

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

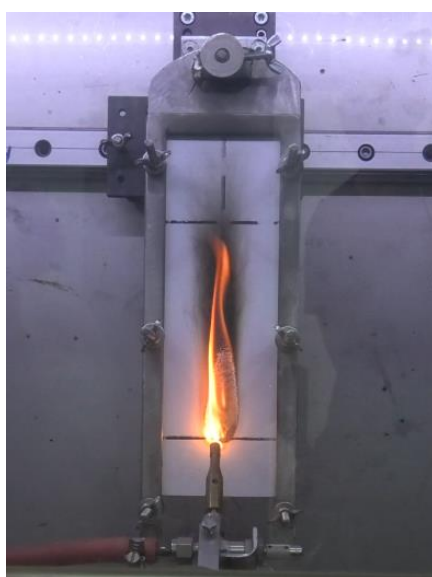
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Δ. ΚΟΛΑΪΤΗΣ (ΕΔΙΠ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΨΗΣ  
ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ

ΚΑΛΟΦΩΛΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022



## *Ευχαριστίες*

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου κ. Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Διονύση Κολαΐτη, για τον καθοριστικό του ρόλο στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, στην επίβλεψη της εργασίας, την καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές του. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους δικούς μου ανθρώπους για την πολύπλευρή τους υποστήριξη, υπομονή και κατανόηση.



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	ii
Κατάλογος σχημάτων.....	vii
Κατάλογος πινάκων .....	x
Περίληψη .....	xi
Abstract.....	xii
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> .....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Φωτιές σε προσόψεις κτηρίων .....	1
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> .....	3
Σύνθετα συστήματα προσόψεων .....	3
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά .....	3
2.2 Εύφλεκτα εμπορικά συστήματα προσόψεων .....	3
2.2.1 Σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP).....	3
2.2.2 Σύνθετα συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS) .....	5
2.2.3 Πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL) .....	7
2.2.4 Δομικά μονωτικά πλαίσια (SIPs).....	10
2.2.5 Αεριζόμενες προσόψεις (Ventilated façades) .....	11
2.3 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.....	14
2.3.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	14
2.3.2 Ηλιοθερμικά συστήματα .....	18
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> .....	21
Φωτιά σε συστήματα προσόψεων .....	21
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά .....	21
3.2 Φυσικοί μηχανισμοί .....	21
3.2.1 Μηχανισμοί έναυσης.....	21
3.2.2 Μηχανισμοί εξάπλωσης της φωτιάς στην πρόσοψη .....	23
3.3 Μελέτη περιστατικών .....	25
3.3.1 Grenfell Tower, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο, 2017.....	25
3.3.2 Beijing Television Cultural Center Tower (TVCC), Πεκίνο, Κίνα, 2009.....	26
3.3.3 MGM Monte Carlo Hotel, Λας Βέγκας, ΗΠΑ, 2008 .....	27
3.3.4 Μίσκολτς, Ουγγαρία, 2009 .....	29
3.3.5 Wooshin Golden Suites, Μπούσαν, Νότια Κορέα, 2010 .....	29
3.4 Μελέτες πειραματικής διερεύνησης.....	30

3.4.1 Υλικά πρόσοψης .....	30
3.4.2 Καύσιμο και Μέγεθος Εστίας .....	31
3.4.3 Πάχος κατασκευαστικών στοιχείων .....	32
3.4.4 Ανοίγματα .....	33
3.4.5 Γεωμετρία πρόσοψης – προβολές .....	34
3.4.6 Πυροφραγμοί.....	35
3.4.7 Επιβραδυντικές ουσίες .....	35
3.4.8 Αερισμός .....	36
3.4.9 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (ΡΕΘ) .....	37
3.5 Μελέτες υπολογιστικής προσομοίωσης .....	37
Κεφάλαιο 4° .....	40
<i>Νομοθετικό πλαίσιο πυροπροστασίας κτηρίων.....</i>	<i>40</i>
4.1 Νομοθετικές απαιτήσεις.....	40
4.1.1 Ελλάδα .....	40
4.1.2 Ηνωμένο Βασίλειο .....	42
4.1.3 Κύπρος .....	43
4.1.4 Κροατία .....	45
4.2 Ταξινόμηση υλικών.....	46
4.2.1 Σύστημα ευρωπαϊκών κλάσεων (Euroclass system) .....	47
4.2.2 Δείκτες πυραντίστασης.....	48
4.3 Πρότυπες δοκιμές φωτιάς προσόψεων .....	50
4.3.1 Δοκιμές BS 8414-1:2020, BS 8414-2:2020 .....	50
4.3.2 Δοκιμή DIN 4102-20 (Draft) .....	53
4.3.3 Δοκιμή SP Fire 105 .....	53
Κεφάλαιο 5° .....	56
<i>Πρότυπη δοκιμή «Αντίδρασης στη φωτιά» EN ISO 11925-2:2020.....</i>	<i>56</i>
5.1 Διάταξη δοκιμής .....	56
5.1.1 Θάλαμος καύσης .....	56
5.1.2 Καυστήρας .....	56
5.1.3 Υποδοχέας δοκιμίου .....	59
5.1.4 Υποστήριξη υποδοχέα .....	59
5.1.5 Λοιπός εξοπλισμός .....	61
5.1.6 Δοκίμια.....	62
5.2 Διαδικασία δοκιμής .....	62
Κεφάλαιο 6° .....	64

<i>Πειραματικές δοκιμές</i> .....	64
6.1 Παραμετρικές μελέτες .....	64
6.1.1 Δομικά υλικά .....	64
6.1.2 Πυράντοχες βαφές .....	67
6.2 Αποτελέσματα δοκιμών EN ISO 11925-2 .....	68
6.2.1 Μη επικαλυμμένα δοκίμια .....	68
6.2.2 Δοκίμια επικαλυμμένα με πυράντοχες βαφές .....	81
6.3 Συμπεράσματα δοκιμών .....	92
6.3.1 Επίδραση υλικού .....	94
6.3.2 Επίδραση πυράντοχης βαφής .....	96
6.3.3 Επίδραση πάχους υλικού .....	98
Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> .....	100
<i>Γενικά συμπεράσματα</i> .....	100
<i>Βιβλιογραφία</i> .....	103

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1	Αριθμός μεγάλων πυρκαγιών προσόψεων ανά πενταετία .....	1
Σχήμα 2.2	Κτηριακή πρόσοψη αποτελούμενη από σύνθετα πλαίσια αλουμινίου .....	5
Σχήμα 2.3	Σύνθετα πλαίσια αλουμινίου .....	5
Σχήμα 2.4	Τυπική δομή συστήματος ETICS .....	6
Σχήμα 2.5	Πρόσοψη κτηρίου, κατασκευασμένη με σύστημα ETICS.....	7
Σχήμα 2.6	Τυπική δομή πολυστρωματικού πλαισίου υψηλής πίεσης (HPL).....	8
Σχήμα 2.7	Κτηριακή πρόσοψη, αποτελούμενη από HPL .....	9
Σχήμα 2.8	Πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL) .....	9
Σχήμα 2.9	Τυπική δομή δομικού μονωτικού πλαισίου (SIP).....	11
Σχήμα 2.10	Κτηριακή μονάδα, κατασκευασμένη με δομικά μονωτικά πλαίσια (SIPS) .....	11
Σχήμα 2.11	Τυπική δομή αεριζόμενης πρόσοψης .....	13
Σχήμα 2.12	Κτήριο με αεριζόμενη πρόσοψη.....	13
Σχήμα 2.13	Κτήριο με ενσωματωμένη φωτοβολταϊκή πρόσοψη .....	15
Σχήμα 2.14	Κτήριο με δυναμικό φωτοβολταϊκό σύστημα πρόσοψης.....	17
Σχήμα 2.15	Κτήριο με ενσωματωμένο ηλιοθερμικό σύστημα.....	18
Σχήμα 3.1	Φλόγες εξερχόμενες από παράθυρο .....	22
Σχήμα 3.2	Αναπαράσταση του φαινομένου <i>leap-frogging</i> .....	24
Σχήμα 3.3	Πυρκαγιά στο κτήριο Grenfell Tower .....	26
Σχήμα 3.4	Το κτήριο TVCC κατά τη διάρκεια της φωτιάς και μετά την κατάσβεσή της .....	27
Σχήμα 3.5	Φωτιά στο κτήριο MGM Monte Carlo Hotel .....	28
Σχήμα 3.6	Φωτιά στο κτήριο Wooshin Golden Suites .....	30
Σχήμα 3.7	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για διαφορετική μάζα καυσίμου .....	31
Σχήμα 3.8	Θερμοκρασία στο ίδιο σημείο για διαφορετική μάζα καυσίμου .....	31
Σχήμα 3.9	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε δοκιμές διαφορετικών καυσίμων.....	32
Σχήμα 3.10	Χρονική εξέλιξη δοκιμών διαφορετικών παχών μόνωσης.....	32
Σχήμα 3.11	Στιγμιότυπα δοκιμών σε ανοίγματα διαστάσεων (α) 2,55 m x 1,45 m,.....	34
Σχήμα 3.12	Επίδραση προβολών σε συνθήκες φωτιάς .....	34
Σχήμα 3.13	Μετρούμενες θερμοκρασίες δοκιμών με και χωρίς πυροφραγμούς.....	35
Σχήμα 3.14	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας δοκιμών με και χωρίς επιβραδυντικό φωτιάς ..	36
Σχήμα 3.15	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	38
Σχήμα 3.16	Στιγμιότυπα προσομοίωσης σε (α) 5 min και (β) 30 min από την έναρξή της...	39
Σχήμα 4.1	Διάταξη δοκιμών BS 8414-1, .....	51
Σχήμα 4.2	Τυπική διάταξη δομικού χαλύβδινου πλαισίου δοκιμής BS 8414-2.....	51
Σχήμα 4.3	Διάταξη του θαλάμου καύσης δοκιμών BS 8414-1, BS 8414-2 .....	51
Σχήμα 4.4	Σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων στις διατάξεις δοκιμών BS 8414-1, BS 8414-2 .....	51
Σχήμα 5.1	Θάλαμος καύσης δοκιμής EN ISO 11925-2 .....	57
Σχήμα 5.2	Θάλαμος καύσης εργαστηρίου .....	57
Σχήμα 5.3	Καυστήρας δοκιμής EN ISO 11925-2 .....	58
Σχήμα 5.4	Καυστήρας εργαστηρίου .....	58
Σχήμα 5.5	Τυπικός υποδοχέας δείγματος δοκιμής EN ISO 11925-2 .....	59
Σχήμα 5.6	Υποδοχέας δοκιμίου πολλαπλών στρωμάτων, δοκιμής EN ISO 11925-2 .....	59
Σχήμα 5.7	Υποδοχέας δοκιμίου υλικών πλήρωσης, δοκιμής EN ISO 11925-2.....	60



<b>Σχήμα 5.8</b>	<i>Σταθεροποίηση δοκιμίων χαλαρής πλήρωσης, δοκιμής EN ISO 11925-2</i>	60
<b>Σχήμα 5.9</b>	<i>Διάταξη εντός του θαλάμου καύσης, δοκιμής EN ISO 11925-2</i>	60
<b>Σχήμα 5.10</b>	<i>Πλάγια όψη του θαλάμου καύσης του εργαστηρίου</i>	60
<b>Σχήμα 5.11</b>	<i>Βιντεοκάμερα καταγραφής των εργαστηριακών δοκιμών</i>	61
<b>Σχήμα 5.12</b>	<i>Γραμμές ελέγχου σε δοκίμιο</i>	63
<b>Σχήμα 6.1</b>	<i>Δοκίμιο 1a.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	69
<b>Σχήμα 6.2</b>	<i>Δοκίμιο 1b.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	70
<b>Σχήμα 6.3</b>	<i>Δοκίμιο 1b.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	70
<b>Σχήμα 6.4</b>	<i>Δοκίμιο 2.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	71
<b>Σχήμα 6.5</b>	<i>Δοκίμιο 2.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	71
<b>Σχήμα 6.6</b>	<i>Δοκίμιο 3.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	72
<b>Σχήμα 6.7</b>	<i>Δοκίμιο 3.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	72
<b>Σχήμα 6.8</b>	<i>Δοκίμιο 4.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	73
<b>Σχήμα 6.9</b>	<i>Δοκίμιο 4.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	73
<b>Σχήμα 6.10</b>	<i>Δοκίμιο 4.2 σε (α) 0 s, (β) 15 s και (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	74
<b>Σχήμα 6.11</b>	<i>Δοκίμιο 5.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	74
<b>Σχήμα 6.12</b>	<i>Δοκίμιο 5.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	75
<b>Σχήμα 6.13</b>	<i>Δοκίμιο 6.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	75
<b>Σχήμα 6.14</b>	<i>Δοκίμιο 6.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	76
<b>Σχήμα 6.15</b>	<i>Δοκίμιο 7.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	76
<b>Σχήμα 6.16</b>	<i>Δοκίμιο 7.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	77
<b>Σχήμα 6.17</b>	<i>Δοκίμιο 8a.1 σε (α) 0 s, (β) 15 s, (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	78
<b>Σχήμα 6.18</b>	<i>Δοκίμιο 8a.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	78
<b>Σχήμα 6.19</b>	<i>Δοκίμιο 8b.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	79
<b>Σχήμα 6.20</b>	<i>Δοκίμιο 8b.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	79
<b>Σχήμα 6.21</b>	<i>Δοκίμιο 8b.2 σε (α) 0 s, (β) 15 s, (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	80
<b>Σχήμα 6.22</b>	<i>Δοκίμιο 8b.2 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	80
<b>Σχήμα 6.23</b>	<i>Δοκίμιο 1a.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	81
<b>Σχήμα 6.24</b>	<i>Δοκίμιο 1a.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	82
<b>Σχήμα 6.25</b>	<i>Δοκίμιο 1a.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	82
<b>Σχήμα 6.26</b>	<i>Δοκίμιο 1a.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	83
<b>Σχήμα 6.27</b>	<i>Δοκίμιο 1b.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	83
<b>Σχήμα 6.28</b>	<i>Δοκίμιο 1b.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	84
<b>Σχήμα 6.29</b>	<i>Δοκίμιο 1b.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	84
<b>Σχήμα 6.30</b>	<i>Δοκίμιο 1b.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	85
<b>Σχήμα 6.31</b>	<i>Δοκίμιο 2.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	85
<b>Σχήμα 6.32</b>	<i>Δοκίμιο 2.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	86
<b>Σχήμα 6.33</b>	<i>Δοκίμιο 2.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	86
<b>Σχήμα 6.34</b>	<i>Δοκίμιο 2.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	87
<b>Σχήμα 6.35</b>	<i>Δοκίμιο 7.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	87
<b>Σχήμα 6.36</b>	<i>Δοκίμιο 7.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	88
<b>Σχήμα 6.37</b>	<i>Δοκίμιο 7.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	88
<b>Σχήμα 6.38</b>	<i>Δοκίμιο 7.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	89
<b>Σχήμα 6.39</b>	<i>Δοκίμιο 8a.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	89
<b>Σχήμα 6.40</b>	<i>Δοκίμιο 8a.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	90
<b>Σχήμα 6.41</b>	<i>Δοκίμιο 8a.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής</i>	90
<b>Σχήμα 6.42</b>	<i>Δοκίμιο 8a.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής</i>	91

<b>Σχήμα 6.43</b>	Δοκίμιο 8b.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής.....	91
<b>Σχήμα 6.44</b>	Δοκίμιο 8b.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής.....	92
<b>Σχήμα 6.45</b>	Δοκίμιο 8b.V.2 μετά το πέρας της δοκιμής.....	92
<b>Σχήμα 6.46</b>	Σύγκριση των δειγμάτων (α) 1a.1, (β) 1b.1, (γ) 5.1 στα 60 s .....	95
<b>Σχήμα 6.47</b>	Σύγκριση των δειγμάτων (α) 4.1, (β) 7.1, (γ) 6.1 στα 60 s .....	96
<b>Σχήμα 6.48</b>	Σύγκριση των δειγμάτων (α) 2.1, (β) 2.N.1, (γ) 2.V.1 στα 60 s.....	97
<b>Σχήμα 6.49</b>	Διόγκωση δειγμάτων (α) 8a.N.1 και (β) 8a.V.1 μετά το πέρας των δοκιμών....	98
<b>Σχήμα 6.50</b>	Σύγκριση δειγμάτων (α) 1b.1 και (β) 8b.1 στα 60 s .....	99

