].

Κλάση	Πρότυπα
A1	prEN ISO 1182,pr EN ISO 1716
A2	prEN ISSO 1182 prEN ISO 1716, EN
B	EN 13823, prEN ISO11925-2
C	EN 13823 prEN ISO11925-2
D	EN 13823 prEN ISO11925-2
E	prEN ISOI 1925-2
F	Δεν προσδιορίζονται

4.6 Δοκιμές αντίδρασης στη φωτιά (Reaction to fire Tests).

Η επίδραση της φωτιάς στα δομικά υλικά αναφέρεται σε ορισμένες θερμικές παραμέτρους, για τις οποίες άλλωστε έχουν αναπτυχθεί διεθνώς και οι αντίστοιχες πρότυπες δοκιμές. Οι δοκιμές αντίδρασης στη φωτιά δεν αναφέρονται μόνο σε δομικά υλικά κατασκευών με την έννοια των κτιριακών εγκαταστάσεων, αλλά και σε άλλες περιπτώσεις όπως π.χ. σε υλικά που αποτελούν τα μέσα μεταφοράς. Στα επόμενα θα γίνει αναφορά σε δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

- α) την περίπτωση της Ευρωπαϊκής Τεχνικής Προδιαγραφής για τα οχήματα των σιδηροδρόμων CEN TS EN 45545 και
- β) στα Ευρωπαϊκά πρότυπα ελέγχου και ταξινόμησης των δομικών υλικών σχετικά με την αντίδραση τους στη φωτιά.

4.7 Διαδικασία μετρήσεων Αντίδρασης Υλικών στη φωτιά.

Πριν τη διεξαγωγή κάποιου πειράματος, απαιτείται κάποια σειρά από βαθμονομήσεις. Οι αναλυτές αερίων καθώς και ο λέιζερ μετρητής καπνού πρέπει πάντοτε να παραμένουν ενεργοποιημένοι και έτοιμοι για χρήση, χωρίς να απαιτείται χρόνος για ζέσταμα είτε για σταθεροποίηση του συστήματος, όμως ο υπόλοιπος εξοπλισμός πρέπει να ενεργοποιηθεί και να ρυθμιστεί. Τα φίλτρα στον αγωγό απαγωγής πρέπει να ελεγχθούν και όπου απαιτείται να αντικατασταθούν. Το σύστημα καταγραφής καπνού είναι βαθμονομημένο σε μηδενική τιμή όταν η δέσμη της ακτίνας λέιζερ είναι πλήρως μπλοκαρισμένη, ενώ στη μέγιστη τιμή όταν η ακτίνα λέιζερ δεν εμποδίζεται. Οι αναλυτές αερίων βαθμονομούνται με τη χρησιμοποίηση αζώτου για μηδενική τιμή και μίγμα αερίων CO/CO_2 (0.85/8.5)% για τα επιθυμητά εύρη των αναλυτών μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Ο υποδοχέας του δοκιμίου πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα τέτοιο ύψος ώστε η επιφάνεια του να απέχει $25mm$ από τον θερμοπομπό. Πριν ξεκινήσει το πείραμα, αφήνεται η συσκευή να καταγράψει δεδομένα για 60 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ξεκινάμε το πείραμα χρησιμοποιώντας ως αφετηρία αυτά τα 60 sec [16].

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από ένα πείραμα θερμοδόμετρου κώνου περιλαμβάνουν ένα εύρος από παραμέτρους και δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως :

§ Μοντελοποίηση φωτιάς

§ Πρόβλεψη για πυρκαγιά πλήρους κλίμακας

§ Κατάταξη προϊόντων ανάλογα με τη συμπεριφορά τους σε πυρκαγιά

§ Τεστ Περνά/Δεν Περνά σε υπο εξέλιξη νέων υλικών

4.8 Μετρήσιμες Ποσότητες σε πείραμα θερμιδομέτρου

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που λαμβάνονται από πειράματα θερμιδομέτρου κώνου περιγράφονται στη συνέχεια:

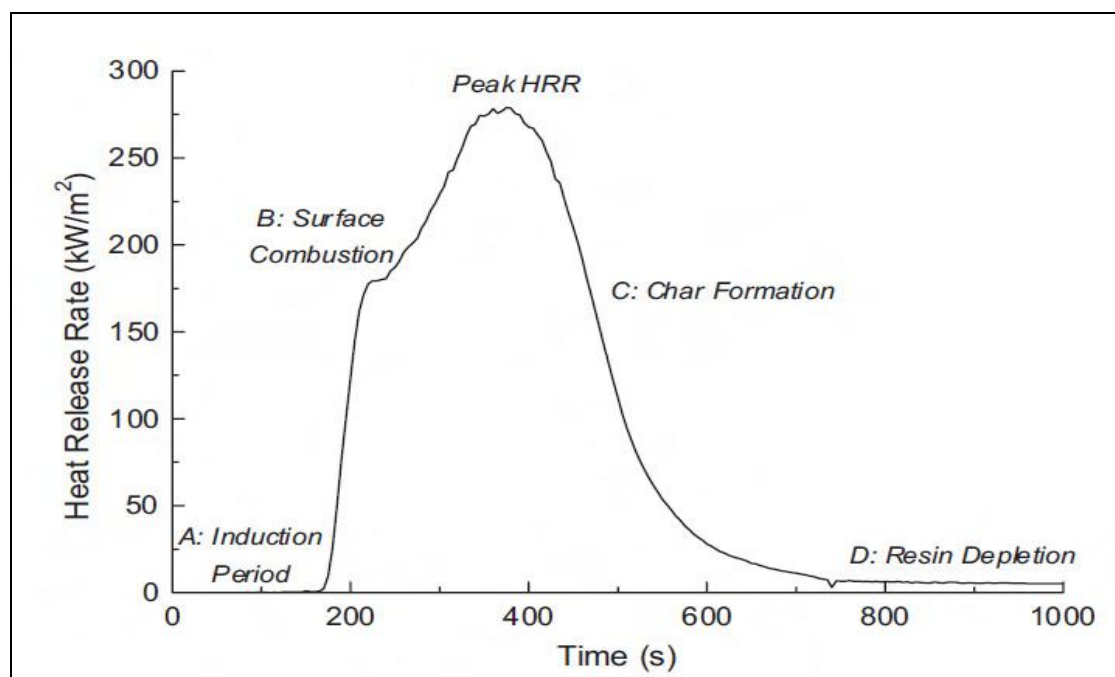
4.8.1 Heat Release Rate, (HRR) – Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας.

Ο ρυθμός Έκλυσης θερμότητας είναι ο σημαντικότερος παράγοντας συμπεριφοράς στη συμπεριφορά ενός υλικού σε περιβάλλον φωτιάς, επειδή η θερμότητα που απελευθερώνεται από ένα υλικό που καίγεται παρέχει την επιπλέον θερμική ενέργεια που απαιτείται για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της φωτιάς [17-23]. Η μέγιστη τιμή του HRR εμφανίζεται συνήθως αμέσως μετά την ανάφλεξη των αερίων, και είναι συνήθως μια καλή ένδειξη της αναφλεξιμότητας των υλικών. Ένα παράδειγμα του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης στη διάρκεια του χρόνου για ένα σύνθετο υλικό (γυαλιού/βινυλεστέρα) που εκτίθεται σε συνεχή θερμοκρασιακή ροή, παρουσιάζεται στην Εικ.22. Το προφίλ του HRR διακυμαίνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου διεξαγωγής του πειράματος λόγω των διάφορων χημικών και θερμικών συμβάντων που εξελίσσονται στο υλικό όταν εκτίθεται σε φωτιά, και αυτά έχουν σχεδιαστεί από την αρχή ως το τέλος τους με *A* έως το *D* στη γραφική παράσταση. Στο σημείο *A*, εμφανίζεται μια εισαγωγική περίοδος στη διάρκεια της οποίας το υλικό δεν απελευθερώνει καθόλου θερμότητα. Κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης του υλικού στην εξωτερική θερμική ροή είναι ανεπαρκής η ακτινοβολήση του υλικού μέχρι την θερμοκρασία αποσύνθεσής του. Έπειτα από αυτή τη καθυστέρηση, ακολουθεί μια ραγδαία αύξηση της τιμής του HRR, σημείο *B*, εξαιτίας της ανάφλεξης των εύφλεκτων αερίων που προέρχονται από την επιφάνεια του υλικού. Η καμπύλη συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή της, και στη συνέχεια σταδιακά μειώνεται αφού η φωτιά πλέον σιγοκαίει την επιφάνεια του δοκιμίου, σημείο *C*. Τελικά η καμπύλη HRR γίνεται αμελητέα όταν η δομή του πολυμερούς έχει υποβαθμιστεί εντελώς.

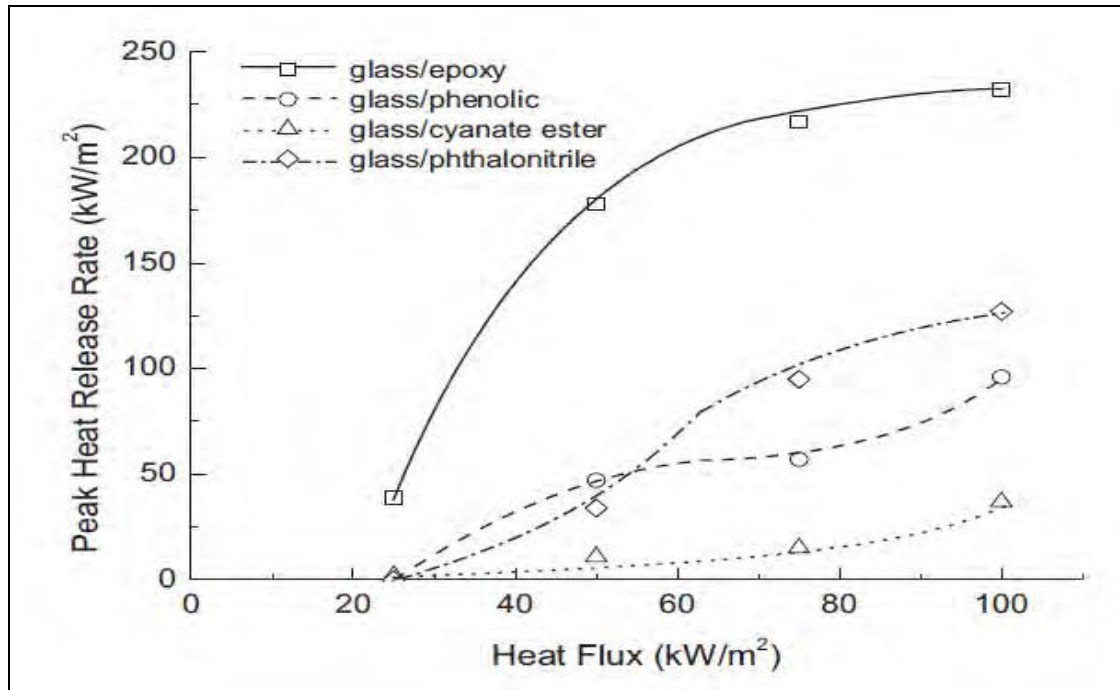
Η ακτινοβολούμενη θερμική ροή επηρεάζει σημαντικά τον αριθμό θερμικής απελευθέρωσης σε διάφορα σύνθετα υλικά. Στην Εικ. 23 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής της θερμικής ροής με τον ρυθμό θερμικής απελευθέρωσης από μια ποικιλία σύνθετων υλικών.

Επίσης το HRR εξαρτάται από το πάχος των υπο δοκιμή υλικών με αρκετές μελέτες να αναφέρουν μεγάλη μείωση στη μέγιστη τιμή του HRR με την αύξηση του πάχους. Στην Εικ.24, παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης του πάχους του δοκιμίου

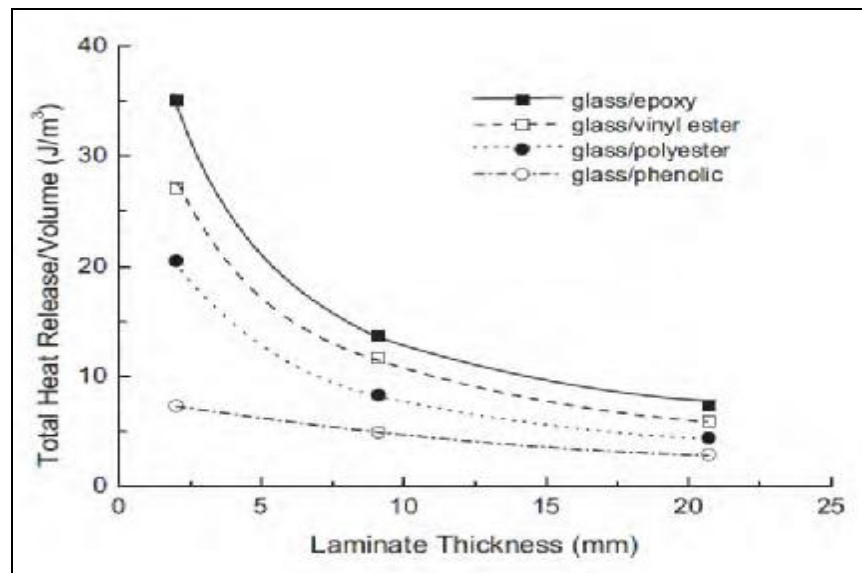
στην θερμότητα που απελευθερώνεται, από τέσσερα διαφορετικά υλικά υαλονημάτων. Παρατηρείται ότι ο HRR μειώνεται σημαντικά για τιμές πάχους μεγαλύτερες των 8mm. Όταν τα σύνθετα υλικά είναι αρκετά λεπτά (τιμές μικρότερες των 8mm), τότε η θερμότητα διαπερνά πολύ γρήγορα το υλικό, προκαλώντας την ολοκληρωτική διάσπαση της μήτρας του υλικού σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, οδηγώντας σε αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.



Εικόνα 23: Προφίλ ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης σύνθετου υλικού (γυαλιού/βινυλεστέρα) υπο σταθερή θερμική ροή [19].



Εικόνα 24: Μεταβολή της μέγιστης τιμής του HRR με τη θερμική ροή [18,20].



Εικόνα 25: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου με την ολική θερμική απελευθέρωση ανά μονάδα όγκου σύνθετου υλικού (Gibson A.G., et al, 1995).

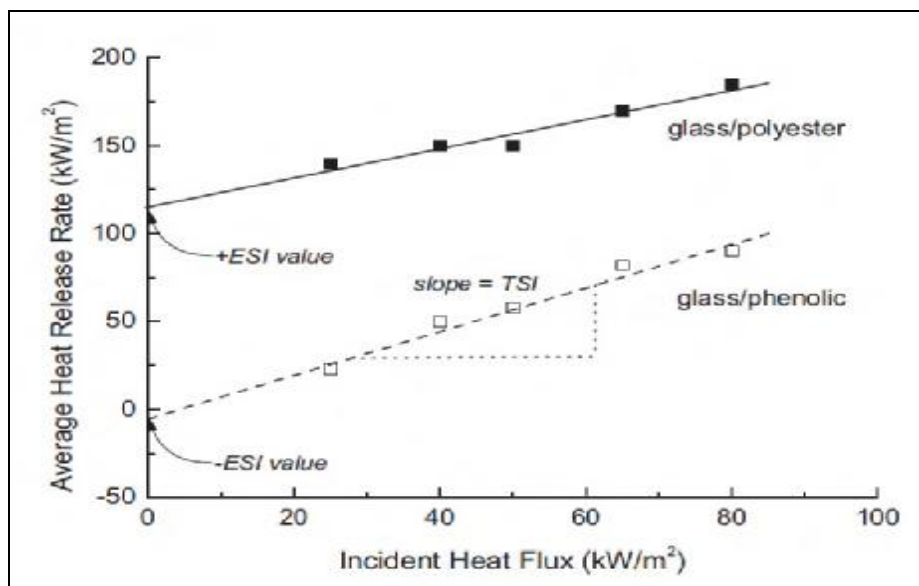
Ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (HRR) υπολογίζεται από τη συγκέντρωση οξυγόνου στα καπναέρια. Το λογισμικό του θερμιδόμετρου κώνου υπολογίζει τον HRR σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση :

$$\dot{Q} = (13.1 \times 10^3) \times 1.10 \times C \times \frac{(0.2095 - X_{O_2})}{(1.105 - 1.5 \times X_{O_2})} \quad (10)$$

- όπου \dot{Q} ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (kW),
 C συντελεστής ροής μετρητή orifice ($kg^{1/2}m^{1/2}k^{1/2}$)
 ΔP πτώση πίεσης στο μετρητή orifice (Pa)
 T_r θερμοκρασία ρευστού στο μετρητή orifice (K)
 X_{O_2} μετρούμενη τιμή γραμμομορίου οξυγόνου στα καπναέρια.

4.8.2 Thermal stability index, (TSI) – Δείκτης θερμικής σταθερότητας.

Άλλη μια ιδιότητα αντίδρασης ενός υλικού σε φωτιά, είναι ο δείκτης *TSI*, ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η ευφλεκτότητα ενός υλικού. Ο *TSI* υπολογίζεται από τη γραφική παράσταση της μέσης τιμής του HRR με τη προσπίπτουσα θερμική ροή, (Εικ.25). Στην εν λόγω γραφική παράσταση υποδεικνύεται κατά πόσο είναι εύφλεκτη η φωτιά που εξελίσσεται επάνω στο υλικό να διατηρηθεί χωρίς τη χρησιμοποίηση εξωτερικής πηγής θερμικής ροής. Στη γραφική παράσταση η κλίση της καμπύλης είναι ο δείκτης **TSI**, όσο μικραίνει αυτός ο δείκτης τόσο μικρότερη εξωτερική θερμική ροή θα χρειαστεί το υλικό για να καεί, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του δείκτη τόσο μεγαλύτερη θερμική ροή θα χρειαστεί για να καεί το υλικό. Τα σύνθετα θερμοπλαστικά υλικά έχουν σχετικά υψηλή τιμή TSI, συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά.



Εικόνα 26: Γραφική παράσταση του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης με την προσπίπτουσα θερμική ροή, για δυο διαφορετικά υλικά (Egglestone G.T., et al, 1994).

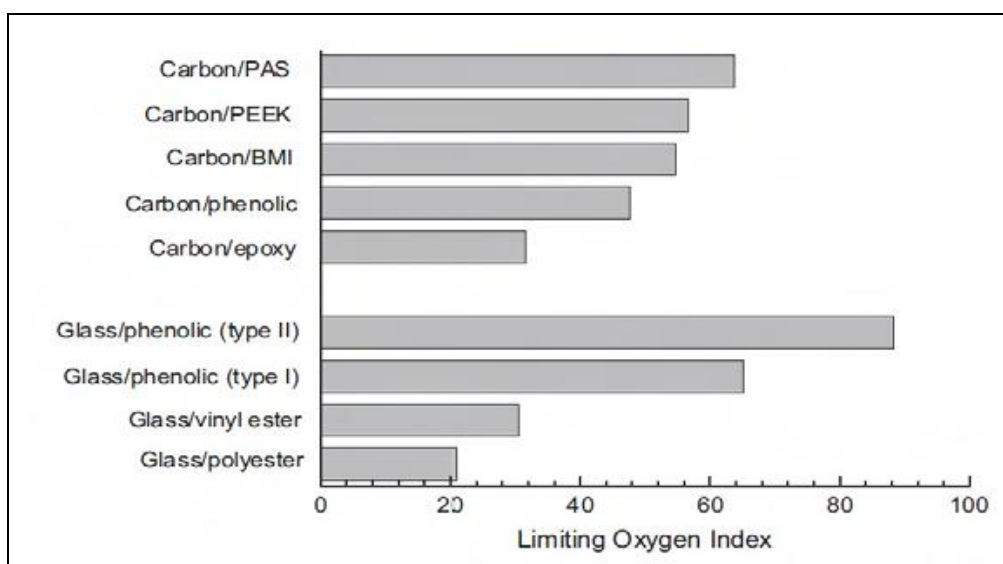
4.8.3 Limiting oxygen index (LOI).

Ο δείκτης **LOI** χρησιμοποιείται συχνά για την ποσοτικοποίηση της ευφλεκτότητας των οργανικών πολυμερών και των σύνθετων υλικών. Ο δείκτης LOI προσδιορίζεται ως η μικρότερη ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να διατηρηθούν οι φλόγες της καύσης, και επιπλέον η συγκεκριμένη τιμή χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός φλεγόμενου υλικού να αποσβένει από μόνου του τις φλόγες. Ο προσδιορισμός του δείκτη LOI επιτυγχάνεται με την έκθεση ενός υλικού σε φλόγες υπο διάφορα επίπεδα οξυγόνου, έτσι με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται το μικρότερο ποσοστό οξυγόνου που επιτρέπει στο δείγμα να εμφανίζει φλόγες μικρής κλίμακας. Δυστυχώς όμως η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εξετάζει το δείγμα σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς, επομένως ο δείκτης LOI δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς σε φωτιά ενός υλικού. Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για την κατάταξη των πολυμερών σύνθετων υλικών ως προς την ευφλεκτότητά τους [27 – 30].

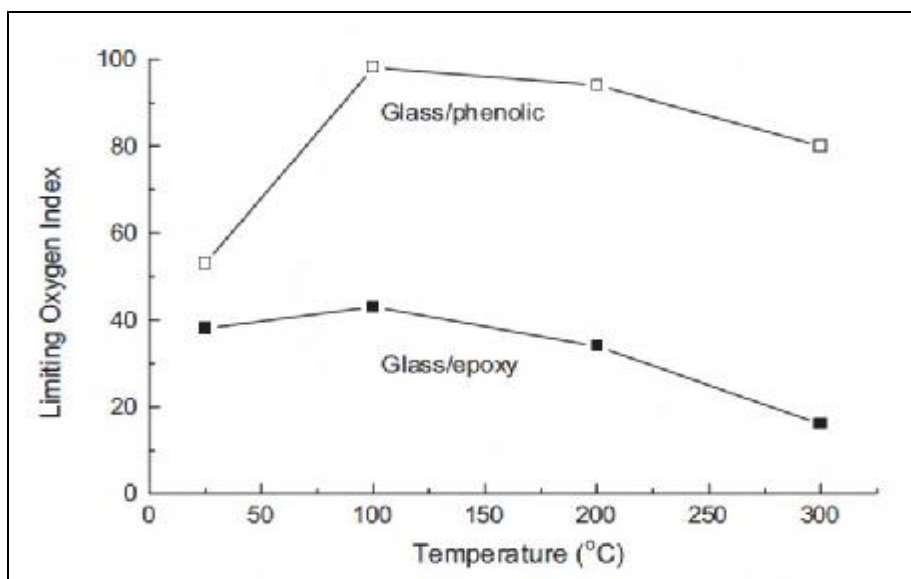
Οι τιμές του **LOI** για μια γκάμα θερμοσκληρυνόμενων και θερμοπλαστικών σύνθετων υλικών παρουσιάζονται στην Εικ.26. Φαίνεται ότι οι τιμές του **LOI** για εύφλεκτα σύνθετα υλικά, όπως ο πολυεστέρας, βινυλεστέρας και οι εποξειδικές ρητίνες, είναι κάτω από την τιμή των 30 **LOI**. Αυτές οι τιμές καθορίστηκαν σε

θερμοκρασία δωματίου. Οι τιμές αυτές όμως μπορούν να αλλάξουν δραματικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, συνήθως με την αύξηση της η τιμή του LOI μειώνεται [27 – 30].

Στην Εικ.28, παρουσιάζεται η μεταβολή δυο σύνθετων υλικών υαλονημάτων για ένα θερμοκρασιακό φάσμα από $25^{\circ}C$ έως $300^{\circ}C$. Αξιοσημείωτη είναι η τιμή των $100^{\circ}C$, αφού μέχρι αυτή την τιμή ο LOI αυξάνεται και με την υπέρβαση αυτής της τιμής παρατηρείται σταδιακή μείωση αφού απαιτεί λιγότερη θερμότητα προκειμένου να διατηρηθεί η καύση [34 - 37].



Εικόνα 27: Τιμές των LOI για διάφορα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου (Soratha U. et al, 1993, Allison D.M. et al, 1991)



Εικόνα 28: Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή LOI (Weil E.D. et al, 1992)

4.8.4 Extinction flammability index, (EFI).

Ο δείκτης ESI είναι μια χρήσιμη ποσοτική μέτρηση της ευφλεκτότητας των σύνθετων υλικών, ωστόσο θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας αφού κυρίαρχη ιδιότητα της ευφλεκτότητας είναι ο δείκτης HRR [38, 39, 40]. Ο *EFI* καθορίζεται μέσω της γραφικής παράστασης του μέσου *HRR* με την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία. Το σημείο της καμπύλης που τέμνει τον κατακόρυφο άξονα, σημείο όπου η θερμική ροή είναι μηδενική, ορίζεται ο δείκτης *EFI*. Αρνητική τιμή του *EFI* υποδηλώνει ότι με την απομάκρυνση της θερμικής ροής που εφαρμόζεται στο υλικό, η φωτιά που εξελίσσεται θα κατασβηστεί μόνη της αρκετά γρήγορα. Ενώ όταν ένα συνθετικό έχει θετική τιμή *EFI*, υποδηλώνει ότι η καύση θα συνεχιστεί ακόμη και όταν η θερμική ροή απομακρυνθεί.

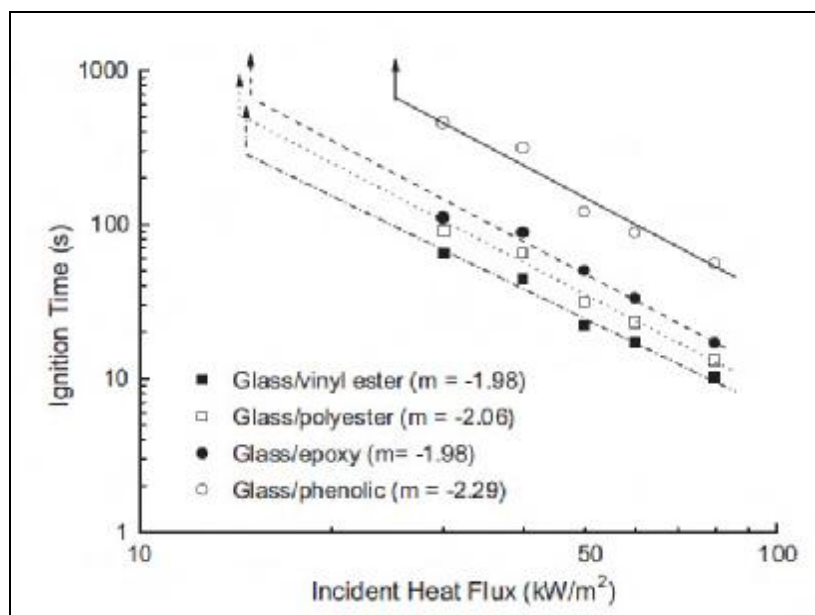
4.8.5 Time to Ignition – Χρόνος Ανάφλεξης

Η ανάφλεξη είναι μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα εύφλεκτα υλικά διότι καθορίζει την έναρξη της καύσης. Οι οργανικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα σύνθετα υλικά μπορούν να αναφλεγούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα όταν εκτεθούν σε φωτιά, με αποτέλεσμα υψηλών θερμοκρασιών φλόγες να βοηθούν τη

διάδοση της φωτιάς. Γι' αυτό το λόγο ο χρόνος ανάφλεξης είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την συμπεριφορά των υλικών σε φωτιά. Η ανάφλεξη συνήθως συμβαίνει όταν η επιφάνεια του σύνθετου υλικού θερμανθεί μέχρι την θερμοκρασία ενδοθερμικής διάσπασης της πολυμερούς μήτρας. Η θερμική διάσπαση της μήτρας παράγει εύφλεκτες ποσότητες αερίων που κατευθύνονται από το υλικό στη φωτιά. Όταν το ποσοστό των εύφλεκτων αερίων φτάσει σε μια κρίσιμη συγκέντρωση τότε συμβαίνει η ανάφλεξη.

Ο χρόνος ανάφλεξης εξαρτάται από μια ποικιλία παραγόντων όπως η διαθεσιμότητα οξυγόνου, η θερμότητα και οι χημικές και οι θερμοφυσικές ιδιότητες της πολυμερούς μήτρας, καθώς και η ενίσχυση του υλικού σε ίνες. Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες ανάφλεξης των σύνθετων ελασμάτων καθώς και των σύνθετων σάντουιτς. Ο χρόνος ανάφλεξης προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη τεχνική θερμιδόμετρου κώνου με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι η αυθόρμητη ανάφλεξη και ο δεύτερος είναι η εξαναγκασμένη ανάφλεξη μέσω ηλεκτρικού αισθητήρα. Στη περίπτωση μας θα μελετηθεί η περίπτωση της εξαναγκασμένης ανάφλεξης.

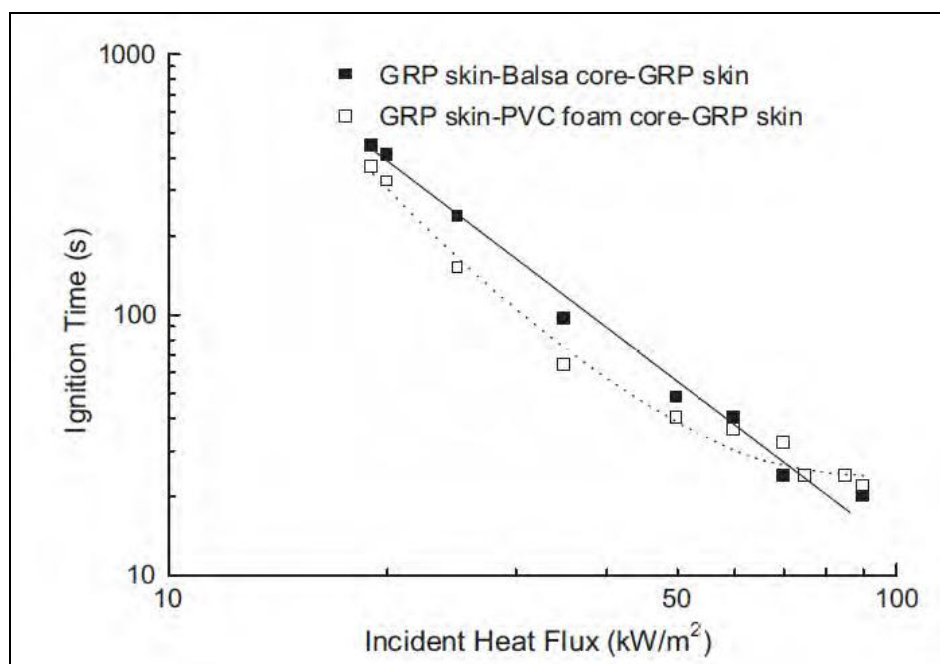
Από τη μια πλευρά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εστιάζεται στα σύνθετα ελάσματα που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική, στην ναυτιλία κ.λ.π. Γι' αυτό το λόγο εξετάστηκε ο χρόνος ανάφλεξης διάφορων ελασμάτων, όπως εποξειδικές ρητίνες, πολυεστέρες, βινυλεστέρες και φαινολικές ρητίνες σε διάφορα περιβάλλοντα φωτιάς [40 - 44]. Στην Εικ.29 παρουσιάζεται η επίδραση μιας εξωτερικής θερμικής πηγής στον χρόνο ανάφλεξης σε ελάσματα με υαλονήματα και διάφορες ρητίνες για μήτρες. Τα σύνθετα υλικά δεν αναφλέγονται κάτω από μια θερμοκρασιακή ροή, ακόμη κι αν έχουν εκτεθεί για πολύ ώρα σε αυτή. Αυτή η κρίσιμη τιμή της θερμοκρασιακής ροής για τον πολυεστέρα, τον βινυλεστέρα, και τις εποξικές ρητίνες είναι περίπου τα $13kW/m^2$ ενώ για τα φαινολικά ελάσματα είναι τα $25kW/m^2$. Αξιοσημείωτη είναι η εξαιρετικά ικανότητα της αντίστασης σε ανάφλεξη των φαινολικών ρητινών, γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως. Η ανάφλεξη κάτω από αυτές τις τιμές δεν επιτυγχάνεται αφού η θερμοκρασιακή ροή είναι πολύ χαμηλή για να θερμάνει τη μήτρα μέχρι τη θερμοκρασία αποσύνθεσης. Η ραγδαία μείωση του χρόνου ανάφλεξης με την αύξηση της θερμοκρασιακής ροής αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση της θερμοκρασιακής ροής αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση του ρυθμού πυρόλυσης μέσω της αύξησης της παροχής των εύφλεκτων αερίων [40].



Εικόνα 29: Γραφική παράσταση του χρόνου ανάφλεξης ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία για τέσσερα διαφορετικά υλικά (Gibson A.G. et al, 1995).

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν πολύ περιορισμένες πληροφορίες για εφαρμογή των σύνθετων υλικών τύπου σάντουιτς σε εφαρμογές αεροναυπηγικής. Η ανάφλεξη των σύνθετων σάντουιτς μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία εξαιτίας της επίδρασης το υλικού που χρησιμοποιείται στο πυρήνα. Στην Εικ.30 δίνεται η επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον χρόνο ανάφλεξης δυο υλικών σύνθετων σάντουιτς. Παρατηρείται ότι το υλικό με πυρήνα ξύλου balsa και εξωτερικής επίστρωσης πλαστικού ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GPR), εμφανίζει μια γραμμική σχέση μεταξύ του χρόνου ανάφλεξης και της θερμικής ροής, και αυτή η γραμμική συμπεριφορά εμφανίζεται και στα ελάσματα μονής επίστρωσης (σύμφωνα με την Εικ.30). Ενώ το σύνθετο με πυρήνα πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και εξωτερική επίστρωση GPR δεν εμφανίζει τον ίδιο γραμμικό χαρακτήρα σε υψηλές θερμικές ροές. Επιπλέον, ο χρόνος ανάφλεξης για αυτό το υλικό είναι αξιοσημείωτα μικρότερος για θερμικές ροές κάτω των 50 kW/m^2 . Αυτό οφείλεται στην επιρροή του PVC πυρήνα στη διαδικασία ανάφλεξης, αφού όταν το υλικό εκτεθεί σε φωτιά ο πυρήνας του λιώνει και διασπάται με αποτέλεσμα τη δημιουργία φουσαλίδων αέρα μεταξύ του πυρήνα και της επίστρωσης. Αυτό το κενό αέρα μειώνει το ρυθμό της θερμικής αγωγιμότητας μέσω της επίστρωσης με αποτέλεσμα να θερμαίνεται και να αναφλέγεται πιο γρήγορα. Στη

περίπτωση του σύνθετου σάντουιτς με πυρήνα balsa, η θερμική μεταφορά δεν διακόπτεται αφού ο πυρήνας μένει σε επαφή με την επίστρωση με αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους ανάφλεξης. Γενικότερα τα υλικά, που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες, με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα όπως ο πολυμερής αφρός πολυμερή με κυψελίδες μπορούν να μειώσουν περισσότερο το χρόνο ανάφλεξης.