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις .....	15
Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ως παράθυρα .....	16
Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εξωτερικά συστήματα ειδικού σκοπού .....	16
Πίνακας 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προηγμένα κτηριακά κελύφη .....	16
Πίνακας 2.5 Κατηγοριοποίηση ενσωματωμένων κτηριακών ηλιοθερμικών συστημάτων με βάση το μέσο μεταφοράς θερμότητας.....	19
Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά ενσωματωμένων ηλιοθερμικών συστημάτων με βάση την τοποθεσία εγκατάστασής τους.....	20
Πίνακας 4.1 Κατηγορίες κριτηρίων δεικτών πυραντίστασης δομικών στοιχείων.....	40
Πίνακας 4.2 Ελάχιστοι επιτρεπόμενοι δείκτες πυραντίστασης.....	41
Πίνακας 4.3 Ελάχιστες απαιτήσεις ελέγχου εξωτερικής μετάδοσης της φωτιάς .....	42
Πίνακας 4.4 Απαιτήσεις συμπεριφοράς υλικών εξωτερικών τοιχωμάτων του κανονισμού πυροπροστασίας κτηρίων του Ηνωμένου Βασιλείου .....	43
Πίνακας 4.5 Ελάχιστες απαιτήσεις ελέγχου εξωτερικής μετάδοσης της φωτιάς του Κυπριακού κανονισμού πυροπροστασίας κτηρίων.....	44
Πίνακας 4.6 Ελάχιστες τιμές δεικτών πυραντίστασης για εξωτερικές τοιχοποιίες.....	44
Πίνακας 4.7 Ελάχιστες τιμές δεικτών πυραντίστασης πυροδιαμερισμάτων .....	45
Πίνακας 4.8 Κατηγοριοποίηση κτηρίων του κανονισμού πυροπροστασίας της Κροατίας ..	45
Πίνακας 4.9 Απαιτούμενες κατηγορίες δομικών υλικών προσόψεων στην Κροατία .....	46
Πίνακας 4.10 Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών σε ανάφλεξη και καύση .....	47
Πίνακας 4.11 Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών στην παραγωγή καπνού .....	48
Πίνακας 4.12 Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών στην παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων .....	48
Πίνακας 4.13 Πιθανοί συνδυασμοί κατηγοριών του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων ..	48
Πίνακας 4.14 Κριτήρια αξιολόγησης για τον καθορισμό του δείκτη πυραντίστασης .....	49
Πίνακας 6.1 Συστάσεις υλικών και χαρακτηριστικά δειγμάτων της πειραματικής δοκιμής.....	64
Πίνακας 6.2 Σύγκριση δοκιμών EN ISO 11925-2 (α) .....	93
Πίνακας 6.3 Σύγκριση δοκιμών EN ISO 11925-2 (β) .....	94

## Περίληψη

Η χρήση εύφλεκτων υλικών σε σύνθετα συστήματα προσόψεων, ως επί το πλείστον θερμομονωτικών υλικών, προσφέρει σημαντική μείωση ενεργειακών απωλειών και εκπομπών CO<sub>2</sub>, γεγονός που με την πάροδο των ετών χρίζεται όλο και πιο αναγκαίο. Στον αντίποδα, η εγκατάσταση των συστημάτων αυτών ελλοχεύει κινδύνους αναφορικά με την πυρασφάλεια των κτηρίων. Ως εκ τούτου, τα τελευταία έτη παρατηρείται αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης κτηριακών πυρκαγιών με επίκεντρο τα συστήματα πρόσοψης. Προκειμένου να διερευνηθεί το εν λόγω φαινόμενο, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική μελέτη συνοδευόμενη από σειρά πρότυπων πειραματικών δοκιμών, οι οποίες διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται επιγραμματικά στοιχεία σχετικά με τα αίτια της αύξησης της συχνότητας εκδήλωσης πυρκαγιών σε προσόψεις, των μηχανισμών λειτουργίας του φαινομένου, αλλά και των παραγόντων που επηρεάζουν την εξέλιξή του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά γνωστών εμπορικών σύνθετων συστημάτων προσόψεων, καθώς και ενσωματωμένων κτηριακών φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων σε προσόψεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι μηχανισμοί έναυσης και εξάπλωσης της φωτιάς στις προσόψεις, παρουσιάζεται μελέτη πραγματικών περιστατικών (case studies), ενώ πραγματοποιείται άντληση συμπερασμάτων, αναφορικά με επιδραστικές στο φαινόμενο παραμέτρους μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης πειραματικών διερευνήσεων και υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τμήματα κανονισμών πυροπροστασίας Ευρωπαϊκών κρατών, τα οποία αφορούν την προστασία των κτηριακών προσόψεων. Παράλληλα, παρουσιάζονται μέθοδοι ταξινόμησης υλικών στα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με γνώμονα την ευφλεκτότητα, την παραγωγή καπνού και φλεγόμενων σταγονιδίων ή σωματιδίων, καθώς και της αντοχής τους σε συνθήκες φωτιάς. Εν συνεχεία, παρατίθενται πρότυπες δοκιμές μεγάλης κλίμακας (large scale) για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς συστημάτων προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρότυπη δοκιμή «αντίδρασης στη φωτιά» EN ISO 11925-2:2020 η οποία διενεργήθηκε στο πλαίσιο των πειραματικών δοκιμών της εργασίας αυτής.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τα υλικά των δειγμάτων και οι πυράντοχες βαφές που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των δοκιμών, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την εργασία και εν δυνάμει μελλοντικές μέθοδοι επέκτασης των γνώσεων που μπορούν να αντληθούν με βάση το γνωστικό αντικείμενο της μελέτης.

## *Abstract*

The use of flammable materials in composite façade systems, mostly thermal insulation materials, offers a significant reduction in energy losses and CO<sub>2</sub> emissions, a fact that over the years becomes more and more necessary. On the other hand, the installation of these kind of systems poses risks related to the fire safety of buildings. As a result, in recent years there has been an increase in building fires related to the façade systems. In order to investigate this phenomenon, a literature review was carried out, accompanied by a series of standard experimental fire tests, carried out at the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems, of the School of Mechanical Engineering, of the National Technical University of Athens.

The first chapter presents information regarding the causes of the increase in the frequency of façade fires, the mechanisms of fire spread on the façade, as well as the factors that influence its behavior.

The second chapter presents the characteristics of well-known, commercially available composite facade systems, as well as building integrated photovoltaic and solar thermal systems in façades.

In the third chapter, an analysis of the mechanisms of ignition and fire spread is performed, as well as presentations of case studies. Moreover, conclusions are drawn regarding the parameters affecting the phenomenon through a literature review of relevant experimental investigations and numerical simulations.

The fourth chapter presents sections of fire protection regulations of European countries, which concern the protection of building façades. At the same time, methods of classification of materials in the countries of the European Union are presented, based on flammability, the production of smoke and flammable droplets or particles, as well as their resistance to fire conditions. In addition, large-scale standard tests are presented that evaluate the behavior of façade systems in fire conditions.

The fifth chapter presents the standard test EN ISO 11925-2: 2020 which was performed in the context of the experimental tests of this study.

The sixth chapter analyzes the materials of the samples and the fire-resistant paints used, the results of the tests, as well as the conclusions that were drawn.

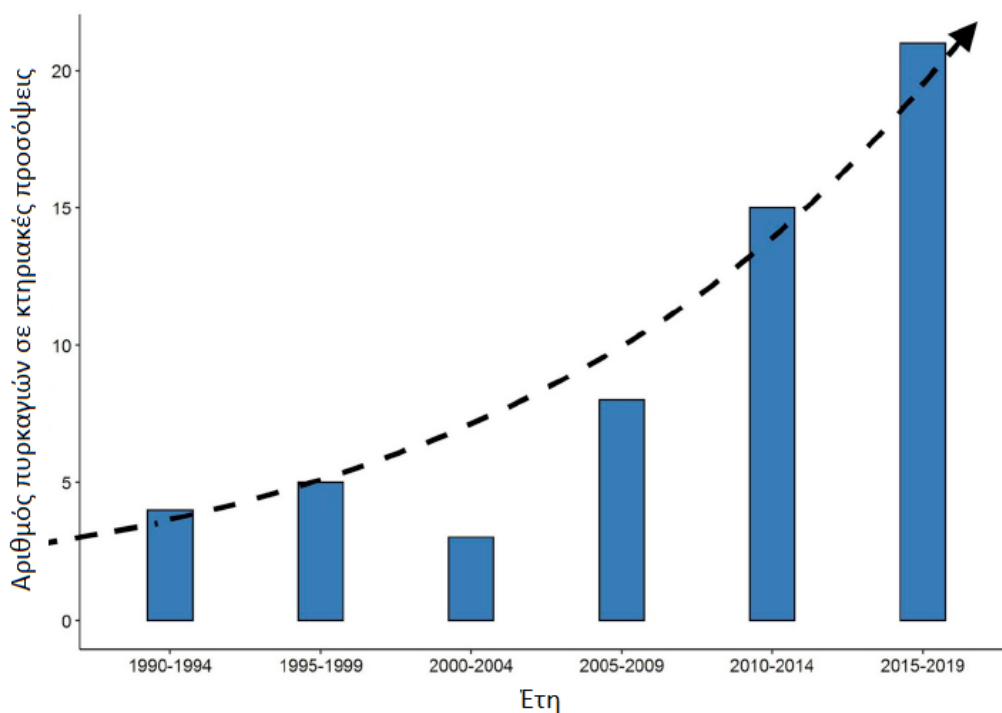
Finally, the seventh chapter presents general conclusions drawn from the study and potential future methods of extending the knowledge that was gained based on this study.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

### 1.1 Φωτιές σε προσόψεις κτηρίων

Στο πέρασμα των τελευταίων δεκαετιών, παρατηρείται παγκοσμίως μια σταδιακή αύξηση εκδήλωσης κτηριακών πυρκαγιών με επίκεντρο την πρόσοψη. Βασικό αίτιο του φαινομένου αυτού συνιστά η εγκατάσταση σύγχρονων συστημάτων πρόσοψης στο κτηριακό κέλυφος, τα οποία κατ' εξοχήν εμπεριέχουν επιμέρους εύφλεκτα στοιχεία, ως επί το πλείστον θερμομονωτικά υλικά. Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη μείωσης των ενεργειακών απωλειών και των παραγόμενων αέριων ρύπων, σε συνδυασμό με την δυνατότητα των εν λόγω εύφλεκτων πολυμερών να επιτυγχάνουν σημαντικά ανώτερο θερμομονωτικό αποτέλεσμα, συγκριτικά με παλαιότερες παραδοσιακές μονώσεις, καθιστά τη χρήση τους ιδιαίτερα επωφελή. Στο Σχήμα 1.1 παρατίθεται μία ποσοτική καταγραφή των μεγάλων πυρκαγιών σε προσόψεις των τελευταίων ετών.



**Σχήμα 1.1** Αριθμός μεγάλων πυρκαγιών προσόψεων ανά πενταετία [1]

Η επικινδυνότητα του φαινομένου μεγαλώνει ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις πυρκαγιών προσόψεων κτηρίων μεγάλου ύψους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καταστροφική πυρκαγιά στο Grenfell Tower του Λονδίνου το 2017 με αποτέλεσμα την απώλεια 72 ανθρώπων, τον τραυματισμό 70 και κόστος που ξεπέρασε τις 500 εκατομμύρια αγγλικές λίρες [2]. Σε στατιστική ανάλυση κτηριακών πυρκαγιών στις ΗΠΑ παρατηρήθηκε ότι στις εν λόγω κατασκευές σημειώνεται το 8% των συνολικών πυρκαγιών

σε κτήρια, το 7% των θανάτων πολιτών, το 9% των τραυματισμών πολιτών και το 3% των οικονομικών ζημιών [3].

Η κατανόηση της επίδρασης της φωτιάς σε συστήματα προσόψεων είναι ένα πολυδιάστατο φαινόμενο, τόσο όσον αφορά στην ανάφλεξη και ανάπτυξή της, όσο και αναφορικά με την εν γένει συμπεριφορά της και τους παράγοντες που την καθορίζουν. Στην κατεύθυνση αυτή, η έναυση της φωτιάς δύναται να προκληθεί από εσωτερική εστία με φλόγες οι οποίες μέσω ανοιγμάτων μεταδίδουν τη φωτιά στο εξωτερικό του κτηρίου, αλλά και από εξωτερικές πηγές προσκείμενες στην πρόσοψη, ή σε μικρή απόσταση από αυτήν, κυρίως μέσω ακτινοβολίας. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς μπορεί να πραγματοποιηθεί από όροφο σε όροφο εισερχόμενη και εξερχόμενη σε κατακόρυφα διαδοχικά ανοίγματα, στην εξωτερική επιφάνεια της πρόσοψης, μέσω εσωτερικών αεριζόμενων κοιλοτήτων ή μονωτικών στρωμάτων, καθώς και λόγω πτώσης φλεγόμενων αντικειμένων σε κατώτερα επίπεδα του κτηρίου. Οι παράμετροι εκείνες οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς είναι πολυποίκιλες και διαφέρουν ανά περίπτωση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων επιδραστικών μεταβλητών συνιστούν τα υλικά και οι διαστάσεις των στοιχείων του συστήματος, η σύσταση των καυσίμων της αρχικής εστίας, η γεωμετρία της πρόσοψης, οι συνθήκες αερισμού, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της εστίας, καθώς και η εν δυνάμει παρουσία ανοιγμάτων, πυροφραγμών και επιβραδυντικών ουσιών στο σύστημα.

## 1.2 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην μελέτη της επίδρασης της φωτιάς σε σύνθετα συστήματα προσόψεων. Ως εκ τούτου, πραγματοποιείται αρχικά μια θεωρητική διερεύνηση των συστημάτων αυτών, των μηχανισμών μέσω των οποίων το φαινόμενο εκτυλίσσεται στα εν λόγω συστήματα και των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η λήψη μέτρων για την αποτροπή εκδήλωσης πυρκαγιών σε προσόψεις έχει απασχολήσει κρατικούς φορείς παγκοσμίως, γεγονός που αποτυπώνεται σε κανονισμούς πυροπροστασίας αλλά και σε πρότυπες μεθόδους δοκιμής, όπως παρουσιάζεται στην εργασία αυτή. Τέλος, προκειμένου να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση ορισμένων εκ των χρησιμοποιούμενων υλικών στα συστήματα αυτά, αλλά και διερεύνηση της επίδρασης κατασταλτικών για το φαινόμενο παραγόντων (στην προκείμενη περίπτωση πυράντοχων βαφών), διενεργήθηκε σειρά πρότυπων πειραματικών δοκιμών στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Κεφάλαιο 2°

### Σύνθετα συστήματα προσόψεων

#### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η πρόσοψη συνιστά ένα εκ των σημαντικότερων κτηριακών στοιχείων, ιδιαίτερα στη σύγχρονη εποχή. Πέραν της ανάδειξης της αισθητικής του κτηρίου, προσφέρει προστασία από της εναλλαγές της εξωτερικής θερμοκρασίας, το ηλιακό φως, τις βροχοπτώσεις, το θόρυβο και τις εν γένει εξωτερικές, ανθρωπογενείς ή μη, επιδράσεις. Παράλληλα, λόγω της πολύπλευρης δράσης της, καθώς και της σταδιακά αυξανόμενης πολυπλοκότητας κατασκευής της, αντιστοιχεί σε ένα από τα μεγαλύτερα ποσοστά του συνολικού κατασκευαστικού κόστους ενός κτηρίου, αγγίζοντας σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και το 25% του συνολικού κόστους [1]. Στο πλαίσιο της εξέλιξης των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν και σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη, οικουμενική ανάγκη περιορισμού των ενεργειακών απωλειών των κτηρίων, παρατηρείται διαρκής αύξηση της χρήσης συστημάτων προσόψεων με εύφλεκτα υλικά, τα οποία παρά την σαφώς χειρότερη συμπεριφορά τους σε συνθήκες φωτιάς, σε σύγκριση με παραδοσιακού τύπου προσόψεις, κατασκευασμένες από οπτόπλινθους ή σκυρόδεμα, διαθέτουν ανώτερη θερμομονωτική ικανότητα. Ταυτόχρονα, παρατηρείται η τοποθέτηση ενσωματωμένων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων συλλογής και μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε προσόψεις, επεκτείνοντας την ενεργειακή αξιοποίηση των κτηριακών επιφανειών, πέραν της συμβατικής εγκατάστασης αντίστοιχων συστημάτων σε οροφές.

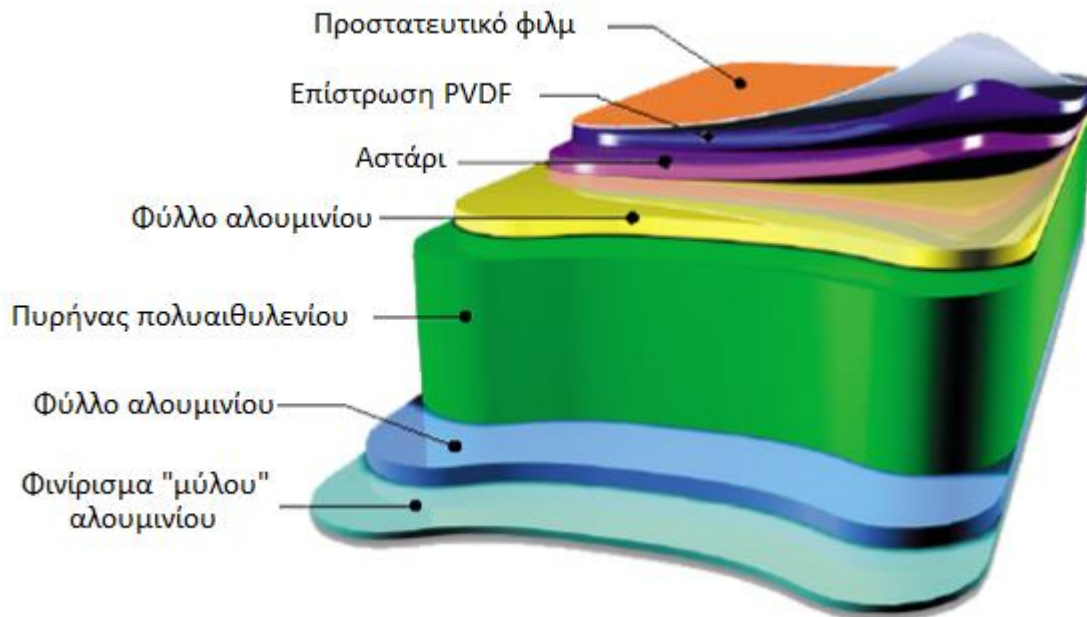
#### 2.2 Εύφλεκτα εμπορικά συστήματα προσόψεων

##### 2.2.1 Σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP)

Οι σύνθετες μεταλλικές επενδύσεις προσόψεων (Metal Composite Material claddings – MCM) αποτελούνται κατά κύριο λόγο από λεπτά φύλλα αλουμινίου, γνωστά ως σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP – Aluminum Composite Panels). Πιο συγκεκριμένα, τα ACP αποτελούνται από δύο πλαίσια αλουμινίου, τυπικού πάχους 0,5 mm, στο εσωτερικό των οποίων βρίσκεται τοποθετημένη μία πλάκα θερμομονωτικού υλικού, πάχους 2 – 5 mm [4]. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η πλάκα αυτή αποτελείται από πολυαιθυλένιο (Polyethylene - PE), ωστόσο λόγω της μεγάλης ευφλεκτότητάς του, συνήθως συνδυάζεται με ορυκτοβάμβακα [5]. Μολονότι η χρήση πολυαιθυλενίου και ορυκτοβάμβακα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην κατασκευή σύνθετων πλαισίων αλουμινίου, στη βιομηχανία χρησιμοποιείται ένα μεγάλο εύρος, εύφλεκτων και μη, θερμομονωτικών υλικών πέραν αυτών, όπως πολυϊσοκυανικός αφρός (Polyisocyanurate – PIR), αφρός πολυουρεθάνης (Polyurethane – PUR), αφρός διογκωμένου πολυστυρένιου (Expanded Polystyrene – EPS), αφρός εξηλασμένου πολυστυρένιου (Extruded Polystyrene – XPS), φαινολικός αφρός (Phenolic Foam - PF) και υαλοβάμβακας [6]. Επιπροσθέτως οι εξωτερικές επιφάνειες διαθέτουν επικάλυψη στρώσεων ειδικών βερνικιών και βαφών, όπως ρητίνης φθοριούχου



πολυβινυλιδενίου (PVDF resin) ή πολυαιθυλενική ρητίνη (PE resin). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η δομή ενός τυπικού πλαισίου ACP.



**Σχήμα 2.1** Δομή τυπικού σύνθετου πλαισίου αλουμινίου [7]

Η εγκατάσταση των πλαισίων στην πρόσοψη πραγματοποιείται με τη βοήθεια χαλύβδινων δοκών, γεγονός που δημιουργεί αεριζόμενο κενό μεταξύ της προϋπάρχουσας τοιχοποιίας και της επένδυσης, συνήθους πάχους 40 mm [5].

Βασικό πλεονέκτημα των πλαισίων αυτών αποτελεί η ιδιαίτερη ακαμψία, σκληρότητα και ανθεκτικότητά τους σε συνδυασμό με το μικρό κατασκευαστικό τους βάρος. Παράλληλα, διαθέτουν σημαντική θερμομονωτική και ηχομονωτική ικανότητα και σχετικά χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα δύναται να προσφέρουν πολυποίκιλα αισθητικά αποτελέσματα [6]. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά μία πρόσοψη σύνθετου σχήματος κατασκευασμένη με ACP, ενώ στο Σχήμα 2.3 παρατίθενται ποικίλα σύνθετα πλαίσια αλουμινίου.



**Σχήμα 2.2** Κτηριακή πρόσοψη αποτελούμενη από σύνθετα πλαίσια αλουμινίου [8]



**Σχήμα 2.3** Σύνθετα πλαίσια αλουμινίου [9]

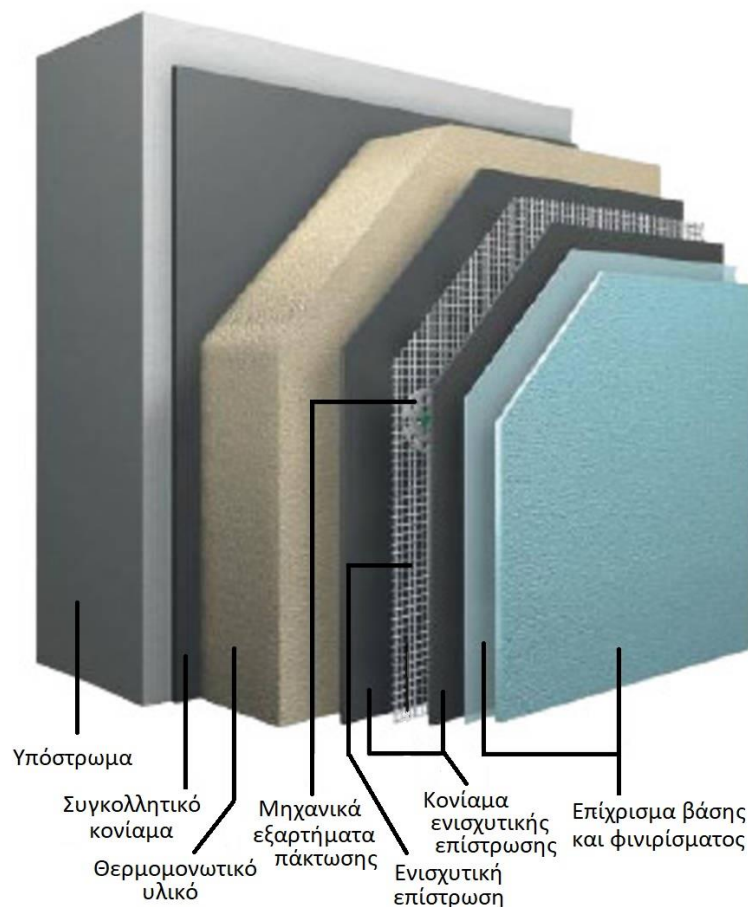
Η κατασκευή σύνθετων πλαισίων αλουμινίου έχει ξεκινήσει από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, ωστόσο η διάδοση της χρήσης τους ως εξωτερικές επενδύσεις κτηρίων επιτεύχθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1980. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η χρήση των σύνθετων πλαισίων αλουμινίου δεν περιορίζεται μόνο στην τοποθέτησή τους ως επένδυση προσόψεων κτηρίων, αλλά καλύπτει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως διακόσμηση εσωτερικών χώρων, μέσω δημιουργίας εσωτερικών τοίχων και ψευδοροφών, καθώς και δημιουργία διαφημιστικών πινακίδων - σημάτων.

### 2.2.2 Σύνθετα συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS)

Τα συστήματα ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) συνιστούν έναν εκ των συνηθέστερων σύγχρονων τύπων συστημάτων μόνωσης προσόψεων κτηρίων. Η

απόδοση του όρου στα ελληνικά δύναται να διατυπωθεί ως Σύνθετα Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης.

Η τυπική δομή των συστημάτων ETICS ή EIFS (External Insulation Finishing Systems), όπως συνήθως ονομάζονται σε χώρες της Βόρειας Αμερικής, περιλαμβάνει το θερμομονωτικό υλικό, μηχανικά εξαρτήματα πάκτωσης, την ενισχυτική επίστρωση, αποτελούμενη συνήθως από υαλόπλεγμα, καθώς και τα επιχρίσματα βάσης (base coat) και φινιρίσματος (finish coat). Επιπρόσθετα, στη δομή περιλαμβάνονται τρεις στρώσεις κονιαμάτων· μία μεταξύ της τοιχοποιίας – υποστρώματος και του θερμομονωτικού υλικού και δύο εκατέρωθεν της ενισχυτικής επίστρωσης [10]. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μία τυπική δομή συστήματος ETICS.



**Σχήμα 2.4** Τυπική δομή συστήματος ETICS [10]

Επιπλέον, συνήθης είναι η εγκατάσταση ειδικού υποστρώματος, μεταξύ των τοιχωμάτων και του συγκολλητικού κονιάματος. Το υλικό κατασκευής των υποστρωμάτων αυτών ποικίλει και μπορεί να αποτελείται από πλαίσια κόντρα πλακέ, πλάκες προσανατολισμένων σωματιδίων (Oriented Strand Boards - OSB) ή γυψοσανίδες. Όσον αφορά στο θερμομονωτικό υλικό, γίνεται χρήση ως επί το πλείστον αφρωδών πολυμερών, ιδιαίτερα αφρού διογκωμένου πολυστυρένιου (EPS), πάχους 62,5 – 200 mm [5]. Εναλλακτικές λύσεις αποτελούν ο αφρός εξηλασμένου πολυστυρένιου (XPS), ο πολυϊσοκυανικός αφρός (PIR), ο αφρός πολυουρεθάνης (PUR), ο φαινολικός αφρός (PF) και ο ορυκτοβάμβακας. Το πάχος της στρώσης του επιχρίσματος βάσης έχει σύνηθες

εύρος τιμών 1,5 – 6,5 mm [11]. Σε ορισμένες σύγχρονες εγκαταστάσεις ETICS συμπεριλαμβάνονται συστήματα διαχείρισης και αποστράγγισης υδάτων. Στις περιπτώσεις αυτές πραγματοποιείται εγκατάσταση αδιάβροχης μεμβράνης, ενώ παράλληλα δημιουργούνται μικρές κοιλότητες αποστράγγισης μεταξύ της μεμβράνης και της μόνωσης [5]. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μία τυπική κτηριακή πρόσοψη, κατασκευασμένη με σύστημα ETICS.



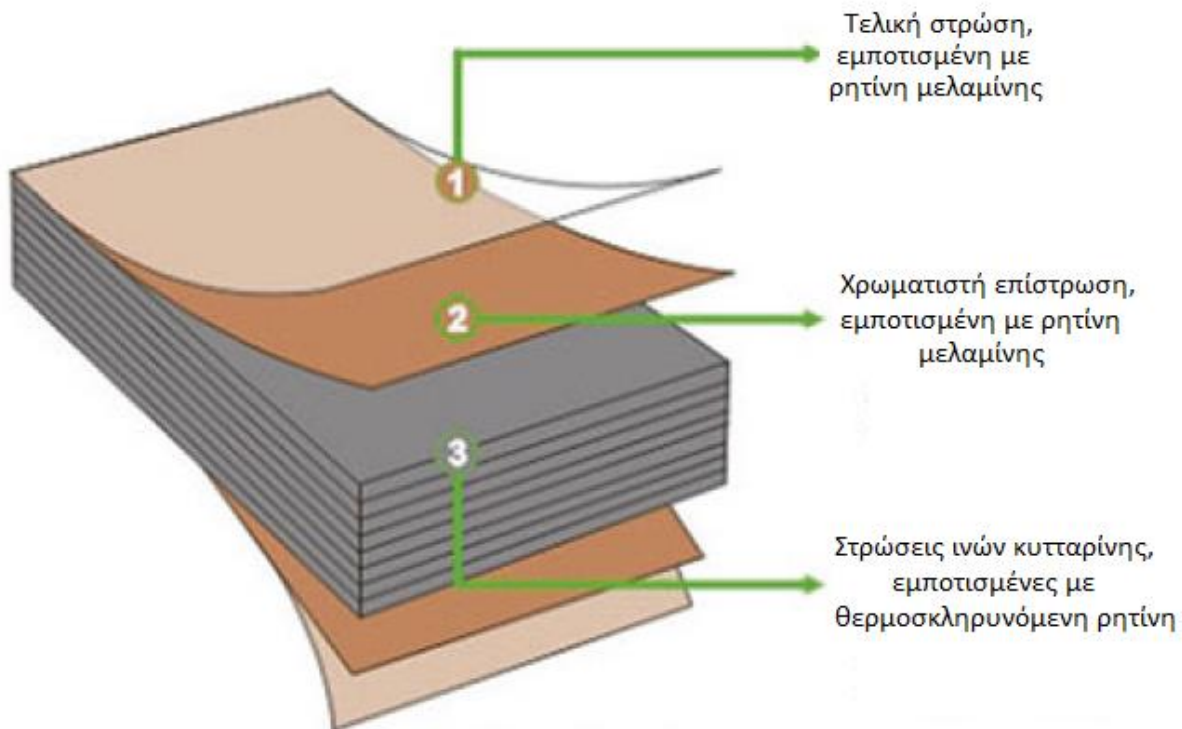
**Σχήμα 2.5** Πρόσοψη κτηρίου, κατασκευασμένη με σύστημα ETICS [12]

Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μεγάλη θερμομονωτική ικανότητα, καθώς μειώνουν τις θερμικές απώλειες στους χώρους εγκατάστασής τους περισσότερο από 50 % [13]. Επιπλέον, σε θερμά κλίματα λειτουργούν και αποτρεπτικά στην εισροή θερμότητας στους εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα τη διατήρηση των θερμοκρασιών σε χαμηλό επίπεδο και τη δημιουργία θερμικής άνεσης, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν τη χρήση επιπρόσθετης κλιματιστικής εγκατάστασης μη απαραίτητη [13]. Παράλληλα, επιδρούν θετικά στα δομικά μέρη των κτηρίων αυξάνοντας την κτηριακή αντοχή, καθώς μετριάζουν τις θερμοκρασιακές μεταβολές των τοιχωμάτων [13].

### 2.2.3 Πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL)

Τα πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (High Pressure Laminates - HPL), εξωτερικής χρήσης, αποτελούνται από στρώσεις ινών κυτταρίνης, σε περιεκτικότητα 60-70%, εμποτισμένων με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως η φαινολική, σε περιεκτικότητα 30-40%. Επιπλέον, διαθέτουν ένα ή περισσότερα χάρτινα, διακοσμητικά επιφανειακά στρώματα, τα οποία συμπιέζονται με τα εσωτερικά των πλαισίων υλικά, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (140 - 150 °C) και πίεσης, συνήθως μεγαλύτερης των 7 MPa [14]. Οι κατασκευαστικές συνθήκες αυτές, είναι απαραίτητες για τη διαδικασία της θερμοσκληρυνόμενης, πολυμερικής συμπύκνωσης της ρητίνης [5], η οποία δημιουργεί ένα σταθερό, αδρανές, μη πορώδες και ομοιογενές υλικό υψηλής πυκνότητας ( $\geq 1350 \text{ kg/m}^3$ ), το οποίο διαθέτει φυσικές και χημικές ιδιότητες, διαφορετικές των αρχικών

υλικών [14]. Αναλυτικότερα, η τυπική δομή των HPL συνίσταται από την επικαλυπτική - τελική στρώση, εμποτισμένη με ρητίνη μελαμίνης, την χρωματιστή επίστρωση, επίσης εμποτισμένη με ρητίνη μελαμίνης και τον πυρήνα, αποτελούμενο από στρώσεις ιών κυτταρίνης (kraft paper), εμποτισμένων με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Η τελική στρώση προσδίδει στο πλαίσιο προστασία από τριβές και αμυχές, ενώ η χρωματιστή επίστρωση το επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα. Το συνολικό πάχος των πλαισίων ποικίλει, από τα 3 mm έως και τα 14 mm, ενώ η εγκατάστασή τους πραγματοποιείται, ως επί το πλείστον, μπροστά από ήδη υπάρχοντα εξωτερικά, κτηριακά τοιχώματα, με τη βοήθεια μεταλλικών αυλακώσεων, στις οποίες και πακτώνονται με κοχλίες ή πριτσίνια [5]. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η τυπική δομή των πολυστρωματικών πλαισίων υψηλής πίεσης.



**Σχήμα 2.6** Τυπική δομή πολυστρωματικού πλαισίου υψηλής πίεσης (HPL) [5]

Η χρήση των HPL, πέραν της επένδυσης προσόψεων, καλύπτει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, τόσο σε εσωτερικούς, όσο και σε εξωτερικούς χώρους, όπως διαμόρφωση εσωτερικών χώρων (διαίρεση δωματίων, πατώματα, οροφές), δημιουργία κουφωμάτων, σημάτων και σκιάστρων. Στο Σχήμα 2.7 παρατίθεται κτηριακή πρόσοψη, αποτελούμενη από HPL.