Εικόνα 30: Επίδραση της θερμικής ροής στο χρόνο ανάφλεξης δυο σύνθετων υλικών σάντουιτς (Grenier A.T. et al, 1998).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στις ιδιότητες ανάφλεξης των πολυμερών σύνθετων υλικών είναι το περιβάλλον που εξελίσσεται η φωτιά. Οι περισσότερες μελέτες ανάφλεξης πραγματοποιούνται κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες (π.χ. 21% O_2 /78% N_2), ωστόσο η ατμόσφαιρα σε μερικές φωτιές μπορεί να είναι ουσιαστικά διαφορετική. Για παράδειγμα όταν μια φωτιά εξελίσσεται σε ένα κλειστό χώρο χωρίς αερισμό, το ποσοστό του οξυγόνου πέφτει με τη πάροδο του χρόνου φτάνοντας ακόμη και τα επίπεδα της τάξεως των 10% προτού οι φλόγες κατασβηστούν από την έλλειψη οξυγόνου. Σύμφωνα με έρευνες [44, 45], έδειξαν ότι η ανάφλεξη θα πραγματοποιηθεί όταν υπάρξει τόση θερμική ενέργεια στην επιφάνεια του πολυμερούς ώστε να τη μετατρέψει από στερεή καύσιμη ύλη σε αέρια. Αυτή η θερμότητα αεριοποίησης ανά

μονάδα μάζας στερεάς πολυμερούς ύλης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$h_g = c(T_{ign} - T_0) + (1 + m)h_n \quad (11)$$

όπου: T_{ig} θερμοκρασία ανάφλεξης,

T_0 θερμοκρασία περιβάλλοντος,

h_n θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση των διασπώμενων αερίων,

m λόγος της μάζας των άκαυστων υλικών στο πολυμερές, όπως οι ίνες ενίσχυση κλπ.,

$c = c_0 T / T_0$ θερμοχωρητικότητα,

c_0 θερμοχωρητικότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επομένως με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, η θερμότητα αεριοποίησης σχετίζεται με τη θερμοκρασία ανάφλεξης ενός πολυμερούς μέσω της μαθηματικής έκφρασης:

$$h_g = \int_{T_0}^{T_{ign}} c(T) dT + (1 - m)h_n = \frac{c_0 T_{ig}^2}{2T_0} + \frac{\dot{e}}{\dot{e}}(1 - m)h_n - \frac{c_0 T_0 \dot{u}}{2} @ \frac{c_0 T_{ig}^2}{2T_0} \quad (12)$$

$$\dot{e} T_{ig} @ \frac{\dot{e} T_0 h_g \dot{u}^{1/2}}{\dot{e} c_0 \dot{u}} \quad (13)$$

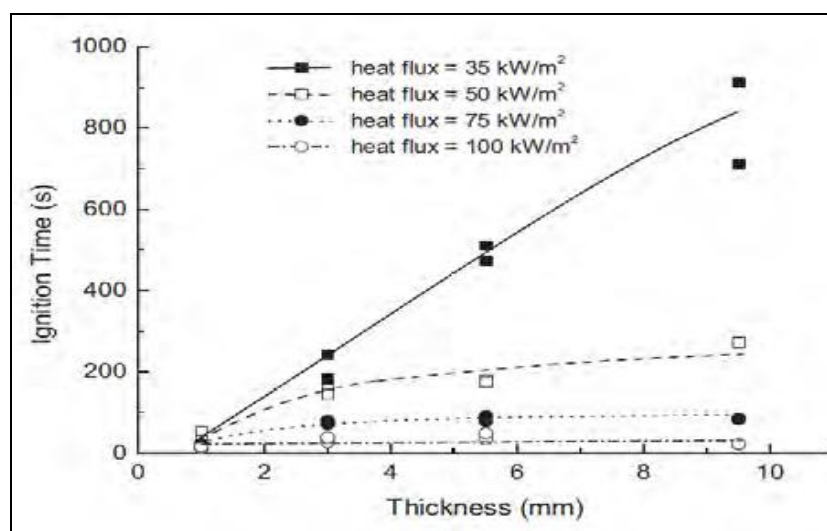
Όπως προκύπτει από τη σχέση (11) αν οι τιμές των h_g και c_0 είναι γνωστές για ένα πολυμερές, τότε είναι εύκολο να εκτιμηθεί η θερμοκρασία ανάφλεξής του.

Τελευταία αλλά όχι ασήμαντη, θεωρείται η επίδραση του πάχους του πολυμερούς στο χρόνο ανάφλεξης [39, 43]. Στην Εικ.31 παρουσιάζεται η επίδραση του πάχους του δοκιμίου στο χρόνο ανάφλεξης για ελάσματα γυαλιού/φαινολών δοκιμασμένες σε διάφορες θερμικές ροές. Παρατηρείται ότι στα $35 kW/m^2$ ο χρόνος ανάφλεξης αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση του πάχους. Ωστόσο σε υψηλότερες θερμικές ροές, ο χρόνος ανάφλεξης σταδιακά αυξάνεται για τιμές πάχους μέχρι και τα $3mm$, ενώ πάνω από αυτή τη τιμή ο χρόνος γίνεται σχεδόν ανεξάρτητος με το πάχος. Σύμφωνα με την αναφορά (Hume J. et al, 1992), η αύξηση του χρόνου ανάφλεξης με το πάχος οφείλεται στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Τα υλικά

ταξινομούνται ανάλογα με το θερμικό τους πάχος, με αυτό τον τρόπο ένα υλικό θεωρείται 'θερμικά λεπτό' όταν η θερμότητα από τη φωτιά απορροφάται τόσο γρήγορα ώστε δεν υπάρχει κάποιο σημαντικό θερμοκρασιακό βαθμωτό στο υλικό, ενώ στα 'θερμικά παχιά' υλικά υπάρχει ένα θερμοκρασιακό βαθμωτό. Οι ερευνητές [46.47] προτείνουν ότι το θερμικό πάχος του υλικού μπορεί να προσδιοριστεί από το χαρακτηριστικό μήκος της θερμικής αγωγιμότητάς του (Δ), η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$D = \sqrt{a t_i} = \sqrt{\frac{k t_i}{r c}} \quad (14)$$

- όπου: a ο συντελεστής θερμικής διάχυσης,
 t_i ο χρόνος ανάφλεξης,
 k ο συντελεστής θερμική αγωγιμότητας,
 r η πυκνότητα του υλικού,
 c η ειδική θερμότητα του υλικού.



Εικόνα 31: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου στο χρόνο ανάφλεξης σε ελάσματα γυαλιού/φαινολών δοκιμασμένες σε διάφορες θερμικές ροές (Scudamore M.J. et al, 1994)

Όταν το χαρακτηριστικό μήκος της θερμικής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερο από το πάχος του δείγματος, L_o , τότε θεωρείται θερμικά λεπτό. Στη πράξη, αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα σύνθετα τα υλικά είναι θερμικά λεπτά όταν το πάχος τους είναι μικρότερο από $2mm$. Λαμβάνοντας υπόψη παραπάνω, ο χρόνος ανάφλεξης ενός ομογενούς υλικού μπορεί να προσδιοριστεί ως :

$$t_i = r \times c \times L_o \frac{(T_i - T_o)}{q_{net}} \quad (15)$$

όπου: T_i θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού την ώρα της ανάφλεξης
 T_o θερμοκρασία περιβάλλοντος
 q_{net} προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία στην επιφάνεια του υλικού (συμπεριλαμβανομένων και των θερμικών απωλειών).

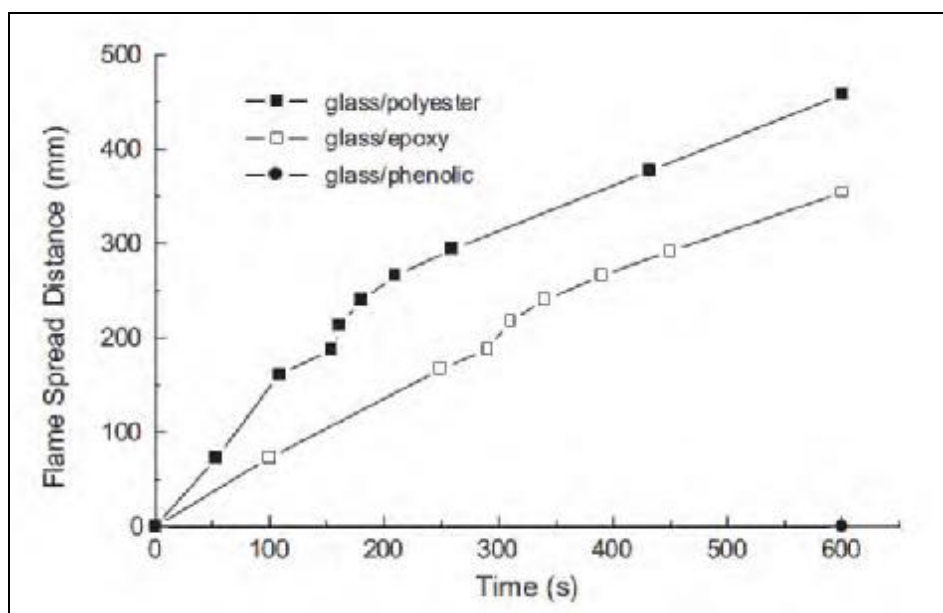
Η εξίσωση (15) δείχνει ότι ο χρόνος ανάφλεξης ενός θερμικά λεπτού υλικού μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας. Η γραφική παράσταση του χρόνου ανάφλεξης ως προς τη προσπίπτουσα ακτινοβολία δίνει καμπύλη με κλίση -2 για θερμικά λεπτά υλικά. Η επαλήθευση της μαθηματικής εξίσωσης επιτυγχάνεται με βάση και την Εικ.29 όπου οι καμπύλες των σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού παρουσιάζουν κλίση (m) περίπου -2.

4.8.6 Surface flame spread – Επιφανειακή Εξάπλωση Φλόγας

Ένας σημαντικός συντελεστής που περιγράφει την ανάπτυξη και τη διάδοση της φωτιάς είναι η ταχύτητα με την οποία οι φλόγες διαδίδονται πάνω στην επιφάνεια των εύφλεκτων υλικών [13]. Εξαιτίας της υψηλής ευφλεκτότητας πολλών υλικών, οι φλόγες θα διαδίδονται πολύ γρήγορα επάνω στο υλικό με αποτέλεσμα τη δυσκολία στη κατάσβεση της φωτιάς. Η διάδοση της φωτιάς σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας πειραματικές τεχνικές. Η πιο κοινή τεχνική είναι η έκθεση ενός σύνθετου υλικού τοποθετημένο υπο γωνία 45° σε ένα θερμαντικό πάνελ σταθερής θερμικής ροής. Το πάνελ τοποθετείται στο πάνω μέρος του υλικού προκειμένου να εξαναγκάσουμε τη φωτιά να εξαπλωθεί από το άνω μέρος του υλικού μέχρι το κάτω και μετράται η ταχύτητα διέλευσης της φωτιάς.

Στην Εικ. 32, παρουσιάζεται η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας για διάφορα ελάσματα πολυεστέρα, εποξικά και φαινολών. Παρατηρείται ότι οι φλόγες διαδίδονται

πολύ γρήγορα στα υλικά πολυεστέρα και εποξικά και αυτό οφείλεται στην υψηλή ευφλεκτότητα των υλικών. Ωστόσο η φλόγα δεν διαδίδεται στο υλικό από φαινόλη, πράγμα που καθιστά το υλικό ικανό να κατασβηστεί μόνο του τη φωτιά. Γι' αυτό το λόγο τα συγκεκριμένα υλικά προτιμώνται σε πολλές εφαρμογές όπου υπάρχει υψηλό ποσοστό εμφάνισης πυρκαγιάς [25].

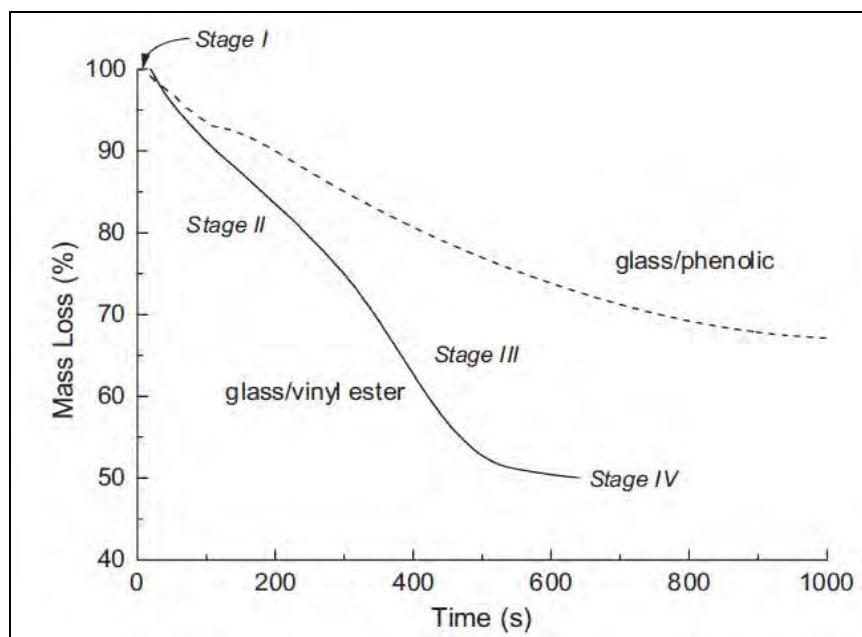


Εικόνα 32: Διάδοση της φλόγας συναρτήσει του χρόνου (Gibson A.G. et al, 1995).

4.8.7 Mass Loss – Απώλεια Μάζας

Η απώλεια μάζας είναι μία ποσοτική μέτρηση του υλικού που θα διασπαστεί στη φωτιά. Μέσω της μεθόδου μέτρησης που παρέχει το καλορίμετρο κώνου μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό και ο ρυθμός της διάσπασης των οργανικών συνιστωσών που αποτελούν ένα σύνθετο υλικό. Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της απώλειας μάζας δυο σύνθετων υλικών κατά τη διάρκεια του χρόνου, ακτινοβολούμενα υπο σταθερή θερμική ροή των 50 kW/m^2 . Οι καμπύλες της απώλειας μάζας παρουσιάζουν κάποιες περιοχές, όπου η κάθε μια αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό φαινόμενο που συμβαίνει κατά τη καύση του υλικού και αυτές αριθμούνται από I έως IV. Το στάδιο I, αντιπροσωπεύει μια μικρή περίοδο όπου δεν εμφανίζεται κάποια μεταβολή στο βάρος του υλικού όταν αυτό έχει εκτεθεί για πρώτη φορά στη φωτιά.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μήτρα του πολυμερούς δεν έχει φτάσει στη θερμοκρασία αποσύνθεσης. Το στάδιο II, χαρακτηρίζεται από ταχεία απώλεια μάζας στη πάροδο του χρόνου, αφού σε αυτή τη φάση έχει ξεκινήσει η ενδοθερμική διάσπαση της μήτρας του σύνθετου υλικού. Κατά τη διάρκεια του σταδίου III, ο ρυθμός απώλεια μάζας μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας της υποβάθμισης της μήτρας του πολυμερούς παρότι μια μικρή περιοχή του υλικού παραμένει άθικτη από τη φωτιά. Σε αυτή τη φάση, το υλικό συμπεριφέρεται ως ένα θερμικά λεπτό υλικό, γεγονός που επιταχύνει το ρυθμό απώλεια μάζας. Στο στάδιο IV, η καμπύλη της απώλεια μάζας φτάνει στη χαμηλότερη τιμή της, αφού πλέον η μήτρα του πολυμερούς έχει καταναλωθεί, αντιπροσωπεύοντας την τελική απώλεια μάζας του υποβαθμισμένου ελάσματος.



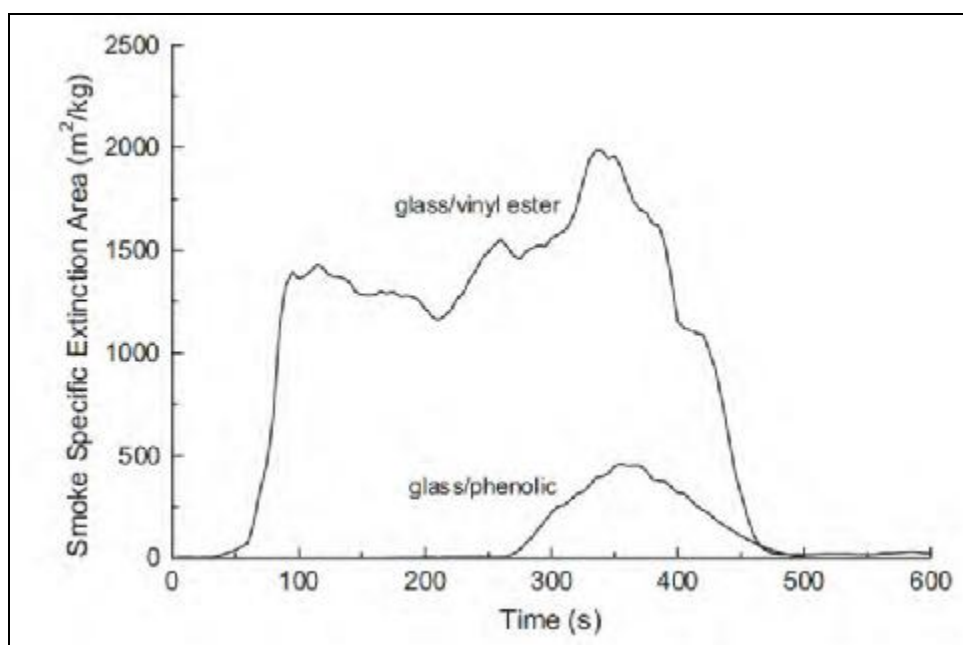
Εικόνα 33: Τυπικές καμπύλες απώλεια μάζας για σύνθετα υλικά γυαλιού/βινυλεστέρα και γυαλιού/φαινολικών ρητινών [25, 48, 49].

4.8.8 Smoke Production – Παραγωγή Καπνού

Η παραγωγή πυκνού καπνού των πολυμερών σύνθετων υλικών, αποτελεί μια από τις βασικότερες ανησυχίες σε θέματα ασφαλείας των κατασκευαστικών εταιριών. Ο καπνός που παράγεται από ένα φλεγόμενο σύνθετο υλικό αποτελείται από μίγμα θραυσμάτων ινών και πολύ μικρών σωματιδίων άνθρακα. Η έκθεση των ανθρώπων

στα καπναέρια της καύσης δεν θεωρείται επιβλαβής, ωστόσο ο καπνός μπορεί να είναι αρκετά πυκνός με αποτέλεσμα να καθιστά τη κατάσβεση της φωτιάς αρκετά δύσκολη.

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι ο παραγόμενος καπνός από εύφλεκτα σύνθετα υλικά όπως, ο πολυεστέρας ο βινυλεστέρας και οι εποξικές ρητίνες, είναι πολύ πυκνότερος από το καπνό που παράγεται από τις φαινολικές ρητίνες [25, 32, 48, 49,51, 52, 53]. Στην Εικ. 34 γίνεται η σύγκριση του συντελεστή SEA - Specific Extinction Area, για διάφορα σύνθετα υλικά όπως γυαλιού/βινυλεστέρα και γυαλιού/φαινολών όταν αυτά εκτεθούν σε φωτιά. Ο δείκτης SEA είναι μια μέτρηση ποσοτικοποίησης του ποσού αυτών των καπναερίων που απελευθερώνονται από μια μάζα και μετατρέπονται σε καπνό. Ο δείκτης SEA του βινυλεστέρα αυξάνεται ταχύτατα κατά τη καύση του, παραμένοντας υψηλός μέχρι η μήτρα του πολυμερούς να καταναλωθεί εντελώς γύρω στα 500sec. Ενώ τα σύνθετα φαινολών παράγουν πολύ λιγότερο καπνό, γεγονός που τα καθιστά τα ιδανικότερα υλικά σε κατασκευές με υψηλό ποσοστό εμφάνισης φωτιάς.



Εικόνα 34: Παραγωγή καπνού συναρτήσεσι του χρόνου για δυο σύνθετα υλικά ακτινοβολούμενα υπο σταθερή θερμική ροή των (Mouritz A.P. et al, 2006).

4.8.8 Smoke Toxicity – Τοξικότητα Καπνού

Στη μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών σε πυρκαγιά, η κυριότερη μεταβλητή της είναι ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (HRR), ωστόσο σημαντικός παράγοντας είναι η τοξικότητα των αερίων που απελευθερώνονται από τη καύση των σύνθετων υλικών. Πολλές φορές η τοξικότητα των αερίων έχει οδηγήσει σε θάνατο αρκετά άτομα, πράγμα που τη καθιστά μια σοβαρή ιδιότητα που απαιτεί μεγάλη προσοχή για όλες τις κατασκευαστικές εταιρίες. Το ποσοστό μονοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τη καύση των σύνθετων υλικών εξαρτάται από τη σύνθεση των οργανικών συστατικών του σύνθετου υλικού, τη θερμοκρασία της φωτιάς, τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου, ωστόσο ακόμη και χαμηλότερες τιμές μονοξειδίου του άνθρακα μπορεί να προκαλέσει το θάνατο [50]. Όταν η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα φτάσει περίπου στα 1500 ppm (*parts per million*) τότε σε μια ώρα μπορεί να επιφέρει τον θάνατο, ενώ στον ίδιο χρόνο η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να φτάσει στα 100.000 ppm για να προκαλέσει το θάνατο. Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 11 ο οποίος παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις των εκπεμπόμενων αερίων από τη καύση διάφορων υλικών.

Πίνακας 11: Συγκεντρώσεις αερίων από τη καύση των παρακάτω υλικών (Sastri S.B. et al, 1997),(Sorathia U. et al, 1991).

Composite	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	HCN (ppm)	HCl (ppm)
Glass/vinyl ester	230	0,3	not detected	not detected
Glass/epoxy	283	1,5	5.0	not detected
Glass/BMI	300	0,1	7.0	Trace
Glass/phenolic	300	1,0	1.0	1.0
Glass/polyimide	200	1,0	Trace	2.0
Glass/PPS	70	0,5	2.0	0.5
Glass/phthalonitrile	40	-	-	-
Glass/PEEK	trace	trace	not detected	not detected

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Πειραματική Συσκευή – Θερμιδόμετρο Κώνου.

Το όνομα του οργάνου προέρχεται από 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^2 .

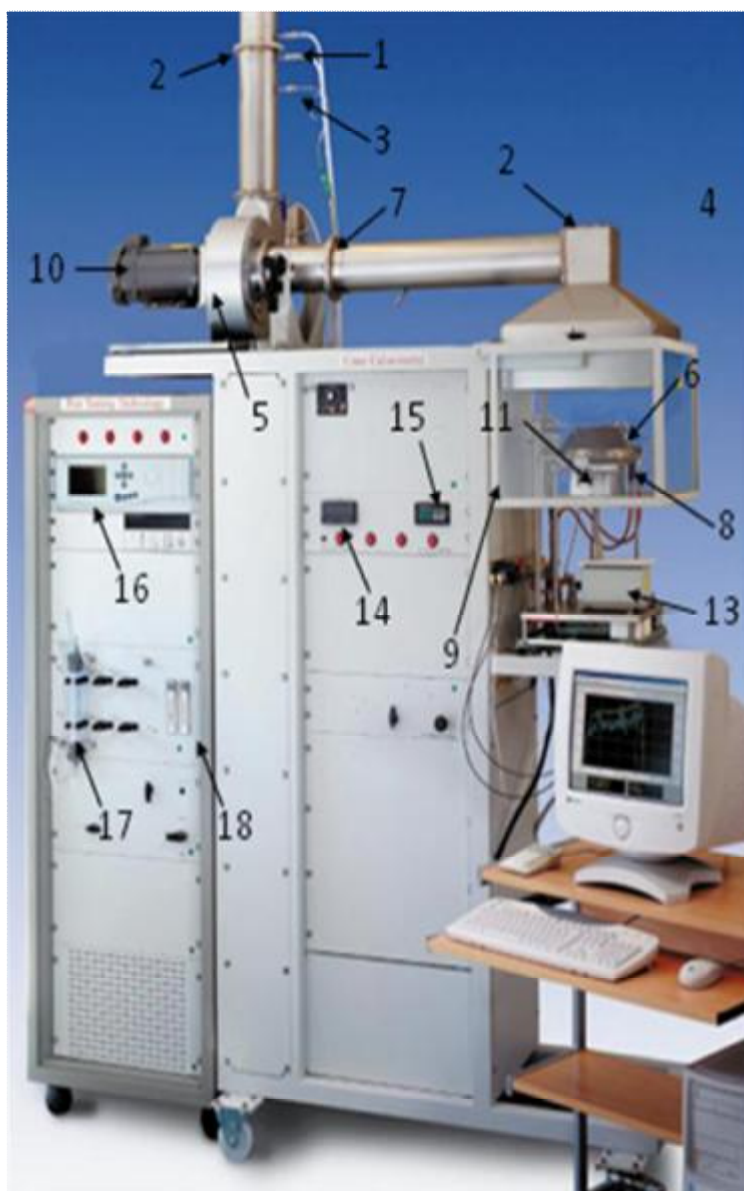
Το θερμιδόμετρο κώνου σήμερα είναι ένα από τα πιο σημαντικά όργανα στον τομέα μετρήσεων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων υλικών, κατά την αντίδρασή τους στη φωτιά, σε κλίμακα εργαστηρίου. Η βασική παράμετρος με βάση την οποία εκτιμάται η ανάπτυξη μιας φωτιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (heat release rate – HRR). Ο προσδιορισμός αυτής της παραμέτρου σε πραγματικές 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 ελλείματος 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 που κατακρατείται κατά τη διαδικασία της καύσης.

Τα βασικά στοιχεία της διάταξης είναι:

- θερμαντήρας κώνου με μέγιστη εκλυόμενη θερμότητα 100 kW/m^2 , που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο προσανατολισμό,
- σπινθηριστής (igniter) 10kV , για την ανάφλεξη του υλικού,
- μετρητής ροής θερμότητας (heat flux meter) για την ρύθμιση – βαθμονόμηση της παρεχόμενης θερμότητας στο υπό εξέταση δοκίμιο,
- σύστημα απαγωγής καυσαερίων το οποίο αποτελείται από μία καμινάδα , όργανα καταγραφής των αερίων της καύσης,
- αναλυτές των αερίων της καύσης (O_2 , CO , CO_2)
- αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη),

- φωτόμετρο για τον προσδιορισμό της ποσότητας του παραγόμενου καπνού,
- ζυγός ακριβείας για τον προσδιορισμό του ρυθμού απώλειας μάζας του υπό δοκιμή υλικού,
- αισθητήρες μέτρησης διαφορικής πίεσης,
- σύστημα αφύγρανσης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της διάταξης Θερμιδομέτρου Κώνου με ένα πλήθος λεπτομερειών φαίνεται στην Εικ. 34.



1. Μέτρηση διαφορικής πίεσης
2. Στόμιο διαμορφωμένο σε πλάκα (orifice plate)
3. Θερμοζεύγος
4. Κάλυπτρο Κώνου
5. Φυσητήρας
6. Θερμική Αντίσταση
7. Δακτυλιοειδής καθετήρας δειγματοληψίας αερίων
8. Ηλεκτρικός Σπινθηριστής
9. Πλευρικά προστατευτικά τοιχώματα
10. Κινητήρας φυσητήρα
11. Πλαίσιο τοποθέτησης δοκιμίου
12. Βάση στήριξης δοκιμίου
13. Ζυγός
14. Ψηφιακή ένδειξη ζυγού
15. Όργανο ελέγχου θερμικής αντίστασης
16. Αναλυτής αερίων
17. Αφυγραντής
18. Ροόμετρα ελέγχου αερίων

Εικόνα 35: Αναλυτική περιγραφή επιμέρους διατάξεων της συσκευής θερμιδομέτρου κώνου.

Οι δοκιμές με το Θερμιδόμετρο Κώνου πραγματοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμών **ISO 5660** – Δοκιμές Αντίδρασης Υλικών σε Φωτιά. Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν με τη συγκεκριμένη διάταξη πραγματοποιήθηκαν στο Εργ. Τεχνικής Θερμοδυναμικής της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Το Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής είναι Διαπιστευμένο από τον ΕΣΥΔκατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025 για τη διενέργεια δοκιμών και μετρήσεων για την Αντίδραση Δομικών Υλικών σε Φωτιά με τη Μέθοδο Θερμιδομετρίας Κώνου, σύμφωνα με τα πρότυπα δοκιμών ISO 5660. Ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Τεχνικής Θερμοδυναμικής καλύπτει όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές για πλήρεις δοκιμές αντίδρασης υλικών σε φωτιά σύμφωνα με τα πρότυπα: ISO 5660, ASTM E 1354, ASTM E 1474, ASTM E 1740, ASTM F 1550, ASTM D 5485, ASTM D 6113, NFPA 264, NFPA 271, CAN ULC 135, BS 476 Part 15.

Το θερμιδόμετρο κώνου αποτελεί σημαντικό εργαλείο εργαστηριακής κλίμακας στο πεδίο των δοκιμών σε φωτιά επειδή έχει τη δυνατότητα μέτρησης των σημαντικότερων παραμέτρων της καύσης υλικών κάτω από ελεγχόμενες και προκαθορισμένες συνθήκες. Τα αποτελέσματα των μετρούμενων μεγεθών μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την αξιολόγηση των υλικών και για την εκτίμηση της συμπεριφοράς τους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Το θερμιδόμετρο κώνου χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα για την ανάπτυξη προϊόντων αλλά και ως εργαλείο για την συλλογή δεδομένων για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της φωτιάς. Το θερμιδόμετρο κώνου έχει τη δυνατότητα άμεσης μέτρησης σημαντικών ιδιοτήτων σχετικών με την συμπεριφορά υλικών σε πυρκαγιές στις οποίες περιλαμβάνονται:

- ∅ Χρόνος ανάφλεξης (time to ignition),
- ∅ Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (heat release rate),
- ∅ Ενεργή θερμότητα καύσης ((effective heat of combustion),
- ∅ Ρυθμός παραγωγής καπνού (total smoke production),
- ∅ Ρυθμός απώλειας μάζας (mass loss rate),
- ∅ Παραγωγή CO και CO₂ (CO, CO₂ production)

Τα αποτελέσματα μπορούν επί πλέον να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς των υλικών σε δοκιμές μεμονωμένου καιόμενου αντικειμένου (SBI) κατά EN 13823, που απαιτούνται για την κατάταξη δομικών υλικών κατά CE.

Η διαδικασία μέτρησης με χρήση του οργάνου έχει προτυποποιηθεί 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 διαπιστευθεί από τον ΕΛΟΤ για την εφαρμογή συστήματος ποιότητας EN ISO/IEC 17025 αναφορικά με παροχή μετρήσεων – παραμέτρων υλικών ως προς την αντίδραση αυτών σε συνθήκες φωτιάς.

Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν χρόνο ανάφλεξης (time to ignition), χρόνο σβέσης (time to flameout), ολικό ποσό έκλυσης θερμότητας (total heat release), ρυθμό έκλυσης θερμότητας (heat release rate), ολική ποσότητα κατανάλωσης οξυγόνου (total oxygen consumed), απώλεια μάζας (mass lost), ρυθμό απώλειας μάζας (mass lost rate), παραγωγή καπνού (total smoke production), καθώς και παραγωγή καπνού στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας (πριν και κατά τη διάρκεια παρουσίας φλόγας), ενεργή θερμότητα καύσης (effective heat of combustion). Επίσης αναφορικά με έκλυση τοξικών ρύπων στα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται ποσότητες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα κατά την καύση ενός υλικού CO, CO₂.



Εικόνα 36: Τυπική εικόνα καύσης δοκιμίου κατά την διαδικασία ελέγχου δοκιμίου ως προς την αντίδρασή του στη φωτιά.

Αναφορικά με τη μέτρηση της μάζας του δοκιμίου αυτό τοποθετείται σε μια μεταλλική κυψέλη και στη συνέχεια σε κατάλληλο υποδοχέα. Ο υποδοχέας τίθεται στο ζυγό που είναι προσαρμοσμένος στη θέση μέτρησης και μπορεί να καταγράφει το βάρος του δοκιμίου κατά τη διάρκεια πειράματος. Επίσης ανάλογα με το εκάστοτε υποδοκιμή υλικό, ο υποδοχέας επιδέχεται τροποποίηση. Η τροποποίηση έχει να κάνει με τη χρήση ενός μεταλλικού πλέγματος προκειμένου αν λιώσει το δοκίμιο να μην μετακινηθεί από τη θέση του, όπως φαίνεται στην Εικ.37.



Εικόνα 37: Διάταξη κώνου καλορίμετρου και μεταλλικό πλέγμα εφαρμογής στην επιφάνεια δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα υλικά που δοκιμάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO – 5660 στη διάταξη θερμιδόμετρου κώνου ανήκουν στην κατηγορία υλικών αεροσκαφών όπως επικάλυψη δαπέδου - χαλί (carpet), υλικό οροφής της καμπίνας του αεροσκάφους (ceiling), κάθισμα επιβατών (seat) και υφάσματα τύπου (textilebluenvy). Οι δοκιμές των παραπάνω υλικών πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές τιμές ακτινοβολούμενης ροής θερμότητας, προκειμένου να ανιχνευθούν πιθανές διαφοροποιήσεις της συμπεριφοράς των υλικών κατά την διαδικασία της καύσης τους.

Οι τιμές ακτινοβολούμενης ροής θερμότητας που επιλέγησαν για όλα τα είδη υλικών που δοκιμάστηκαν ήταν στο εύρος (15 – 60) kW/m². Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα με κοινούς άξονες ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς των υλικών στις διαφορετικές τιμές ροής θερμότητας. Πιο αναλυτικά, στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης ελήφθησαν μεγέθη που σύμφωνα με το πρότυπο ISO – 5660 συγκεντρώνουν την απαιτούμενη πληροφορία σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών κατά την αντίδρασή τους σε συνθήκες φωτιάς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειράματα σε Θερμιδόμετρο Κώνου προσομοιάζουν διαφορετικές συνθήκες φωτιάς ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολούμενης ροής θερμότητας και μέσα από αυτά εκτιμάται η συμπεριφορά των υλικών στις πραγματικές συνθήκες.

Τα βασικότερα μεγέθη που σύμφωνα με το πρότυπο ISO – 5660 (αντίδραση σε δοκιμή φωτιάς – Reaction to fire test) δίνουν την απαιτούμενη πληροφορία για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της συμπεριφοράς ενός υλικού σε συνθήκες φωτιάς είναι:

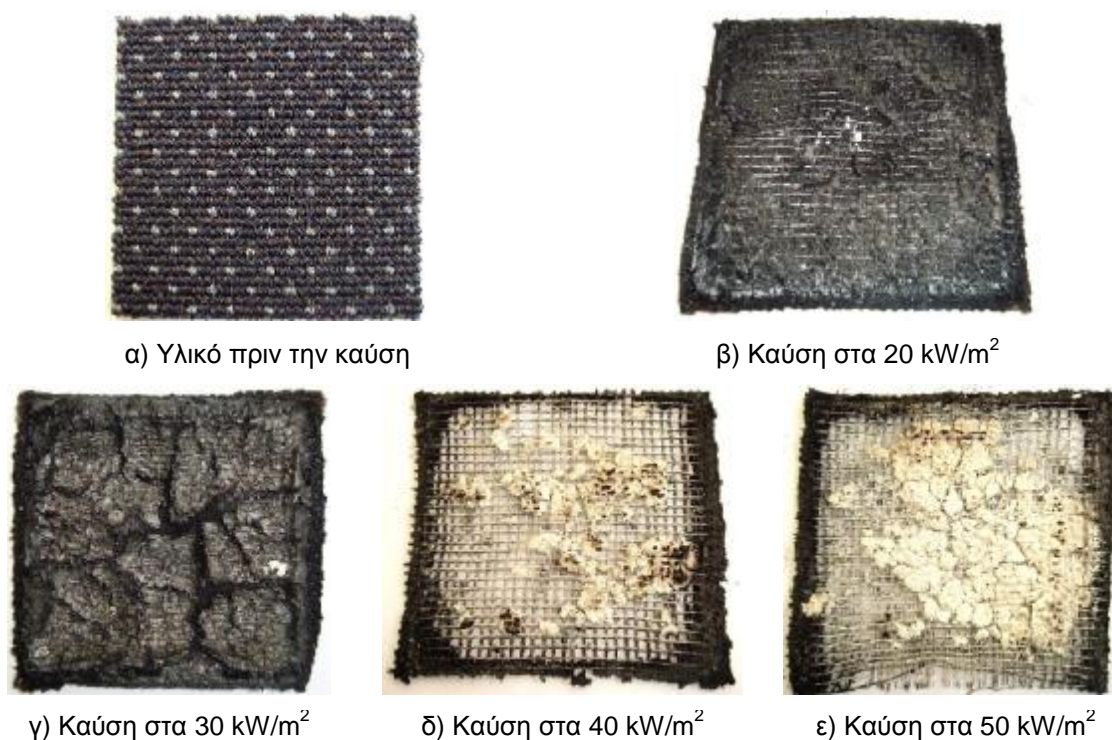
1. ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας - heat release rate (kW/m²),
2. η ολική έκλυση θερμότητας - total heat release (MJ/m²),
3. ο ρυθμός απώλειας μάζας του υλικού – mass loss rate (%),

4. η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα CO_2 , (g/s),
5. η παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα CO , (g/s),
6. η θερμοκρασία του δοκιμίου κατά τη διαδικασία της καύσης του ($^{\circ}\text{C}$),
7. η παραγωγή καπνού – smoke production (m^2/s).