Αίτια της πολύπλευρης και διαχρονικής χρήσης τους, η οποία ξεκίνησε την δεκαετία του 1950 στις ΗΠΑ [14], αποτελούν η στιβαρή και άκαμπτη αλλά ταυτόχρονα ελαφριά κατασκευή τους, η θερμομονωτική τους ικανότητα, η αντίστασή τους σε καιρικά φαινόμενα (ήλιος, βροχή, αέρας), η υψηλή διάρκεια ζωής τους αλλά και η πληθώρα σχεδιαστικών δυνατοτήτων που παρέχουν. Τέλος, στο ενδεχόμενο εγκατάστασής τους σε υπόστρωμα ξυλείας, αποτρέπουν την εκπομπή φορμαλδεΐδης και άλλων πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds – VOCs), προερχόμενων από τα

προκείμενα υποστρώματα, λόγω της πολύ χαμηλής διαπερατότητας που παρουσιάζουν. Στο Σχήμα 2.8 παρατίθενται ποικίλα πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης.



**Σχήμα 2.7** Κτηριακή πρόσοψη, αποτελούμενη από HPL [15]



**Σχήμα 2.8** Πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL) [16]

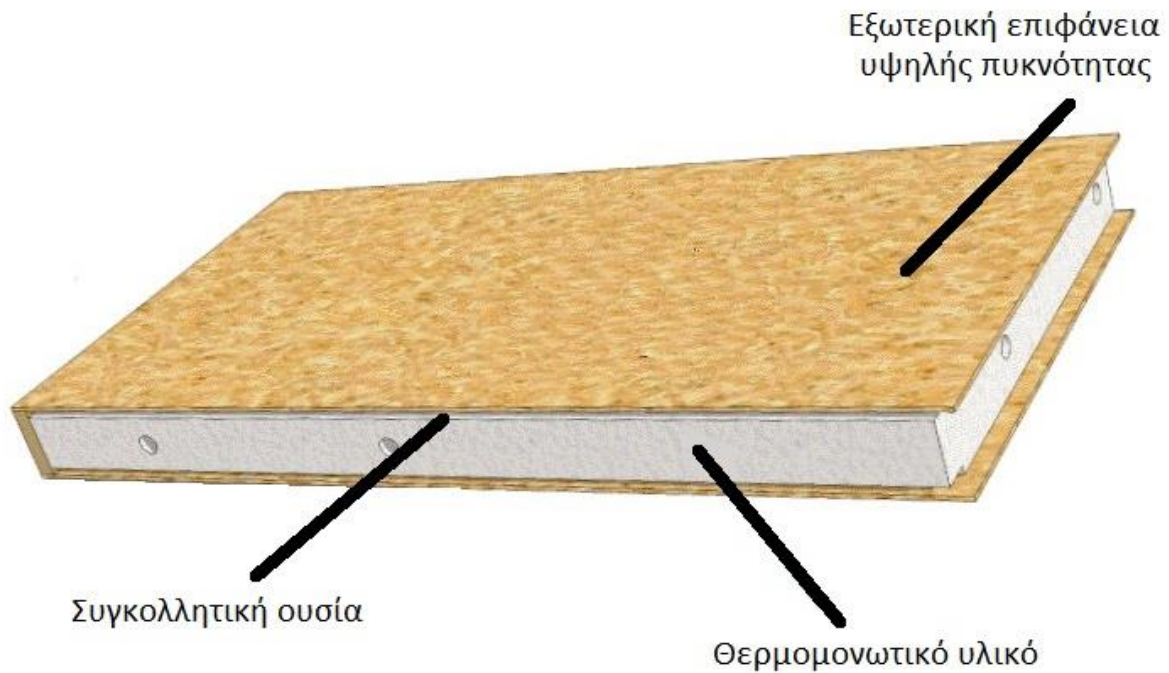
#### 2.2.4 Δομικά μονωτικά πλαίσια (SIPs)

Τα δομικά μονωτικά πλαίσια (Structural Insulation Panels – SIPs) ή μονωτικά πλαίσια τύπου «Sandwich» (Insulated Sandwich Panels), αποτελούνται από δύο επιφάνειες υψηλής πυκνότητας, οι οποίες εσωκλείουν μία στρώση θερμομονωτικού υλικού χαμηλής πυκνότητας. Βασική τους διαφορά με άλλες μεθόδους μόνωσης προσόψεων, συνιστά το γεγονός ότι ως επί το πλείστον δεν εγκαθίστανται σε προϋπάρχον κτηριακό υπόστρωμα, αλλά αυτούσια, δρώντας παράλληλα ως τοιχώματα και ως πάροχος θερμομόνωσης.

Η κατασκευή των εξωτερικών επιφανειών δύναται να πραγματοποιηθεί με ένα μεγάλο εύρος υλικών και ως εκ τούτου, η κατηγοριοποίηση των πλαισίων πραγματοποιείται με βάση τη σύσταση των υλικών αυτών, σε μεταλλικά και μη μεταλλικά [5]. Τα μεταλλικά δομικά μονωτικά πλαίσια αποτελούνται συνήθως από φύλλα χάλυβα, πάχους 0,4 – 0,6 mm. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα SIPs διαθέτουν μη μεταλλικές εξωτερικές επιφάνειες, αποτελούμενες κατά κύριο λόγο από πλάκες προσανατολισμένων σωματιδίων (Oriented Strand Board – OSB), αλλά και από άλλα προϊόντα ξυλείας, όπως κόντρα πλακέ, ινοσανίδες μέσης πυκνότητας (Medium Density Fibreboard – MDF) και μοριοσανίδες τσιμέντου (Cement Bonded Particle Board - CBPB). Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο Ηνωμένο Βασίλειο, υπολογίστηκε ότι το 93% των παραγόμενων δομικών μονωτικών πλαισίων της χώρας διαθέτουν OSB ως εξωτερική επιφάνεια [17]. Επιπροσθέτως, η θερμομόνωση μπορεί να αποτελείται από πολυάριθμα υλικά, ως επί το πλείστον αφρώδη πολυμερή, όπως αφρός διογκωμένου πολυστυρένιου (EPS), αφρός εξηλασμένου πολυστυρένιου (XPS), αφρός πολουρεθάνης (PUR), πολυϊσοκυανικός αφρός (PIR), φαινολικός αφρός (PF), αλλά και από συνδυασμό διογκωμένου πολυστυρένιου με φαινολικό αφρό ή ορυκτοβάμβακα [17]. Παράλληλα, μεταξύ της θερμομόνωσης και των εξωτερικών επιφανειών, παρεμβάλλονται συγκολλητικές ουσίες, όπως οξικό πολυβινύλιο (Polyvinyl Acetate – PVA), καθώς και πληθώρα άλλων ακρυλικών, φαινολικών και εποξειδικών ενώσεων [17]. Το συνολικό πάχος των δομικών μονωτικών πλαισίων έχει εύρος από 50 mm έως και 200 mm [5]. Στο Σχήμα 2.9 παρατίθεται η τυπική δομή ενός δομικού μονωτικού πλαισίου.

Τα SIPs με μεταλλική εξωτερική επιφάνεια τοποθετούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης τροφίμων, λόγω της υψηλής αντοχής και θερμομονωτικής τους ικανότητας, καθώς και των εύκολα καθαριζόμενων, αδρανών επιφανειών τους. Όσον αφορά στα πλαίσια μη μεταλλικών εξωτερικών επιφανειών, η εγκατάστασή τους προορίζεται συνήθως για κτήρια μικρού ύψους, όπως οικίες και δημόσιες υπηρεσίες, ενώ η χρήση τους, πέραν από θερμομονωτική, εξυπηρετεί και ηχομονωτικές ανάγκες [5].

Τα πλαίσια αυτά προσφέρουν στιβαρή και ταυτόχρονα ελαφριά κτηριακή κατασκευή, παρέχουν υψηλής ποιότητας θερμομόνωση, χαμηλό κόστος και χρόνο εγκατάστασης, ενώ παράλληλα είναι φιλικά προς το περιβάλλον και συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, σημειώθηκε 85% υψηλότερο επίπεδο αεροστεγανότητας σε σύγκριση με παραδοσιακές ξύλινες κτηριακές μονάδες και μείωση του κόστους κατανάλωσης ενέργειας σε ποσοστό 25-50% [18].



**Σχήμα 2.9** Τυπική δομή δομικού μονωτικού πλαισίου (SIP)

Τα πρώτα δομικά μονωτικά πλαίσια δημιουργήθηκαν το 1935 στις ΗΠΑ, ενώ η χρήση αφρώδους πυρήνα σε SIP σημειώθηκε το 1952, θέτοντας τις βάσεις για την οικονομική, μαζική κατασκευή τους και άρα την προσβασιμότητα του ευρέως κοινού σε αυτά, τη δεκαετία του 1960 [18]. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται κτηριακή μονάδα, κατασκευασμένη με δομικά μονωτικά πλαίσια.



**Σχήμα 2.10** Κτηριακή μονάδα, κατασκευασμένη με δομικά μονωτικά πλαίσια (SIPS) [19]

### 2.2.5 Αεριζόμενες προσόψεις (Ventilated façades)

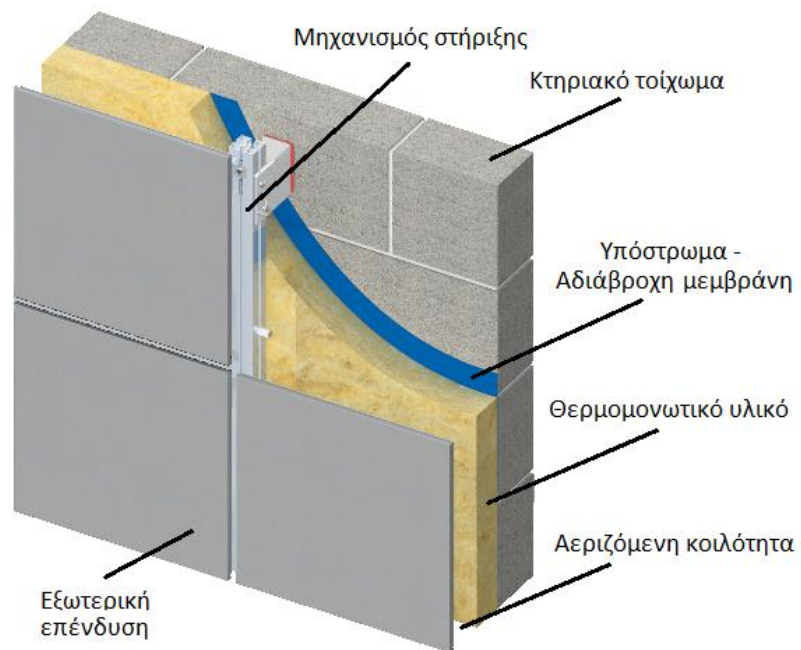
Οι αεριζόμενες προσόψεις (Ventilated Façades ή Rain Screen Cladding – RSC) συνιστούν επιπρόσθετες εξωτερικές επενδύσεις, οι οποίες εγκαθίστανται έμπροσθεν των κτηριακών



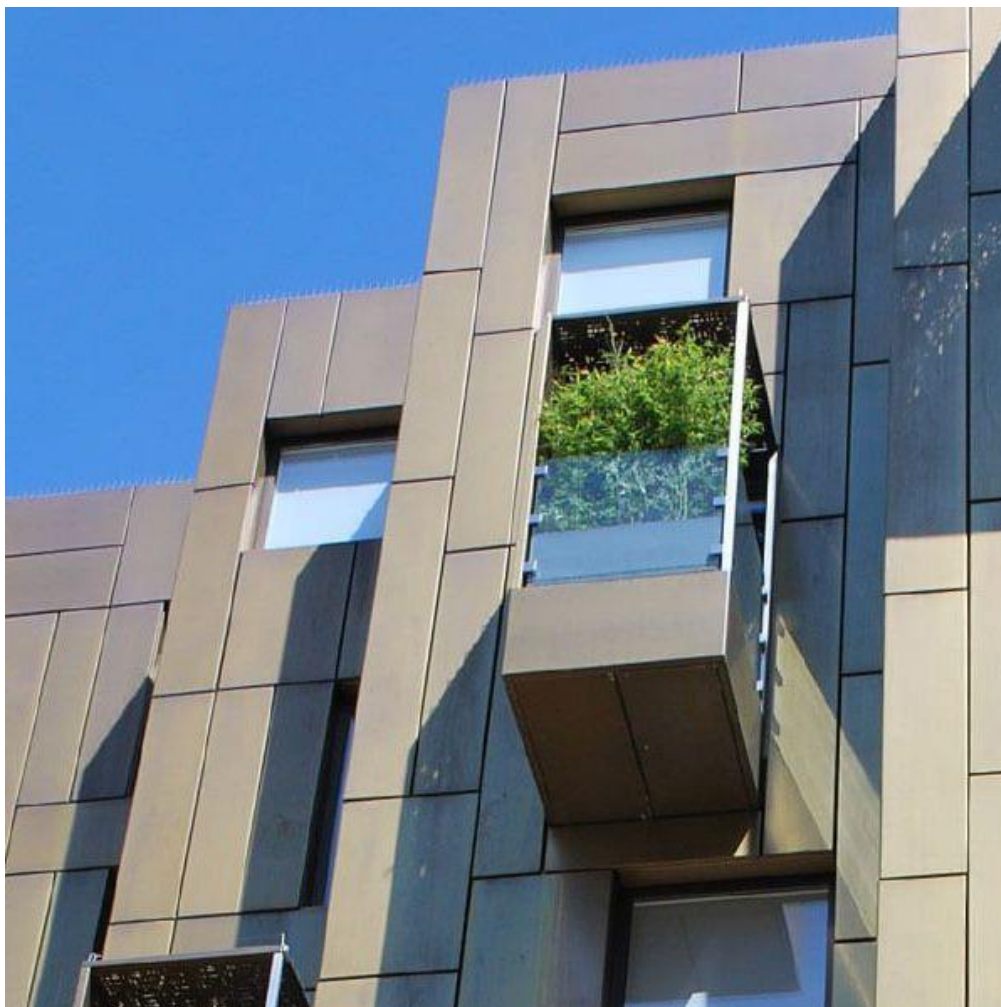
τοιχωμάτων, δημιουργώντας ένα διάκενο αερισμού, μεταξύ της μόνωσης των τοιχωμάτων και των εν λόγω επενδύσεων. Η τοποθέτησή τους δύναται να πραγματοποιηθεί κατά την κατασκευή του κτηρίου, αλλά και σε έτερη χρονική στιγμή, π.χ. στο πλαίσιο ανακαίνισης του κτηριακού κελύφους. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η τυπική δομή μίας αεριζόμενης πρόσοψης. Πιο ενδελεχώς, οι αεριζόμενες προσόψεις απαρτίζονται από τα ακόλουθα επιμέρους στοιχεία:

- i. Το εξωτερικό κτηριακό τοίχωμα, το οποίο μπορεί να είναι συμπαγής τοιχοποιία ή τοίχος από σκυρόδεμα.
- ii. Το υπόστρωμα, αποτελούμενο από γυψοσανίδες, τσιμεντοσανίδες ή προϊόντα ξυλείας, μπροστά από το οποίο τοποθετείται αδιάβροχη μεμβράνη. Η εγκατάσταση υποστρώματος δεν πραγματοποιείται πάντοτε.
- iii. Το θερμομονωτικό υλικό, πακτωμένο μηχανικά ή προσκολλημένο στο υπόστρωμα. Σε περίπτωση μη χρήσης υποστρώματος η πάκτωση πραγματοποιείται στο τοίχωμα. Συνήθης είναι η χρήση υλικών όπως ο φαινολικός αφρός (PF), ο πολυϊσοκυανικός αφρός (PIR), ο αφρός διογκωμένου πολυστυρένιου (EPS), ο αφρός εξηλασμένου πολυστυρένιου (XPS), ο αφρός πολυουρεθάνης (PUR) και ο ορυκτοβάμβακας [5].
- iv. Η αεριζόμενη κοιλότητα μεταξύ του θερμομονωτικού υλικού και της εξωτερικής επένδυσης, πάχους μεγαλύτερου των 25 mm [5].
- v. Ο μηχανισμός στήριξης της εξωτερικής επένδυσης, δηλαδή βραχίονες στήριξης αποτελούμενοι από αλουμίνιο, γαλβανισμένο ή ανοξείδωτο χάλυβα, καθώς και πλαστικά υλικά, ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Οι βραχίονες αυτοί είναι πακτωμένοι μηχανικά στην τοιχοποιία/υπόστρωμα και συγκρατούν την εξωτερική επένδυση διανύοντας την αεριζόμενη κοιλότητα.
- vi. Η εξωτερική επένδυση, η οποία είναι δυνατό να αποτελείται από μια ευρεία ποικιλία υλικών, όπως σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP), πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL), τσιμεντοσανίδες, προϊόντα ξυλείας, μεταλλικά και κεραμικά υλικά [5].

Ο αερισμός των εν λόγω προσόψεων μπορεί να είναι παθητικός, ενεργητικός ή υβριδικός. Ο παθητικός ή φυσικός αερισμός προκύπτει είτε από την ύπαρξη διαφοράς πιέσεων του ανέμου, είτε από την ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασιών μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων του κτηρίου (ελκυσμός). Ο ενεργητικός ή μηχανικός αερισμός οφείλεται στη λειτουργία συστημάτων κυκλοφορίας αέρα (π.χ. ανεμιστήρες). Ο υβριδικός αερισμός περιλαμβάνει και τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους, ενώ κάνει χρήση των συστημάτων κυκλοφορίας αέρα όταν ο παθητικός αερισμός δεν καθίσταται ικανός να επιτύχει την απαιτούμενη απόδοση [11]. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται κτήριο με αεριζόμενη πρόσοψη, αποτελούμενη από σύνθετα πλαίσια αλουμινίου.



**Σχήμα 2.11** Τυπική δομή αεριζόμενης πρόσοψης [20]



**Σχήμα 2.12** Κτήριο με αεριζόμενη πρόσοψη [21]

Η εγκατάσταση αεριζόμενων προσόψεων παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως προστασία έναντι της υγρασίας και της διείδυσης της στο εσωτερικό του κτηρίου, λόγω της ύπαρξης της αεριζόμενης κοιλότητας μεταξύ του κτηρίου και της εξωτερικής επένδυσης, καθώς και της παρουσίας της αδιάβροχης μεμβράνης [22]. Ταυτόχρονα, προσφέρει σημαντική ηχομονωτική και θερμομονωτική δράση, η οποία οφείλεται στο συνδυασμό της προσφερόμενης σκίασης του κτηρίου από την εξωτερική επένδυση, της αυξημένης θερμικής αντίστασης που προσφέρει η κοιλότητα αερισμού, της δράσης του θερμομονωτικού υλικού και της μειωμένης ύπαρξης θερμογεφυρών, δηλαδή σημείων του κελύφους του κτηρίου, τα οποία αποτελούν σημαντικές πηγές θερμικών απωλειών και συναντώνται ως επί το πλείστον σε διεπιφάνειες διαφορετικών δομικών υλικών ή ίδιων δομικών υλικών διαφορετικού πάχους [5]. Παράλληλα, μειώνει την ασκούμενη πίεση, λόγω ανέμων, στα κτηριακά στοιχεία [11], ενώ επιφέρει απόσβεση του υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης, μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρει στο κτήριο [23]. Τέλος, αξίζει να τονιστεί το καινοτόμο αισθητικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση αεριζόμενων προσόψεων.

## 2.3 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

### 2.3.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα κτήρια συνιστούν μια εκ των σημαντικότερων πηγών εκπομπής CO<sub>2</sub> και κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως, όντας υπεύθυνα για το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης του πλανήτη [24]. Στο πλαίσιο της βελτίωσης των περιβαλλοντικών συνθηκών, παροντικών και μελλοντικών, καθώς και της εξοικονόμησης ενέργειας, δημιουργείται η ανάγκη κατασκευής, όσο το δυνατότερο, ενεργειακά ανεξάρτητων κτηρίων. Προς αυτή την κατεύθυνση, γίνεται εμφανής η ανάγκη αξιοποίησης των κτηριακών επιφανειών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενσωματωμένων κτηριακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Building Integrated Photovoltaics – BIPV), η τοποθέτηση των οποίων δύναται να πραγματοποιηθεί σε πολυποίκιλα μέρη του κτηρίου όπως σε οροφές, προσόψεις, φωταγωγούς κ.α. Όσον αφορά στη χρήση ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις, η εγκατάστασή τους ως επί το πλείστον πραγματοποιείται ως εξωτερική επένδυση κρεμαστών προσόψεων (curtain walls), ως ηλιακών υαλοπινάκων (solar glazing), σε συστήματα σκίασης και εν γένει εξωτερικών συστημάτων ειδικού σκοπού, καθώς και ως μέρος προηγμένων κτηριακών κελυφών. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται κτήριο με ενσωματωμένη φωτοβολταϊκή πρόσοψη.



**Σχήμα 2.13** Κτήριο με ενσωματωμένη φωτοβολταϊκή πρόσοψη [25]

### Εξωτερική επένδυση προσόψεων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματώνονται στο κτήριο ως εξωτερική επένδυση σε κρεμαστές προσόψεις ή και σε προσόψεις πιο απλής μορφής. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών.

**Πίνακας 2.1** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αξιοποίηση μεγάλου ποσοστού της εξωτερικής επιφάνειας του κτηρίου για την παραγωγή ενέργειας	Σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης
Συμβολή στην επίτευξη θερμικής άνεσης, μειώνοντας τις εισροές θερμικής ακτινοβολίας από τον ήλιο στο εσωτερικό του κτηρίου κατά τους θερινούς μήνες	Ενδεχόμενη χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας, συγκριτικά με αντίστοιχη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στη οροφή του κτηρίου, λόγω των γωνιών πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα πλαίσια
Εξισορρόπηση μεταξύ του φυσικού φωτισμού και της σκίασης του κτηρίου κατά τη διάρκεια της ημέρας	Πολύπλοκη μελέτη και σχεδιασμός
Συμβολή στην αναβάθμιση της αισθητικής του κτηρίου, προσφέροντας καινοτόμο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό	Απαιτήση ιδιαίτερης προσοχής, ώστε να μην προκληθεί παρεμπόδιση της ορατότητας λόγω ηλεκτρικών καλωδίων

Επιπροσθέτως, η χρήση των φωτοβολταϊκών δύναται να επεκταθεί εγκαθιστώντας τα ως διαφανή ή ημιδιαφανή (αναλόγως της διαφάνειας των πλαισίων) μέρη της πρόσοψης,

ενσωματώνοντάς τα σε παράθυρα. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εν λόγω χρήσης τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ως παράθυρα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αξιοποίηση των ανοιγμάτων του κτηρίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Δυνητική εμφάνιση χαμηλότερης αποδοσης
Μείωση των εισερχόμενων ακτινών φωτός και σκίαση του εσωτερικού χώρου	Χαμηλή απορρόφηση ηλιακής ενέργειας, λόγω της μειωμένης πυκνότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων
Ορισμένα ειδικά διαμορφωμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια διαθέτουν θερμομονωτικά στοιχεία	

Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να ενσωματωθούν σε στοιχεία εξωτερικά του κτηρίου, όπως σε εξώστες (μπαλκόνια) και στηθαία μεταξύ ορόφων, ή να τοποθετηθούν ως σκίαστρα ή ως ηχομονωτική επένδυση. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αποφέρει η εγκατάστασή τους σε ανάλογες περιπτώσεις.

**Πίνακας 2.3** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εξωτερικά συστήματα ειδικού σκοπού

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μείωση της εισροής θερμότητας στο εσωτερικό του κτηρίου	Ενδεχόμενος ανομοιόμορφος φωτισμός στο εσωτερικό του κτηρίου
Μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων του κτηρίου	Παραμπόδιση της ορατότητας προς τον εξωτερικό χώρο, εφόσον τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι αδιαφανή
Σκίαση των ανοιγμάτων του κτηρίου	

Τέλος, η χρήση ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών δύναται να πραγματοποιηθεί σε κτίρια τα οποία διαθέτουν προηγμένα εξωτερικά κελύφη, όπως προσόψεις διπλού κελύφους (double skin facades), προσόψεις ενεργού κελύφους (active skin facades), καθώς και να ενσωματωθούν σε κινούμενα στοιχεία προσόψεων. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που περιλαμβάνει η τοποθέτησή τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προηγμένα κτηριακά κελύφη

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δυνατότητα συνεργασίας των φωτοβολταϊκών με άλλα στοιχεία του κτηρίου για αύξηση της απόδοσης και της αισθητικής του	Μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης συγκριτικά με άλλες χρήσεις των φωτοβολταϊκών
Παραγωγή θερμότητας κατά τους χειμερινούς μήνες, παρεχόμενη στο εσωτερικό του κτηρίου	Ενδεχόμενη ανάγκη μείωσης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κατά τους θερινούς μήνες
Υψηλής ποιότητας αισθητικό αποτέλεσμα	

### Δυναμικά φωτοβολταϊκά συστήματα προσόψεων

Εξετάζοντας τη συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων, καθίσταται σαφές ότι προσφέρουν σημαντικά ενεργειακά και σχεδιαστικά πλεονεκτήματα στο κτήριο. Παρόλα αυτά η χρήση ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, ως επί το πλείστον περιορίζεται στην οροφή του κτηρίου, καθώς η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο εν λόγω σημείο επιφέρει σημαντικά μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις, η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για ενεργειακή επάρκεια των κτηρίων οδηγεί στην αξιοποίηση και άλλων περιοχών του κτηρίου, πέραν της οροφής, με πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα τις προσόψεις. Μία λύση στο πρόβλημα της σχετικά χαμηλής ενεργειακής απόδοσης αυτών των συστημάτων προσόψεων μπορούν να δώσουν τα δυναμικά ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα προσόψεων. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην επιπλέον δυνατότητά τους να κινούνται – περιστρέφονται, κατά τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνουν καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και διαχείριση του εισερχόμενου στο κτήριο φωτός - σκίαση του κτηρίου. Σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σημειώνεται αύξηση παραγωγή ενέργειας έως και 40% και μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου έως και 50% συγκριτικά με αντίστοιχες εγκαταστάσεις στατικών συστημάτων [26]. Βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών παραμένει η τεχνική πολυπλοκότητα τους και ιδιαίτερα των μηχανισμών ανίχνευσης – ενεργοποίησης ηλιακού φωτός τους οποίους περιλαμβάνουν, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής τους. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται κτήριο το οποίο διαθέτει δυναμικό φωτοβολταϊκό σύστημα πρόσοψης.



**Σχήμα 2.14** Κτήριο με δυναμικό φωτοβολταϊκό σύστημα πρόσοψης [26]

### 2.3.2 Ηλιοθερμικά συστήματα

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας τόσο με τη μορφή φωτοβολταϊκών, όσο και ηλιοθερμικών συστημάτων, αποτελεί μακροχρόνια λύση στο πλαίσιο της παραγωγής ενέργειας σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Αναλυτικότερα, τα ηλιοθερμικά συστήματα διαθέτουν σημαντικά υψηλή απόδοση, δύο με τέσσερις φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά, ενώ η παραγωγή τους πραγματοποιείται μαζικά, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα συμφέροντα στη χρήση [27]. Με την ηλιακή ενέργεια να αποτελεί έναν εκ των σημαντικότερων ανανεώσιμων πόρων στον πλανήτη, η επέκταση της χρήσης τους καθίσταται αναγκαία, όσο η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> μεγαλώνει σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό, πιθανή λύση αποτελούν τα ενσωματωμένα κτηριακά ηλιοθερμικά συστήματα (Building Integrated Solar Thermal – BIST), τα οποία χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη εσωτερικών χώρων, παροχή ζεστού νερού χρήσης και παραγωγή ενέργειας, ενώ επιπρόσθετα προσφέρουν θερμομόνωση, σκίαση και σχεδιαστική αναβάθμιση στο κτήριο. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται κτήριο με ενσωματωμένο ηλιοθερμικό σύστημα.



**Σχήμα 2.15** Κτήριο με ενσωματωμένο ηλιοθερμικό σύστημα [28]

Τα συστήματα αυτά κατηγοριοποιούνται με βάση το μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούν και κατά συνέπεια παρουσιάζουν ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 2.5.

**Πίνακας 2.5** Κατηγοριοποίηση ενσωματωμένων κτηριακών ηλιοθερμικών συστημάτων με βάση το μέσο μεταφοράς θερμότητας

Κατηγορία – Μέσο μεταφοράς θερμότητας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αέρας	Χαμηλό κόστος	Χαμηλή θερμοχωρητικότητα
	Δεν προκαλείται πήξη ή βρασμός	Χαμηλή απόδοση
	Δεν προκαλείται διάβρωση	Πιθανή εμφάνιση διαρροών και θορύβου
	Απλή δομή	Μεγάλος όγκος και βάρος κατασκευής
Νερό	Χαμηλό κόστος	Πιθανή κατακράτηση αλάτων
	Σχεδόν αδιάκοπη παραγωγή ενέργειας	Πιθανή εμφάνιση διαρροών, διάβρωσης και ψύξης
	Μη τοξικό	
	Καλή λύση για εγκατάσταση σε κλίματα χαμηλής θερμοκρασίας	Πιθανή υπερθέρμανση – Ασταθής απόδοση αφαίρεσης θερμότητας
Ψυκτικό υγρό	Μικρός όγκος κατασκευής και υγρού	Υψηλό κόστος
	Ταχεία απόκριση σε αλλαγή καιρικών συνθηκών	Μη ισορροπημένη κατανομή υγρού
	Χαμηλή λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εφόσον χρησιμοποιούνται CFCs
	Σταθερά υψηλή απόδοση	Ανάγκη αναπλήρωσης υγρών
Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)	Επίτευξη σημαντικής θερμικής άνεσης	Περίπλοκη συμπεριφορά υλικών
	Μικρός όγκος	Απαιτητική συντήρηση - λειτουργία

Αναφορικά με τα ενσωματωμένα ηλιοθερμικά συστήματα, η χρήση τους σε προσόψεις περιλαμβάνει την τοποθέτησή τους ως επενδύσεις εξωτερικών τοιχωμάτων και μπαλκονιών, καθώς και την ενσωμάτωσή τους σε ανοίγματα. Πιο αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά των επιμέρους αυτών περιπτώσεων αναδεικνύονται στον Πίνακα 2.6.



**Πίνακας 2.6** Χαρακτηριστικά ενσωματωμένων ηλιοθερμικών συστημάτων με βάση την τοποθεσία εγκατάστασής τους

Τοποθεσία εγκατάστασης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εξωτερική επένδυση πρόσοψης	Σχετικά οικονομική και ιδιαίτερα αποδοτική επένδυση	Κόστη καθαρισμού και συντήρησης
	Βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας του κτηρίου	Δημιουργία θερμογεφυρών
	Μεγάλη επιφάνεια συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας	Κίνδυνος συμπύκνωσης του μέσου μεταφοράς θερμότητας
	Δυνατότητα εγκατάστασης του συστήματος σε προϋπάρχουσα πρόσοψη	Απαιτείται κατασκευή υποστηριγμάτων λόγω του επιπρόσθετου στατικού φορτίου
	Μείωση των καταπονήσεων της προϋπάρχουσας πρόσοψης λόγω καιρικών συνθηκών	Απαιτείται υψηλή ποιότητα κατασκευής και τοποθέτησης των ηλιοθερμικών στοιχείων για την αποδοτικότητα και ασφάλειά τους
Ανοίγματα πρόσοψης	Ρύθμιση του εισερχόμενου ηλιακού φωτός – Σκίαση των εσωτερικών χώρων	Σημαντική μείωση του εισερχόμενου φωτός, εφόσον δεν γίνει ορθή μελέτη - εγκατάσταση
	Δυνατότητα εγκατάστασης προκατασκευασμένων συστημάτων	Κίνδυνος μείωσης του χρόνου ζωής των ηλιοθερμικών πλαισίων, λόγω διαρροών νερού και υψηλών θερμοκρασιών
	Διατήρηση του χρόνου ζωής των ηλιοθερμικών πλαισίων, εφόσον τοποθετούνται εντός διπλών υαλοπινάκων	
Μπαλκόνια	Ευκολία καθαρισμού και συντήρησης	Απαιτείται κατασκευή υποστηριγμάτων λόγω του επιπρόσθετου στατικού φορτίου
	Ευκολία εγκατάστασής σε προϋπάρχουσα διάταξη	
	Παροχή σκίασης	Απαιτείται υψηλή ποιότητα κατασκευής και τοποθέτησης των ηλιοθερμικών στοιχείων για την αποδοτικότητα και ασφάλειά τους
	Δυνατότητα εγκατάστασης προκατασκευασμένων συστημάτων	

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Φωτιά σε συστήματα προσόψεων

#### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Οι φωτιές σε συστήματα προσόψεων αποτελούν κίνδυνο ιδιάζουσας σημασίας για μια κτηριακή δομή, τόσο για την ασφάλεια των ανθρώπων που παρευρίσκονται σε αυτήν, όσο και για το μεγάλο μέγεθος των υλικών ζημιών που συνήθως προκαλείται σε ενδεχόμενη εκδήλωση τέτοιου είδους πυρκαγιών. Μολονότι οι παρευρισκόμενοι δεν κινδυνεύουν άμεσα από τις φλόγες στο εξωτερικό του κτηρίου, ο κίνδυνος έγκειται στο γεγονός ότι η μετάδοση της φωτιάς δύναται να πραγματοποιηθεί με μεγάλη ταχύτητα, εξωτερικά, από όροφο σε όροφο, εισχωρώντας παράλληλα στους εσωτερικούς χώρους, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη σωματική ακεραιότητα των παρευρισκόμενων. Επιπροσθέτως, η εκδήλωση φωτιάς σε προσόψεις, πέραν των εξωτερικών υλικών ζημιών που προκαλεί, είναι ικανή να προσβάλει τα δομικά κτηριακά στοιχεία, ακόμα και να οδηγήσει στην ολοκληρωτική παράδοση του κτηρίου στις φλόγες. Η καταστροφική δυνατότητα του φαινομένου είναι ιδιαίτερα εμφανής σε κτήρια μεγάλου ύψους, με πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα την πυρκαγιά στο κτήριο Grenfell Tower στο Λονδίνο το 2017. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι φυσικοί μηχανισμοί που διέπουν την έναυση και τη μετάδοση της φωτιάς σε προσόψεις, περιστατικά ανάλογων πυρκαγιών των τελευταίων χρόνων, καθώς και συμπεράσματα πειραματικών μελετών και υπολογιστικών προσομοιώσεων από τη βιβλιογραφία.