Τα παραπάνω μεγέθη καταγράφηκαν ως χρονοσειρές κατά την καύση των υλικών (carpet, ceiling, seat, textile blue navy) σε τέσσερις διαφορετικές παροχές ακτινοβολούμενης θερμότητας έως και 60 kW/m^2 . Οι χρονοσειρές των μεγεθών ενδιαφέροντος δίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν και σχολιάζονται.

6.1 Υλικό πατώματος αεροσκάφους (χαλί – carpet)

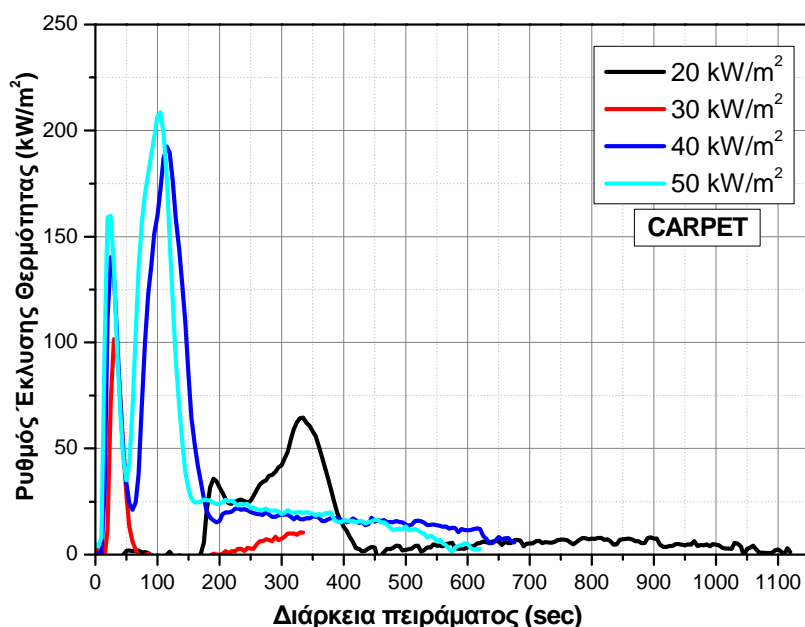
Στα ακόλουθα παρατίθενται και σχολιάζονται οι κατανομές των μεγεθών, που προκύπτουν κατά τη δοκιμή αντίδρασης του υλικού πατώματος αεροσκάφους (carpet) με τη μετρητική διάταξη Θερμιδόμετρο Κώνου. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το υλικό πριν και μετά τις δοκιμές σε διαφορετικές ροές θερμότητας (φωτ. 6.1).



Φωτογραφία 6.1: Φωτογραφίες του υλικού πριν και μετά τις δοκιμές

6.1.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας παρουσιάζει μια σχετική κανονικότητα για τις παροχές 20kW/m^2 , 40kW/m^2 και 50kW/m^2 . Για την ακτινοβολούμενη ροή θερμότητας των 30kW/m^2 όπως φαίνεται και στον άξονα της διάρκειας του πειράματος, η δοκιμή διακόπηκε αρκετά νωρίς εκτιμώντας πιθανότατα εσφαλμένα ότι η καύση δεν θα είχε να παρουσιάσει κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η κανονικότητα στις υπόλοιπες 3 παροχές ακτινοβολούμενης θερμότητας έγκυται στο ότι κατά την εξέλιξη της καύσης εμφανίζονται 2 χαρακτηριστικές κορυφές στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR).



Εικόνα 38: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20kW/m^2 , 30kW/m^2 , 40kW/m^2 , 50kW/m^2 .

Φαίνεται ότι αυξανόμενη της θερμότητας στην οποία εκτίθενται τα δοκίμια, οι κορυφές αυτές μεταφέρονται σε μικρότερους χρόνους δηλαδή σε χρόνους πιο κοντινούς στο χρόνο έναρξης του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση των εντάσεων που βαίνουν προς όλο και υψηλότερες τιμές. Προκύπτει ότι και στις 3 παροχές θερμότητας του κώνου (20kW/m^2 , 40kW/m^2 και 50kW/m^2) οι δεύτερες κορυφές είναι μεγαλύτερης έντασης. Τέλος φαίνεται ότι οι χρονικές αποστάσεις των δύο μεγίστων των χρονοσειρών μικραίνουν αυξανόμενη της παροχής θερμότητας του

κώνου κάτι που φαίνεται πιο χαρακτηριστικά στις παροχές των 40kW/m^2 και 50kW/m^2 .

Στη συνθήκη των 40kW/m^2 οι κορυφές φαίνονται στα 30s και στα 110s περίπου, στη συνθήκη των 50kW/m^2 οι κορυφές μεταφέρονται ελαφρά προς ακόμα νωρίτερους χρόνους στα 25s και 100s. Αντίθετα στην παροχή θερμότητας των 20kW/m^2 φαίνεται χαρακτηριστικά η μεγάλη χρονική απόσταση των δύο υψηλών εντάσεων του HRR που συμβαίνουν στα 190s και στα 335s, έχοντας δηλαδή μια χρονική απόσταση 145s δηλ. περίπου 2.5 min. Η παρατήρηση των δίδυμων μεγίστων στις χρονοσειρές αποτελεί ένδειξη ότι υπάρχει διαστρωμάτωση στο υλικό. Η πιθανή στρωματοποίηση έχει ως συνέπεια η πρώτη επίστρωση να αντιδρά στην καύση πιο γρήγορα δηλαδή σε μικρές χρονικές αποστάσεις από την έναρξη του πειράματος δίνοντας μια πρώτη υψηλή ένταση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) που αντιστοιχεί στην πρώτη χαρακτηριστική κορυφή της χρονοσειράς. Στη συνέχεια το HRR πέφτει σε χαμηλότερες τιμές μέχρι να αρχίσει να αντιδρά η δεύτερη στρώση του υλικού με υψηλότερη ένταση και για μεγαλύτερο χρόνο που αντιστοιχεί στην δεύτερη κορυφή της κάθε χρονοσειράς.

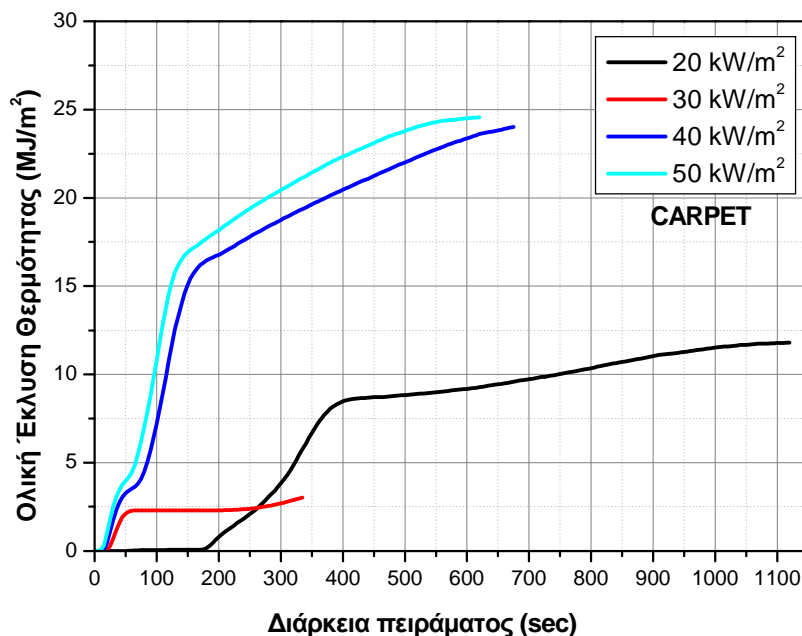
Είναι κοινό χαρακτηριστικό ότι και στις 3 παροχές ακτινοβολούμενης θερμότητας μετά και την δεύτερη κορυφή του HRR οι κατανομές αποσβένουν βαθμιαία πλέον προς σχεδόν μηδενικές τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, κάτι που σημαίνει ότι το υπόλοιπο τμήμα των δοκιμών δεν αντιδρά πλέον στη φωτιά.

6.1.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας

Οι κατανομές της ολικής έκλυσης θερμότητας δείχνουν και αυτές κανονικότητα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας οι κατανομές ολικής έκλυσης θερμότητας τείνουν να λαμβάνουν αυξημένες τιμές σε μικρότερους χρόνους με μεγαλύτερες κλίσεις. Ειδικότερα η συμπεριφορά των κατανομών παρουσιάζει δύο τμήματα.

Στο πρώτο τμήμα εμφανίζονται οξύτερες κλίσεις ενώ στο δεύτερο οι τιμές των κλίσεων αμβλύνονται. Ειδικότερα στην παροχή των 20kW/m^2 η μεταβολή της κλίσης εμφανίζεται σε χρόνο 380s ενώ αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου στα 40kW/m^2 , και 50kW/m^2 οι μεταβολές των κλίσεων μετατοπίζονται σε μικρότερους χρόνους στα 150s και 125s αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση των κλίσεων μπορεί να οφείλεται σε πιθανή διαστρωμάτωση του υλικού δοκιμής. Φαίνεται ότι μια πρώτη

στρώση αντιδρά και δίνει τις μεγαλύτερες κλίσεις στα πρώτα στάδια του πειράματος (σε μικρούς χρόνους) ενώ μια δεύτερη στρώση υλικού αντιδρά διαφορετικά δίνοντας μικρότερες κλίσεις στις κατανομές.



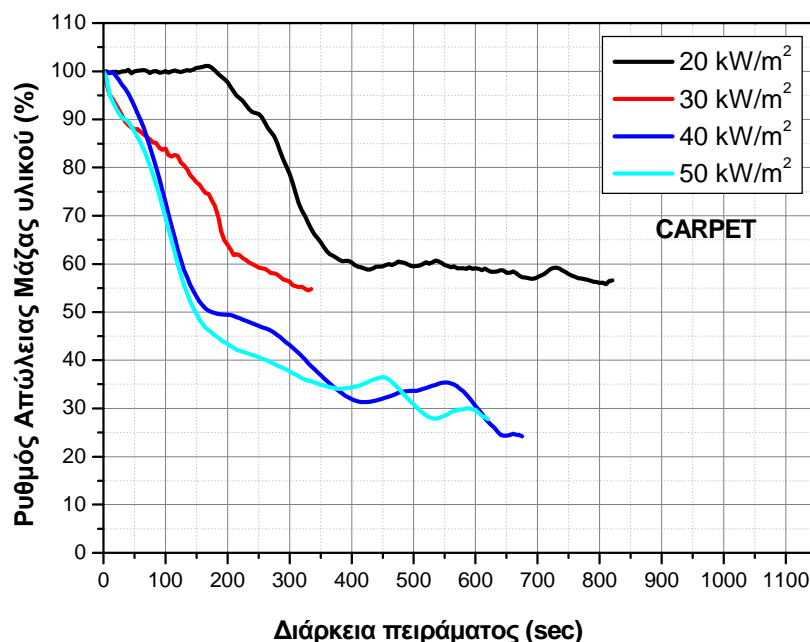
Εικόνα 39: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.1.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας

Οι κατανομές του ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) έχουν πτωτική τάση. Ειδικότερα προκύπτει ότι αυξανόμενη της παρεχόμενης θερμότητας του κώνου, τα πιο σημαντικά ποσοστά απώλεια μάζας συμβαίνουν σε όλο και μικρότερους χρόνους, δηλ. σε χρόνους κοντινότερους στην έναρξη των δοκιμών. Φαίνεται δηλ. ότι το υλικό χάνει μάζα με μεγαλύτερο ρυθμό (οξύτερες κλίσεις) όσο αυξάνει η ροή θερμότητας του κώνου. Σε συνέπεια με τα προηγούμενα οι κατανομές MLR μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο τμήματα.

Σε ένα πρώτο στάδιο οι κλίσεις είναι πιο απότομες πράγμα που σημαίνει ότι το υλικό χάνει μάζα με μεγαλύτερο ρυθμό ενώ σε ένα δεύτερο στάδιο οι κλίσεις εξομαλύνονται σε μικρότερες τιμές. Αυτή η συμπεριφορά είναι μια ακόμα ένδειξη ότι υπάρχει διαστρωμάτωση του υλικού δοκιμής με τα συστατικά του να αντιδρούν διαφορετικά στην καύση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη ροή θερμότητας των

40kW/m², και 50kW/m² οι συμπεριφορές είναι παρόμοιες κάτι που δείχνει ότι σε αυτά τα επίπεδα θερμοροής το υλικό χάνει μάζα κατά τον ίδιο οριακό τρόπο.



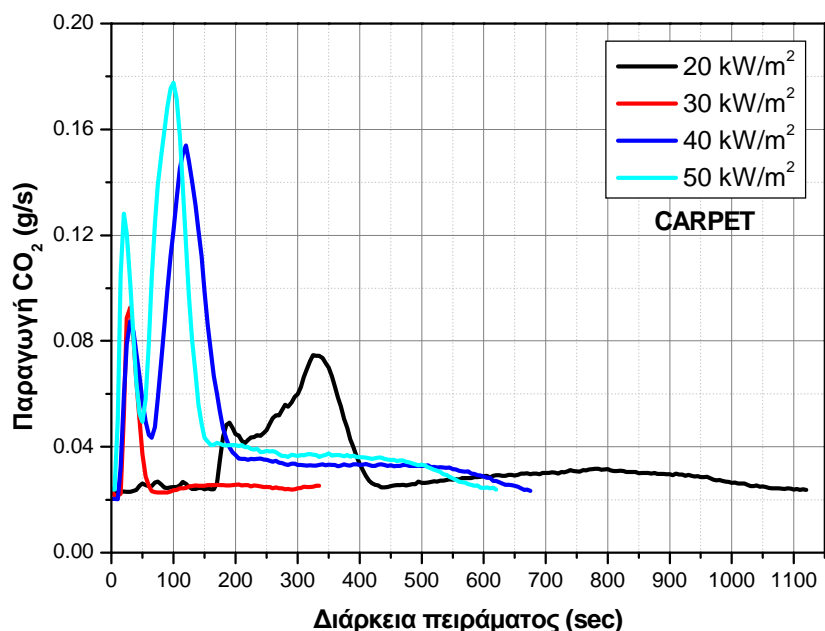
Εικόνα 40: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.1.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.

Οι κατανομές παραγωγής CO₂ διατηρούν μορφή παρόμοια με τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) κάτι που δείχνει ότι η παραγωγή CO₂ είναι ευθέως ανάλογη του (HRR). Οι διπλές κορυφές αποτελούν πάλι μια ένδειξη της στρωματοποίησης του υλικού. Φαίνεται ότι αυξανόμενης της θερμότητας στην οποία εκτίθενται τα δοκίμια, οι κορυφές αυτές μεταφέρονται σε μικρότερους χρόνους δηλαδή σε χρόνους πιο κοντινούς στο χρόνο έναρξης του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση των εντάσεων που βαίνουν προς όλο και υψηλότερες τιμές. Προκύπτει ότι και στις 3 παροχές θερμότητας του κώνου (20kW/m², 40kW/m² και 50 kW/m²) οι δεύτερες κορυφές είναι μεγαλύτερης έντασης.

Τέλος, φαίνεται ότι οι χρονικές αποστάσεις των δύο μεγίστων των χρονοσειρών μικραίνουν αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου κάτι που φαίνεται πιο χαρακτηριστικά στις παροχές των 40kW/m² και 50 kW/m². Τα μέγιστα των κατανομών

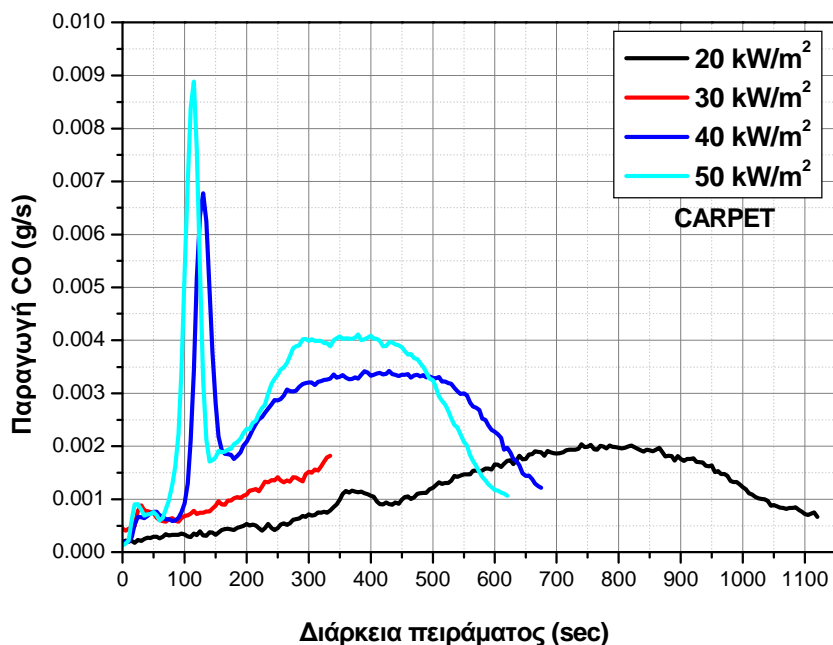
αναγνωρίζονται στους ίδιους χρόνους με τις αντίστοιχες κορυφές των κατανομών HRR.



Εικόνα 41: Κατανομές Παραγωγής CO₂ κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.1.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.

Συγκρίνοντας τις κατανομές παραγωγής μονοξειδίου (CO)– διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) φαίνεται καταρχήν ότι οι τιμές του CO είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες ως προς τις αντίστοιχες του CO₂. Η κατανομή που αντιστοιχεί σε παροχή θερμότητας 20kW/m² αρχικά, φαίνεται να διαφέρει ως προς εκείνες των 40kW/m² και 50kW/m². Παρατηρώντας τις τελευταίες, αναγνωρίζονται υψηλές κορυφές μεγίστων τιμών σε τιμές χρόνου περί τα 120s και 110s αντίστοιχα. Αυτό το πρώτο τμήμα των κατανομών ακολουθείται σε μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης από λόφους που φθάνουν σε ένταση περίπου στο ήμισυ των μέγιστων τιμών. Υπάρχει κανονικότητα στη συμπεριφορά των κατανομών και σε αυτό το τμήμα τους, με την υψηλότερη ακτινοβολία του κώνου να δίνει υψηλότερα πλατώ. Η συμπεριφορά για την χαμηλότερη παροχή των 20kW/m² εμφανίζει διαφοροποίηση.



Εικόνα 42: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Πιο αναλυτικά η ομαλή αυξητική τάση στο πρώτο τμήμα της κατανομής φαίνεται να διαταράσσεται γύρω στα 375s με την εμφάνιση μιας λίγο πιο ισχυρής έντασης ενώ η κατανομή φθάνει σε πλατώ σε αρκετά μεγαλύτερους χρόνους σε σχέση με τις μεγαλύτερες δύο σε χρόνους γύρω από τα 800s.

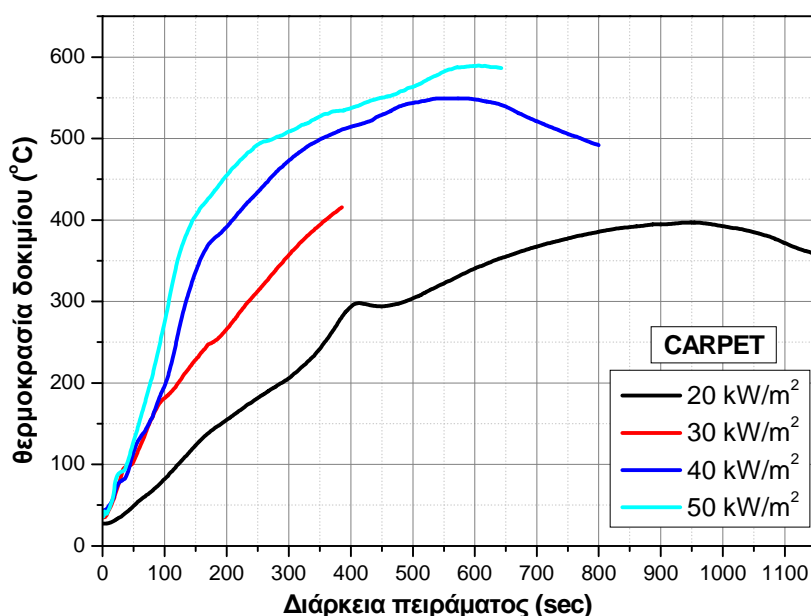
Συνολικά η εξέλιξη της παραγωγής CO ως προς την παροχή θερμότητας θα μπορούσε να ειπωθεί ως μια ακολουθία, θεωρώντας ότι αυξανόμενης της έντασης του κώνου αναπτύσσονται μέγιστες τιμές σε όλο και μικρότερους χρόνους δηλ. πιο κοντά στην έναρξη του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση ως προς την έντασή τους. Παράλληλα αναφορικά με το δεύτερο τμήμα των κατανομών μετά τα πρώτα μέγιστα εμφανίζονται λόφοι μικρότερων μέγιστων τιμών (περίπου στο μισό των πρώτων) με εμφανές πλατώ οι οποίοι μεταφέρονται και αυτοί προς μικρότερους χρόνους αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου ενώ παράλληλα ενισχύονται φθάνοντας σε υψηλότερες τιμές παραγωγής CO.

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει μια επιπλέον σύγκριση μεταξύ των κατανομών CO₂, CO. Στις κατανομές της παραγωγής του CO₂ αναγνωρίστηκαν διπλές κορυφές (με την δεύτερη πάντα πιο έντονη) που συναρτήθηκαν με την πιθανή παρουσία δύο στρώσεων του υλικού. Στις κατανομές της παραγωγής του CO αναγνωρίστηκε μια ισχυρή ένταση και στη συνέχεια αντί μιας δεύτερης (όπως στο CO₂) εμφανίζονται

λόφοι που για τις 2 υψηλότερες τουλάχιστον παροχές θερμότητας από τον κώνο διατηρούν χαμηλότερες μέγιστες τιμές σε μορφή πλατώ. Η παραγωγή των αερίων της καύσης δείχνει συνέπεια αφού η καλύτερη καύση συνεπάγεται υψηλότερες τιμές της παραγωγής CO₂ και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές CO και αντίστροφα.

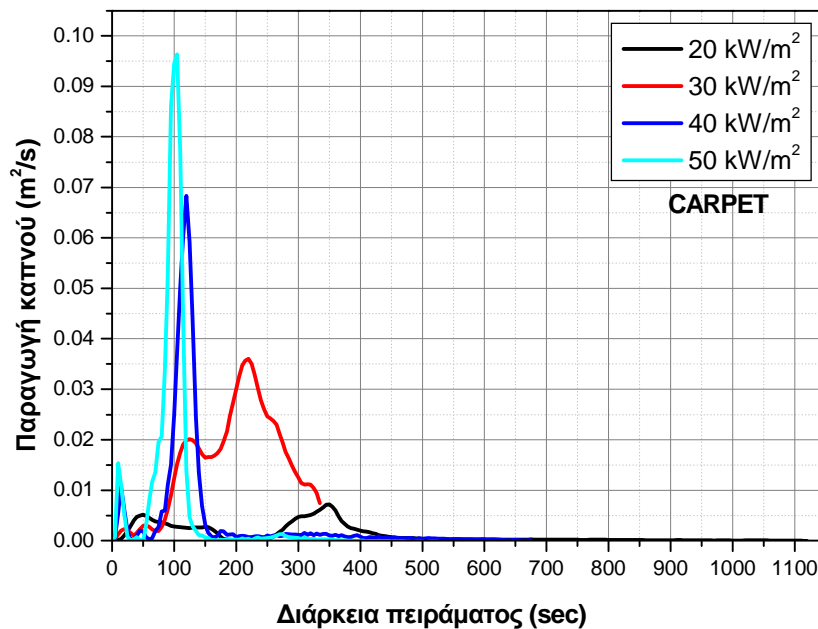
6.1.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.

Στο διάγραμμα 6.6 απεικονίζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας δοκιμίου carpet για τιμές παροχής θερμότητας από τον κώνο. Οι κατανομές δείχνουν ότι αυξανόμενης της έντασης του κώνου αυξάνεται η κλίση που σημαίνει ότι το δοκίμιο αναπτύσσει γρηγορότερα υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρατηρείται ότι στην υψηλότερη παροχή θερμότητας των 50kW/m² εμφανίζεται μέγιστη θερμοκρασία στους 600°C σε χρόνο 600s περίπου, δηλ. μετά από 10 λεπτά αντίδρασης του υλικού. Επίσης για παροχή θερμότητας 40kW/m² εμφανίζεται μέγιστη θερμοκρασία στους 550°C περίπου σε χρόνο 550s. Για παροχή θερμότητας 20kW/m² εμφανίζεται μέγιστη θερμοκρασία στους 400°C σε χρόνο 950s περίπου. Προκύπτει δηλ. ότι αυξανόμενης της έντασης του κώνου οι μέγιστες θερμοκρασίες των δοκιμίων εμφανίζεται σε όλο και μικρότερους χρόνους.



Εικόνα 43: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.1.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.



Εικόνα 44: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Από τις κατανομές παραγωγής καπνού παρατηρείται ότι αυξανόμενης της έντασης του κώνου (παροχής θερμότητας) οι μέγιστες τιμές μετατοπίζονται προς μικρότερους χρόνους ενώ παράλληλα η ένταση των μέγιστων τιμών αυξάνει προοδευτικά. Κορυφές χαμηλότερης έντασης των μεγίστων διακρίνονται επίσης σε χρόνους πολύ μικρούς που μπορεί να συναρτώνται με την αντίδραση ενός υποστρώματος διαφορετικού υλικού κάνοντας τη θεώρηση ότι τα δοκίμια έχουν μια δομή sandwich. Αυτή η διαπίστωση για τη δομή του συγκεκριμένου υλικού δοκιμής επιβεβαιώνεται τόσο από τις κατανομές διοξειδίου, όσο και από τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR).

6.2 Υλικό οροφής αεροσκάφους (ceiling)

Στα ακόλουθα παρατίθενται και σχολιάζονται οι κατανομές των μεγεθών, που προκύπτουν κατά τη δοκιμή αντίδρασης του υλικού οροφής αεροσκάφους (ceiling) με τη μετρητική διάταξη Θερμιδόμετρο Κώνου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές διαφέρουν στα επίπεδα ακτινοβολούμενης θερμότητας από τον κώνο σε σχέση με το υλικό πατώματος που αναλύθηκε νωρίτερα.

Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το υλικό πριν και μετά τις δοκιμές σε διαφορετικές ροές θερμότητας (φωτ. 6.2).



α) Υλικό πριν την καύση



β) Καύση στα 15 kW/m²



γ) Καύση στα 30 kW/m²



δ) Καύση στα 50 kW/m²



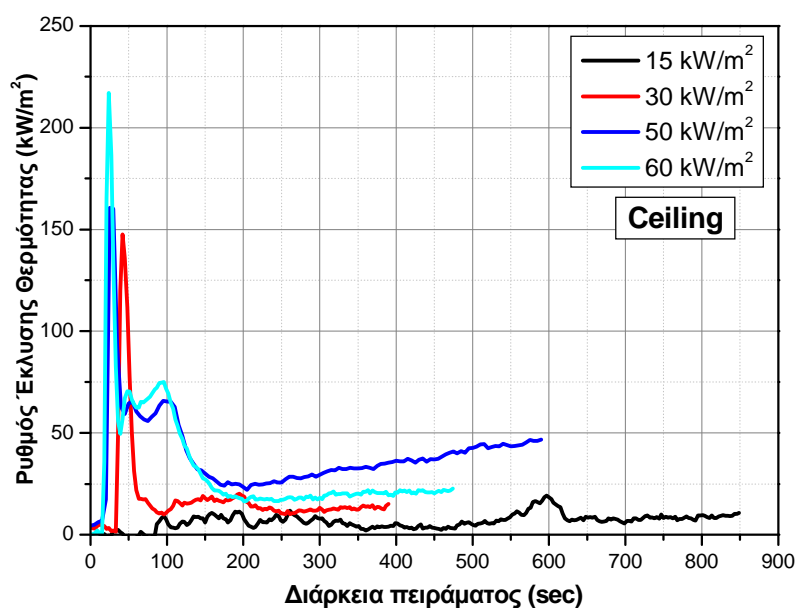
ε) Καύση στα 60 kW/m²

Φωτογραφία 6.2: Φωτογραφίες του υλικού πριν και μετά τις δοκιμές

6.2.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας

Για το υλικό οροφής αναγνωρίζονται κάποιες διαφοροποιήσεις τουλάχιστον για παροχές θερμότητας του κώνου από 30kW/m^2 και άνω, ως προς το ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Μέγιστες τιμές παρατηρούνται σε χρόνους κοντά στην έναρξη των πειραμάτων και μάλιστα αυξανόμενης της έντασης του κώνου αυτές έχουν όλο και μεγαλύτερη ένταση ενώ συμβαίνουν σε όλο και μικρότερους χρόνους.

Στη χαμηλότερη ένταση του κώνου παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις του ρυθμού έκλυσης θερμότητας γύρω από τιμές λίγο μεγαλύτερες από μηδενικές. Στο υπόλοιπο της εξέλιξης των κατανομών αξίζει να σημειωθεί ότι για τις υψηλότερες εντάσεις του κώνου των 50kW/m^2 , 60kW/m^2 παρατηρούνται και δύο ακόμα δίδυμες κορυφές χαμηλότερης ισχύος σε λίγο μεγαλύτερους χρόνους. Η παρατήρηση των δίδυμων κορυφών στις χρονοσειρές αποτελεί ένδειξη ότι υπάρχει διαστρωμάτωση στο υλικό. Η πιθανή στρωματοποίηση έχει ως συνέπεια η πρώτη επίστρωση να αντιδρά στην καύση πιο γρήγορα δηλαδή σε μικρές χρονικές αποστάσεις από την έναρξη του πειράματος δίνοντας μια πρώτη υψηλή ένταση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) που αντιστοιχεί στην πρώτη χαρακτηριστική κορυφή της χρονοσειράς. Στη συνέχεια το HRR πέφτει σε χαμηλότερες τιμές μέχρι να αρχίσει να αντιδρά η δεύτερη και πιθανόν μια τρίτη στρώση του υλικού σε μεγαλύτερους χρόνους που αντιστοιχούν στις δίδυμες κορυφές των χρονοσειρών.



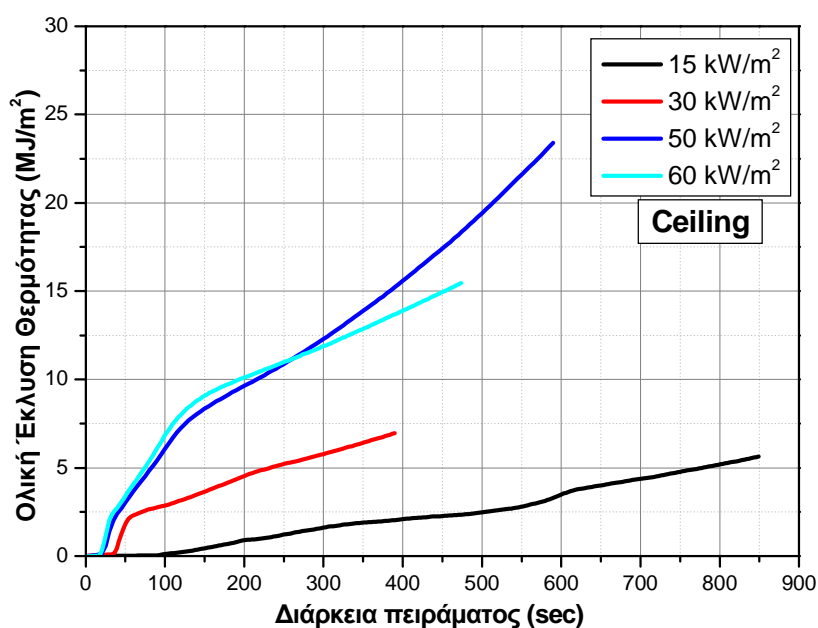
Εικόνα 45: Διάγραμμα 6.8 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 50 kW/m^2 , 60 kW/m^2 .

6.2.2 Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας.

Οι κατανομές της ολικής έκλυσης θερμότητας δείχνουν ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου οι κατανομές ολικής έκλυσης θερμότητας τείνουν να λαμβάνουν αυξημένες τιμές σε μικρότερους χρόνους με μεγαλύτερες κλίσεις. Ειδικότερα η συμπεριφορά των κατανομών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τμήματα διαφορετικών κλίσεων όπως και στην περίπτωση του υλικού carpet.

Η παροχή των 15kW/m^2 δείχνει ότι η κατανομή της ολικής HRR έχει αυξητική τάση στο χρόνο με σχεδόν σταθερή κλίση από τα 100s και καθόλη τη διάρκεια του πειράματος στη συνέχεια. Στις υψηλότερες παροχές θερμότητας (30kW/m^2 , 50kW/m^2) οι κλίσεις της ολικής HRR αυξάνουν και μάλιστα αναγνωρίζονται οξύτερες κλίσεις στα πρώτα στάδια της καύσης ενώ στη συνέχεια οι κλίσεις αμβλύνονται λαμβάνοντας σχετικά μικρότερες τιμές.

Ειδικότερα στην παροχή των 30kW/m^2 η μεταβολή της κλίσης εμφανίζεται σε χρόνο 60s περίπου από τον οποίο και έπειτα η μορφή της κατανομής αυξάνει μονότονα με μικρότερη κλίση ως προς το πρώτο τμήμα. Αντίστοιχα η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται στην παροχή των 50kW/m^2 , με τη διαφοροποίηση της κλίσης να συμβαίνει σε μεγαλύτερο χρόνο από την έναρξη του πειράματος περίπου στα 125s.



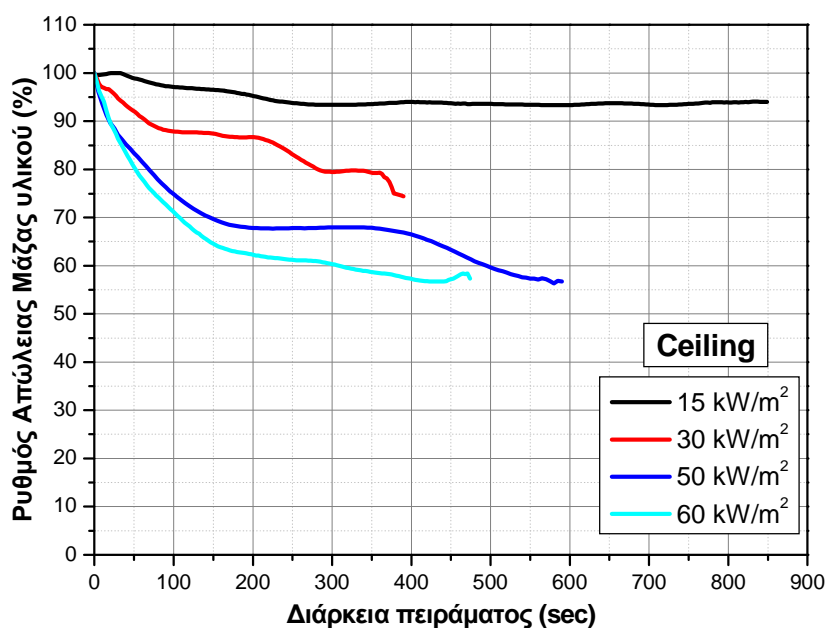
Εικόνα 46: Διάγραμμα 6.9 Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15kW/m^2 , 30kW/m^2 , 50kW/m^2 , 60kW/m^2 .