#### 3.2 Φυσικοί μηχανισμοί

Η έναυση της φωτιάς σε συστήματα προσόψεων, καθώς και η διάδοσή της σε αυτά, ακολουθεί συγκεκριμένους φυσικούς μηχανισμούς, οι βασικοί εκ των οποίων παρουσιάζονται στο παρόν υποκεφάλαιο.

##### 3.2.1 Μηχανισμοί έναυσης

Η έναυση της πυρκαγιάς σε προσόψεις πραγματοποιείται κατ' εξοχήν με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- i. Πυρκαγιά σε εσωτερικό χώρο του κτηρίου η οποία εξαπλώνεται στην πρόσοψη μέσω ανοιγμάτων, κατά κύριο λόγο κουφωμάτων, αλλά και άλλου είδους κοιλοτήτων, όπως οπών και ρωγμών στο κέλυφος του κτηρίου. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στις φλόγες και στα θερμά αέρια να μεταβούν στο εξωτερικό του κτηρίου και να προκαλέσουν ανάφλεξη του συστήματος πρόσοψης. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται φλόγες εξερχόμενες από ανοίγματα σε πρόσοψη κτηρίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον δεν υπάρξει έγκαιρη κατάσβεση της πυρκαγιάς στον φλεγόμενο εσωτερικό χώρο, τότε το φαινόμενο μπορεί να περάσει στη φάση της καθολικής ανάφλεξης πυρκαγιάς (flashover). Γενεσιουργός αιτία της καθολικής ανάφλεξης είναι η επαρκής ποσότητα πυροθερμικού φορτίου (καύσιμης ύλης) και

οξυγόνου, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει ταχύτατα μια σχετικά μικρή φωτιά σε πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά, καθώς πραγματοποιείται ανάφλεξη των εύφλεκτων προϊόντων της πυρόλυσης, λόγω της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.1** Φλόγες εξερχόμενες από παράθυρο [29]

Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό όταν η θερμοκρασία κάτω από την οροφή αγγίζει τους  $600^{\circ}\text{C}$ , όταν σημειώνεται θερμοροή ακτινοβολίας μεγαλύτερη των  $20 \text{ kW/m}^2$ , ή οπτικά όταν οι φλόγες εξέρχονται από τα ανοίγματα του κτηρίου [30]. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο, η φωτιά αφότου προκαλέσει θραύση των υαλοπινάκων του δωματίου μπορεί να επεκταθεί στην κτηριακή πρόσοψη, με φλόγες που μπορούν να φτάσουν μέχρι και 5 m πάνω από την κορυφή του ανοίγματος, ανεξαρτήτως του συστήματος πρόσοψης και των υλικών από το οποίο αυτό αποτελείται [10]. Παρόλα ταύτα, η διάδοση της πυρκαγιάς στο εξωτερικό του κτηρίου καθίσταται δυνατή, αν και σαφώς λιγότερο πιθανή, και πριν τη φάση της καθολικής ανάφλεξης [5]. Οι πυρκαγιές προερχόμενες από ανάφλεξη εσωτερικού χώρου του κτηρίου είναι συνηθώς οι πιο επικίνδυνες σε σύγκριση με τις επόμενες δύο κατηγορίες, ενώ όσον αφορά στο σύνολο των πυρκαγιών σε προσόψεις είναι στατιστικά οι πιο συχνές [5].

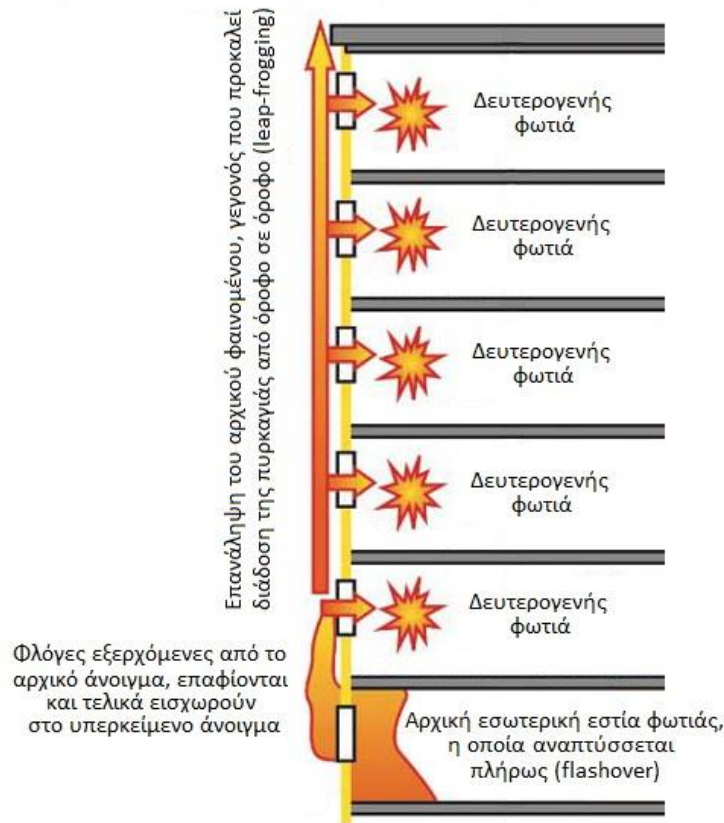
- ii. Πυρκαγιά προερχόμενη από εξωτερική εστία προσκείμενη στην πρόσοψη. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς στην πρόσοψη σε αυτό το ενδεχόμενο οφείλεται σε ακτινοβολία εκπεμπόμενη από την εστία της φωτιάς, σε συναγωγή, λόγω της πρόσπτωσης φλογών και θερμών αερίων στην πρόσοψη, καθώς και σε πιθανή ύπαρξη φλεγόμενων ιπτάμενων σωματιδίων προερχομένων από την εστία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εν δυνάμει εστιών φωτιάς αποτελούν κάδοι απορριμμάτων και σταθμευμένα αυτοκίνητα σε εισόδους κτηρίων, έπιπλα, ψησταριές και εύφλεκτα αντικείμενα σε μπαλκόνια. Η ένταση της πυρκαγιάς καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το παρεχόμενο θερμικό φορτίο [31].

- iii. Πυρκαγιά προερχόμενη από γειτονικό, σε απόσταση κτήριο. Στην περίπτωση αυτή η ανάφλεξη της πρόσοψης οφείλεται σε θερμότητα μεταδιδόμενη μέσω ακτινοβολίας από το ήδη φλεγόμενο γειτονικό κτήριο. Επιπλέον, εφόσον ίπτανται στο χώρο φλεγόμενα σωματίδια τα οποία κατευθύνονται προς την πρόσοψη, αυξάνεται η πιθανότητα ανάφλεξής της. Ωστόσο, η παρουσία των σωματιδίων αυτών επιδρά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τη ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, όσον αφορά στο ενδεχόμενο ανάφλεξης. Παράλληλα η πραγμάτωση καθώς και η ένταση του φαινομένου επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της αρχικής εστίας και της απόστασης του φλεγόμενου κτηρίου με το εν δυνάμει αναφλέξιμο σύστημα πρόσοψης. Οι πυρκαγιές που μπορούν να προκύψουν στην περίπτωση αυτή είναι κατά κύριο λόγο ηπιότερες, ενώ μπορούν να συγκριθούν με πυρκαγιές οι οποίες έχουν προκληθεί από τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, μόνο εφόσον τα γειτονικά κτήρια βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση και η ένταση της φωτιάς είναι εξαιρετικά μεγάλη [31].

### 3.2.2 Μηχανισμοί εξάπλωσης της φωτιάς στην πρόσοψη

Πέραν της αρχικής ανάφλεξης των συστημάτων προσόψεων, η εξάπλωση της πυρκαγιάς σε αυτά ακολουθεί ως επί το πλείστον έναν ή περισσότερους εκ των ακόλουθων μηχανισμών:

- i. Διάδοση της πυρκαγιάς από όροφο σε όροφο. Οι φλόγες στο εσωτερικό του κτηρίου θραύουν τους υαλοπίνακες στα εξωτερικά ανοίγματα του κτηρίου, συνήθως μετά την καθολική ανάφλεξη της πυρκαγιάς. Εν συνεχεία η φωτιά διαδίδεται ανοδικά στην πρόσοψη απ' όπου εισέρχεται στο επόμενο επίπεδο του κτηρίου επίσης μέσω εξωτερικών ανοιγμάτων και προχωρά στην καύση των χώρων στους οποίους εισέρχεται. Το φαινόμενο αυτό (leap-frogging), εφόσον δεν υπάρξει έγκαιρη αντιμετώπισή του, μπορεί να επαναλαμβάνεται από όροφο σε όροφο, δημιουργώντας πληθώρα δευτερογενών εστιών, γεγονός το οποίο το καθιστά ιδιαίτερος επικίνδυνος, ειδικά για πολυώροφες κατασκευές. Στο Σχήμα 3.2 αναπαρίσταται το φαινόμενο leap-frogging. Παράλληλα οι εξερχόμενες φλόγες από τα ανοίγματα αποτελούν πιθανή εστία ανάφλεξης γειτονικών κτηρίων. Έχει παρατηρηθεί ότι πυρκαγιές προσόψεων με εστία που προέρχεται από εσωτερικό χώρο, οι οποίες ακολουθούν τον εν λόγω μηχανισμό διάδοσης σε συνθήκες μετά την καθολική ανάφλεξη, αποτελούν μεγαλύτερο κίνδυνο συγκριτικά με πυρκαγιές εξωτερικής έναυσης [5]. Παρόλα αυτά, πυρκαγιές οι οποίες οφείλονται σε ανάφλεξη εξωτερικού του κτηρίου χώρου δύναται να προκαλέσουν αντίστοιχες ή και περισσότερο επιζήμιες καταστάσεις, εφόσον προκύψει ανάφλεξη αντικειμένων ή χώρων προσκειμένων στο κτήριο τα οποία περιέχουν καύσιμα (π.χ. δεξαμενές πετρελαίου, σταθμευμένα αυτοκίνητα) [5].
- ii. Εξάπλωση της πυρκαγιάς πάνω στην εξωτερική επιφάνεια της πρόσοψης. Η φωτιά μπορεί να διαδοθεί στο εξωτερικό του κτηρίου, ως επί το πλείστον κατακόρυφα, αναφλέγοντας τα επιμέρους στοιχεία της πρόσοψης, με το φαινόμενο να εντείνεται όσο μεγαλώνει η αναφλεξιμότητα των υλικών που την απαρτίζουν.



**Σχήμα 3.2** Αναπαράσταση του φαινομένου *leap-frogging* [32]

- iii. Διάδοση της πυρκαγιάς σε εσωτερικές αεριζόμενες κοιλοότητες ή σε συστήματα μόνωσης. Σε συστήματα προσόψεων τα οποία διαθέτουν κοιλοότητες στο εσωτερικό τους καθίσταται δυνατό, εφόσον οι φλόγες διεισδύσουν στο εσωτερικό τμήμα της μόνωσης, να υπάρξει εξάπλωση της φωτιάς μέσω των κοιλοτήτων αυτών. Στην προκείμενη κατάσταση η μετάδοση της πυρκαγιάς πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα, καθώς λόγω του αερισμού και του κατακόρυφου προσανατολισμού των κοιλοτήτων λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ελκυσμού, κατά το οποίο φλόγες και θερμά αέρια κατευθύνονται ανοδικά. Χαρακτηριστική περίπτωση συστημάτων πρόσοψης στα οποία είναι ικανό να προκύψει το φαινόμενο αυτό, αποτελούν οι αεριζόμενες προσόψεις (*ventilated façades*). Ο ίδιος μηχανισμός παρατηρείται και σε άλλου τύπου κατακόρυφες κοιλοότητες όπως σε φρεάτια ανελκυστήρων και σε φωταγωγούς. Αναφορικά με συστήματα μόνωσης τα οποία διαθέτουν εύφλεκτο θερμομονωτικό υλικό στο εσωτερικό τους, αυτό υπό την επίδραση της φωτιάς ρευστοποιείται και αναφλέγεται, ενώ παράλληλα μεταδίδει τη φλόγα σε όλη την έκτασή του.
- iv. Ισχυρή θερμοροή προς το σύστημα πρόσοψης, η οποία προκαλεί αλλοιώσεις στη μη εύφλεκτη εξωτερική επένδυση ή ακόμα και διαχωρισμό της από τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην εισχώρηση της φωτιάς στο εσωτερικό του συστήματος, ρευστοποιώντας και αναφλέγοντας εν συνεχεία την εύφλεκτη μόνωση, με αποτέλεσμα τελικά τη μετάδοση της πυρκαγιάς σε όλη την έκταση του εσωτερικού του συστήματος.

- v. Πτώση φλεγόμενων αντικειμένων και συντριμμιών δύναται να οδηγήσει σε πρόκληση μεταγενέστερων εξωτερικών εστιών φωτιάς σε χαμηλότερους ορόφους, στην πλειονότητα των περιπτώσεων στο επίπεδο του εδάφους.

### 3.3 Μελέτη περιστατικών

#### 3.3.1 Grenfell Tower, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο, 2017

Ο πύργος Grenfell ύψους 67 m, αποτελούμενος από 24 ορόφους και συνολικού αριθμού διαμερισμάτων 129, ήταν κτήριο οικιστικής χρήσης, ευρισκόμενο στην περιοχή Κένσινγκτον του δυτικού Λονδίνου. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1974, ωστόσο το 2016 ανακαινίστηκε και μεταξύ άλλων πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση νέας εξωτερικής επένδυσης, αντικατάσταση των κουφωμάτων και των συστημάτων θέρμανσης, καθώς και επανασχεδιασμός των πρώτων τεσσάρων ορόφων [33]. Αναλυτικότερα, η ανακαίνιση της πρόσοψης περιλάμβανε την τοποθέτηση θερμομόνωσης και συγκεκριμένα πλακών πολυϊσοκυανικού αφρού (PIR) μπροστά από την ήδη υπάρχουσα πρόσοψη οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση σύνθετων πλαισίων αλουμινίου (ACP) πάχους 3 mm ως εξωτερική επένδυση, τα οποία στο εσωτερικό τους περιείχαν πολυαιθυλένιο (PE) ως θερμομονωτικό υλικό. Η τοποθέτηση της εξωτερικής επένδυσης έγινε σε απόσταση 150 mm από τις πλάκες PIR, δημιουργώντας μια αεριζόμενη κοιλοότητα αντίστοιχου πάχους. Τέλος έγινε εγκατάσταση διπλών υαλοπινάκων (double-glazed windows) οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο ίδιο επίπεδο με τις πλάκες πολυϊσοκυανικού αφρού [34].

Όσον αφορά στην αρχική ανάφλεξη, αυτή σημειώθηκε σε διαμέρισμα του τετάρτου ορόφου, πιθανώς λόγω ενός ελλαττωματικού ψυγείου. Δεκαοκτώ λεπτά μετά το γεγονός αυτό, οι φλόγες εξήλθαν από το εξωτερικό άνοιγμα και άρχισαν να εξαπλώνονται στην πρόσοψη του κτηρίου μέσω των πλαισίων αλουμινίου, ενώ εικοσιπέντε λεπτά μετά την έναυση παρατηρήθηκε καπνός σε διαμερίσματα των δύο υπερκείμενων ορόφων. Σαράντα λεπτά μετά την αρχική ανάφλεξη σημειώθηκε εξάπλωση της πυρκαγιάς μέχρι την οροφή του κτηρίου και παράλληλα οριζόντια διάδοσή της, η οποία προκάλεσε εισχώρηση φλογών και καπνού σε διαμερίσματα, δημιουργώντας πολλαπλές νέες εσωτερικές εστίες. Το κτήριο παραδόθηκε ολοκληρωτικά στις φλόγες σχεδόν τρεισήμισι ώρες μετά το αρχικό περιστατικό, με τη φωτιά τελικά να σβήνει μόνη μετά από εικοσιτέσσερις ώρες καύσης. Στο Σχήμα 3.3 παρατίθεται ενδεικτική φωτογραφία της πυρκαγιάς στον πύργο Grenfell.

Κύριο αίτιο της ταχύρρυθμης διάδοσης της πυρκαγιάς φαίνεται να αποτέλεσε η χρήση των σύνθετων πλαισίων αλουμινίου στην εξωτερική επένδυση και συγκεκριμένα η χρήση του πολυαιθυλενίου σαν θερμομονωτικό υλικό. Σύμφωνα με την αναφορά του καθηγητή Luke Bisby για το περιστατικό «Τα σύνθετα πλαίσια αλουμινίου στο Grenfell Tower ενσωματώνουν ένα πολύ εύφλεκτο πληρωτικό πολυαιθυλενίου, το οποίο σε αυξημένη θερμοκρασία ρευστοποιείται, στάζει, ρέει και παράλληλα απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας κατά την καύση του» [35]. Επιπλέον στην προκείμενη αναφορά σημειώνεται η επίδραση του φαινομένου του ελκυσμού, λόγω της ύπαρξης αεριζόμενων κοιλοτήτων στην πρόσοψη, ωστόσο δεν υπήρξαν επαρκείς αποδείξεις που να κατοχυρώνουν την εγκυρότητα του ισχυρισμού αυτού. Επιπροσθέτως, οι εγκατεστημένοι πυροφραγμοί των αεριζόμενων κοιλοτήτων, οι οποίοι εν γένει λειτουργούν αποτρεπτικά

στο φαινόμενο του ελκυσμού και στην εν γένει διάδοση της φωτιάς, στην παρούσα περίπτωση ήταν ανεπαρκούς μεγέθους και σε πολλές περιπτώσεις τοποθετημένοι εσφαλμένα. Τέλος τα κουφώματα που τοποθετήθηκαν κατά την ανακαίνιση του κτηρίου ήταν ανεπαρκούς μεγέθους και συντελούνταν από υλικά ελλιπούς αντοχής στη φωτιά, γεγονός το οποίο βοήθησε στη μετάδοση της πυρκαγιάς μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου του κτηρίου [34]. Η πυρκαγιά στο Grenfell Tower θεωρείται η καταστροφικότερη οικιστική πυρκαγιά στο Ηνωμένο Βασίλειο από τον Β' παγκόσμιο πόλεμο και μετέπειτα, με 72 νεκρούς, 70 τραυματίες και οικονομικό κόστος που ξεπερνάει τις 500 εκατομμύρια αγγλικές λίρες [2].



**Σχήμα 3.3** Πυρκαγιά στο κτήριο Grenfell Tower [34]

### 3.3.2 Beijing Television Cultural Center Tower (TVCC), Πεκίνο, Κίνα, 2009

Η πυρκαγιά ξέσπασε στις 9 Φεβρουαρίου του 2009 σε ένα υπό κατασκευή κτήριο κινεζικού τηλεοπτικού σταθμού. Το κτήριο 32 ορόφων και ύψους 159 m, αποτελείτο από έναν κεντρικό πύργο και δύο πλευρικές πτέρυγες στον άξονα ανατολής – δύσης. Στις προσόψεις των πτερύγων αυτών είχε πραγματοποιηθεί εγκατάσταση πλαισίων κράματος τιτανίου – ψευδαργύρου, το εσωτερικό των οποίων συντελούνταν από εξηλασμένο πολυστυρένιο (XPS) ως θερμομονωτικό υλικό, καθώς και από ένα διάκενο αέρα μεταξύ των πλαισίων και της μόνωσης [10]. Παράλληλα, η βόρεια και η νότια πλευρά του κτηρίου διέθεταν κρεμαστές προσόψεις (curtain wall façades), αποτελούμενες από υαλοπίνακες.

Σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν, η έναυση της φωτιάς πραγματοποιήθηκε στην οροφή του κτηρίου, ως αποτέλεσμα ανάφλεξης πυροτεχνημάτων χωρίς αδειοδότηση [36]. Τα φλεγόμενα σωματίδια που παρήχθησαν, εισήλθαν στο εσωτερικό των πλασιών τιτανίου – ψευδαργύρου, σημείου τήξης 400°C περίπου, με αποτέλεσμα την ανάφλεξη του εξηλασμένου πολυστυρένιου [10]. Εν συνεχεία, η ανάφλεξη του θερμομονωτικού υλικού οδήγησε στην πτώση φλεγόμενων σωματιδίων, μεταδίδοντας τη φωτιά σε χαμηλότερους ορόφους. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τους δυνατούς ανέμους που έπνεαν στην περιοχή εκείνη τη χρονική στιγμή, είχε ως αποτέλεσμα την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε όλον τον όγκο του κτηρίου, σε χρονικό διάστημα μικρότερο των είκοσι λεπτών. Ο απολογισμός του δυστυχήματος ήταν ένας νεκρός πυροσβέστης, επτά τραυματίες, έξι εκ των οποίων πυροσβέστες, και υλική ζημία, η οποία αποτιμήθηκε οικονομικά στα 110 εκατομμυρίων ευρώ. Στο Σχήμα 3.4 παρατίθενται φωτογραφίες του κτηρίου κατά τη διάρκεια της φωτιάς και μετά την κατάσβεσή της.



**Σχήμα 3.4** Το κτήριο TVCC κατά τη διάρκεια της φωτιάς και μετά την κατάσβεσή της [37]

### 3.3.3 MGM Monte Carlo Hotel, Λας Βέγκας, ΗΠΑ, 2008

Το κτήριο MGM Monte Carlo 32 ορόφων και ύψους 110 m αποτελείται από ένα κεντρικό πύργο, από τον οποίο εκτείνονται τρεις πτέρυγες μήκους 73 m η κάθε μία. Η κατασκευή του κτηρίου ξεκίνησε το 1995 και ολοκληρώθηκε ένα χρόνο αργότερα, το 1996. Κατά την κατασκευή του το κτήριο επενδύθηκε εξωτερικά με σύνθετο σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS) στις επίπεδες περιοχές του κτηρίου, καθώς και στις κατακόρυφες αναδύομενες διακοσμητικές στήλες του που εκτείνονταν από τον 29ο έως και το 31ο όροφο. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση διακοσμητικών λεπτομερειών, κατασκευασμένων από αφρό διογκωμένου πολυστυρένιου (EPS) περικλειόμενου σε ρητίνη πολυουρεθάνης (PUR resin), όπως οι οριζόντιες διακοσμητικές στήλες κατά μήκος



του 29ου και του 32ου ορόφου και η εξωτερική διακόσμηση μεταξύ των παραθύρου του 32ου ορόφου.

Αίτιο της αρχικής ανάφλεξης αποτέλεσαν σπινθήρες, παραγόμενοι από συγκολλήσεις που διενεργήθηκαν σε εξέδρα στην οροφή του κτηρίου, με αποτέλεσμα την καύση των υλικών της εξωτερικής επένδυσης της αριστερής πλευράς της κεντρικής πτέρυγας του κτηρίου [5]. Στη συνέχεια η πυρκαγιά εξαπλώθηκε πλευρικά στη δεξιά πλευρά της κεντρικής πτέρυγας, μέσω των προαναφερθέντων διακοσμητικών υλικών, καθώς και στην αριστερή πτέρυγα κατά 24 m. Στην πτέρυγα αυτή η διάδοση της φωτιάς πραγματοποιήθηκε και κατακόρυφα φτάνοντας μέχρι και τον 29ο όροφο. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η εξάπλωση της φωτιάς στην πρόσοψη του κτηρίου.



**Σχήμα 3.5** Φωτιά στο κτήριο MGM Monte Carlo Hotel [38]

Η διάδοση της πυρκαγιάς στους εσωτερικούς χώρους του ξενοδοχείου απετράπη μέσω της ενεργοποίησης των εσωτερικών καταιονητήρων. Καταλυτικό ρόλο για την εξάπλωση της πυρκαγιάς αποτέλεσε ο συνδυασμός των υλικών των διακοσμητικών στοιχείων, καθώς τα φλεγόμενα σωματίδια διογκωμένου πολυστυρένιου και ρητίνης πολυουρεθάνης που παρήχθησαν κατά την καύση της διακόσμησης στον 32ο όροφο, διέδωσαν κατά την πτώση τους τη φωτιά στον 29ο όροφο. Το σύστημα ETICS που χρησιμοποιήθηκε δεν κατείχε το κυρίαρχο μερίδιο ευθύνης αναφορικά με την πορεία της φωτιάς, παρόλα ταύτα συνέβαλε σε μικρότερο βαθμό στη μετάδοσή της με την ανάφλεξή του. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το εγκατεστημένο εξωτερικό στρώμα του συστήματος ETICS ήταν ανεπαρκούς πάχους, γεγονός το οποίο ενδεχομένως να επηρέασε τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος στη φωτιά [5]. Η απόσβεση της πυρκαγιάς επιτεύχθηκε μία ώρα μετά την έναυσή της,

χωρίς ανθρώπινες απώλειες ή τραυματισμούς. Εντούτοις, η συνολική οικονομική ζημία που προκλήθηκε υπολογίζεται λίγο κάτω από τα 100 εκατομμύρια δολάρια [39].

#### 3.3.4 Μίσκολτς, Ουγγαρία, 2009

Στις 15 Αυγούστου του 2009 ξέσπασε πυρκαγιά σε οικιστικό κτήριο στο Μίσκολτς της Ουγγαρίας, με αποτέλεσμα τρεις ανθρώπινες απώλειες. Στο κτήριο 11 ορόφων, κατασκευασμένο το 1968, πραγματοποιήθηκε ανακαίνιση το 2007, η οποία μεταξύ άλλων περιλάμβανε την εγκατάσταση συστήματος ETICS στην πρόσοψη του κτηρίου, σύστημα το οποίο περιείχε πολυστυρένιο (polystyrene) ως θερμομονωτικό υλικό [5].

Η αρχική ανάφλεξη προήλθε από κουζίνα στον 6ο όροφο του κτηρίου και γρήγορα διαδόθηκε κατακόρυφα μέσω του συστήματος πρόσοψης, μέχρι την οροφή, ενώ παράλληλα ο παραγόμενος καπνός εξαπλώθηκε στο εσωτερικό του κτηρίου μέσω του κλιμακοστασίου και των μη καταλλήλως μονωμένων φρεατίων. Μετά από έρευνες που διεξήχθησαν συμπεράστηκε ότι στην ταχύρρυθμη εξάπλωση της φωτιάς συνέβαλε η χρήση του πολυστυρενίου ως υλικού θερμομόνωσης, η ελλαττωματική τοποθέτηση και πάκτωση των μονωτικών πλαισίων, η παράληψη τοποθέτησης πυροφραγμών στη μόνωση, το ανεπαρκές πάχος ασβεστοκονιάματος (2 – 3 mm έναντι των απαιτούμενων 5 mm), καθώς και τα ανοικτά κουφώματα λόγω του καλοκαιρινού καιρού, τα οποία διευκόλυναν τη μετάδοση της πυρκαγιάς σε υπερκείμενους ορόφους [10].

#### 3.3.5 Wooshin Golden Suites, Μπούσαν, Νότια Κορέα, 2010

Το κτήριο Wooshin Golden Suites, ύψους 140 m, 38 υπέργειων και 4 υπόγειων ορόφων κατασκευάστηκε το 2005 και συνιστά κτήριο, κατά κύριο λόγο, οικιστικής χρήσης. Ο φέρον οργανισμός του κτηρίου αποτελείται από δομικό χάλυβα, ως επί το πλείστον, καθώς και από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ταυτόχρονα, η κρεμαστή πρόσοψη του κτηρίου (curtain wall facade) ήταν κατασκευασμένη με σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP), πάχους 3 mm, τα οποία εμπεριείχαν μόνωση πολυαιθυλενίου (PE) [5]. Επιπλέον μεταξύ του σκυροδέματος και των πλαισίων αλουμινίου παρεμβάλλονταν ένα επιπρόσθετο στρώμα θερμομόνωσης, το υλικό του οποίου δεν έχει διευκρινιστεί με σαφήνεια και ενδεχομένως ήταν είτε υαλοβάμβακας (glass wool), είτε διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS) [5].

Η φωτιά ξεκίνησε από τον 4ο όροφο λόγω σπινθήρων παραγόμενων από οικιακή πρίζα, με αποτέλεσμα την ανάφλεξη παρακείμενων αντικειμένων εντός του διαμερίσματος. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την απουσία καταιονισμού στο συγκεκριμένο δωμάτιο, οδήγησε στη μετάδοση των φλογών στο εξωτερικό του κτηρίου, απ' όπου στη συνέχεια σημειώθηκε κατακόρυφη εξάπλωση της πυρκαγιάς στο σύστημα πρόσοψης. Με τον τρόπο αυτό, η πυρκαγιά έφτασε από τον 4ο όροφο στην κορυφή του κτηρίου σε χρονικό διάστημα 20 λεπτών, καταστρέφοντας το ρετιρέ και ορισμένους χώρους του 37ου ορόφου. Η εξωτερική κατακόρυφη εξάπλωση της φωτιάς ακολούθησε σχήμα τύπου «U», φαινόμενο το οποίο εκτιμάται ότι ισχυροποίησε το ρυθμό διάδοσής της, μέσω του φαινομένου του ελκυσμού και της μετάδοσης ακτινοβολίας από το ένα μέτωπο της φωτιάς στο άλλο, ενώ οι ισχυροί άνεμοι που έπνεαν στην περιοχή ενίσχυσαν περαιτέρω τη δράση της. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η φωτιά στο κτήριο. Η αρχική εστία αποσβέσθηκε 90 λεπτά μετά την ανάφλεξή της, ενώ το σύνολο του κτηρίου σε χρονικό διάστημα άνω των 6 ωρών [40]. Η κατάσβεση ολοκληρώθηκε χωρίς ανθρώπινες απώλειες,

ωστόσο σημειώθηκαν 4 τραυματισμοί και υλικές ζημιές κόστους άνω των 3 εκατομμυρίων ευρώ [5].



Σχήμα 3.6 Φωτιά στο κτήριο Wooshin Golden Suites [40]

### 3.4 Μελέτες πειραματικής διερεύνησης

Η αυξανόμενη χρήση εύφλεκτων υλικών σε συστήματα προσόψεων, σε συνδυασμό με τις καταγεγραμμένες, καταστρεπτικές συνέπειες που επιφέρει η πρόκληση πυρκαγιάς σε αυτά, εγείρει προβληματισμούς σχετιζόμενους με την ασφάλειά τους και με τους ενδεχόμενους κινδύνους ανάλογων μελλοντικών περιστατικών. Σε αυτήν την κατεύθυνση, η επιστημονική κοινότητα διερευνά πολύπλευρα τη συμπεριφορά συστημάτων προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς, καθώς και τις παραμέτρους εκείνες οι οποίες καθορίζουν το μέγεθος και την εξέλιξη του φαινομένου αυτού. Η διενέργεια ελεγχόμενων πειραμάτων, ενδεικτικών της συμπεριφοράς αυτής, συνιστά μία εκ των σημαντικότερων μεθόδων διερεύνησης των εν λόγω καθοριστικών παραγόντων. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συμπεράσματα, σχετικά με τη δράση της φωτιάς σε κτηριακές προσόψεις, όπως αυτά προέκυψαν μέσω ανασκόπησης πειραματικών μελετών.