Στο δεύτερο αυτό τμήμα η χρονοσειρά της ολικής HRR μπορεί να προσμοιαστεί ως γραμμική εξέλιξη αν και εμφανίζει μια υστέρηση στην περιοχή (200 – 300)s. Η υστέρηση αυτή δεν παρατηρείται στην παροχή των 60kW/m^2 , για την οποία η διαφοροποίηση της κλίσης συμβαίνει σχεδόν στον ίδιο χρόνο με την παροχή των 50kW/m^2 , (περίπου στα 125s).

Η διαφοροποίηση των κλίσεων μπορεί να οφείλεται σε πιθανή διαστρωμάτωση του υλικού δοκιμής. Φαίνεται ότι μια πρώτη στρώση αντιδρά και δίνει τις μεγαλύτερες κλίσεις στα πρώτα στάδια του πειράματος (σε μικρούς χρόνους) ενώ μια δεύτερη στρώση υλικού αντιδρά διαφορετικά δίνοντας μικρότερες κλίσεις στις κατανομές.

6.2.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας

Οι κατανομές του ρυθμού απώλειας μάζας (MLR), δείχνουν πτωτική τάση με διαφορετικές συμπεριφορές σε σχέση με την παροχή θερμότητας από τον κώνο. Ειδικότερα στη χαμηλότερη θερμότητα ακτινοβολίας του κώνου των 15kW/m^2 , φαίνεται ότι το δοκίμιο μέχρι το τέλος του πειράματος χάνει περίπου ποσοστό της τάξης του 5% της αρχικής του μάζας. Αυτό αποτελεί ένδειξη του ότι το κομμάτι μάλλον δεν αναφλέγεται, παρά μόνο “σιγοκαίει” ή όπως λέγεται στην ορολογία το φαινόμενο που παρατηρείται (smoldering).



Εικόνα 47: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 15kW/m^2 , 30kW/m^2 , 50kW/m^2 , 60kW/m^2 .

Επίσης από τη χρονοσειρά φαίνεται ότι το δοκίμιο χάνει το μικρό ποσοστό μάζας στα πρώτα 250s αφού στη συνέχεια της δοκιμής η κατανομή MLR έχει λάβει τιμές πλαφόν (οριζοντιοποιημένη) σε ένα ποσοστό περίπου 95%.

Η κατανομή MLR για την παροχή 30kW/m^2 , υποδιαιρείται σε αρκετά τμήματα ως προς την κλίση του ρυθμού απώλειας μάζας (MLR). Για παράδειγμα μεταβολές του MLR αναγνωρίζονται περίπου στα 75s, 220s και 300s. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να σχετίζονται με το ότι ο ρυθμός ακτινοβολούμενης θερμότητας του κώνου δεν είναι αρκετά υψηλός και έτσι αντιδρούν εμφανώς τμήματα της επιφάνειας που πιθανόν και λόγω διαστρωμάτωσης του υλικού (sandwich) να δίνουν τις διαφορετικές κλίσεις στην κατανομή MLR.

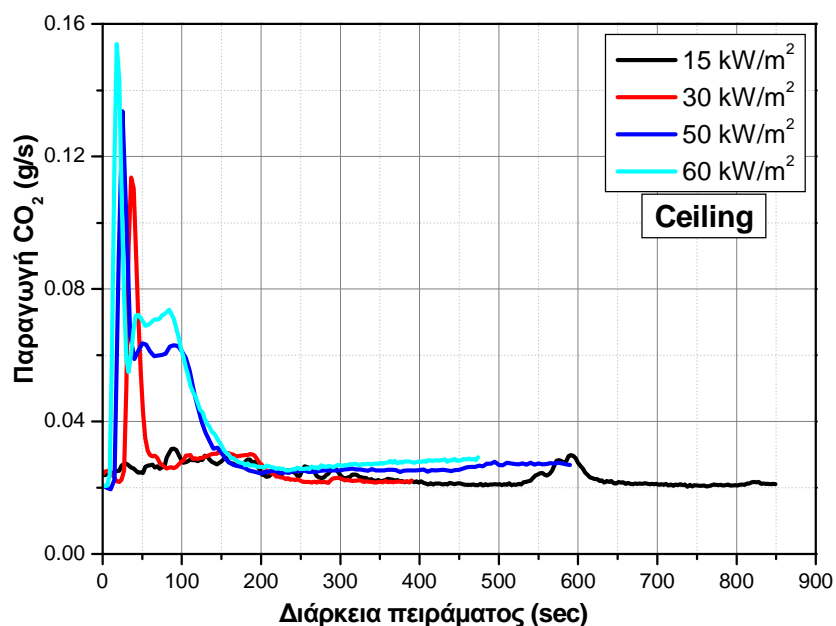
Οι μεταβολές στην κλίση του MLR για μεγαλύτερη ακτινοβολούμενη θερμότητα από τον κώνο είναι λιγότερες όπως φαίνεται από την κατανομή των 50kW/m^2 , στα 150s και στα 350s, που μπορεί να σημαίνει ότι η ακτινοβολούμενη θερμότητα του κώνου φθάνει και σε μεγαλύτερα πάχη από την ακτινοβολούμενη επιφάνεια του δοκιμίου, οπότε και η καμπύλη του MLR είναι λιγότερο ευαίσθητη ως προς τα πιθανά ενδιάμεσα υλικά – στρώσεις του δοκιμίου.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις ενισχύονται από την εξέλιξη της χρονοσειράς για ακτινοβολούμενη θερμότητα του κώνου 60kW/m^2 , στην οποία παρατηρείται μία μόνο μεταβολή της κλίσης του MLR στην περιοχή των 150s. Φαίνεται δηλ. ότι για την μεγαλύτερη ροή θερμότητας δοκιμών (60kW/m^2), το υλικό διατηρεί την ταυτότητά του ως προς τη δομή sandwich.

6.2.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.

Οι κατανομές παραγωγής CO_2 διατηρούν μορφή παρόμοια με τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) κάτι που δείχνει ότι η παραγωγή CO_2 είναι ευθέως ανάλογη του (HRR). Οι διπλές κορυφές που ακολουθούν τις μέγιστες των χρονοσειρών αποτελούν πάλι μια ένδεξη πιθανής στρωματοποίησης του υλικού. Φαίνεται ότι αυξανόμενης της θερμότητας στην οποία εκτίθενται τα δοκίμια, οι μέγιστες τιμές μεταφέρονται σε μικρότερους χρόνους δηλαδή σε χρόνους πιο κοντινούς στο χρόνο έναρξης του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση των εντάσεων που

βαίνουν προς όλο και υψηλότερες τιμές. Φαίνεται ότι αυτό συμβαίνει για τις 3 παροχές θερμότητας του κώνου (30kW/m^2 , 50kW/m^2 και 60kW/m^2).



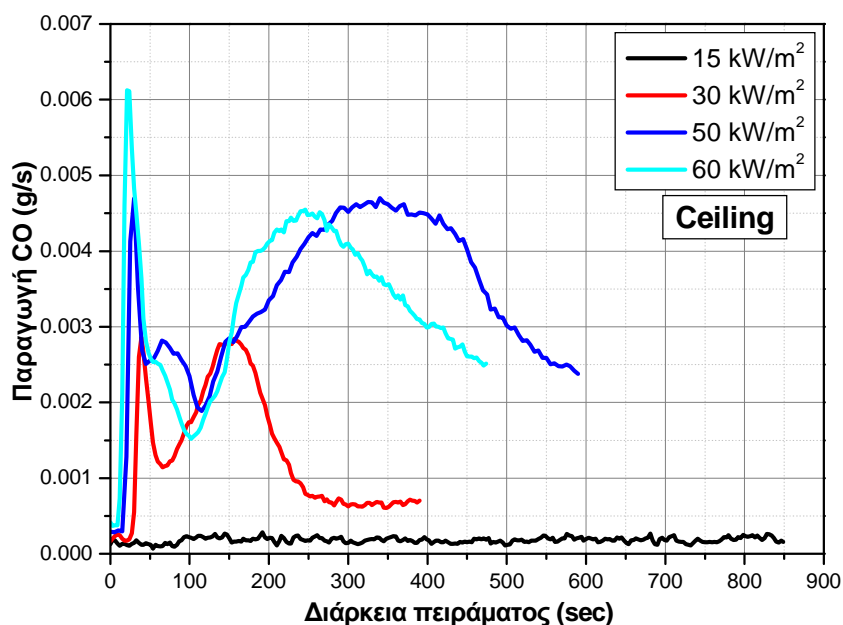
Εικόνα 48: Κατανομές Παραγωγής CO₂ κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Τα μέγιστα των κατανομών αναγνωρίζονται στους ίδιους χρόνους με τις αντίστοιχες κορυφές των κατανομών HRR. Στη χαμηλότερη ροή θερμότητας λόγω και του φαινομένου smoldering που αναφέρθηκε και παραπάνω παρατηρούνται μικρές μόνο διακυμάνσεις με ασθενείς δίδυμες κορυφές σε χρόνο μεταξύ 550s και 600s, οι οποίες θα μπορούσε να υποτεθεί ότι μεταφέρονται προς μικρότερους χρόνους αυξανόμενης της ροής θερμότητας του κώνου.

6.2.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.

Συγκρίνοντας τις κατανομές παραγωγής μονοξειδίου (CO)– διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) φαίνεται καταρχήν ότι οι τιμές του CO είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερες ως προς τις αντίστοιχες του CO₂.

Η κατανομή που αντιστοιχεί σε παροχή θερμότητας 15kW/m^2 δείχνει να εξελίσσεται ως μια σταθερή συνάρτηση, με μικρές διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή λίγο μεγαλύτερη από μηδενική παραγωγή CO. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να συσχετισθεί με το φαινόμενο του smoldering κατά το οποίο το δοκίμιο δεν αναφλέγεται σε κανένα χρονικό σημείο κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρά μόνο μπορεί να σιγοκαίει, λόγω της έκθεσής του σε χαμηλό επίπεδο ακτινοβολίας από τον κώνο. Αντίθετα στις επόμενες παροχές θερμότητας των 30kW/m^2 , 50kW/m^2 και 60kW/m^2 η συμπεριφορά του δοκιμίου διαφέρει.



Εικόνα 49: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20kW/m^2 , 30kW/m^2 , 40kW/m^2 , 50kW/m^2 .

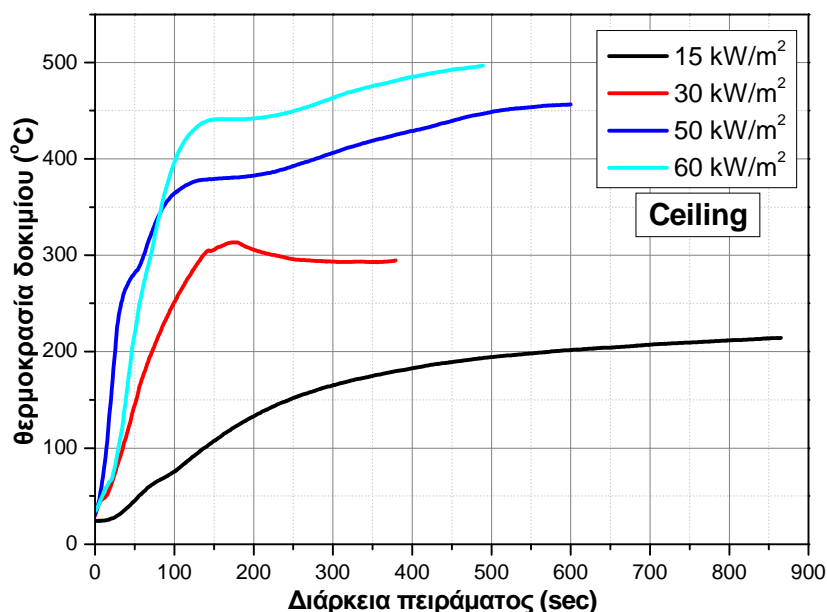
Για παράδειγμα σε χρόνους πολύ κοντά στην έναρξη των δοκιμών παρατηρούνται έντονες σύντομες κορυφές (μικρής παραμονής) που μάλιστα αυξανόμενης της ακτινοβολούμενης θερμότητας του κώνου μετακινούνται προς όλο και μικρότερους χρόνους δηλ. πιο κοντά στην έναρξη της δοκιμής. Στη συνέχεια οι χρονοσειρές έχουν μορφές κοιλάδων που ακολουθούνται από περιοχές δευτέρων μεγίστων στα οποία όμως οι χρονοσειρές ξοδεύουν μεγαλύτερους χρόνους (λόφοι). Οι δεύτερες κορυφές είναι περίπου ίδιας έντασης με τις πρώτες για τις περιπτώσεις των

30kW/m² και 50kW/m², ενώ για την περίπτωση των 60kW/m² μόνο, η περιοχή του δεύτερου μεγίστου διατηρείται σε ένταση περίπου στο 75% της πρώτης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι οι περιοχές των δεύτερων μεγίστων μετακινούνται προς μεγαλύτερους χρόνους χωρίς όμως κάποια κανονικότητα. Η συμπεριφορά του μεγέθους της παραγωγής CO μπορεί να ερμηνευθεί πάλι θεωρώντας δομή sandwich για τα υπό μελέτη δοκίμια, με τις διπλές κορυφές να αναφέρονται στην έναρξη της αντίδρασης διαφορετικών υποστρωμάτων του υλικού δοκιμής.

6.2.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.

Οι κατανομές θερμοκρασίας των δοκιμίων στα αρχικά στάδια των δοκιμών δείχνουν ότι αυξανόμενης της έντασης του κώνου αυξάνεται η κλίση που σημαίνει ότι το δοκίμιο αναπτύσσει γρηγορότερα υψηλότερες θερμοκρασίες ή διαφορετικά ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας αυξάνει με την αύξηση της ακτινοβολούμενης θερμότητας. Ειδικότερα φαίνεται ότι η κατανομή των 15kW/m² παρουσιάζει μια υστέρηση της τάξης των 25s πριν η θερμοκρασία του δοκιμίου αρχίσει να αυξάνεται η οποία σχετίζεται ακριβώς με τη χαμηλή ποσότητα της ακτινοβολούμενης θερμότητας. Η μορφή της χρονοσειράς στην εξέλιξη είναι ομαλή, εκθετικής αύξησης, που καταλήγει σχεδόν σε πλατώ, με την ανώτερη θερμοκρασία του δοκιμίου να επιτυγχάνεται προς το τέλος της δοκιμής και να είναι λίγο μεγαλύτερη των 200°C.

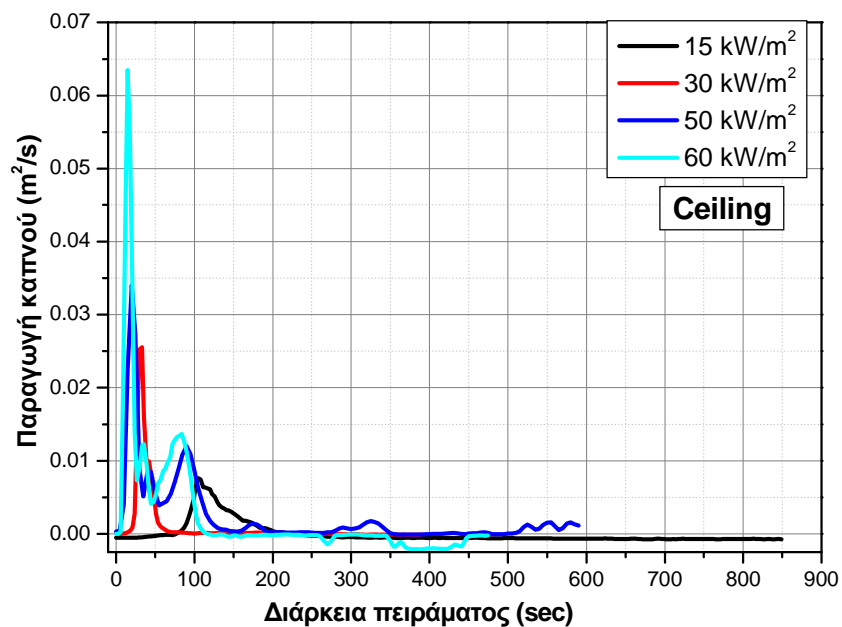
Στις επόμενες καταστάσεις των 30kW/m² 50kW/m² και 60kW/m², αναγνωρίζονται δύο περιοχές στην εξέλιξη των χρονοσειρών. Διακρίνεται μια πρώτη περιοχή με αρκετά απότομες κλίσεις η οποία ακολουθείται από μια δεύτερη στην οποία οι κλίσεις λαμβάνουν μικρότερες τιμές. Φαίνεται ότι αυξανόμενης της ροής ακτινοβολίας οι κατανομές καταλήγουν σε υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας των δοκιμίων, ενώ η περιοχή όπου οι κλίσεις αμβλύνονται δεν διατηρούν κάποια κανονικότητα αφού σε αυξανόμενης της ποσότητας θερμότητας του κώνου η διαφοροποίηση των κλίσεων συμβαίνει σε περίπου 150s, 100s και 125s.



Εικόνα 50: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού οροφής (ceiling) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.2.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.

Από τις κατανομές παραγωγής καπνού παρατηρούνται μέγιστες τιμές που αυξανόμενης της έντασης του κώνου (παροχής θερμότητας) μετατοπίζονται προς μικρότερους χρόνους ενώ παράλληλα η ένταση των μέγιστων τιμών αυξάνει προοδευτικά. Κορυφές χαμηλότερης έντασης των μεγίστων διακρίνονται επίσης σε μεταγενέστερες χρονικές περιόδους που μπορεί να συναρτώνται με την αντίδραση ενός υποστρώματος διαφορετικού υλικού κάνοντας τη θεώρηση ότι τα δοκίμια έχουν μια δομή sandwich. Αυτή η διαπίστωση για τη δομή του συγκεκριμένου υλικού δοκιμής επιβεβαιώνεται τόσο από τις κατανομές διοξειδίου, όσο και από τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR). Αρκετά σύντομα επίσης σε σχέση με τη διάρκεια των δοκιμών οι κατανομές αποσβένουν προς μηδενικές τιμές.



Εικόνα 51: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού carpet σε παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 .

6.3 Υλικό καθίσματος αεροσκάφους (seat foam)

Στα ακόλουθα παρατίθενται και σχολιάζονται οι κατανομές των μεγεθών, που προκύπτουν κατά τη δοκιμή αντίδρασης του υλικού καθίσματος αεροσκάφους (seat foam) με τη μετρητική διάταξη Θερμιδόμετρο Κώνου. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το υλικό πριν και μετά τις δοκιμές σε διαφορετικές ροές θερμότητας (φωτ. 6.3).



α) Υλικό πριν την καύση



β) Καύση στα 20 kW/m²



γ) Καύση στα 30 kW/m²



δ) Καύση στα 40 kW/m²



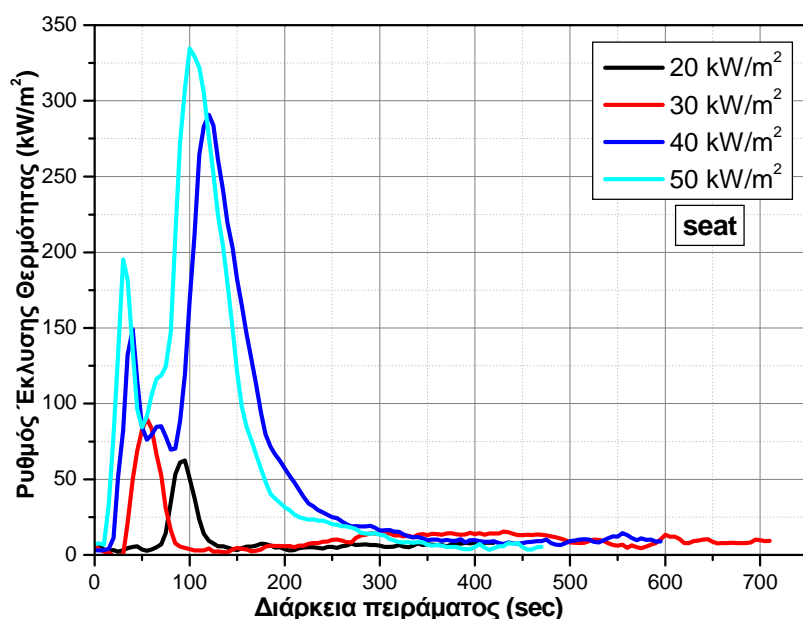
ε) Καύση στα 50 kW/m²

Φωτογραφία 6.3: Φωτογραφίες του υλικού πριν και μετά τις δοκιμές

6.3.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας παρουσιάζει ενδιαφέρον αφού διακρίνονται κορυφές – μέγιστες τιμές οι οποίες φαίνεται ότι μεταφέρονται σε μικρότερους χρόνους δηλαδή σε χρόνους πιο κοντινούς στο χρόνο έναρξης του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση των εντάσεων που βαίνουν προς όλο και υψηλότερες τιμές. Έτσι, οι

χρόνοι εμφάνισης κορυφών ισχυρών εντάσεων για παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 ανιχνεύονται στα 95s, 50s, 75s, 50s αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για παροχές των 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 εμφανίζονται δευτέρες κορυφές και μάλιστα ισχυρότερων εντάσεων εύρημα που δεν παρατηρείται για τις χαμηλότερες παροχές των 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 .



Εικόνα 52: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 .

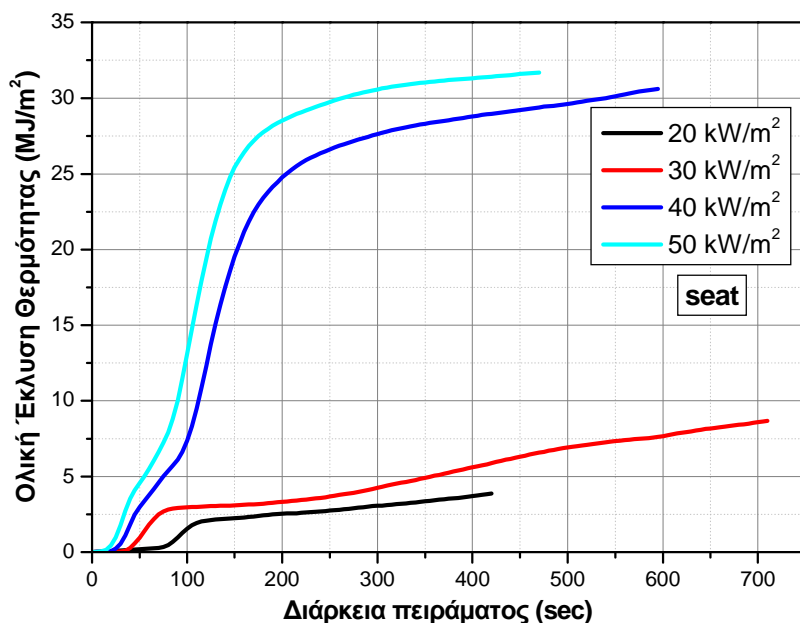
Η παρατήρηση των δίδυμων μεγίστων στις χρονοσειρές των 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 αποτελεί ένδειξη ότι υπάρχει διαστρωμάτωση στο υλικό. Η πιθανή στρωματοποίηση έχει ως συνέπεια η πρώτη επίστρωση να αντιδρά στην καύση πιο γρήγορα δηλαδή σε μικρές χρονικές αποστάσεις από την έναρξη του πειράματος δίνοντας μια πρώτη υψηλή ένταση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) που αντιστοιχεί στην πρώτη χαρακτηριστική κορυφή της χρονοσειράς. Στη συνέχεια το HRR ακολουθεί κοιλάδες χαμηλότερων τιμών μέχρι να αρχίσει να αντιδρά η δεύτερη στρώση του υλικού με υψηλότερη ένταση και για μεγαλύτερο χρόνο που αντιστοιχεί στην δεύτερη κορυφή της κάθε χρονοσειράς. Αυτό το χαρακτηριστικό βέβαια δεν ανιχνεύεται στη χαμηλότερη παροχή θερμότητας των 30 kW/m^2 , όπου πολύ πιο ομαλά

μετά τη μοναδική μέγιστη τιμή της χρονοσειράς φαίνεται η κατανομή να ακολουθεί λόφο νεπαίσθητου ύψους ως προς την κατανομή των 20 kW/m^2 , με την τελευταία να δείχνει ότι μια υποτιθέμενη δεύτερη στρώση υλικού δεν αντιδρά καθόλου. Για τις δύο χαμηλότερες παροχές θερμότητας φαίνεται να αντιδρά μια πρώτη στρώση του υλικού ενώ στη συνέχεια το φαινόμενο του smoldering λαμβάνει χώρα με την δεύτερη στρώση του υλικού να μην αντιδρά και τα δοκίμια να σιγοκαίουν.

6.3.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας

Οι κατανομές της ολικής έκλυσης θερμότητας δείχνουν ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου οι κατανομές ολικής έκλυσης θερμότητας τείνουν να λαμβάνουν αυξημένες τιμές σε μικρότερους χρόνους με μεγαλύτερες κλίσεις. Ειδικότερα η συμπεριφορά των κατανομών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τμήματα διαφορετικών κλίσεων όπως και στην περίπτωση των προηγούμενων υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling). Η διαπίστωση αυτή ενισχύει την άποψη ότι τα δοκίμια έχουν δομή sandwich αποτελούμενα δηλαδή από στρώματα διαφορετικών υλικών. Οι κατανομές (THR) εμφανίζονται ως ομαδοποιημένες με τις χρονοσειρές για παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 να φθάνουν σε τελικές τιμές (περιοχή των 10 MJ/m^2), πολύ χαμηλότερες από τις παροχές θερμότητας 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 με τις τελευταίες να φθάνουν σε τελικές τιμές άνω των 30 MJ/m^2 .

Αναφορικά με τις κλίσεις των κατανομών οι οξύτερες κλίσεις αναγνωρίζονται στα πρώτα στάδια της καύσης ενώ στη συνέχεια οι κλίσεις αμβλύνονται λαμβάνοντας σχετικά μικρότερες τιμές. Η διαφοροποίηση των κλίσεων μπορεί να οφείλεται σε πιθανή διαστρωμάτωση του υλικού δοκιμής.



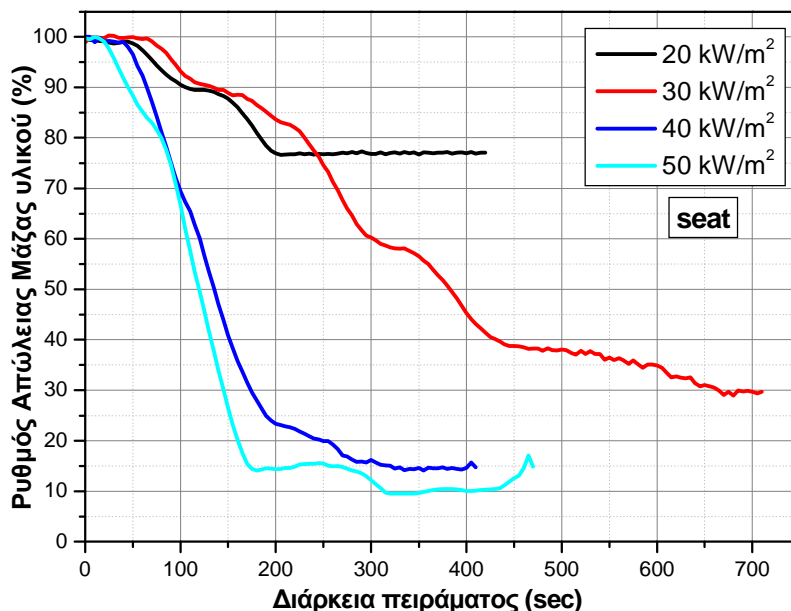
Εικόνα 53: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Φαίνεται ότι μια πρώτη στρώση αντιδρά και δίνει τις μεγαλύτερες κλίσεις στα πρώτα στάδια του πειράματος (σε μικρούς χρόνους) ενώ μια δεύτερη στρώση υλικού αντιδρά διαφορετικά δίνοντας μικρότερες κλίσεις στις κατανομές.

6.3.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας

Οι κατανομές του ρυθμού απώλειας μάζας (MLR), δείχνουν πτωτική τάση με διαφορετικές συμπεριφορές σε σχέση με την παροχή θερμότητας από τον κώνο. Ειδικότερα στη χαμηλότερη θερμότητα ακτινοβολίας του κώνου των 20kW/m², φαίνεται ότι το δοκίμιο μέχρι το τέλος του πειράματος χάνει περίπου ποσοστό της τάξης του 22.5% της αρχικής του μάζας. Αυτό αποτελεί ένδειξη του ότι το κομμάτι μάλλον δεν αναφλέγεται, παρά μόνο “σιγοκαίει” ή όπως λέγεται στην ορολογία το φαινόμενο που παρατηρείται (smoldering). Επίσης από τη χρονοσειρά φαίνεται ότι το δοκίμιο χάνει το μικρό ποσοστό μάζας στα πρώτα 200s αφού στη συνέχεια της δοκιμής η κατανομή MLR έχει λάβει τιμές πλαφόν (οριζοντιοποιημένη) σε ένα ποσοστό περίπου 77.5%. Μάλιστα εντός του παραπάνω χρόνου των 200s, κατά διαστήματα φαίνεται ότι ο MLR δεν διατηρεί σταθερή κλίση αλλά παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις στη μορφή της χρονοσειράς.

Αντίστοιχες διακυμάνσεις παρατηρούνται και στη χρονοσειρά των 30kW/m^2 έως και χρόνο 425s που η κλίση του MLR μεταβάλλεται σε μικρότερη τιμή μέχρι το τέλος της δοκιμής.



Εικόνα 54: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 .

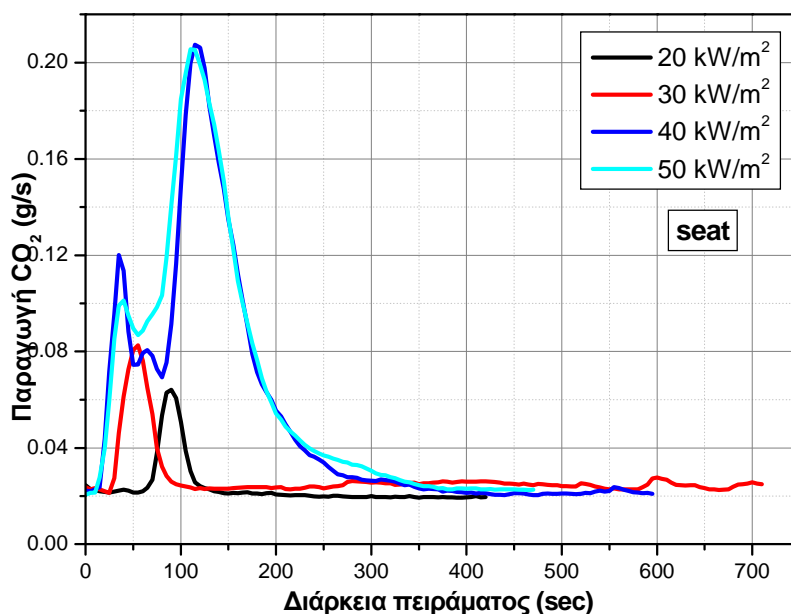
Στις χρονοσειρές που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες παροχές των 40kW/m^2 και 50kW/m^2 παρόμοιες διακυμάνσεις δεν είναι εμφανείς, οι κλίσεις του MLR στο πρώτο κομμάτι των κατανομών είναι πιο σταθερές και εμφανώς διαφοροποιούνται – αμβλύνονται σε χρόνους περίπου 200s και 175s.

Οι μεταβολές των κλίσεων όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα μπορεί να σχετίζεται με πιθανή διαστρωμάτωση των δοκιμίων με μια πιθανή δεύτερη στρώση αυξανόμενης της παροχής θερμότητας να αντιδρά όλο και πιο γρήγορα κατά τη δοκιμή. Επίσης αναφορικά με την πρώτη στρώση του υλικού αυτή αντιδρά πιο γρήγορα αφού αυξανόμενης της παροχής θερμότητας οι κλίσεις των MLR είναι οξύτερες.

6.3.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.

Οι κατανομές παραγωγής CO_2 διατηρούν μορφή παρόμοια με τις κατανομές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) κάτι που δείχνει ότι η παραγωγή CO_2 είναι

ευθέως ανάλογη του (HRR). Οι διπλές κορυφές αποτελούν πάλι μια ένδειξη πιθανής στρωματοποίησης του υλικού. Φαίνεται ότι αυξανόμενης της θερμότητας στην οποία εκτίθενται τα δοκίμια, οι μέγιστες τιμές μεταφέρονται σε μικρότερους χρόνους δηλαδή σε χρόνους πιο κοντινούς στο χρόνο έναρξης του πειράματος με ταυτόχρονη ισχυροποίηση των εντάσεων που βαίνουν προς όλο και υψηλότερες τιμές.



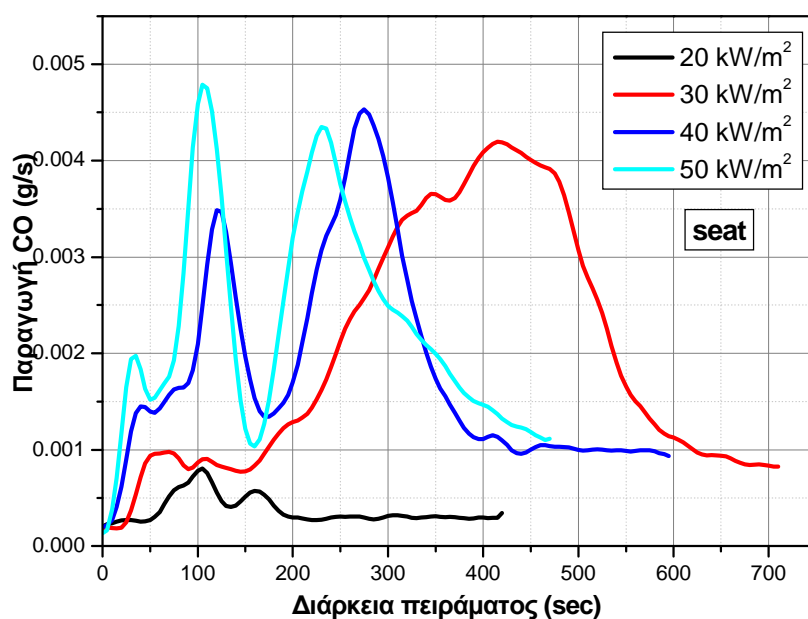
Εικόνα 55: Κατανομές Παραγωγής CO₂ κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Τα μέγιστα των κατανομών αναγνωρίζονται στους ίδιους χρόνους με τις αντίστοιχες κορυφές των κατανομών HRR. Η απουσία των δεύτερων μεγίστων στις δύο χαμηλότερες παροχές θερμότητας αποτελούν ένδειξη ότι στις χαμηλότερες παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², μια πιθανή δεύτερη στρώση του υλικού δεν αντιδρά με συνέπεια το φαινόμενο του smoldering.

6.3.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.

Οι χρονοσειρές της παραγωγής CO δείχνουν διαφορετική εξέλιξη από τις αντίστοιχες των προηγούμενων υλικών (carpet, ceiling), στις οποίες ανιχνεύονται ομοιότητες. Η χρονοσειρά των 20 kW/m², διατηρείται στα χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής CO ενώ διακρίνονται δίδυμες κορυφές σε χρόνους 100s και 175s

περίπου. Στη συνέχεια η κατανομή διατηρείται σε επίπεδα λίγο μεγαλύτερα από μηδενικά. Η συμπεριφορά της παροχής των 30 kW/m² φαίνεται να αποτελεί ορόσημο αφού στις επόμενες μεγαλύτερες παροχές θερμότητας των 40 kW/m², 50 kW/m² οι χρονοσειρές ακολουθούν μια κανονικότητα. Η χρονοσειρά των 30 kW/m² διατηρεί μια αυξητική τάση έως την περιοχή των 400s περίπου και στη συνέχεια βαίνει μειούμενη προς όλο και μικρότερες τιμές παραγωγής CO.



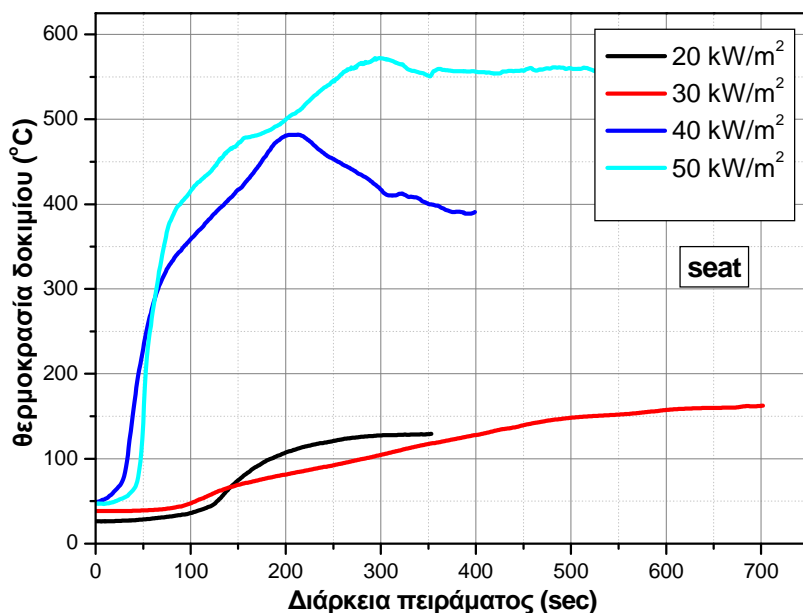
Εικόνα 56: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Οι κατανομές των 40 kW/m², 50 kW/m² δείχνουν κορυφές ισχυρών εντάσεων σε παραπλήσιους χρόνους. Φαίνεται ότι καθώς η παροχή θερμότητας σε αυτά τα υψηλά επίπεδα αυξάνει, οι μέγιστες τιμές μεταφέρονται προς μικρότερους χρόνους.

6.3.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.

Οι κατανομές θερμοκρασίας των δοκιμίων μπορούν να ειδωθούν ως δύο ομάδες. Στις χαμηλότερες παροχές θερμότητας των 20 kW/m², 30 kW/m² φαίνεται οι θερμοκρασίες των δοκιμίων να αυξάνονται προοδευτικά με μικρές κλίσεις και τις τελικές θερμοκρασίες να κυμαίνονται στην περιοχή των 125 – 175°C. Αντίθετα οι χρονοσειρές που αντιστοιχούν σε παροχές 40 kW/m² και 50 kW/m² φθάνουν σε πολύ

μεγαλύτερες θερμοκρασίες διατηρώντας πολύ οξύτερες κλίσεις τουλάχιστον στα πρώτα 100s. Οι διαφοροποίηση των κλίσεων μπορεί να συναρτώνται με τη δομή sandwich όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα με το δεύτερο συστατικό κατά βάθος του υλικού να αντιδρά ομαλότερα (μικρότερες κλίσεις) σε σχέση με το πρώτο (οξύτερες κλίσεις).

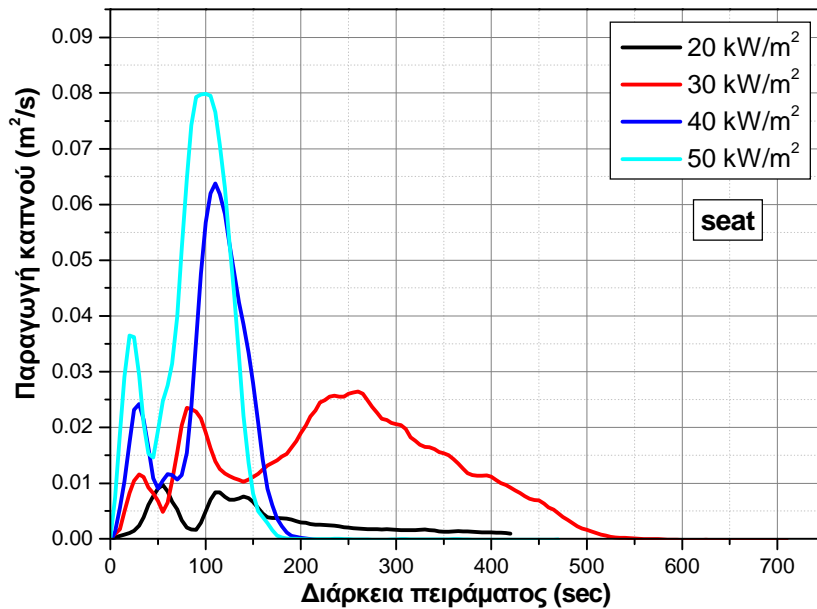


Εικόνα 57: Κατανομές Θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.3.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.

Γενικά φαίνεται ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας να αυξάνονται και τα επίπεδα παραγωγής καπνού. Οι χρονοσειρές της παραγωγής καπνού δείχνουν διαφορετική συμπεριφορά για τις χαμηλές παροχές θερμότητας των 20 kW/m² και 30 kW/m², ενώ κανονικότητα δείχνουν οι κατανομές των υψηλότερων παροχών θερμότητας των 40 kW/m² και 50 kW/m². Αναγνωρίζονται μέγιστες τιμές σε όλες τις παροχές. Ειδικότερα οι κατανομές των 30 kW/m², 40 kW/m² και 50 kW/m² εμφανίζουν μια πρώτη κορυφή ισχυρής έντασης πολύ κοντά στην έναρξη των δοκιμών σε χρόνο περίπου (20 – 30)s. Για τις ίδιες παροχές θερμότητας δεύτερες μέγιστες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή των 100s. Η κατανομή των 30 kW/m² φαίνεται να αποτελεί μια οριακή κατάσταση, αφού η χρονοσειρά πέρα από τις παραπάνω

ομοιότητες που δείχνει με τις αντίστοιχες των υψηλότερων παροχών θερμότητας, εντούτοις παρουσιάζει ομοιότητες και με την χαμηλότερη παροχή θερμότητας που δοκιμάστηκε.



Εικόνα 58: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού καθίσματος (seat) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.4 Υλικό ύφασμα (textile blue navy)

Στα ακόλουθα παρατίθενται και σχολιάζονται οι κατανομές των μεγεθών, που προκύπτουν κατά τη δοκιμή του υλικού καλύμματος από κάθισμα αεροσκάφους (textile blue navy) με τη μετρητική διάταξη Θερμιδόμετρο Κώνου. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται το υλικό πριν και μετά τις δοκιμές σε διαφορετικές ροές θερμότητας (φωτ. 6.4).



α) Υλικό πριν την καύση



β) Καύση στα 20 kW/m²



γ) Καύση στα 30 kW/m²



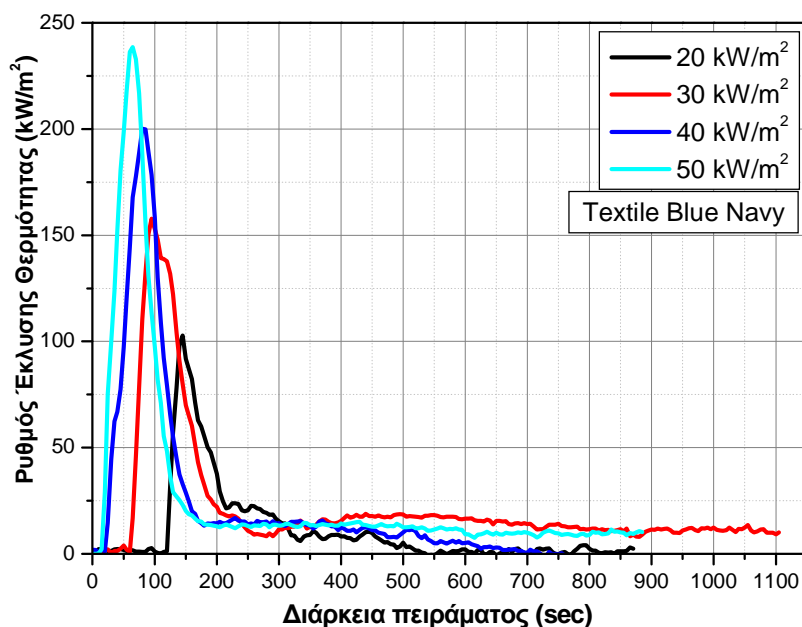
δ) Καύση στα 40 kW/m²



ε) Καύση στα 50 kW/m²

Φωτογραφία 6.4: Φωτογραφίες του υλικού πριν και μετά τις δοκιμές

6.4.1 Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας

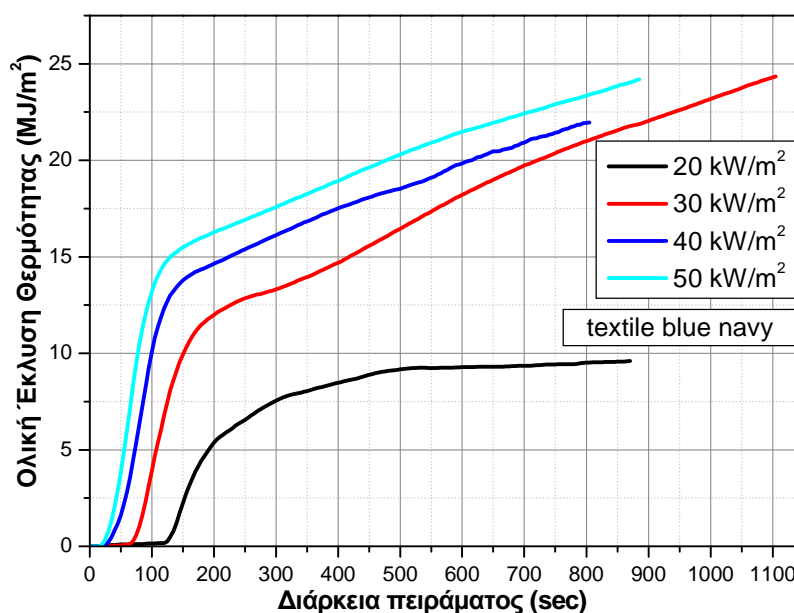


Εικόνα 59: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Οι χρονοσειρές του Ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR) δείχνουν μια αξιοσημείωτη κανονικότητα ως προς τα προηγούμενα υπό μελέτη υλικά. Προκύπτει ότι για όλες τις παροχές θερμότητας εμφανίζονται μέγιστες τιμές κοντά στην έναρξη της δοκιμής, οι οποίες αυξανόμενης της παροχής θερμότητας ισχυροποιούνται λαμβάνοντας υψηλότερες τιμές και ταυτόχρονα μεταφέρονται προς μικρότερους χρόνους. Στη συνέχεια οι κατανομές αποσβένουν προς όλο και μικρότερες τιμές μέχρι το τέλος των δοκιμών. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχει ένας χρόνος υστέρησης αρχικά αφού το υλικό δεν αντιδρά ακαριαία με την έναρξη της δοκιμής. Για παράδειγμα αυτός ο χρόνος είναι λίγο μεγαλύτερος από 100s για την περίπτωση της παροχής 20 kW/m², για την παροχή των 30 kW/m², μειώνεται γύρω στα 50s, ενώ για τις ακόμα μεγαλύτερες παροχές θερμότητας ο χρόνος υστέρησης μειώνεται ακόμα τείνοντας προς το χρόνο μηδέν, ταυτόχρονα δηλαδή με την έναρξη του πειράματος.

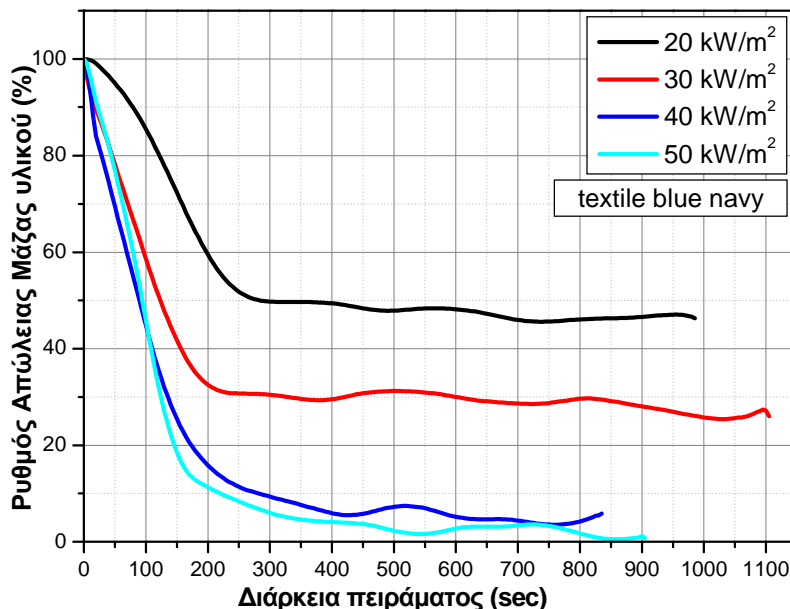
6.4.2 Κατανομές Ολική Έκλυση Θερμότητας

Οι χρονοσειρές της (THR) μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις περιοχές για όλες τις παροχές θερμότητας που δοκιμάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα διακρίνεται αρχικά μια περιοχή χρονικής υστέρησης η οποία μειώνεται αυξανόμενης της παροχής θερμότητας. Στη συνέχεια διακρίνεται μια περιοχή όπου οι χρονοσειρές αναπτύσσονται με μεγάλες κλίσεις οι οποίες πιο συγκεκριμένα γίνονται οξύτερες αυξανόμενης της παροχής θερμότητας. Τέλος αναγνωρίζεται μια περιοχή όπου οι κλίσεις των χρονοσειρών λαμβάνουν μικρότερες τιμές. Αξιοσημείωτο είναι ότι για τις παροχές θερμότητας 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 και 50 kW/m^2 η δεύτερη περιοχή ανάπτυξης των κατανομών γίνεται εντός μιας ζώνης σχεδόν σταθερού εύρους. Αντίθετα η χρονοσειρά για παροχή θερμότητας 20 kW/m^2 στην Τρίτη περιοχή ανάπτυξης φαίνεται να τείνει προς αποκατάσταση σε μια τιμή λίγο μικρότερη των 10 MJ/m^2 .



Εικόνα 60: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (THR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 .

6.4.3 Κατανομές Ρυθμού Απώλειας Μάζας



Εικόνα 61: Κατανομές ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Οι χρονοσειρές του ρυθμού απώλειας μάζας (MLR), δείχνουν πτωτική πορεία με παρόμοια συμπεριφορά. Γενικά οι χρονοσειρές μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο περιοχές, μια πρώτη με οξύτερες κλίσεις και μια δεύτερη όπου το MLR τείνει να αποκατασταθεί σε σταθερές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας του κώνου το χρονικό σημείο μεταβολής της κλίσης των χρονοσειρών μετακινείται προς μικρότερους χρόνους. Φαίνεται ακόμα ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας το δοκίμιο χάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής του μάζας.

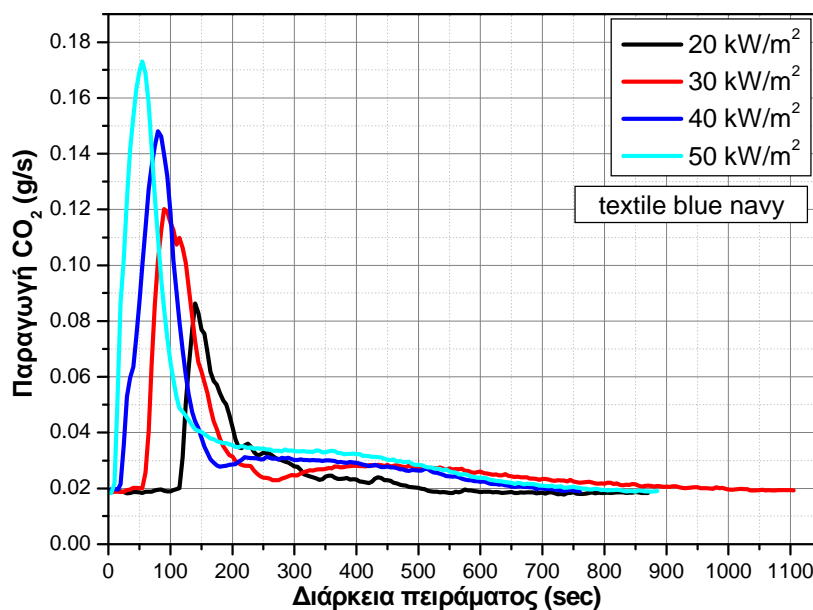
Ειδικότερα στη χαμηλότερη θερμότητα ακτινοβολίας του κώνου των 20kW/m², φαίνεται ότι το δοκίμιο μέχρι το τέλος του πειράματος χάνει ένα ποσοστό της τάξης του 55% της αρχικής του μάζας. Επίσης από τη χρονοσειρά φαίνεται ότι το δοκίμιο χάνει το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας (50%) στα πρώτα 250s αφού στη συνέχεια της δοκιμής η κατανομή MLR συνεχίζει να μειώνεται αμελητέα όμως. Το δοκίμιο χάνει ένα

επιπλέον ποσοστό μάζας της τάξης του 5% μέχρι το τέλος της δοκιμής στα 980s περίπου. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις υψηλότερες παροχές θερμότητας.

Οι μεταβολές των κλίσεων όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα μπορεί να σχετίζεται με πιθανή διαστρωμάτωση των δοκιμίων με μια πιθανή δεύτερη στρώση αυξανόμενης της παροχής θερμότητας να αντιδρά όλο και πιο γρήγορα κατά τη δοκιμή. Επίσης αναφορικά με την πρώτη στρώση του υλικού αυτή αντιδρά πιο γρήγορα αφού αυξανόμενης της παροχής θερμότητας οι κλίσεις των MLR είναι οξύτερες.

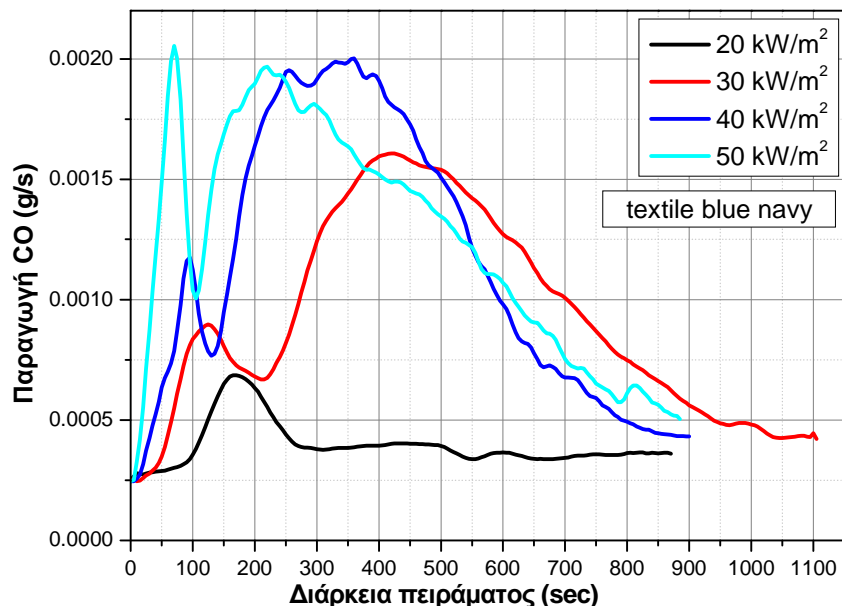
6.4.4 Κατανομές Παραγωγή Διοξειδίου του άνθρακα.

Οι χρονοσειρές της παραγωγής CO₂, ακολουθούν επακριβώς τις χρονοσειρές του HRR κάτι που υποδηλώνει την άμεση σχέση των δύο μεγεθών και την αντίστοιχη συμπεριφορά που ακολουθούν. Το πιο σημαντικό εύρημα που μπορεί να αναγνωρισθεί είναι ότι για όλες τις παροχές θερμότητας εμφανίζονται μέγιστες τιμές κοντά στην έναρξη της δοκιμής, οι οποίες αυξανόμενης της παροχής θερμότητας ισχυροποιούνται λαμβάνοντας υψηλότερες τιμές και ταυτόχρονα μεταφέρονται προς μικρότερους χρόνους.



Εικόνα 62: Κατανομές Παραγωγής CO₂ κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (*textile blue navy*) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

6.4.5 Κατανομές Παραγωγής Μονοξειδίου του άνθρακα.

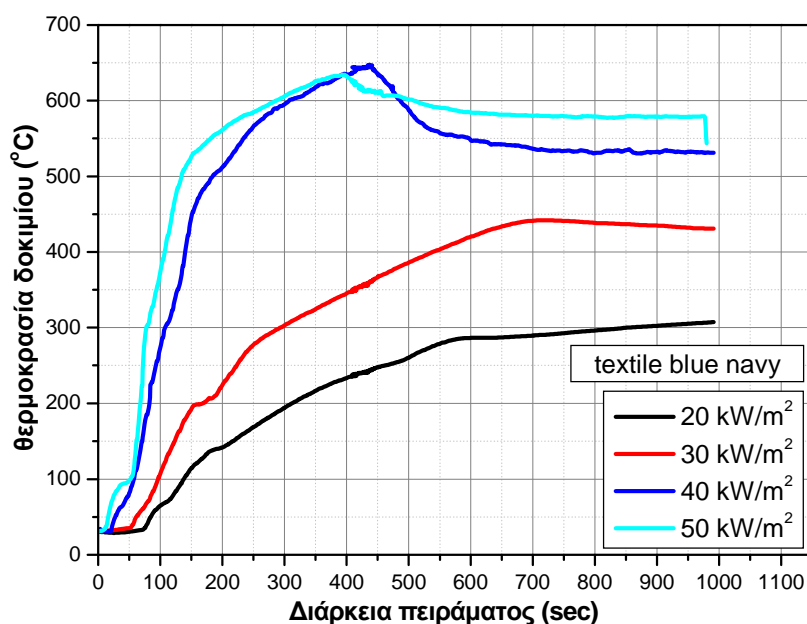


Εικόνα 63: Κατανομές Παραγωγής CO κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Ομοιότητες παρατηρούνται και στην εξέλιξη των χρονοσειρών της παραγωγής CO του υλικού textile blue navy. Όλες οι κατανομές εμφανίζουν μια πρώτη κορυφή σε χρόνους κοντά στην έναρξη των δοκιμών. Φαίνεται ότι αυξανόμενης της παροχής θερμότητας οι κορυφές μεταφέρονται προς μικρότερους χρόνους, ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν σε ένταση ισχύος και γίνονται οξύτερες. Οι πρώτες ισχυρές εντάσεις των χρονοσειρών παρατηρούνται σε χρόνους 175s, 125s, 100s και 75s για παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m² και 50 kW/m² αντίστοιχα. Στην περαιτέρω εξέλιξη οι κατανομές για παροχή θερμότητας 30 kW/m², 40 kW/m² και 50 kW/m² διαφοροποιούνται ως προς την χαμηλότερη των 20 kW/m². Η τελευταία μετά την περιοχή του μέγιστου αποσβένει προς χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής CO και από τα 250s περίπου παραμένει γύρω από μια σταθερή τιμή με μικρές διακυμάνσεις. Αντίθετα οι κατανομές των υψηλότερων παροχών θερμότητας μετά τις μέγιστες τιμές εισέρχονται σε κοιλάδες όπου φαίνεται ο χρόνος παραμονής τους να μειώνεται αυξανόμενης της παροχής θερμότητας. Στη συνέχεια βαίνουν ξανά αυξανόμενες προς

περιοχές μεγίστων τιμών με μεγαλύτερους χρόνους παραμονής ως προς τις πρώτες μέγιστες. Τέλος οι χρονοσειρές δείχνουν τάση απομείωσης προς παραπλήσιες τιμές ανεξαρτήτως της παροχής θερμότητας του κώνου.

6.4.6 Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων.

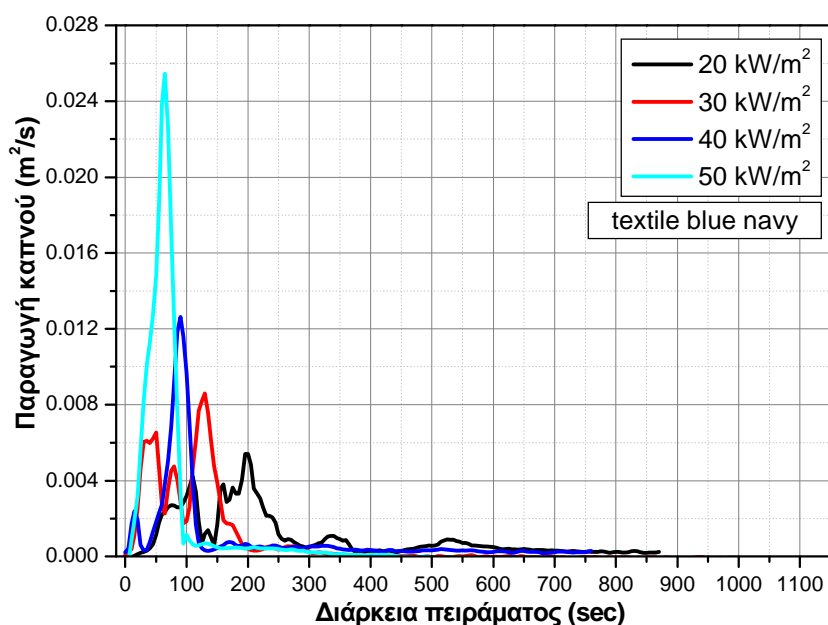


Εικόνα 64: Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίου κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m², 30 kW/m², 40 kW/m², 50 kW/m².

Οι κατανομές θερμοκρασίας των δοκιμίων μπορούν να ειδωθούν ως δύο ομάδες. Στις χαμηλότερες παροχές θερμότητας των 20 kW/m², 30 kW/m² φαίνεται οι θερμοκρασίες των δοκιμίων να αυξάνονται προοδευτικά με μικρές κλίσεις. Αντίθετα οι χρονοσειρές που αντιστοιχούν σε παροχές 40 kW/m² και 50 kW/m² φθάνουν σε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες διατηρώντας πολύ οξύτερες κλίσεις τουλάχιστον στα πρώτα στάδια εξέλιξης των δοκιμών (έως περίπου 150s).

6.4.7 Κατανομές Παραγωγής Καπνού.

Γενικά φαίνεται ότι αυξανόμενη της παροχής θερμότητας να αυξάνονται και τα επίπεδα παραγωγής καπνού στα πρώτα στάδια της αντίδρασης – καύσης του υλικού. Οι χρονοσειρές της παραγωγής καπνού δείχνουν παρόμοια συμπεριφορά για τις παροχές θερμότητας των 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 και 40 kW/m^2 , ενώ διαφορετική εξέλιξη δείχνει η κατανομή παραγωγής καπνού για την παροχή των 50 kW/m^2 . Στις πρώτες 3 παροχές θερμότητας οι χρονοσειρές εμφανίζουν κορυφές ισχυρών εντάσεων που βαθμιαία μετατοπίζονται προς μικρότερους χρόνους, πιο κοντά στην έναρξη των δοκιμών. Αντίθετα στην υψηλότερη παροχή θερμότητας των 50 kW/m^2 , μια μοναδική κορυφή έντασης πολύ μεγαλύτερης από τις υπόλοιπες εμφανίζεται στο πρώτο στάδιο της αντίδρασης του δοκιμίου.



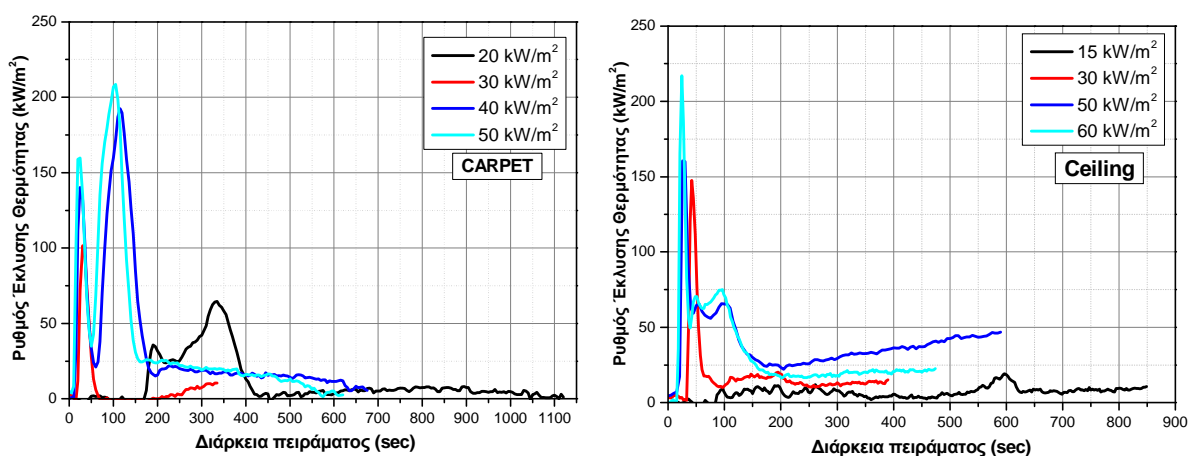
Εικόνα 65: Κατανομές Παραγωγής Καπνού κατά τη δοκιμή υλικού υφάσματος (textile blue navy) σε παροχές θερμότητας 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

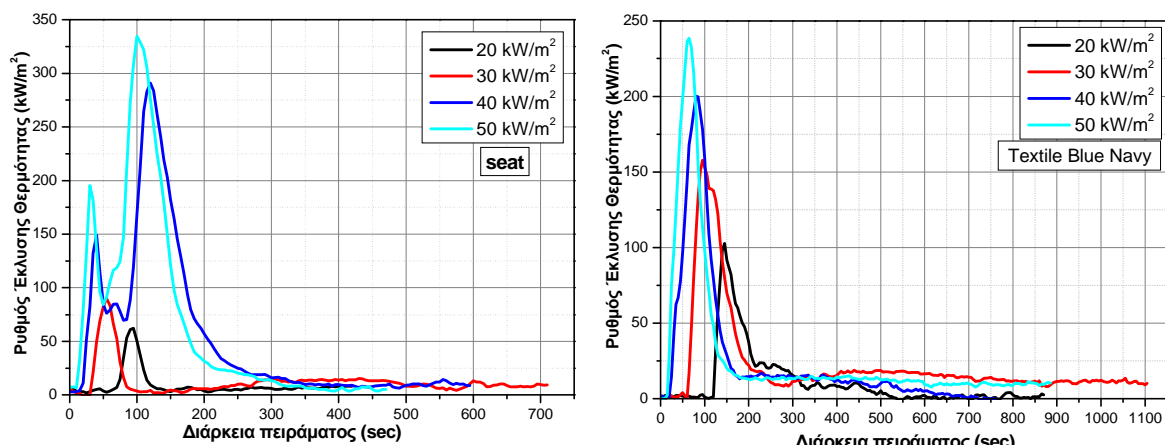
7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εξάγονται κάποια ολοκληρωμένα συμπεράσματα πέρα από όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αποτυπώνονται τα διαγράμματα των τεσσάρων υλικών στις θερμότητες ακτινοβολίας υπό τις οποίες τέθηκαν τα δοκίμια και σχολιάζονται ως προς τα όμοια μεγέθη που καταγράφησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Δεδομένου ότι οι κατανομές της παραγωγής CO₂, σχετίζονται άμεσα τις αντίστοιχες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας λόγω της αρχής λειτουργίας της μεθόδου, οι πρώτες δεν παρατίθενται. Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια των υλικών carpet, seat, textile blue navy όπως φαίνεται και στα επόμενα εξετάστηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας του κώνου.

7.1 Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας – Heat Release Rate (HRR)



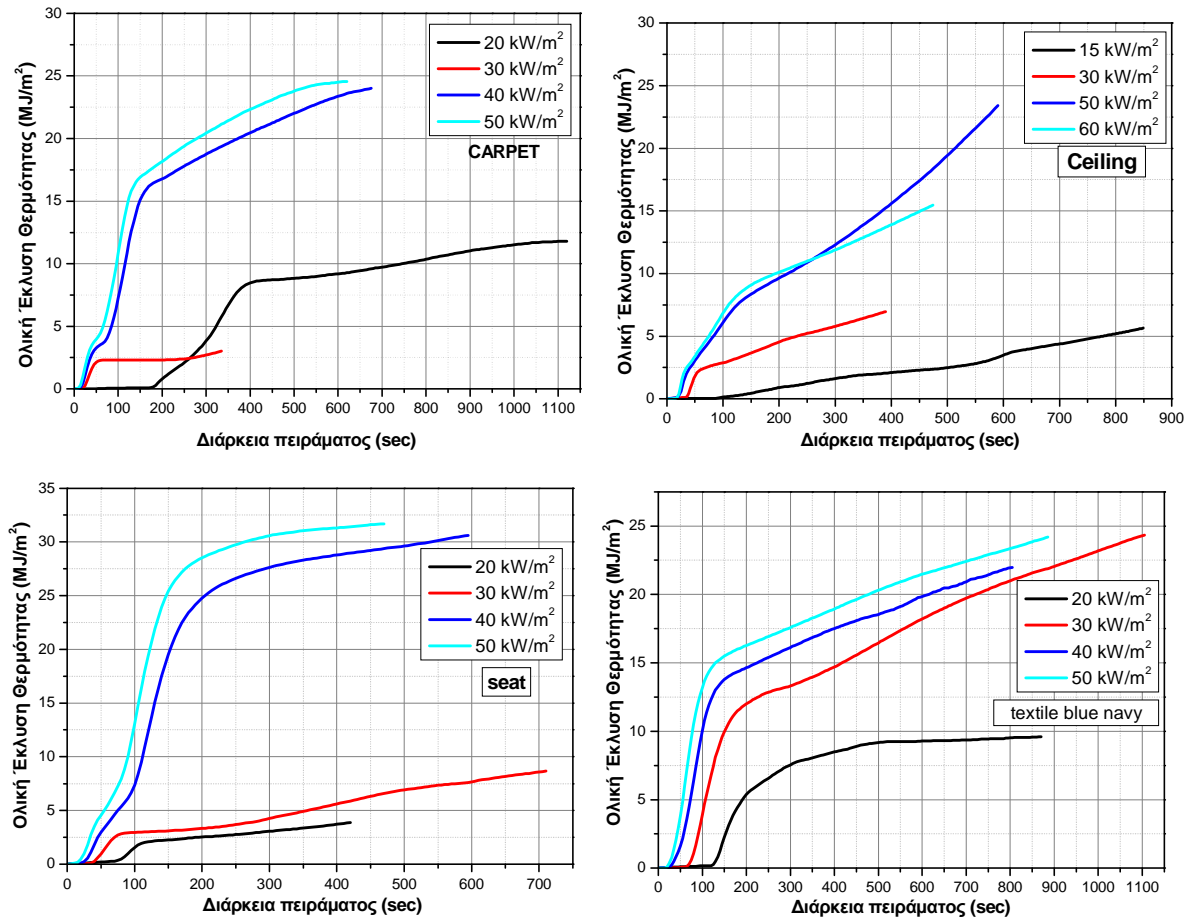
Εικόνα 66: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.



Εικόνα 67: Κατανομές Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.66 παρουσιάζονται τα υλικά που μελετήθηκαν ως προς το μέγεθος του ρυθμού έκλυσης θερμότητας που αποδίδεται κατά την ακτινοβολία θερμότητας από τον κώνο του Θερμιδομέτρου. Τα υλικά carpet και seat δείχνουν παρόμοιες συμπεριφορές στις υψηλότερες παροχές θερμότητας που δοκιμάστηκαν (40 kW/m^2 , 50 kW/m^2), με εμφανή την παρουσία διδύμων κορυφών υψηλών εντάσεων που όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα είναι πιθανό να σχετίζεται με μια στρωματοειδή δομή των εν λόγω υλικών. Πολύ διαφορετική συμπεριφορά δίνει το υλικό ceiling, το οποίο φαίνεται να είναι μονοστρωματικό και ίσως κρίνεται και το πιο ασφαλές σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά αφού η έκλυση θερμότητας περιορίζεται σε πολύ μικρούς χρόνους σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά.

7.2 Ολική Έκλυση Θερμότητας – Total Heat Release (THR)

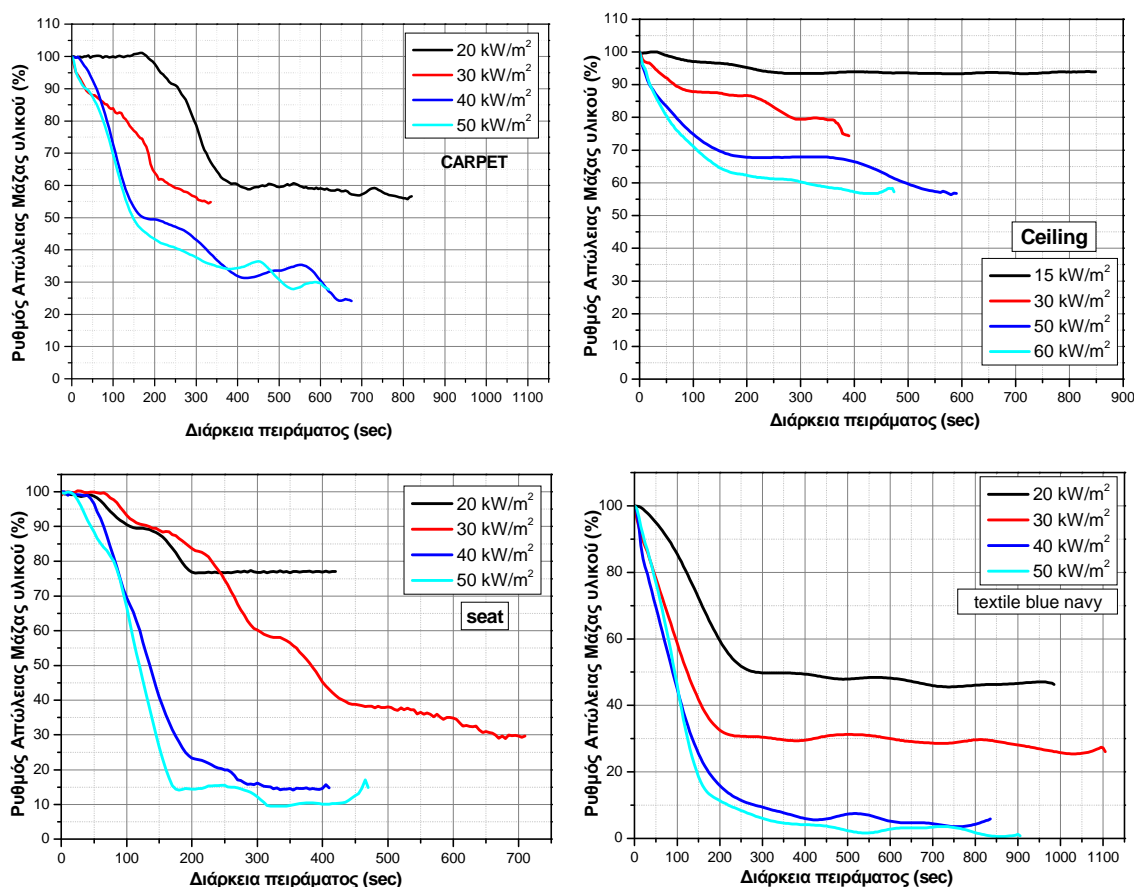


Εικόνα 68: Κατανομές Ολικής Έκλυσης Θερμότητας (THR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.67 παρουσιάζονται τα υλικά που μελετήθηκαν ως προς το μέγεθος της ολικής έκλυσης θερμότητας που αποδίδεται κατά την ακτινοβολία θερμότητας από τον κώνο του Θερμιδομέτρου. Τα υλικά carpet textile blue navy και seat δείχνουν παρόμοιες συμπεριφορές με κλίσεις που διαφοροποιούνται στο πέρασμα του χρόνου. Ειδικότερα φαίνεται ότι στα πρώτα στάδια της αντίδρασης οι χρονοσειρές των συγκεκριμένων υλικών διατηρούν αυξημένες κλίσεις που μετά τα 100 – 150s οι κλίσεις φαίνεται να αμβλύνονται προς μικρότερες τιμές. Αυτό επίσης πιθανά μπορεί να αποδοθεί στη διαστρωμάτωση των υλικών που μπορεί να αποτελούνται από

περισσότερα του ενός συστατικών. Η παραπάνω συμπεριφορά δεν παρατηρείται για το υλικό ceiling τουλάχιστον τόσο χαρακτηριστικά όσο στα προηγούμενα υλικά που μελετήθηκαν.

7.3 Ρυθμός Απώλειας Μάζας – Mass Loss Rate (MLR).

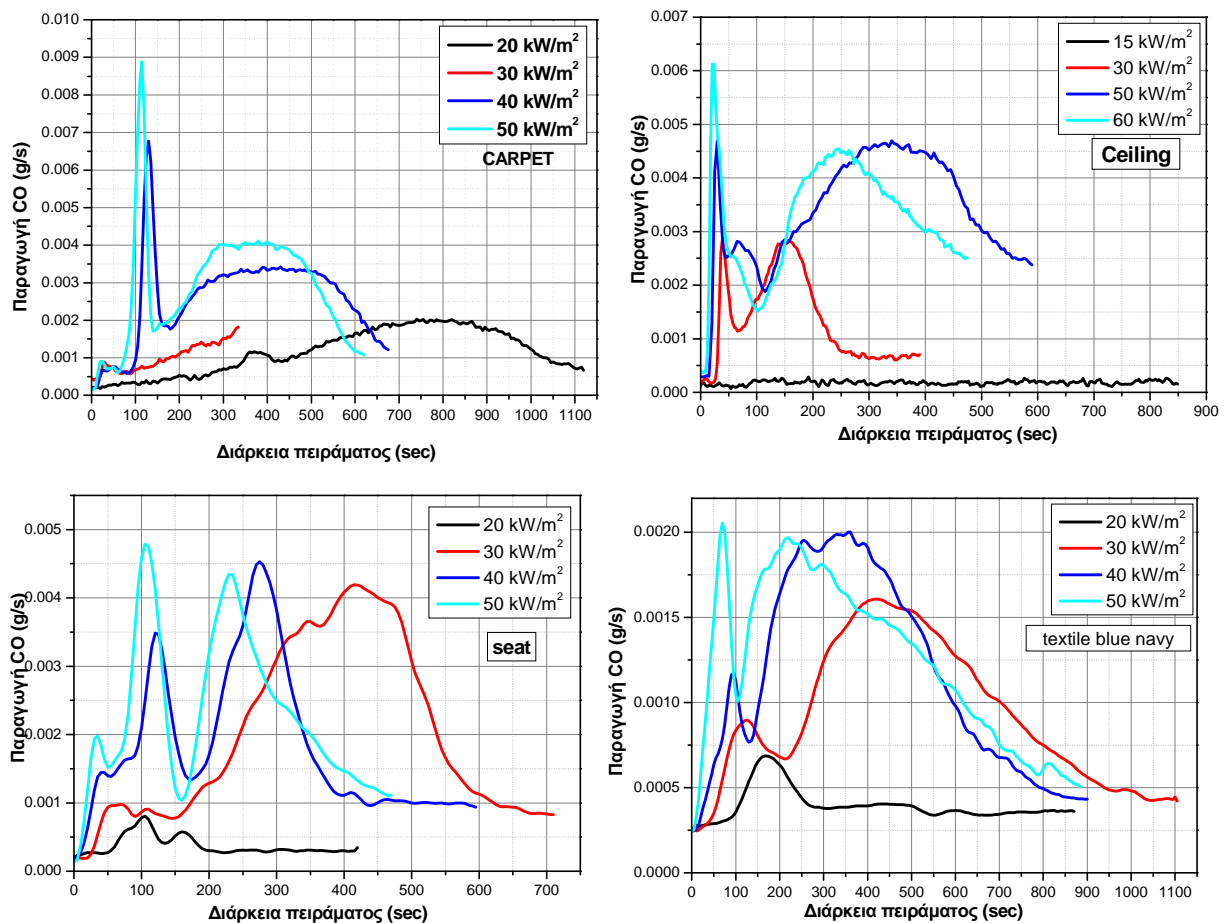


Εικόνα 69: Κατανομές Ρυθμού απώλειας μάζας (MLR) κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.68 παρουσιάζονται τα υλικά που μελετήθηκαν ως προς το μέγεθος του ρυθμού απώλειας μάζας. Τα υλικά carpet textile blue navy και seat δείχνουν παρόμοιες συμπεριφορές με κλίσεις που διαφοροποιούνται στο πέρασμα του χρόνου. Ειδικότερα φαίνεται ότι στα πρώτα στάδια της αντίδρασης οι χρονοσειρές των συγκεκριμένων υλικών διατηρούν αυξημένες κλίσεις που μετά τα 150s οι κλίσεις

φαίνεται να αμβλύνονται προς μικρότερες τιμές. Αυτό επίσης πιθανά μπορεί να αποδοθεί στη διαστρωμάτωση των υλικών που μπορεί να αποτελούνται από περισσότερα του ενός συστατικών. Η παραπάνω συμπεριφορά δεν παρατηρείται για το υλικό ceiling τουλάχιστον τόσο χαρακτηριστικά όσο στα προηγούμενα υλικά που μελετήθηκαν, όπου οι κατανομές του MLR διατηρούν πιο εξομαλυμένη μορφή κατά την πτωτική πορεία.

7.4 Παραγωγή CO.

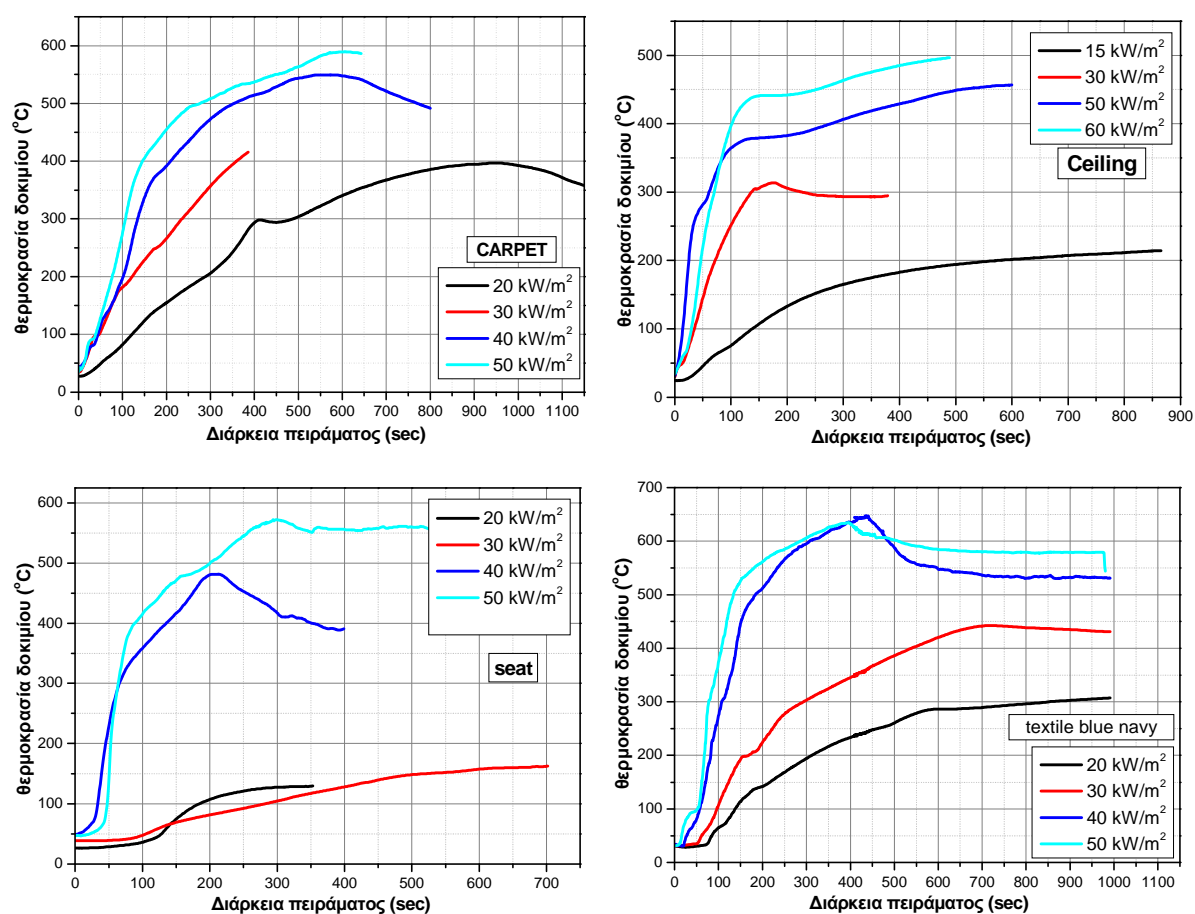


Εικόνα 70: Κατανομές παραγωγής CO κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.69 παρουσιάζονται τα υλικά που μελετήθηκαν ως προς το μέγεθος της παραγωγής CO. Το μέγεθος κυμαίνεται γενικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα και είναι

αρκετά ευάλωτο. Κοινά χαρακτηριστικά που αναγνωρίζονται είναι οι έντονες κορυφές υψηλών εντάσεων όσο και κοιλάδες μεταξύ τους.

7.5 Θερμοκρασία δοκιμίου.

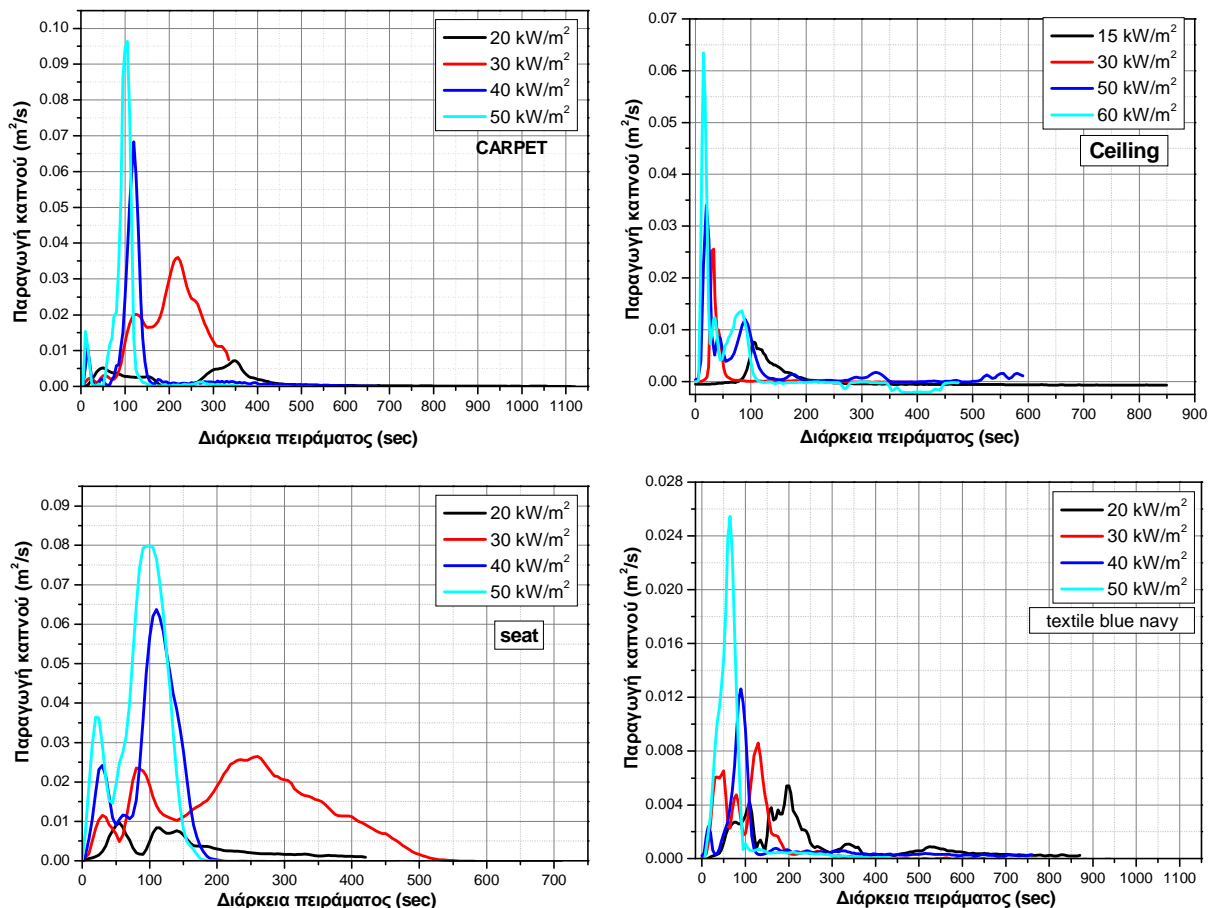


Εικόνα 71: Κατανομές θερμοκρασίας δοκιμίων κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.70 παρουσιάζονται τα υλικά που μελετήθηκαν ως προς το μέγεθος της θερμοκρασίας των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Όλα τα υλικά δείχνουν παρόμοιες συμπεριφορές για τις υψηλότερες παροχές θερμότητας του κώνου, με

κλίσεις που διαφοροποιούνται στο πέρασμα του χρόνου. Ειδικότερα φαίνεται ότι στα πρώτα στάδια της αντίδρασης οι χρονοσειρές των συγκεκριμένων υλικών διατηρούν αυξημένες κλίσεις που σημαίνει ότι ένα πρώτο στρώμα των δοκιμίων θερμαίνεται γρήγορα. Στις περιπτώσεις που οι καμπύλες δείχνουν αυξητική τάση αλλά με έναν πιο εξομαλυμένο τρόπο σημαίνει ότι η θερμότητα μεταφέρεται αρκετά ομαλά σε όλο το πάχος του υλικού, ενώ περιπτώσεις που παρουσιάζονται πιο οξείες μεταβολές (ασυνέχεις των κατανομών) είναι ενδεικτικές ότι η τα διάφορα στρώματα των υλικών δεν έχουν προθερμανθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

7.6 Παραγωγή καπνού.



Εικόνα 72: Εικόνα 70: Κατανομές παραγωγής καπνού κατά τη δοκιμή των υπό μελέτη υλικών (carpet, ceiling, seat και textile blue navy) στις παροχές θερμότητας ακτινοβολίας του κώνου.

Στην Εικ.71 παρουσιάζονται οι κατανομές παραγωγής καπνού των υπό μελέτη υλικών. Κοινό χαρακτηριστικό είναι οι έντονες κορυφές υψηλών εντάσεων στα πρώτα στάδια της αντίδρασης των υλικών ενώ μια σημαντική διαφοροποίηση παρουσιάζει το υλικό textile blue navy για το οποίο οι τιμές καπνού διατηρούνται μια τάξη μεγέθους μικρότερες από τα υπόλοιπα υλικά.

8 Αναφορές

1. Schartel, B. and Hull, T. R., "Development of fire-retarded materials— Interpretation of cone calorimeter data, FIRE AND MATERIALS, Fire Mater; 31:327–354, 2007,
2. Παπαϊωάννου Κ.Κ., Φούντη Μ., "Αντίσταση Δομικών Υλικών στην Πυρκαγιά", 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008,
3. Drysdale, D., "An introduction to fire dynamics", John Wiley&Sons Ltd., Sussex, England, 1999,
4. Thomas P.H., "Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms". Fire and Materials, 5 1981,
5. Friedman R., "Ignition and burning of solids". Fire Standards and Safety, ASTM STP 614, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1977,
6. Magee, R.S, and McAlevy, R.F., "The mechanism of flame spread". J.Fire and Flammability, 2 ,271-297, 1971,
7. Markstein, G.H, de Ris, J.N., "Upward fire spread over textiles", 14th Symposium(International) on Combustion, pp.1085-1097, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1972,
8. Suzuki ,M., Dobashi, R., and Hirano, T., "Behaviour of fire spreading downward over thick paper", 25th Symposium(International) on Combustion, pp.1439-1446, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1994,
9. Alvares, N.J, , "Some experiments to delineate the conditions for flashover in enclosure fires", International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pp.375-383, University of Edinburgh, 1975,
10. Cengel Yunus., Ghajar A Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α. ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε, 2011, http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html
11. Mouritz, A.P., Gibson A.G., "Fire Properties of Polymer Composite Materials", RMIT University and CRC for Advanced Composite Structures Melbourne/Centre for Composite Materials Engineering England, 2006,
12. Quintiere J.G. V., Babrauskas, L. Cooper, M. Harkleroad, K. Steckler and A. Tewarson. "The role of aircraft panel materials in cabin fires and their properties." DOT/FAA/CT-84/30, Federal Aviation Administration, 1985,
13. Schimitt Heirick, Andreas Heene, "Κτιριακές κατασκευές", Μετάφραση Δ. Μαλασπίνας, εκδότης Μόσχος Γκιούρδας, 1994,
14. Blassi Walter, "ΔΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ. ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ – ΗΧΟΜΟΝΩΣΗ – ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ", ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ ΚΑΣΣΕΛΟΥΡΗ ΒΑΡΒΑΡΑ, ΕΚΔΟΤΙΚΟΣ ΟΜΙΛΟΣ ΙΩΝ, ΑΘΗΝΑ, 2000,
15. Lindholm J., Brink A., Hupa M., "Cone calorimeter-A tool for measuring Heat release rate.", Abo Akademi Process Chemistry Centre, 2001,

17. Babrauskas V., "Why was the fire so big? HHR: The role of heat release rate in described fires". *Fire & Arson Investigator*, 47:54-57, (1997),
18. Babrauskas V. and Parker W.J., "Ignitability measurements with the cone calorimeter." *Fire & Materials*, 11:31-43, 1987,
19. Mouritz A.P. and Mathys Z. "Post-fire mechanical properties of marine polymer composites." *Composite Structures*, 47:643-653, 1999,
20. Mouritz A.P., and Mathys Z., "Mechanical properties of fire-damaged glass-reinforced phenolic composites." *Fire and Materials*, 24:67-75, 2000,
21. Mouritz A.P., "Post-fire flexural properties of fibre-reinforced polyester, epoxy and phenolic composites." *Journal of Materials Science*, 37:1377-1386, 2002,
22. Mouritz A.P., and Gardiner C.P., "Compression properties of fire-damaged polymer sandwich composites." *Composites*, 33A:609-620, 2002,
23. Babrauskas V. and Peacock R.D., « Heat release rate: the single most important variable in fire hazard." *Fire Safety Journal*, 18:255-272, 1992,
24. Mouritz A.P. and Mathys Z., "Heat release of polymer composites in fire." In: *Proceedings of the SAMPE Symposium and Exhibition*, 16-20 May 2004,
25. Gibson A.G. and Hume J. "Fire performance of composite panels for large marine structures." *Plastics, Rubbers & Composites Processing and Applications*, 23:175-183, 1995,
26. Egglestone G.T. & Turley D.M., "Flammability of GRP for use in ship superstructures", *Fire and Materials*, 18:255-260, 1994,
27. M. Le Bras, S. Bourbigot, B. Mortaigne and G. Cordellier, "Comparative study of the fire behaviour of glass-fibre reinforced unsaturated polyesters using a cone calorimeter", *Polymers and Polymer Composites*, 6:535-539, (1998),
28. Kourtides D.A., Gilwee W.J. & Parker J.A., "Thermal response of composite panels", *Poly. Eng. & Sci.*, 19:226-231, (1979),
29. Macaione D.P., Downing R.P. and Bergquist P.R., *Summary Report AMMRC TR 83-53*, Army Materials and Mechanics Research Laboratory, Watertown, MA, 1983,
30. Bates S.C. and Soloman P.R., "Elevated temperature oxygen index apparatus and measurements.", *Journal of fire Science*, 11:271-284, 1993,
31. Sorathia U., Dapp T. & Kerr J., "Flammability characteristics of composites for shipboard and submarine internal applications", In: *Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium*. San Diego, CA, 15-18, p.1868-1878, April 1991,
32. Allison D.M., Marchand A.J. and Morchat R.M., "Fire performance of composite materials in ships and offshore structures.", *Marine Structures*, 4:129-140, 1991,
33. Weil E.D., Hirschler M.M., Patel N.G., Said M.M. and Shakir S., "Oxygen index: correlations to other fire tests.", *Fire and Materials*, 16:159-167, 1992,
34. Sorathia U., "Flammability and fire safety of composite materials. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Composite Materials for Offshore Operations*." Houston, Texas, 26-28, p. 309- 317, Oct 1993,
35. Sorathia U., Gracik T., Ness J., Blum M., Le A., Scholl B. and Long G., "Fire safety of marine composites." In: *Proceedings of the 8th International Conference on Marine Applications of Composite Materials*. Florida, 14-16 March, 2000,
36. Sorathia U., Telegadas H. and Bergen M., "Mechanical and flammability characteristics of phenolic composites for naval applications." In: *Proceedings of the 39th International SAMPE Symposium*. 11-14, p. 2991-3002, April 1994,

37. Sorathia U., Lyon R., Ohlemiller T. and Grenier A., "A review of fire test methods and criteria for composites." SAMPE Journal, 33 (July/August):23-31, 1997,
38. Brown J.E., Braun E. and Twilley W.H., "Cone calorimetry evaluation of the flammability of composite materials." NBS Report NBSIR 88-3733, 1988,
39. Hume J., "Assessing the fire performance characteristics of GRP composites." In: International Conference on Materials and Design Against Fire, p.11-15, London, 1992,
40. Brown J.R., Fawell P.D. and Mathys Z., "Fire-hazard assessment of extended-chain polyethylene and aramid composites by cone calorimetry." Fire & Materials, 18:167-172, 1994,
41. Sastri S.B., Armistead J.P. and Keller T.M., "Phthalonitrile-carbon fiber composites." Polymer Composites, 17:816-822, 1996,
42. Sastri S.B., Armistead J.P., Keller T.M. and Sorathia U., "Flammability characteristics of phthalonitrile composites." In: Proceedings of the 42th International SAMPE Symposium. 4-8, p.1032-1038, May 1997,
43. Scudamore M.J., "Fire performance studies on glass-reinforced plastic laminates." Fire and Materials, 18:313-325, 1994,
44. Grenier A.T., Dembsey N.A. and Barnett J.R., "Fire characteristics of cored composite materials for marine use." Journal of Fire Safety, 30:137-159, 1998,
45. Lyon R.E., Demario J., Walters R.N. and Crowley S., "Flammability of glass fiber-reinforced polymer composites." Proceedings of the Fourth Conference on Composites in Fire, Newcastle-upon-Tyne, UK, 15-16 September 2005,
46. Mikkola E. and Wichmann I.S., "On the thermal ignition of combustible material" Fire & Materials, 14:87-96, 1989,
47. Mikkola E., "Ignitability of solid materials." In : Heat Release in Fires. Ed. V. Babrauskas and S.J. Grayson. London: Elsevier Applied Science, pp. 225-232, 1992,
48. Gibson A.G., Mouritz A.P., Wu Y., Gardiner C.P. and Mathys Z., "Validation of the Gibson model for the fire reaction properties of fibre-polymer composites." In: Proceedings of Composites in Fire 3, Newcastle, 2003,
49. Gibson A.G., Wu Y.S., Chandler H.W., Wilcox J.A.D. and Bettess P., "A model for the thermal performance of thick composite laminates in hydrocarbon fires composite materials in the petroleum industry." Revue de l'Institut Francais du Petrole, 50:69-74, 1995,
50. Hirsher F.Y. and Beeson H.D., "Flammability testing of flame-retarded epoxy composites and phenolic composites." Fire and Materials, 21:41-49, 1997,
51. Brown J.R. and St John N.A., "Fire-retardant low-temperature-cured phenolic resins and composites." TRIP, 4:416-420, 1996,
52. Brown J.R. and Mathys Z., "Reinforcement and matrix effects on the combustion properties of glass reinforced polymer composites." Composites, 28A:675-681, 1997,
53. Brown J.E., "Combustion characteristics of fiber reinforced resin panels." NBS Report No. FR3970, 1987,

9 Παράρτημα

Στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας παρατίθεται τμήμα της Εσωτερικής Οδηγίας του Συστήματος Διαχείρισης Ποιότητας (ΣΔΠ) που τηρείται στο Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, αναφορικά με το πεδίο Δοκιμών Αντίδρασης σε Φωτιά το οποίο υποβοηθάει τη διαδικασία των δοκιμών. Περιγράφονται στάδια της προετοιμασίας του οργάνου που χρησιμοποιείται (Θερμιδόμετρο Κώνου) καθώς και η διαδικασία ημερήσιας βαθμονόμησης της όλης διάταξης.

9.1 Βασικά Στάδια Προετοιμασίας του Καλορίμετρου Κώνου.

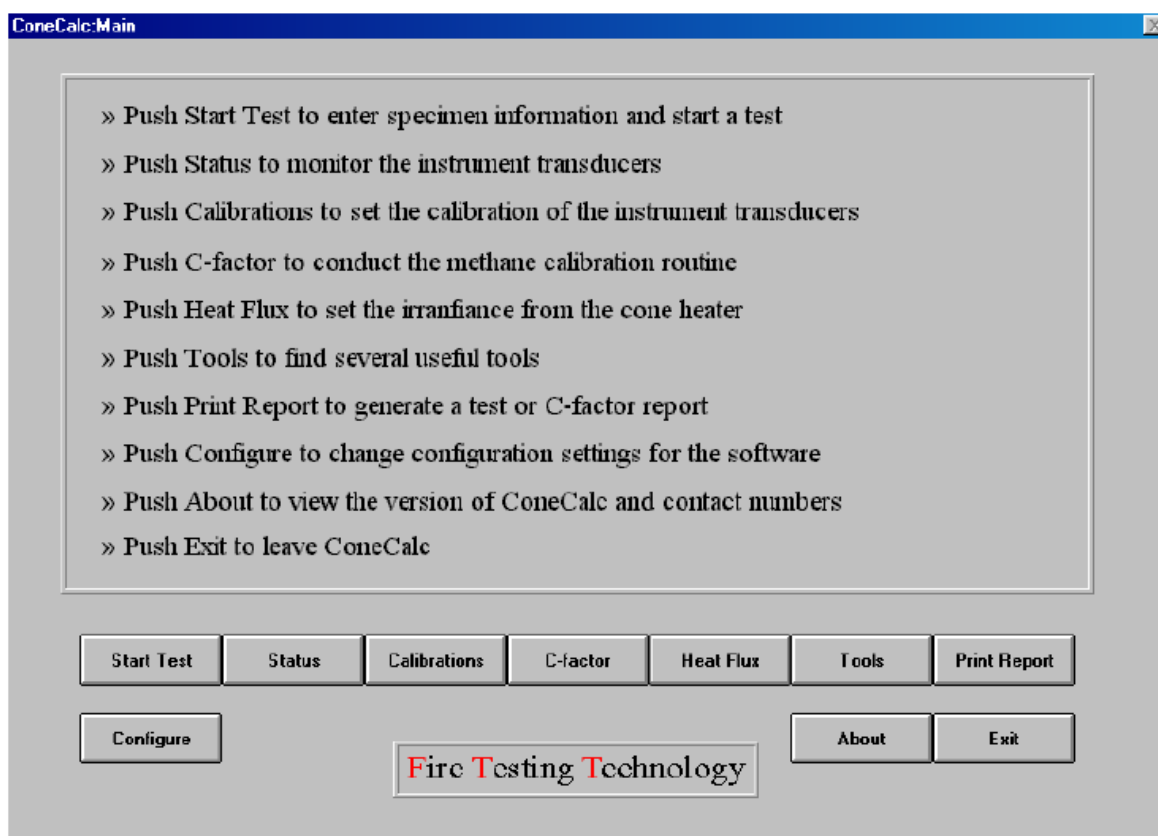
1. Προετοιμασία - Έλεγχος του αναλυτή αερίων ώστε να έχει παραμείνει ανοικτός τουλάχιστον 24 ώρες πριν τη δοκιμή,
2. Έλεγχος της παγίδας συμπυκνωμάτων (Cold Trap). Στο πίσω μέρος της μονάδας του αναλυτή αερίων υπάρχει διακόπτης τον οποίο και ανοίγουμε για να αφαιρεθούν τυχόν υγρά συμπυκνώματα (νερό που παραμένει από τη διαδικασία της προηγούμενης ημέρας). Κατά τη διάρκεια λειτουργίας ο διακόπτης πρέπει να παραμένει κλειστός,
3. Ελέγχουμε την παροχή νερού αν λειτουργεί κανονικά,
4. Ελέγχουμε για τη σωστή παροχή των αερίων N_2 , CO_2 , CO , Μεθανίου.

9.2 Διαδικασία Ημερήσιας Βαθμονόμησης

Το συνοδευτικό λογισμικό **ConeCalc** χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση του οργάνου. Στο κύριο μενού εμφανίζονται όλες οι δυνατές λειτουργίες – ρυθμίσεις στη διάταξη του θερμιδομέτρου. Το μενού φαίνεται στην Εικ.62. Στο κάτω μέρος της οθόνης υπάρχουν 10 επιλογές με τις οποίες επιτρέπεται η πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν βαθμονομήσεις ενός ή

δύο βημάτων. Στην περίπτωση των δύο βημάτων δημιουργείτε μία συνθήκη **zero** και μια συνθήκη **span**. Στην περίπτωση του ενός βήματος δημιουργείται μόνο μια συνθήκη **zero**. Η πρώτη εργασία είναι η βαθμονόμηση του οργάνου.

Με την επιλογή **Calibrations** στην οθόνη του Η/Υ εμφανίζεται το **Calibration Panel** που δείχνει τα είδη των βαθμονομήσεων που απαιτούνται ώστε να βεβαιωθεί η αξιοπιστία των δοκιμών που θα γίνουν μετέπειτα με το Θερμιδόμετρο Κώνου. Το **Calibration Panel** φαίνεται στην Εικ.63.



Εικόνα 73: Αρχικό Μενού Λογισμικού Δοκιμών



Εικόνα 74: Παράθυρο Βαθμονόμησης Θερμιδομέτρου Κώνου (Calibration Panel)

9.2.1 Βαθμονόμηση Παροχόμετρου Μεθανίου (Zero MFMs)

1. Με την επιλογή **Zero MFMs** γίνεται η ρύθμιση – μηδενισμός της παροχής του μεθανίου. (Πρόκειται για βαθμονόμηση ενός βήματος.) Στην οθόνη του Η/Υ εμφανίζεται το παράθυρο **MFM Calibrations**. (Εικ.3).



Εικόνα 75: Βαθμονόμηση Παροχόμετρου Μεθανίου (MFM Calibration Panel)

2. Έχοντας βεβαιωθεί ότι η παροχή του μεθανίου είναι μηδέν (η βάνα της φιάλης μεθανίου είναι κλειστή) επιλέγεται το **Zero** οπότε στην οθόνη εμφανίζεται μια μπάρα προόδου που στο τέλος θα δώσει μηδέν στην ένδειξη **MFM Output (V)**. Στη συνέχεια επιλέγεται **OK** και το λογισμικό επιστρέφει στο **Calibration Panel**

προκειμένου να προχωρήσει η διαδικασία σε ρύθμιση άλλων transducers του οργάνου.

9.2.2 Βαθμονόμηση Μανομέτρων και Παροχής Ανεμιστήρα (DPT & FLOW).

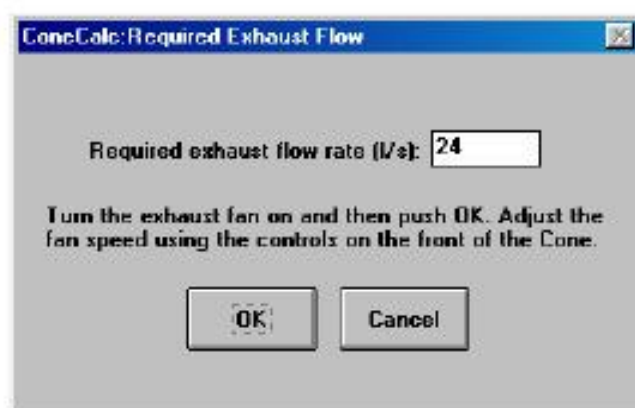
1. Στο βήμα αυτό ο δοκιμαστής – πειραματιστής πρέπει να θέσει σε λειτουργία τον **εξωτερικό απορροφητήρα** που βρίσκεται πάνω από την καμινάδα του οργάνου, (να αναμείνει έως ότου αποκατασταθεί σταθεροποιημένη ροή του αέρα) και στη συνέχεια να προχωρήσει στο μηδενισμό του **Differential Pressure Transducer**. Πρόκειται για βαθμονόμηση ενός βήματος. Το πάνελ της διαδικασίας δίνεται στην Εικόνα χχ. Σε αυτό το στάδιο επιλέγεται **Zero** ως αρχική (μηδενική) συνθήκη, ως τέτοια στο εξής θα αναφέρεται η λειτουργία του εξωτερικού απορροφητήρα ο οποίος από το σημείο αυτό και μετά παραμένει σε λειτουργία μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι προγραμματισμένες δοκιμές της ημέρας.



Εικόνα 76: Βαθμονόμηση Μανομέτρου μέτρησης πίεσης (DPT Transducer Calibration Panel).

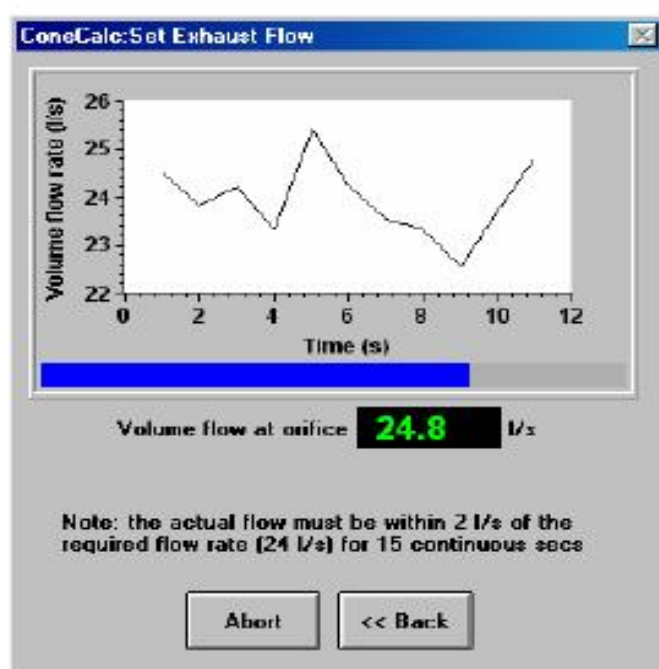
2. Στη συνέχεια στο **Calibration Panel** επιλέγεται **DPT & FLOW**. Στην οθόνη εμφανίζονται μηνύματα οδήγησης για τον χρήστη που τον βοηθούν να συνειδητοποιήσει ακριβώς την αρχική συνθήκη που τίθεται ότι δηλ. η λειτουργία του απορροφητήρα αποτελεί την αρχική συνθήκη. Με την επιλογή **Zero** εμφανίζεται η μπάρα προόδου της εργασίας (**Collecting data**) και με την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιλέγεται **OK**.

3. Στη συνέχεια της διαδικασίας τίθεται σε λειτουργία ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας του θερμιδομέτρου (**exhaust fan**) του θερμιδομέτρου και αποκαθίσταται μια ροή αέρα στον αγωγό με παροχή **24 l/sec**. Αυτό πρακτικά γίνεται ρυθμίζοντας τις στροφές του κινητήρα - ανεμιστήρα βαθμιαία στην ένδειξη του ρυθμιστή 55. Το παράθυρο που ανοίγει στο λογισμικό φαίνεται στην Εικ.66.



Εικόνα 77: Ρύθμιση κατάλληλης Παροχής αέρα.

4. Κατά τη διάρκεια που το όργανο συλλέγει δεδομένα θα πρέπει η ροή στον αγωγό να είναι σταθεροποιημένη. Με τη βοήθεια του λογισμικού κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων δίνεται η δυνατότητα μικρορυθμίσεων και το όργανο επιβεβαιώνει στην μπάρα προόδου χρωματίζοντας πράσινη την τιμή κατά την ολοκλήρωση στο χρόνο. Αν η τιμή είναι στο κόκκινο η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί. Η πρόοδος της διαδικασίας φαίνεται στην Εικόνα 6.

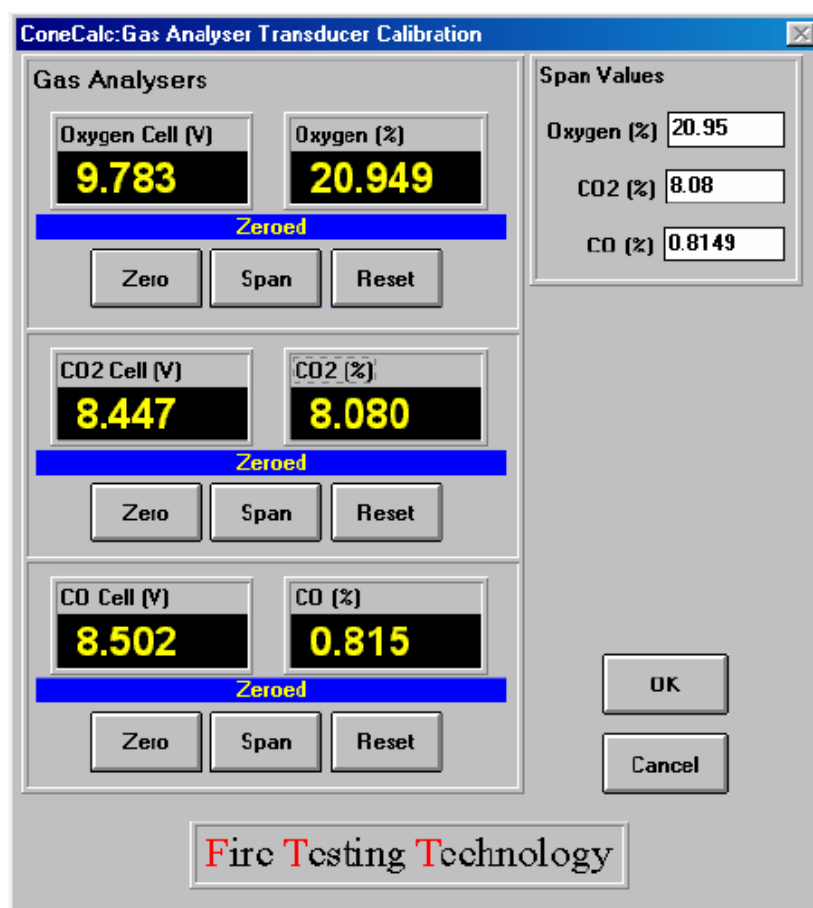


Εικόνα 78: Έλεγχος Παροχής στην έξοδο της καμινάδας.

9.2.3 Βαθμονόμηση Αναλυτή Αερίων Gas Analyzers.

1. Στο **Calibration Panel** επιλέγεται το **Gas Analyzers** προκειμένου να τεθούν τα όρια στις περιεκτικότητες των μετρούμενων αερίων. Η διαδικασία βαθμονόμησης του **Αναλυτή Αερίων** γίνεται σε δύο βήματα. Στην οθόνη του Η/Υ το λογισμικό δίνει την Εικ. 67.

Οι διαδικασία χωρίζεται σε **LOW CAL** και **HIGH CAL** για όλα τα μετρούμενα αέρια. Στην περίπτωση του **LOW CAL** η διαδικασία είναι ίδια για όλα τα αέρια, ενώ προσοχή απαιτείται στην περίπτωση του **HIGH CAL** όπου γίνεται διαφορετική ρύθμιση για τα (CO, CO₂) και το O₂



Εικόνα 79: Μενού βαθμονόμησης μετατροπών ανάλυσης των καταγραφόμενων αερίων.

- Pump ON** → Ρυθμίζεται η πίεση στα ροόμετρα στην πρόσοψη της συσκευής στην ένδειξη **3.5** οπότε στην πίσω πλευρά στο **Cold Trap** η ένδειξη της πίεσης πρέπει να είναι στα **5 psi**. Ο στόχος είναι η βαθμονόμηση του οργάνου οριοθετώντας το εύρος στο οποίο θα εργάζεται. Αυτό πρακτικά γίνεται θέτοντας ως κάτω όριο όλων των αερίων δηλαδή O₂, CO, CO₂ την τιμή 0 (**LOW CAL**). Στο άνω δεξιά τμήμα της οθόνης του λογισμικού (Span Gases) τίθενται οι τιμές περιεκτικότητας των αερίων βαθμονόμησης, οι οποίες πρέπει να είναι σύμφωνες με τις τιμές των πιστοποιητικών διακρίβωσης που συνοδεύουν τις φιάλες των αερίων. Οι τιμές αυτές θα πρέπει να επιτευχθούν (εντός κάποιων ορίων) κατά τη διαδικασία **HIGH CAL**, που θα ακολουθήσει. Η έναρξη της διαδικασίας βαθμονόμησης των αερίων γίνεται με την εισαγωγή κωδικού πρόσβασης στον αναλυτή, ώστε στη συνέχεια να επιτρέπεται ο έλεγχος και η διαχείριση των ρυθμίσεων του αναλυτή αερίων Servomex της διάταξης.

9.2.3.1 LOW CAL

- Pump OFF** → Οι δύο βάνες των αερίων στην πρόσοψη του οργάνου τίθενται σε **Nitrogen**. Με τον τρόπο αυτό διοχετεύεται άζωτο N₂ (Nitrogen Non – scrubbed) ώστε να μηδενιστούν όλες οι ενδείξεις των αερίων στο Servomex, δηλαδή O₂, CO, CO₂. Υπενθυμίζεται ότι στην όλη διαδικασία στο συγκεκριμένο βήμα στις επιλογές του Θερμιδόμετρου Κώνου έχει επιλεγεί η λειτουργία **Pump OFF**.
- Ρυθμίζεται η παροχή στη φιάλη αζώτου N₂ ώστε τα ροόμετρα στην πρόσοψη της συσκευής να αποκατασταθούν στην τιμή των **3.5 lt/min** ή στην πίσω πλευρά του οργάνου το μανόμετρο ελέγχου να έχει αποκατασταθεί στην τιμή **5 psi**.
- Όταν αποκατασταθεί η παραπάνω τιμή ο χρήστης αποκαθιστά στον Αναλυτή Αερίων Servomex. όλες τις ενδείξεις των αερίων στο 0 (O₂, CO, CO₂).
- Πρώτα αναμένεται και επιβεβαιώνεται ο μηδενισμός των τιμών στη συσκευή (Servomex) και μετά στον Η/Υ. Παρακολουθούνται οι τιμές στον Η/Υ. Πρέπει να δίνουν **0.000**. Ελέγχονται οι ενδείξεις του Servomex με την οθόνη του Η/Υ. Μόνο όταν οι τιμές στον Αναλυτή αερίων και στο λογισμικό συμφωνούν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης του κάτω ορίου (low calibration). Κατά τη διαδικασία απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή αφού οι περιεκτικότητες των αερίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στα εξαγώμενα της δοκιμής.

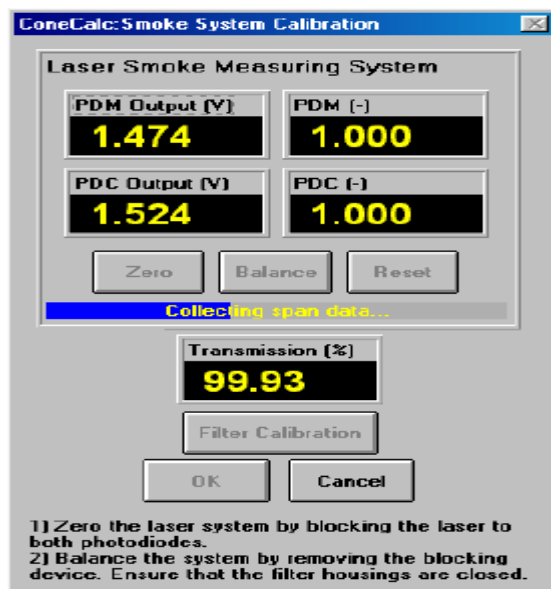
9.2.3.2 HIGH CAL

Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται η βαθμονόμηση του άνω ορίου για τα αέρια των φιαλών CO, CO₂ και στο δεύτερο μέρος επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το οξυγόνο.

- 1. HIGH CAL (CO, CO₂)** Στη διαδικασία αυτή πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή γιατί διαφοροποιείται για τα span – gases (CO, CO₂) από το O₂. Αρχικά γίνεται η βαθμονόμηση άνω ορίου (high calibration) στα αέρια (CO, CO₂). Η βάνα του θερμιδομέτρου που αναφέρεται στα αέρια (CO, CO₂) τίθεται στην ένδειξη SPAN, από Nitrogen που ήταν στο προηγούμενο στάδιο της βαθμονόμησης. Ελέγχονται τα ροόμετρα στην πρόσοψη της συσκευής (CO, CO₂) να δείχνουν **3.5**. [Ακόμα και αν οι τιμές κυμαίνονται σε ένα εύρος (3.4 – 3.7) είναι αποδεκτές]. Αφού τεθούν οι μέγιστες τιμές αναμένεται η καταγραφή από τον Αναλυτή Αερίων (Servomex). Σε περίπτωση που διαπιστωθεί μεγάλη απόκλιση (drift) από αυτές που δώθηκαν ως span επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Συνήθως δεν παρατηρείται πρόβλημα σε αυτό το τμήμα της διαδικασίας. Η διαδικασία ολοκληρώνεται επιλέγοντας SPAN στο μενού του λογισμικού για (CO, CO₂). Παρακολουθείται η εξέλιξη με την μπάρα προόδου που αναφέρεται σε αυτά τα αέρια.
- 2. HIGH CAL (O₂) → Pump ON** → Αναμένεται η σταθεροποίηση της ροής αρχικά αφού τεθεί ο φυγοκεντρικός ανεμοστήρας του οργάνου σε λειτουργία (περίπου για 5min). Ρυθμίζεται η βάνα της παγίδας (Cold Trap) στο θερμιδόμετρο ώστε να αποβάλλονται πιθανά συμπυκνώματα στη συνέχεια της διαδικασίας.
- 3.** Στη συνέχεια τίθεται η βάνα του O₂. στη θέση **Sampling Gas**, στο θερμιδόμετρο. Αυτό μπορεί να γίνει και την ώρα που η αντίστοιχη διαδικασία γίνεται για τα άλλα αέρια (CO, CO₂). Ως μέτρηση span για το οξυγόνο λαμβάνεται αέρας της ατμόσφαιρας. Η διαδικασία οριοθέτησης του άνω ορίου για το οξυγόνο απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή αφού ο αναλυτής έχει μεγαλύτερες πιθανότητες ολίσθησης (drift) στην περίπτωση του οξυγόνου.
- 4.** Οι διαδικασίες της βαθμονόμησης των αερίων συνοψίζονται στο επόμενο σχήμα.

(50%, 16%) τις παρακολουθούμε στην οθόνη του Η/Υ. Ενδεικτικά για τα δύο φίλτρα τα ποσοστά μετάδοσης μπορεί να είναι τα ακόλουθα.

Φίλτρο 1	0.325	Transmission	44.48 %
Φίλτρο 2	0.8	Transmission	13.12%



Εικόνα 80: Βαθμονόμηση συστήματος καταγραφής του παραγόμενου καπνού

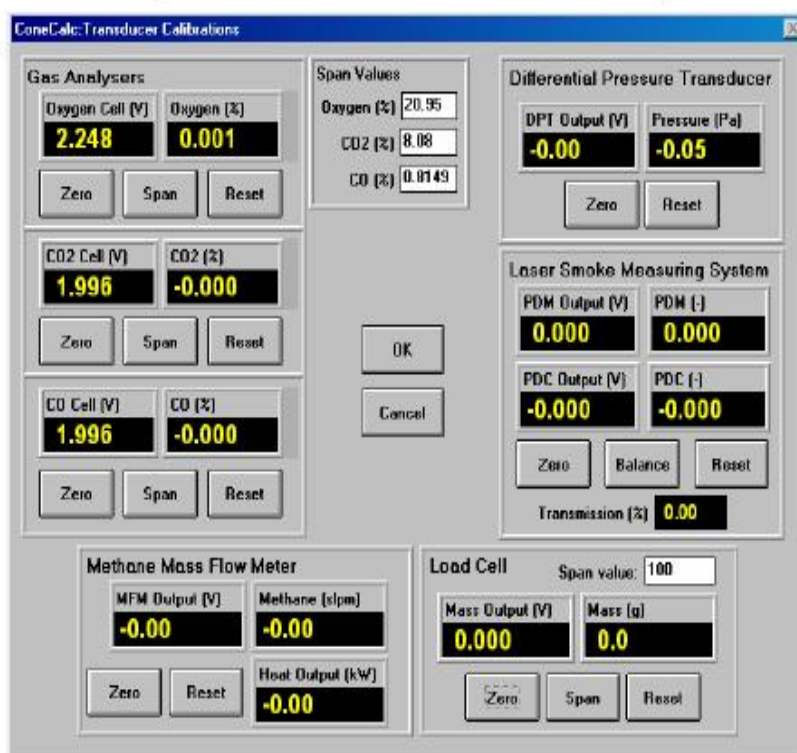
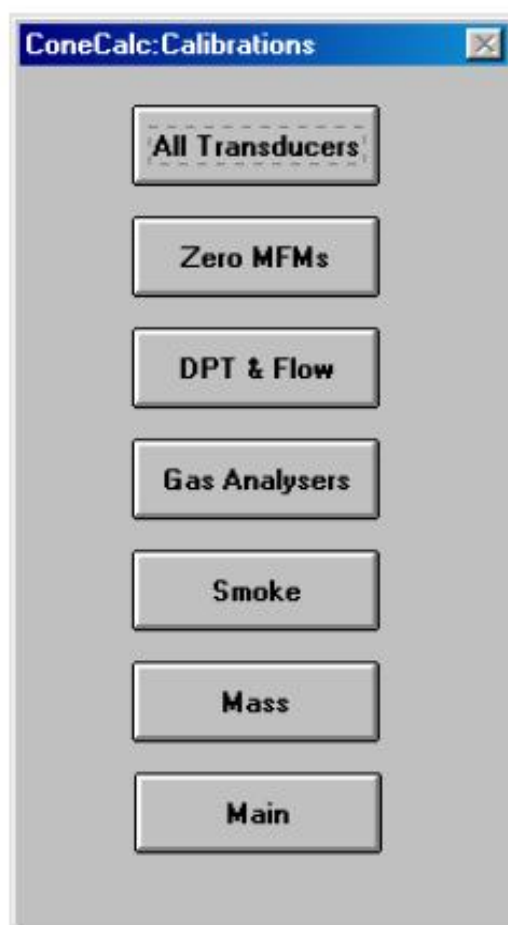
Η εξέλιξη που φαίνεται στην Εικ.69 δείχνει τιμές της τάσης που πρέπει να καταγράφουν οι φωτοδιόδοι απουσία κάθε εμποδίου στη δέσμη (μαύρο κομμάτι ή φίλτρα) καθώς και την ένταση της μεταδιδόμενης δέσμης που πρέπει να προσεγγίζει το 100%. Οι τιμές αυτές προκύπτουν στο τέλος όλης αυτής της διαδικασίας. Ενδεικτικές τιμές για το φίλτρο 0.325 η ένταση μπορεί να κυμαίνεται σε ένα εύρος (45 – 55) % και για το φίλτρο 0.8 (12 – 20)%.

Αν οι παραπάνω τιμές δεν επιτυγχάνονται επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή. Η πρόοδος της διαδικασίας αποτυπώνεται στο λογισμικό όπως φαίνεται στην Εικ.69.

Σημείωση: Υπάρχουν 2 ποτενσιόμετρα και ενισχυτές για τη ρύθμιση των δύο φωτοδιόδων. Οι φωτοδιόδοι ρυθμίζονται με ένα κατσαβίδι στην περίπτωση που τα αποτελέσματα εξακολουθούν να μην είναι τα επιθυμητά.

E. Mass Δεν γίνεται καμία ρύθμιση αφήνονται τα Factory Settings.

Στο σημείο αυτό έχουν ολοκληρωθεί όλες οι επιμέρους ρυθμίσεις που φαίνονται στο Calibration Panel και οι οποίες συνολικά μπορούν να εμφανιστούν επιλέγοντας **All Transducers**.



Εικόνα 81: Συνολική Εμφάνιση των επιμέρους ρυθμίσεων όλων των βαθμονομήσεων του οργάνου.

Υπενθυμίζεται ότι στο τέλος της διαδικασίας ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας διατηρείται σε κανονική λειτουργία, (**PUMP**) οπότε οι περιεκτικότητες CO, CO₂ πρέπει να είναι πολύ κοντά στο μηδέν αφού στο σημείο αυτό αέρας αναρροφάται από το περιβάλλον.

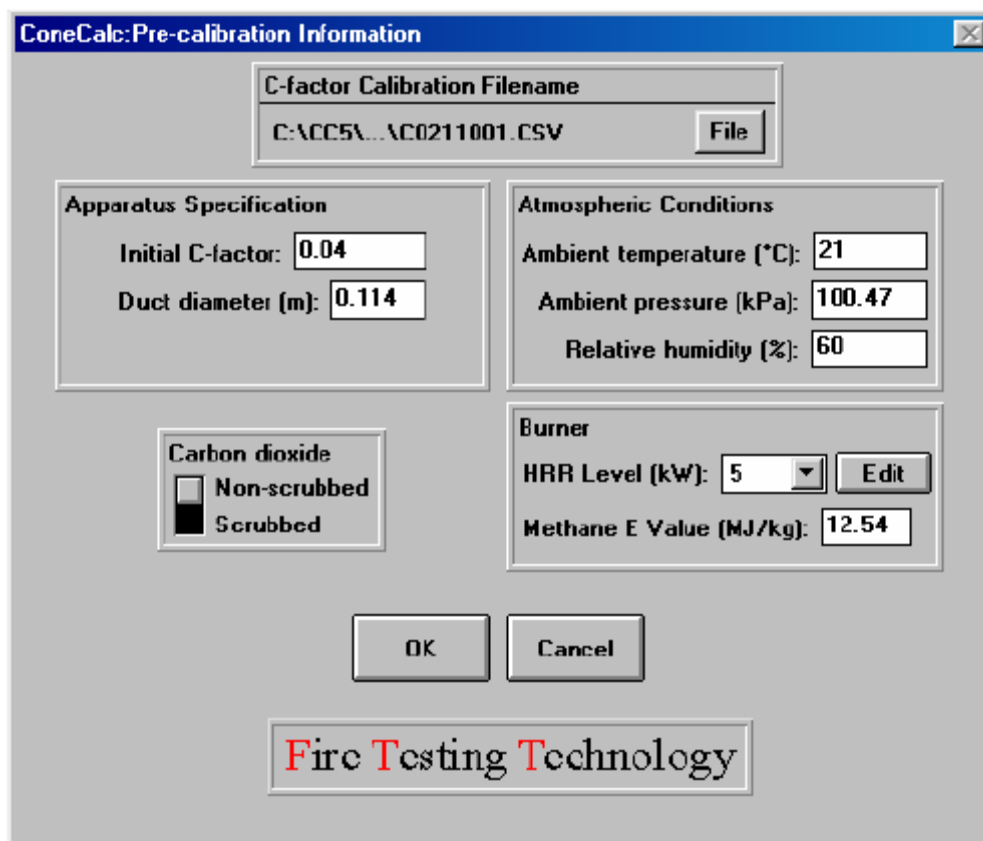
9.2.5 Συνολικός Συντελεστής Βαθμονόμησης του Θερμιδομέτρου (C-factor).

Με την ολοκλήρωση όλων των επιμέρους βαθμονομήσεων του οργάνου (**Calibrations**) επιλέγεται το στο αρχικό μενού (**ConeCalc Main**) και στη συνέχεια **C – factor**. Αυτός ο συντελεστής προσδιορίζει μια συνολική σταθερά βαθμονόμησης για όλο το όργανο. Ακόμα ο συντελεστής αυτός πρέπει να προσδιορίζεται σε καθημερινή βάση όταν το θερμιδόμετρο χρησιμοποιείται για δοκιμές. Το παράθυρο που ανοίγει στην οθόνη φαίνεται στην Εικ.71.



Εικόνα 82: Μενού εύρεσης του C – factor. (Τύπος Αρχείου .csv)

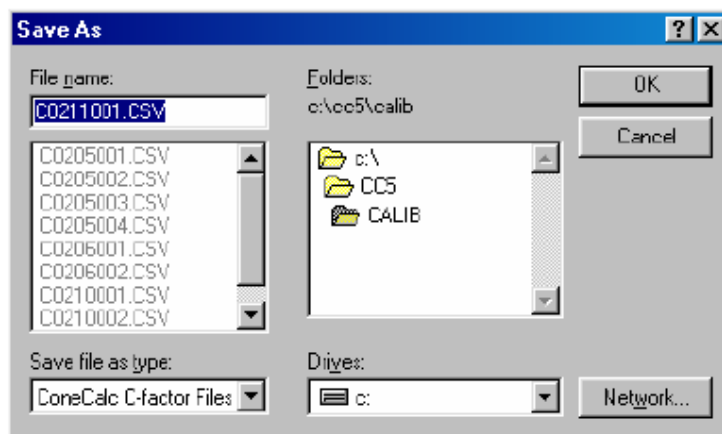
1. Επιβεβαιώνεται ότι ο ανεμιστήρας του οργάνου είναι ήδη σε λειτουργία.
2. Επιβεβαιώνεται ακόμα ότι η παροχή αέρα στον αγωγό είναι 24 lt/sec.
3. Επιβεβαιώνεται ότι η αντλία αέρα δουλεύει τουλάχιστον για 5 λεπτά πριν την έναρξη της διαδικασίας (PUMP ON). Στην πραγματικότητα η αντλία δουλεύει από το στάδιο των βαθμονομήσεων και αν σε αυτό το βήμα την βρούμε κλειστή κάποιο σφάλμα στην όλη διαδικασία έχει συμβεί από νωρίτερα.
4. Στο μενού αυτό επιλέγεται **Routine**. Στην οθόνη εμφανίζεται ένα παράθυρο (Εικόνα 11) με κάποιες πληροφορίες (Pre-calibration Info panel)



Εικόνα 83: Πληροφορίες ελέγχου συνθηκών για τη βαθμονόμηση του οργάνου.

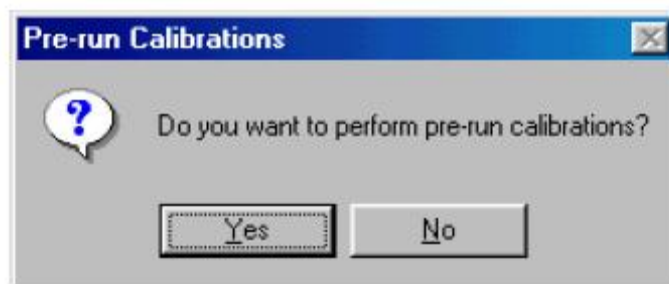
Στο μενού αυτό φαίνεται καταρχήν που σώζεται το αρχείο υπολογισμού και ο τύπος του αρχείου (*.csv). Ακόμα φαίνονται οι συνθήκες του χώρου και η ρύθμιση της εκπεμπόμενης θερμότητας του μεθανίου που πρέπει να είναι στα 5KW. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούμε έναν καυστήρα μεθανίου σε γνωστό επίπεδο “θερμότητας εξόδου” το οποίο σύμφωνα με τις προδιαγραφές πρέπει να είναι 5KW. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δεδομένων από το όργανο στην πρώτη φάση πριν τη λήξη κάποιου χρόνου μετά τον οποίο γίνεται η ολοκλήρωση των δεδομένων.

5. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται αυτόματα σε αρχείο όπως φαίνεται στην Εικ.73. Προτείνεται πάντως αν θέλουμε να σώσουμε σε άλλο – νέο αρχείο αυτό θα πρέπει να αρχίζει με το γράμμα C και η κατάληξη του αρχείου να είναι *.CSV. Το όνομα του νέου αρχείου που θα σωθεί η τιμή του C-Factor γίνεται στο σημείο αυτό πριν συνεχίσουμε τη διαδικασία (Εικ.73).



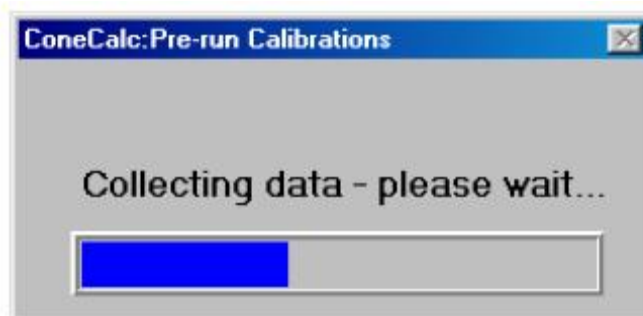
Εικόνα 84: Αρχείο Αποθήκευσης της διαδικασίας βαθμονόμησης – εξαγωγή συντελεστή C-factor.

6. Πριν την έναρξη της διαδικασίας καύσης του μεθανίου το λογισμικό υπενθυμίζει σχετικά με διαδικασίες βαθμονόμησης (pre-run calibrations Εικ.74). Στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνεται η δυνατότητα επιλογής στον χρήστη.



Εικόνα 85: Δυνατότητα επιλογής προελέγχων πριν τη διαδικασία της καύσης.

7. Αν επιλεγεί θετική απάντηση τότε το λογισμικό συλλέγει δεδομένα για 10sec και ένα παράθυρο προόδου εμφανίζεται στην οθόνη. Κατά τη διαδικασία αυτή επιβεβαιώνεται ουσιαστικά ότι δεν υπάρχει ροή μεθανίου στον καυστήρα και ότι το “αέριο” στους αναλυτές είναι από τον περιβάλλοντα αέρα. Η διαδικασία συλλογής δεδομένων φαίνεται στην Εικ.75.

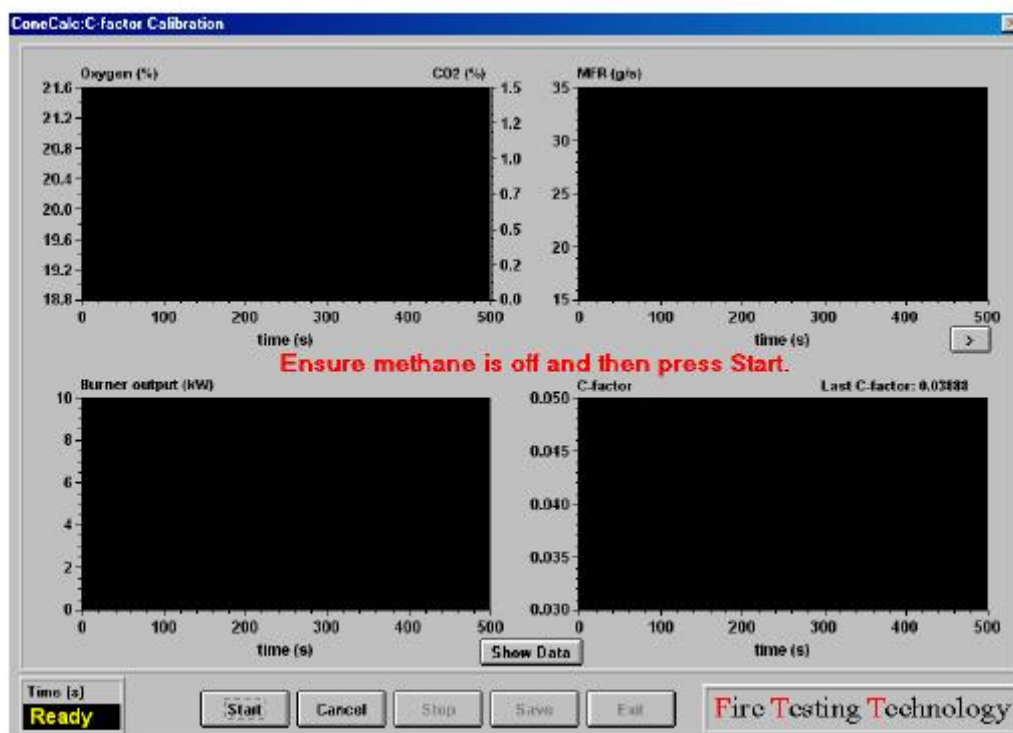


Εικόνα 86: Διαδικασία συλλογής δεδομένων κατά τους προελέγχους (Pre-run Calibrations).

8. Στη συνέχεια στην οθόνη εμφανίζεται το panel για τη βαθμονόμηση του C-Factor.

Στην οθόνη του Η/Υ εμφανίζεται η Εικ.76 με 4 γραφικές παραστάσεις που περιέχουν

- α) Συγκέντρωση O_2 , CO_2 ,
- β) Παροχή μάζας στον αγωγό,
- γ) Εκλυόμενη θερμότητα από την καύση του μεθανίου,
- δ) Εξέλιξη του C- factor.



Εικόνα 87: Πάνελ βαθμονόμησης του C-Factor (Έναρξη)

9. Πριν ξεκινήσει αυτή η διαδικασία ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:
 - a. Τοποθετείται ο καυστήρας στη βάση του κώνου και καθορίζεται με τον μεταλλικό χάρακα η απόστασή του από το χείλος του κώνου να είναι στα 25mm,
 - b. Επιβεβαιώνεται ότι η βάννα του μεθανίου είναι στη θέση OFF στην πρόσοψη του οργάνου,
 - c. Τίθεται ο ρυθμιστής στη φιάλη του μεθανίου στην πίεση λειτουργίας (5psi),
 - d. Ανοίγεται η παροχή μεθανίου στη φιάλη, (ενώ ο διακόπτης στην πρόσοψη του οργάνου εξακολουθεί να είναι OFF),
 - e. Επιβεβαιώνεται ότι ο σπινθηριστής βρίσκεται εκτός της περιοχής του κώνου.

Η ρουτίνα βαθμονόμησης αποτελείται από 4 στάδια. Μηνύματα εμφανίζονται στο κέντρο του παραθύρου ανάμεσα στις γραφικές παραστάσεις. Στην κορυφή της οθόνης υπάρχει μια περιοχή μηνυμάτων από το λογισμικό που καθοδηγούν το χρήστη στις σημαντικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, όπως π.χ το πότε πρέπει να ανοίγεται η παροχή του μεθανίου. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα δεδομένα επεξεργάζονται και τα αποτελέσματα δίνονται στην οθόνη. Τα αποτελέσματα επίσης μπορούν να σώζονται και ακόμα, υπάρχει ένα αρχείο με αναφορά και για τα παλιότερα αποτελέσματα υπολογισμών του C – factor στο οποίο αποθηκεύεται και η τελευταία τιμή. Έτσι διατηρείται το ιστορικό του συντελεστή με την οποία είναι εφικτή η σύγκριση των νεότερων αποτελεσμάτων κάθε φορά με παλιότερα, ώστε να παρακολουθείται η επαναληψιμότητα ή η αναπαραγωγιμότητα της διαδικασίας εύρεσης του C- factor.

10. Βήμα 1 - Baseline Data

Επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχει ροή μεθανίου στον καυστήρα και επιλέγεται Start. Μια στάθμη αναφοράς δεδομένων συλλέγεται στα πρώτα 60sec (Baseline Data). Η διαδικασία αυτή αποδίδεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 88: Διαδικασία Εύρεσης του Συνολικού συντελεστή βαθμονόμησης C-Factor – Βήμα1.

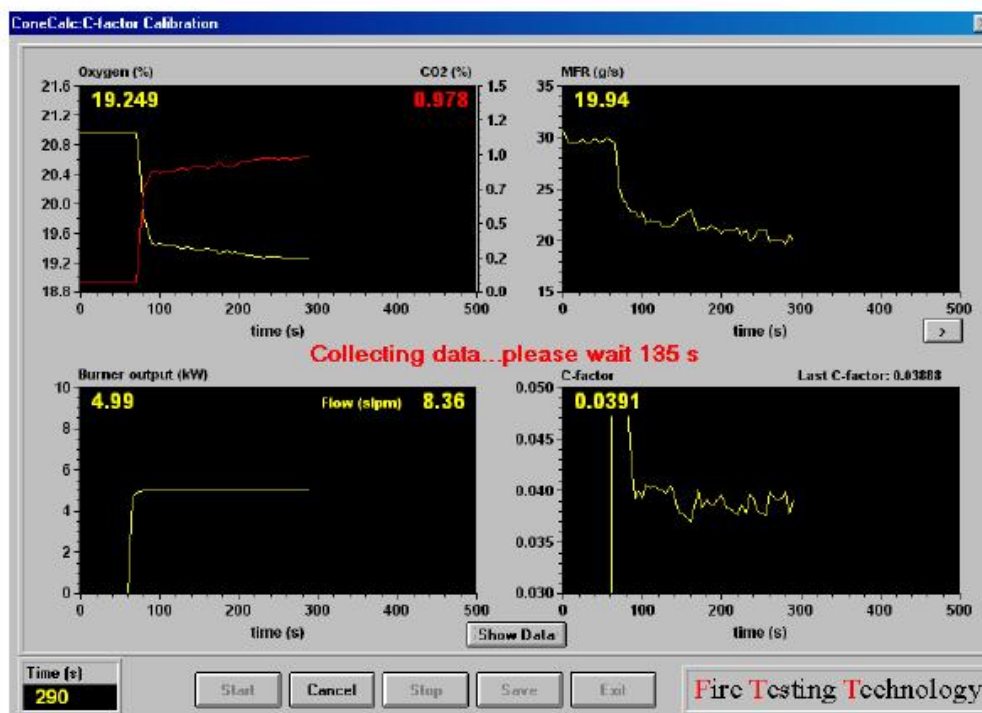
Στην Εικ.77 υπάρχει μήνυμα αντίστροφης μέτρησης 60sec ανάμεσα στις γραφικές παραστάσεις ενώ ορθή μέτρηση φαίνεται στο πάνελ κάτω αριστερά.

11. Βήμα 2 – Έναυση και σταθεροποίηση της παροχής Μεθανίου.

- A.** Όταν έχουν απομείνει περίπου **10 - 15sec** στην αντίστροφη μέτρηση μετακινείται ο σπινθηριστής ανάφλεξης σε θέση πάνω ακριβώς από τον καυστήρα του μεθανίου και ανοίγεται σταδιακά η βάνα του μεθανίου στην πρόσοψη του οργάνου. Στο στάδιο αυτό έχει από νωρίτερα επιλεγεί **Ignition** στην πρόσοψη του οργάνου. Γίνεται η έναυση και σταθεροποιείται αν απαιτείται την παροχή μεθανίου στην σωστή τιμή (5KW).
- B.** Αφού γίνει η έναυση μετακινείται ο σπινθηριστής στην αρχική του θέση. Ελέγχεται ότι η φλόγα περνά από το κέντρο του κώνου.

12. Βήμα 3 – Συλλογή Δεδομένων

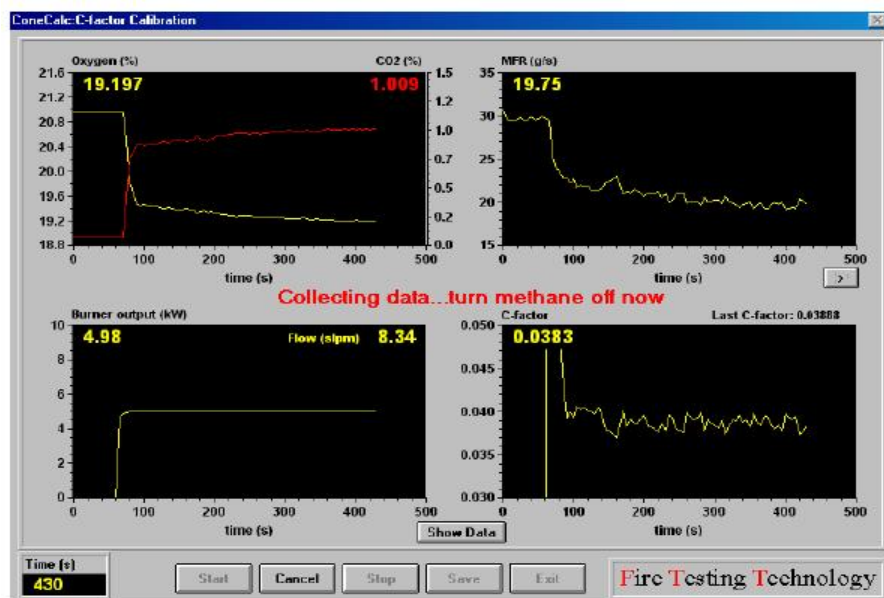
Στα επόμενα 180s συλλέγονται δεδομένα ώστε να καθοριστεί η τιμή του C – Factor. Δεν απαιτείται καμιά ενέργεια από τον χρήστη. Στο παράθυρο του H/Y φαίνεται η πρόοδος της διαδικασίας. (Εικ.78).



Εικόνα 89: Διαδικασία συλλογής δεδομένων για την εύρεση του C-factor - Βήμα 3

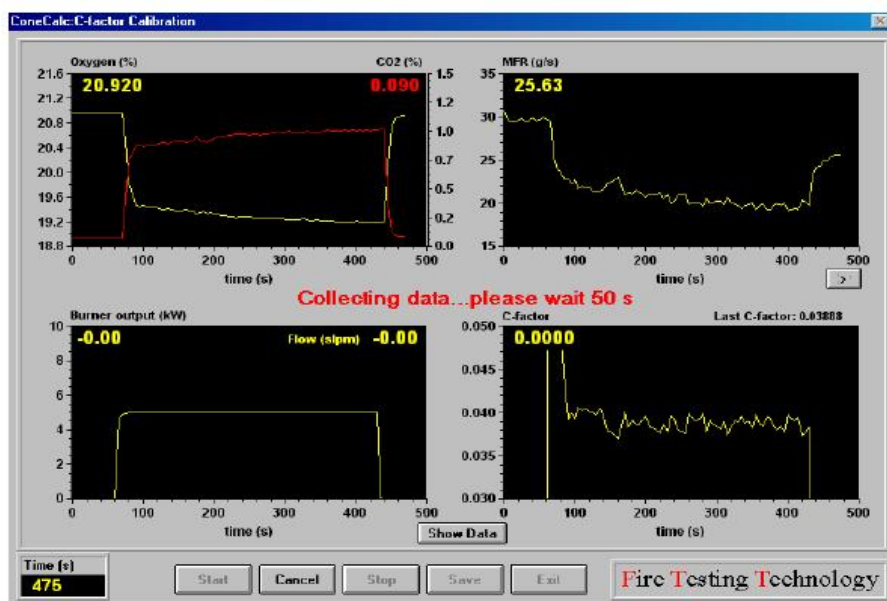
13. Βήμα 4 - Κλείσιμο παροχής μεθανίου και επεξεργασία των δεδομένων.

- A. Όταν η αντίστροφη μέτρηση τερματιστεί κλείνεται η παροχή του μεθανίου. Θα υπάρξει και μήνυμα στην οθόνη από το πρόγραμμα όπως φαίνεται και στην Εικ.79.



Εικόνα 90: Προχωρημένο στάδιο συλλογής δεδομένων – κλείσιμο βάνας μεθανίου - Βήμα 4

- B. Στα επόμενα 90s (αντίστροφη μέτρηση) συλλέγονται τα δεδομένα και κατόπιν ο χρήστης πρέπει να σταματήσει τη διαδικασία επιλέγοντας **Stop** το οποίο τώρα έχει γίνει διαθέσιμο (Εικ.80).

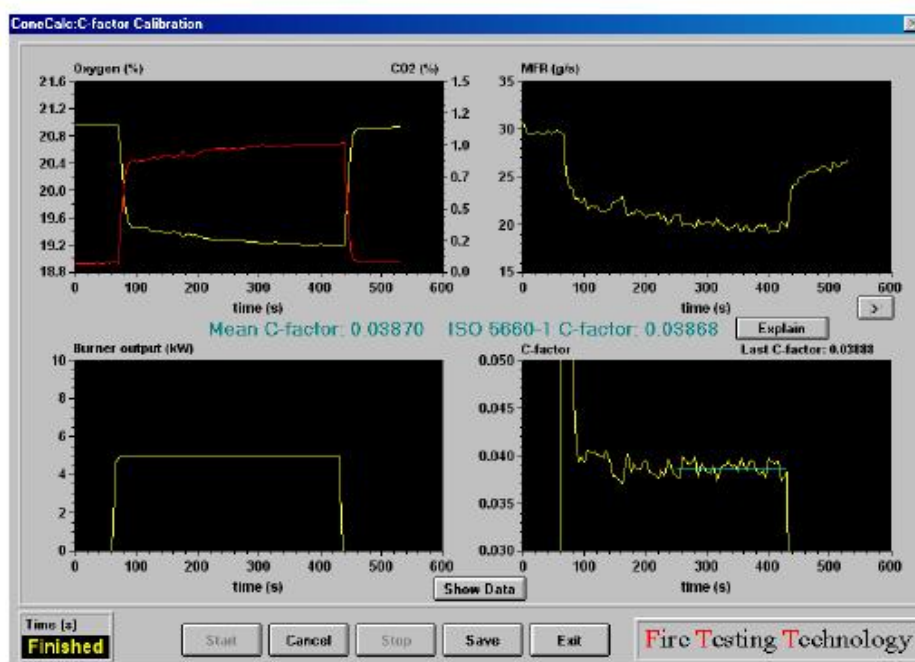


Εικόνα 91: Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων για την τελική εκτίμηση του C – factor.

- Γ. Αφού επιλεγεί το **Stop** τα δεδομένα επεξεργάζονται και προκύπτει ο C-factor. Ο υπολογισμός βασίζεται στο πρότυπο ISO 5660-1 στη διαδικασία που

περιγράφεται στο ISO 5660-1: 2002. [Σημείωση Τα θερμιδόμετρα είναι κατασκευασμένα ώστε να δίνουν C –factors στο εύρος **(0.035 – 0.045)**].

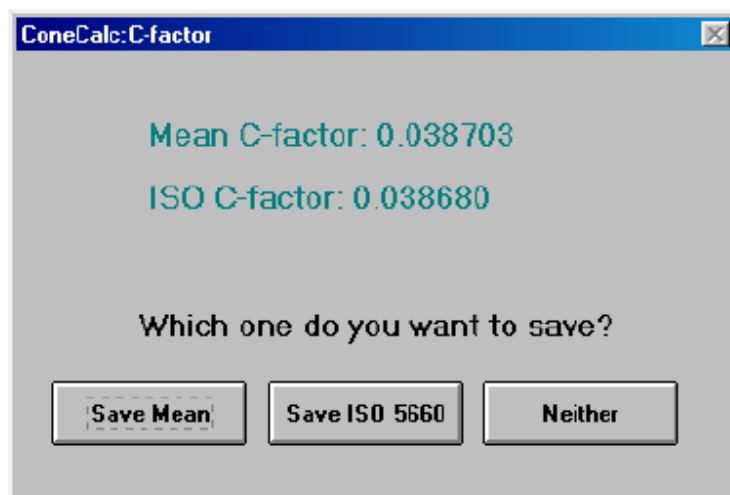
Μετρήσεις που γίνονται σε δύο συνεχόμενες μέρες δεν θα πρέπει να δίνουν διαφορά μεγαλύτερη από 0.002 στην τιμή των C –factors. Υπάρχουν 2 τρόποι υπολογισμού του C- factor που δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Το λογισμικό υπολογίζει την τιμή του συντελεστή και με τους 2 τρόπους, για το λόγο αυτό στην οθόνη δίνονται 2 τιμές. Επιλέγεται εκείνη που είναι σύμφωνη με το πρότυπο ISO – 5660-1. Στην Εικ. 81) φαίνεται το τέλος της διαδικασίας. Στα γραφήματα δίνεται η χρονική εξέλιξη των μετρούμενων μεγεθών και η μορφή των διαγραμμάτων ενώ στο μέσον του παραθύρου δίνεται η τελική τιμή του C- factor που μέτρησε το όργανο καθώς και η τιμή αναφοράς κατά το πρότυπο ISO – 5660-1. Όταν η μετρηθείσα τιμή του συντελεστή είναι εντός των ορίων που θεωρεί το όργανο, αυτή χρωματίζεται πράσινη, ενώ όταν προκύπτει εκτός ορίων κόκκινη οπότε και επιβάλλεται η επανάληψη της διαδικασίας προσδιορισμού του C – factor.



Εικόνα 92: Χρονική εξέλιξη των μετρούμενων ποσοτήτων κατά την καύση του μεθανίου.

- Δ.** Τα αποτελέσματα σώζονται επιλέγοντας **Save**. Λόγω του ότι υπάρχουν 2 τύποι του C-Factor πρέπει να επιλεγεί ποιος θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της

παροχής μάζας (mass flow rate) και της ροής θερμότητας (heat release rate). Στην οθόνη εμφανίζεται το παρακάτω πάνελ (Εικ. 82).

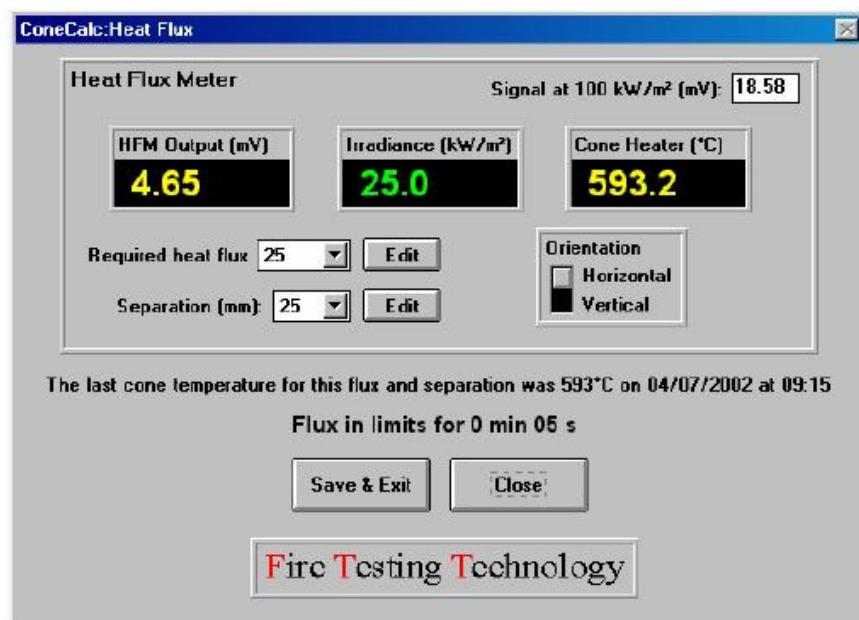


Εικόνα 93: Τελική εκτίμηση και επιλογή τιμής του C-Factor

9.2.6 Βαθμονόμηση Μετρητή Ροής Θερμότητας (Heat Flux).

1. Στο βήμα αυτό στην υποδοχή που προηγουμένως ετέθη ο καυστήρας μεθανίου τίθεται το αισθητήριο μέτρησης ροής θερμότητας και με τη μεταλλική ράβδο ελέγχεται η απόσταση από τον κώνο ώστε να είναι πάλι στα 25mm.
2. Επιβεβαιώνεται ότι το κύκλωμα του νερού που διαβρέχει περιμετρικά τον αισθητήρα μέτρησης ροής θερμότητας λειτουργεί.
3. Τοποθετείται στη βάση του ζυγού το θερμομονωτικό υλικό προστασίας του ζυγού.
4. Τίθεται σε λειτουργία ο κώνος επιλέγοντας **CONE** στην πρόσοψη του οργάνου.
5. Τίθεται η θερμοκρασία λειτουργίας του κώνου (ενδεικτικά στους 790 °C) βαθμιαία. Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα σε 2 ή 3 βήματα θέτοντας ενδιάμεσες θερμοκρασίες αποκατάστασης (250 – 550 - 790 ή 350 – 790).
6. Στο λογισμικό από το **Main Menu** επιλέγεται **Heat Flux** (Εικ.83). Τίθεται στο λογισμικό η ένταση και η απόσταση του αισθητηρίου από το χείλος του κώνου. Ενδεικτικά για τα κομμάτια – υπόδειγμα δοκιμών PMMA τίθεται ακτινοβολία κώνου στα 50 KW/m² καθώς και η απόσταση από το χείλος του κώνου (Separation) στα 25mm. Επίσης στο πάνελ δίνεται επιλογή για τον προσανατολισμό του κομματιού (οριζόντιο ή κατακόρυφο).

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης της ακτινοβολίας του κώνου μέσω του μετρητή ροής θερμότητας, θα πρέπει τα διαφράγματα (Shutters) του κώνου να είναι ανοικτά. Αν δεν είναι τότε η τιμή του **Irradiance** δεν ανεβαίνει. Δηλ. το αισθητήριο δεν αντιλαμβάνεται την αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 94: Πάνελ Ρύθμισης Ροής Θερμότητας.

7. Όταν η θερμοκρασία και η ροή θερμότητας έχουν αποκατασταθεί και σταθεροποιηθεί στις τελικά απαιτούμενες η επιλογή **Save & Exit** γίνεται διαθέσιμο στο χρήστη οπότε με τη συγκεκριμένη επιλογή σώζονται οι ρυθμίσεις.
8. Αφαιρείται το αισθητήριο διατηρώντας τη θερμοκρασία του κώνου.
9. Στο τέλος της διαδικασίας τα διαφράγματα του κώνου (Shutters) μπορούν να κλείσουν ώστε στη συνέχεια στη διαδικασία δοκιμών να υπάρχει ελευθερία κινήσεων ως προς τη διαχείριση – τοποθέτηση των δοκιμών.

9.3 Διαδικασία Ελέγχων πριν τη Δοκιμή των Υλικών

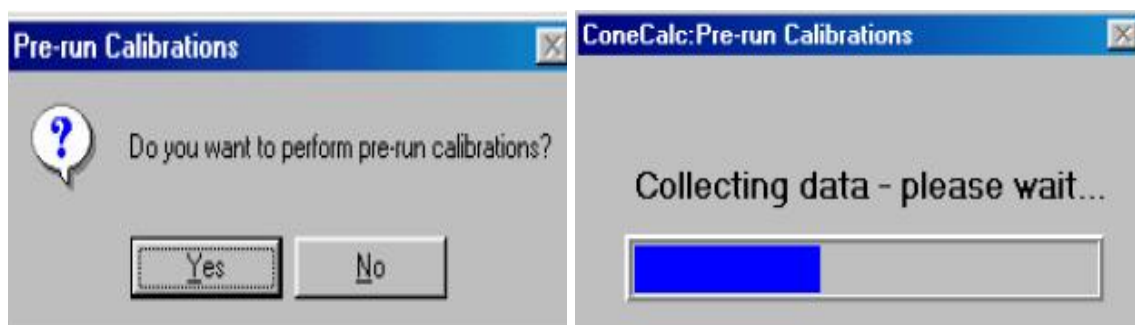
Πριν την έναρξη διαδικασίας δοκιμών μια σειρά από ενέργειες απαιτείται για την απρόσκοπτη λειτουργία του οργάνου όπως:

1. Πριν την έναρξη της διαδικασίας ελέγχεται η ποσότητα και το χρώμα του “Drierite” (δείκτης υγρασίας) να είναι στα επιθυμητά πλαίσια,
2. Επιλέγεται το Load Cell στην πρόσοψη του οργάνου ώστε να λειτουργήσει ο ζυγός που είναι προσαρμοσμένος στο θερμιδόμετρο και λαμβάνεται η αρχική

μάζα του δοκιμίου ζυγίζοντας αρχικά μόνο τη βάση(tare) και μηδενίζοντας δίνοντας έτσι στάθμη αναφοράς. Στη συνέχεια ξαναζυγίζεται η βάση με το δίκιμιο, σημειώνεται η μάζα του δοκιμίου η οποία και ζητείται από το λογισμικό στη συνέχεια.

3. Στο αρχικό μενού επιλέγεται **Start Test** και στην οθόνη εμφανίζεται φόρμα με πληροφορίες που αφορούν τόσο τις συνθήκες αντίδρασης όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου που πρόκειται να αντιδράσει στο **Test Information Panel** (Εικ.84).
4. Συμπληρώνονται στο πάνελ τις τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και αρχικής μάζας του δοκιμίου. Αν το δοκίμιο έχει προηγουμένως διατηρηθεί σε χώρο με συγκεκριμένες συνθήκες ελέγχονται και τίθενται στο λογισμικό ελέγχου. Αφού έχουν γίνει όλες οι ρυθμίσεις επιλέγεται **OK**.
5. Το λογισμικό ενημερώνει για προελέγχους βαθμονόμησης ώστε να θέσει στάθμες αναφοράς των μετρήσιμων στη συνέχεια μεγεθών, (Pre-run Calibrations). **Συνίσταται** να γίνονται Pre-run Calibrations πριν από κάθε δοκιμή. Στη φάση αυτή πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι η αντλία λειτουργεί για τουλάχιστον 10 λεπτά και οι αναλυτές αερίων δίνουν σταθερές τιμές. Κατά τη διαδικασία Pre-run Calibrations το όργανο συλλέγει δεδομένα από τους transducers για 10s. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην Εικ.85.

Εικόνα 95: Πάνελ Διαδικασίας δοκιμής κομματιού



Εικόνα 96: Διαδικασία προελέγχων (Pre-run Calibrations) πριν την έναρξη της δοκιμής.

9.4 Διαδικασία Δοκιμής των Υλικών

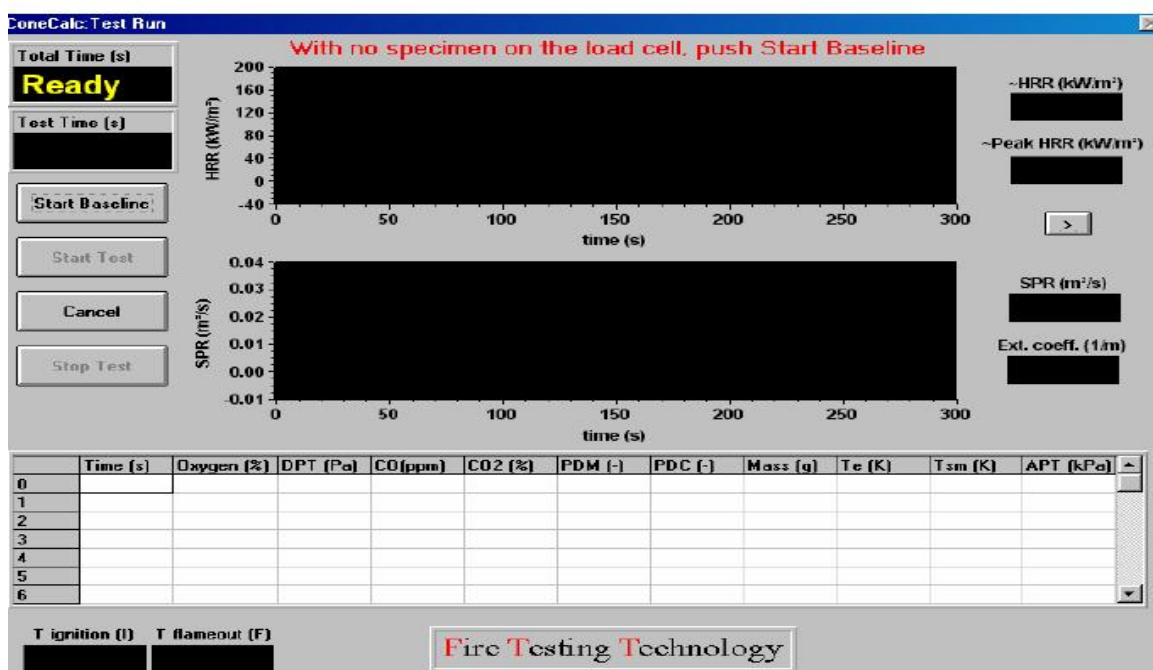
Στο τμήμα αυτό περιγράφονται τα απαιτούμενα βήματα κατά τη δοκιμή. Η διαδικασία υποδιαιρείται σε επιμέρους βήματα για την καλύτερη κατανόησή της. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης συνοπτικά είναι:

- ∅ Διαδικασία Συλλογής δεδομένων αναφοράς (baseline data),
- ∅ Τοποθέτηση δοκιμίου και έναρξη της δοκιμής,

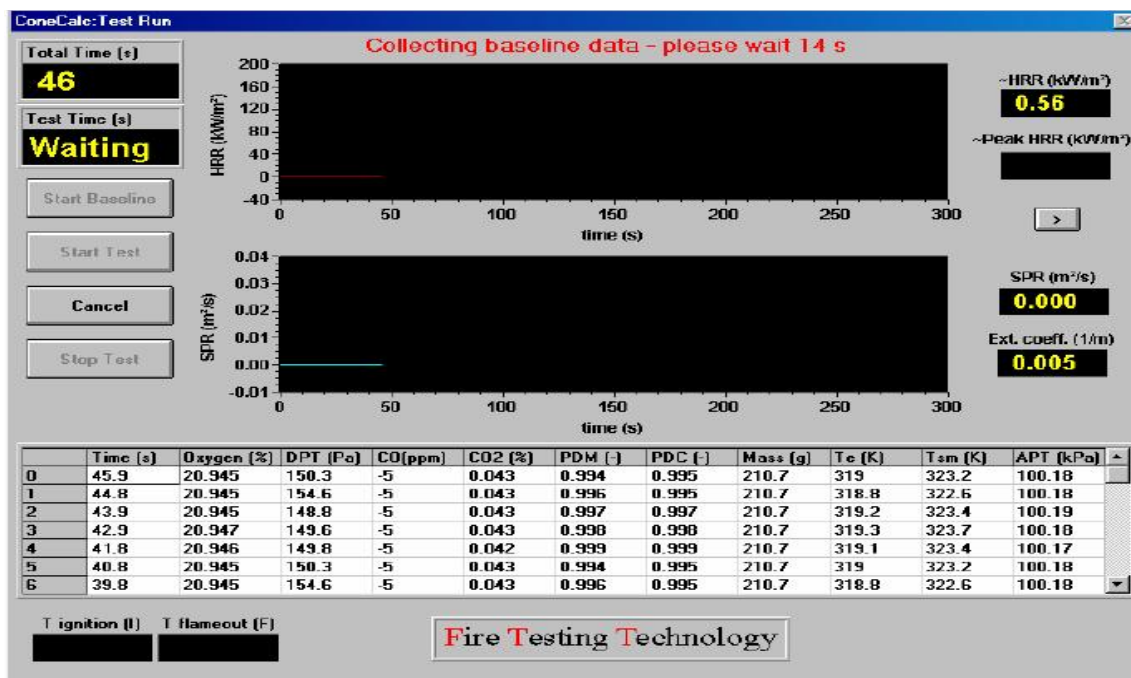
Ø

9.4.1 Διαδικασία Συλλογής δεδομένων αναφοράς (*baseline data*).

Στο βήμα αυτό δεν τίθεται το δοκίμιο κάτω από τον κώνο ακόμα. Στην κορυφή του πάνελ που εμφανίζεται, το λογισμικό ενημερώνει (Εικ. 86). Στο πάνελ επιλέγεται **Start Baseline**. Το λογισμικό στην πραγματικότητα καταγράφει για 60s Baseline δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιήσει στη συνέχεια ως στάθμη αναφοράς, (Εικ. 86 - 87).



Εικόνα 97: Έναρξη καταγραφής δεδομένων αναφοράς (*baseline data*) στο πάνελ *Test Run*.

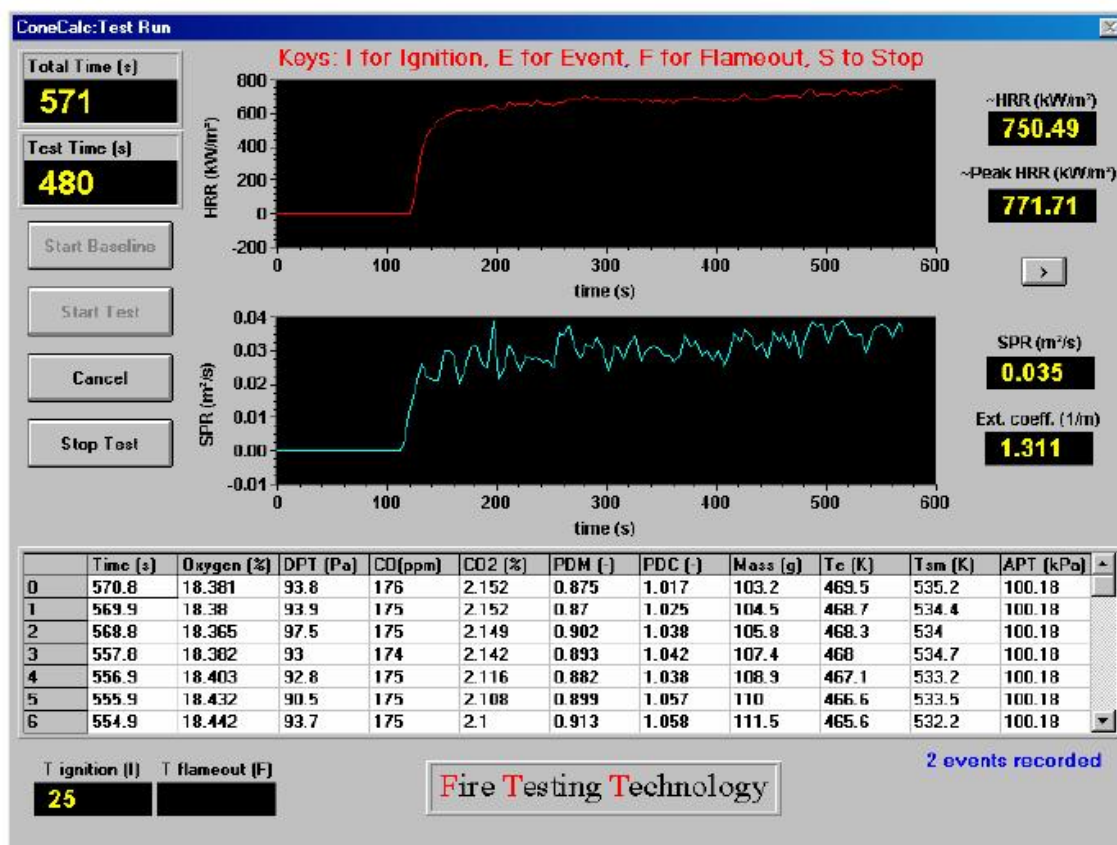


Εικόνα 98: Διαδικασία καταγραφής δεδομένων αναφοράς (baseline data) στο πάνελ Test Run.

Στην Εικ. 87 φαίνεται η πρόοδος της προεργασίας συλλογής δεδομένων βάσης. Στο βήμα αυτό πρέπει τα διαφράγματα (Shutters) του κώνου, να είναι ανοικτά και το θερμομονωτικό υλικό τίθεται στη βάση του ζυγού.

9.4.2 Τοποθέτηση δοκιμίου και έναρξη της δοκιμής.

1. Αφού γίνει η συλλογή των δεδομένων, κλείνονται τα διαφράγματα του κώνου (Shutters) και τοποθετείται η πλατφόρμα με το δοκίμιο στη βάση του ζυγού έχοντας πρώτα αφαιρέσει το θερμομονωτικό υλικό που υπήρχε νωρίτερα για προστασία.
2. Τίθεται ο σπινθηριστής στη θέση λειτουργίας (κέντρο του κώνου) και επιβεβαιώνεται ότι η επιλογή **Ignition** στην πρόσοψη του θερμιδομέτρου είναι ενεργοποιημένη,
3. Όταν σταθεροποιηθεί η τιμή του ζυγού (μάζα δοκιμίου) ανοίγονται τα διαφράγματα του κώνου (Shutters) και αμέσως επιλέγεται **Start Test** ή **S** στο remote control,
4. Παρακολουθείται οπτικά το δοκίμιο για να ανιχνευθεί το χρονικό σημείο ανάφλεξης αυτού στην περίπτωση που υπάρξει. Όταν το δείγμα αναφλεγεί επιλέγεται **I** στο remote control.



Εικόνα 99: Χρονική Εξέλιξη της δοκιμής

Σημείωση Κατά τη διαδικασία στην κορυφή του πάνελ (Εικ. 88) εμφανίζονται οι κρίσιμες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της δοκιμής (**I** για Ignition, **F** για Flameout, **S** για το τέλος της δοκιμής).

- Όταν παύσει η φλόγα ενημερώνεται το λογισμικό για το τέλος της δοκιμής και επιλέγεται **F (finish)**. Ο χρόνος σβέσης της φλόγας καταγράφεται από το λογισμικό μαζί με τα άλλα δεδομένα και δίνεται στα αποτελέσματα.
- Όταν η δοκιμή ολοκληρωθεί (ο χρήστης αναμένει για 2 λεπτά μετά το σβήσιμο της φλόγας κατά υπόδειξη του λογισμικού) και επιλέγεται **Stop Test (S)**.
- Τα αποτελέσματα συνολικά απεικονίζονται επιλέγοντας στο **Main Menu** τη δυνατότητα **Print Report**. (Εικ. 89).

Test Summary

Laboratory: Fire Testing Technology
 Operator: Andrew Green
 Specimen: PMMA
 Material name/ID: Cast PMMA
 E (MJ/kg): 13.1
 Initial mass (g): 220.4

Specimen #:
 Test date: 27/05/2002
 Thickness (mm): 18
 Surface area (cm²): 100

Test Results (between 24 and 624 s)

	Average	Peak	at time (s)
Heat release rate (kW/m ²):	614.55	721.86	605
Effective heat of comb. (MJ/kg):	22.78	34.19	335
Mass loss rate (g/s):	0.270	0.401	580
Specific extinction area (m ² /kg):	120.08	188.95	335
Carbon monoxide yield (kg/kg):	0.0102	0.0165	335
Carbon dioxide yield (kg/kg):	2.01	8.82	25

Test Averages

From ignition to ignition plus...	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
Heat release rate (kW/m ²):	508.59	540.00	559.67	568.18	573.92	580.84
Effective heat of comb. (MJ/kg):	24.37	23.21	23.02	23.09	22.85	22.75
Mass loss rate (g/s):	0.209	0.233	0.242	0.246	0.252	0.255
Specific extinction area (m ² /kg):	105.69	106.77	109.70	111.07	110.13	111.51
Carbon monoxide yield (kg/kg):	0.0074	0.0088	0.0094	0.0098	0.0099	0.0100
Carbon dioxide yield (kg/kg):	2.20	2.09	2.06	2.06	2.03	2.02

Εικόνα 100: Πίνακας Αποτελεσμάτων μετά το τέλος της δοκιμής σε θερμιδόμετρο κώνου.

Μια ηλεκτρική συσκευή ανάφλεξης είναι εγκατεστημένη ακριβώς επάνω από το δοκίμιο και κάτω από τον κωνικό θερμοπομπό. Όταν το δοκίμιο θερμανθεί τότε θα ξεκινήσουν να εκπέμπονται εύφλεκτα αέρια τα οποία θα αναφλεχθούν από την ηλεκτρική συσκευή ανάφλεξης. Όταν η φωτιά εξελιχθεί και καταλάβει όλο το δοκίμιο, τότε η συσκευή ανάφλεξης απενεργοποιείται και απομακρύνεται, *Εικόνα 3.8α* και *Εικόνα 3.8β*.