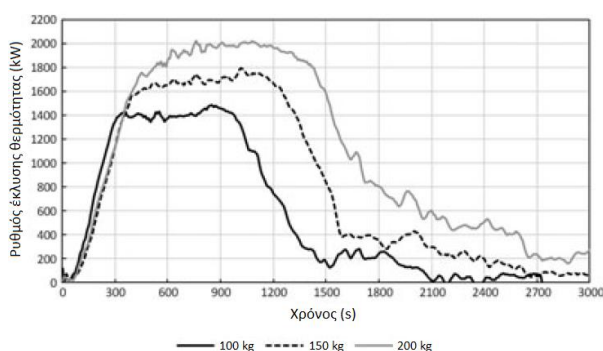
#### 3.4.1 Υλικά πρόσοψης

Οι ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν την κτηριακή πρόσοψη συνιστούν παράγοντες ιδιαίτερης σημασίας, όσον αφορά στη συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα η αντίδραση της πρόσοψης καθορίζεται από την ευφλεκτότητα του θερμομονωτικού υλικού, καθώς και της εκάστοτε εξωτερικής επένδυσης – επίστρωσης. Όπως είναι αναμενόμενο, η χρήση εύφλεκτων υλικών επισπεύδει την ανάφλεξη και τη διάδοση της πυρκαγιάς στην πρόσοψη. Παρόλα αυτά, ενώ σε ορισμένα

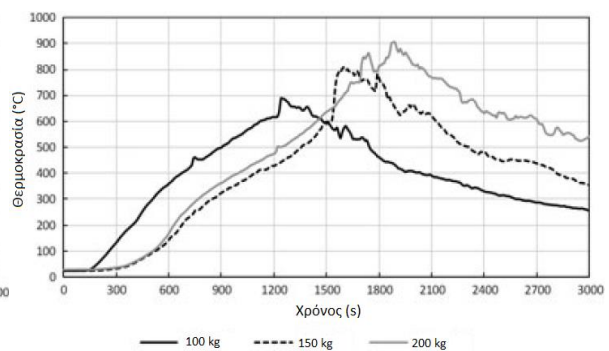
συστήματα η κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς, δύναται να πραγματοποιείται ανεμπόδιστα, σε άλλα παρατηρείται αδυναμία συνέχισης της διάδοσης άνευ επίδρασης επιπρόσθετης παραμέτρου και ως εκ τούτου η συνεισφορά του υλικού καθίσταται συμπληρωματική στην εξέλιξη του φαινομένου [41]. Παράλληλα σημειώνεται διαφοροποίηση της σημαντικότητας της συνεισφοράς των επιμέρους εύφλεκτων στοιχείων, ανάλογα με το σύστημα στο οποίο χρησιμοποιούνται. Παραδείγματος χάρη, σε συστήματα ETICS, η ευφλεκτότητα του θερμομονωτικού υλικού κατέχει πρώτιστο ρόλο στη μετάδοση της φωτιάς [42], ενώ συμπληρωματικά λειτουργεί η αναφλεξιμότητα του εξωτερικού επιχρίσματος, καθώς και η ύπαρξη ρωγμών και εν γένει ατελειών στη δομή του [43]. Αντίθετα σε συστήματα δομημένα με σύνθετα πλαίσια αλουμινίου (ACP), κυρίαρχη παράμετρο συνιστά η ευφλεκτότητα του πυρήνα του πλαισίου, ενώ η αντίστοιχη ιδιότητα του στρώματος θερμομόνωσης, ευρισκόμενο πίσω από το πλαίσιο, επιδρά σε αρκετά μικρότερο βαθμό στο φαινόμενο [44], [45], [46]. Χαρακτηριστικά, σε δοκιμές μεσαίας κλίμακας που διενεργήθηκαν σε προσόψεις με ACP, δοκίμια με πολυαιθυλένιο (Polyethylene – PE) στον πυρήνα σημείωσαν 16 φορές μεγαλύτερο μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (PEΘ) και 2 – 3 φορές μεγαλύτερη συνολική έκλυση θερμότητας από δοκίμια με μη εύφλεκτο πυρήνα, ανεξαρτήτως του εκάστοτε μονωτικού υλικού [44]. Στην προκειμένη δοκιμή, η επίδραση του μονωτικού υλικού έγινε εμφανής στο τελικό στάδιό της, όταν η ένταση της πυρκαγιάς είχε μειωθεί σημαντικά. Ομοίως, σε άλλη δοκιμή παρατηρήθηκε ραγδαία ανάπτυξη της φωτιάς, σε σύνθετα πλαίσια αλουμινίου με θερμοπλαστικό πυρήνα, χωρίς να παρατηρείται αξιοσημείωτη συνεισφορά της μόνωσης στο φαινόμενο [46].

### 3.4.2 Καύσιμο και Μέγεθος Εστίας

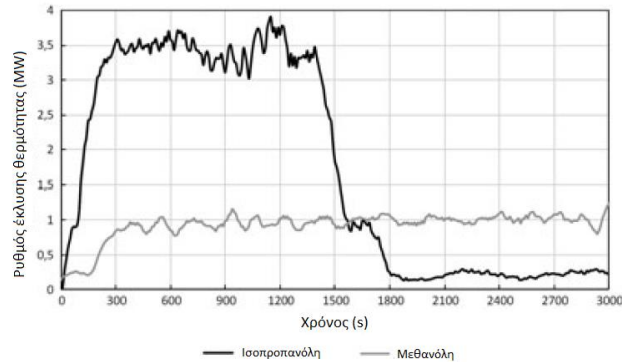
Η αρχική μάζα καθώς και οι ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται ως καύσιμο επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Σε έρευνα των Zehfuß et al. παρατηρήθηκε αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και των μετρούμενων θερμοκρασιών σε ίδιο ύψος για αύξηση της μάζας καυσίμου (ξύλινες ράβδοι) [47], όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 και στο Σχήμα 3.8 αντίστοιχα. Παράλληλα, στην ίδια έρευνα, σημειώνεται διαφοροποίηση των ρυθμών έκλυσης θερμότητας αντίστοιχων δοκιμών, διαφορετικών καυσίμων (ισοπροπανόλη, μεθανόλη), γεγονός το οποίο οφείλεται στις διαφορετικές θερμικές ιδιότητες των υλικών αυτών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



**Σχήμα 3.7** Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για διαφορετική μάζα καυσίμου [47]



**Σχήμα 3.8** Θερμοκρασία στο ίδιο σημείο για διαφορετική μάζα καυσίμου [47]



**Σχήμα 3.9** Ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε δοκιμές διαφορετικών καυσίμων [47]

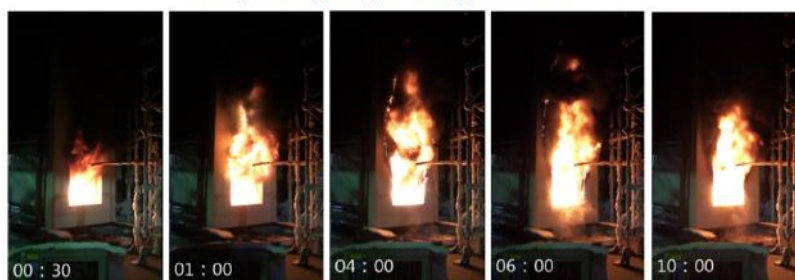
Όμοια συμπεράσματα, αναφορικά με το μέγεθος της εστίας της φωτιάς, δίνουν και άλλες έρευνες. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της διάδοσης της φωτιάς και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, με αύξηση της θερμικής ισχύος των εστιών όμοιων δοκιμών από 600 kW σε 900 kW [48], ενώ σε άλλη έρευνα τονίστηκε ο καθοριστικός ρόλος του μεγέθους της εστίας, όσον αφορά στην έκταση της διάδοσης της πυρκαγιάς [49].

### 3.4.3 Πάχος κατασκευαστικών στοιχείων

Το πάχος του θερμομονωτικού υλικού της πρόσοψης συνιστά μια εκ των παραμέτρων που καθορίζουν την εξέλιξη της φωτιάς σε αυτήν. Ο διπλασιασμός του πάχους της εύφλεκτης μονωτικής στρώσης EPS σε δοκιμές που διενεργήθηκαν στην Ιαπωνία, σημείωσε υψηλότερο ρυθμό διάδοσης της φωτιάς και αύξηση των μετρούμενων θερμοκρασιών [50]. Η συσχέτιση αυτή παρατηρείται και σε όμοιο δοκίμιο, ενδιάμεσου πάχους μόνωσης των προηγούμενων, στο οποίο οι μετρούμενες θερμοκρασίες ήταν ενδιάμεσες των τιμών των προσόψεων που προαναφέρθηκαν. Στο Σχήμα 3.10 παρατίθεται η χρονική εξέλιξη των δοκιμών για δείγματα με μόνωση πάχους 100 mm και 200 mm αντίστοιχα.



Δοκίμιο πάχους μόνωσης 100 mm



Δοκίμιο πάχους μόνωσης 200 mm

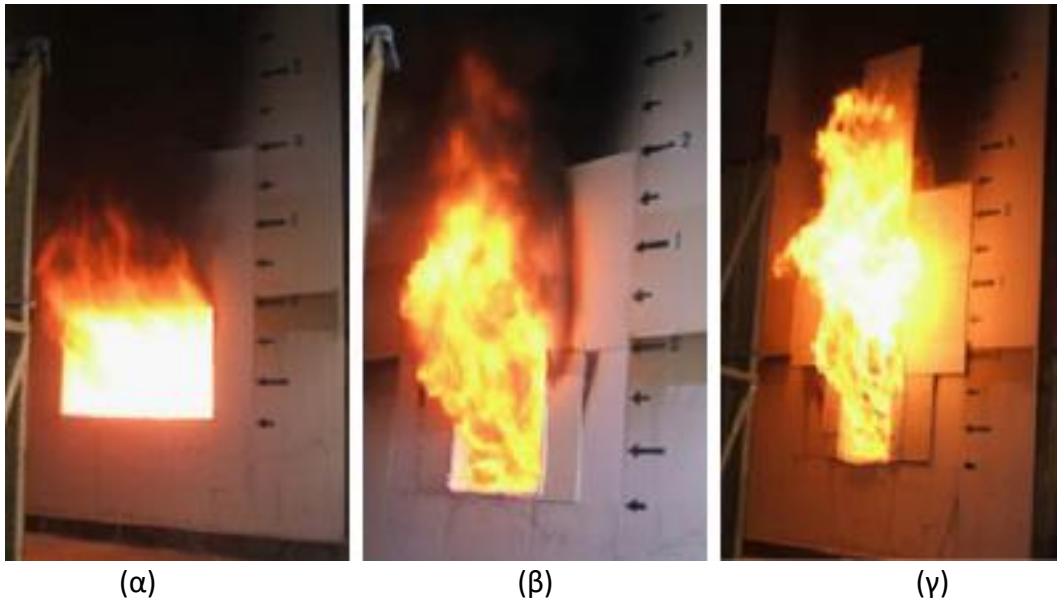
**Σχήμα 3.10** Χρονική εξέλιξη δοκιμών διαφορετικών παχών μόνωσης [50]

Αντίστοιχα, οι Anderson et al. συμπέραναν μετά από πειράματα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος των στοιχείων της πρόσοψης, τόσο περισσότερη θερμότητα απορροφάται από αυτά, ιδιαίτερα στην περιοχή κοντά στην εστία της φωτιάς, δηλαδή στα κατώτερα μέρη των δοκιμών στην προκείμενη περίπτωση [51]. Παρόλα αυτά το μεγάλο πάχος σε ορισμένα στοιχεία δύναται να αποτρέψει την ανάπτυξη της φωτιάς. Σε πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην Ιταλία παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της δράσης της φωτιάς για δοκίμιο μεγαλύτερου πάχους εξωτερικής επίστρωσης γύψου (20 mm έναντι του συνήθους πάχους 7 mm), σε σύστημα ETICS [42].

#### 3.4.4 Ανοίγματα

Η πρόκληση πυρκαγιάς με φλόγες προερχόμενες από εστία στο εσωτερικό του κτηρίου, οι οποίες εξέρχονται μέσω ανοιγμάτων, αποτελούν ίσως την πιο επικίνδυνη κατηγορία φωτιάς σε προσόψεις. Η ιδιαίτερη σοβαρότητα του φαινομένου αυτού οφείλεται στη μεγάλη ένταση των φλογών που προσπίπτουν άμεσα στο εξωτερικό του κτηρίου. Στην περίπτωση αυτή οι διαστάσεις και οι αναλογίες των πλευρών των ανοιγμάτων επιδρούν πολύπλευρα στην αναπτυσσόμενη φλόγα. Σύμφωνα με τον Oleszkiewicz, τα μεγάλα ανοίγματα διευκολύνουν τη διεργασία της καύσης εντός του κτηρίου, λόγω μεγάλης παροχής οξυγόνου στον εσωτερικό χώρο, γεγονός το οποίο συνεπάγεται μειωμένη θερμοκρασία και ύψος φλόγας στην πρόσοψη, συγκριτικά με παράθυρα μικρότερης διατομής [52]. Παράλληλα, στην ίδια έρευνα, τονίζεται η σημαντικότητα του λόγου πλάτους – ύψους του ανοίγματος, καθώς επηρεάζει τη μορφή της εξερχόμενης φλόγας. Συγκεκριμένα, ανοίγματα των οποίων το ύψος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος, τείνουν να απομακρύνουν τις φλόγες από την πρόσοψη, μειώνοντας ως εκ τούτου τη θερμική έκθεσή της. Ανάλογα συμπεράσματα παρατηρήθηκαν και σε έρευνα των Cheng και Hadjisophocleous, όπου παρατηρήθηκε μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη μείωση της διατομής του ανοίγματος και αύξηση του ύψους της εξωτερικής φλόγας κατά τη μείωση του πλάτους του ανοίγματος [53]. Ταυτόχρονα, σε άνοιγμα μεγάλου πλάτους παρατηρήθηκε ταχεία πτώση της θερμοκρασίας σε διαδοχικές θέσεις πάνω από το άνοιγμα, σε αντίθεση με το άνοιγμα μεγάλου ύψους και με το άνοιγμα τετραγωνικής διατομής. Ακόμα, στην ίδια έρευνα διαπιστώθηκε ότι σε περιπτώσεις ανοιγμάτων πλάτους σημαντικά μεγαλύτερου του ύψους τους, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται ως επί το πλείστον από τις φλόγες εντός του ανοίγματος, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η ακτινοβολία προέρχεται κυρίως από φλόγες υπερκείμενες του παραθύρου. Στο Σχήμα 3.11 παρατίθενται ενδεικτικές φωτογραφίες των εν λόγω δοκιμών, με φλόγες εξερχόμενες από ανοίγματα διαφορετικών λόγων πλάτους – ύψους. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη ανοιγμάτων σε φλεγόμενο κτήριο ενισχύει την επικινδυνότητα του φαινομένου, αφού καθίσταται δυνατή η μετάδοση της πυρκαγιάς από όροφο σε όροφο (leap-frogging). Η εν λόγω μετάδοση καθορίζεται από παραμέτρους όπως η απόσταση μεταξύ των εκάστοτε άνω και κάτω ανοιγμάτων, η απόσταση της εξερχόμενης φλόγας από το υπερκείμενο άνοιγμα, το ενδεχόμενο να βρίσκεται το παράθυρο σε κλειστή ή ανοικτή θέση, το θερμικό φορτίο του καυσίμου, η ευφλεκτότητα της πρόσοψης, αλλά και από τις συνθήκες αερισμού της φλεγόμενης περιοχής [54]. Τέλος, σε σύγκριση πραγματοποιούμενη στο πλαίσιο πειραματικών δοκιμών από τους Northe et al., μεταξύ πρόσοψης η οποία διαθέτει ανοίγματα και όμοιας άνευ ανοιγμάτων, σημειώθηκε ολοκληρωτική καύση της πρώτης σε χρονικό διάστημα μικρότερο του μισού του προκαθορισμένου χρόνου δοκιμής, με αποτέλεσμα την πρόωρη διακοπή της, σε αντιδιαστολή με τη δεύτερη περίπτωση, στην

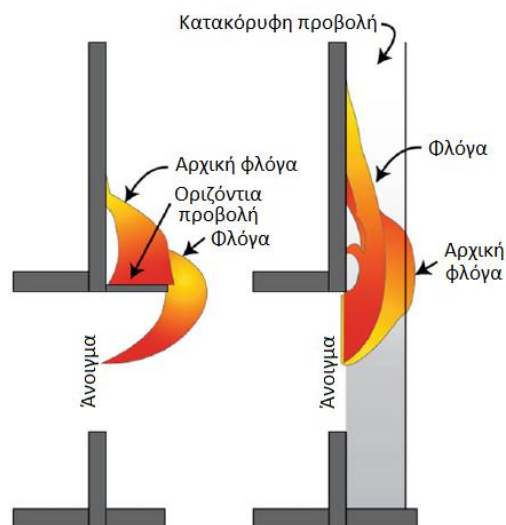
οποία παρά τις φθορές που προκλήθηκαν, η δοκιμή ολοκληρώθηκε στον προβλεπόμενο χρόνο [55].



**Σχήμα 3.11** Στιγμιότυπα δοκιμών σε ανοίγματα διαστάσεων (α)  $2,55\text{ m} \times 1,45\text{ m}$ , (β)  $1,45\text{ m} \times 1,45\text{ m}$  και (γ)  $1,1 \times 1,45\text{ m}$  [53]

#### 3.4.5 Γεωμετρία πρόσοψης – προβολές

Η τοποθέτηση προβολών, οριζόντιων ή καθέτων, μεταξύ των ορόφων, έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα αναφορικά με τη επίδρασή τους σε ενδεχόμενη πυρκαγιά πρόσοψης. Ο Oleszkiewicz μετά από πειραματικές δοκιμές συμπέρανε ότι η παρεμβολή οριζόντιων προβολών στις προσόψεις (π.χ. μπαλκόνια) ενεργεί κατευναστικά στο φαινόμενο, απομακρύνοντας τις φλόγες από τα τοιχώματα, μειώνοντας έτσι τη θερμική έκθεση [41]. Στο Σχήμα 3.12 αναπαρίσταται η επίδραση των προβολών αυτών σε συνθήκες φωτιάς.

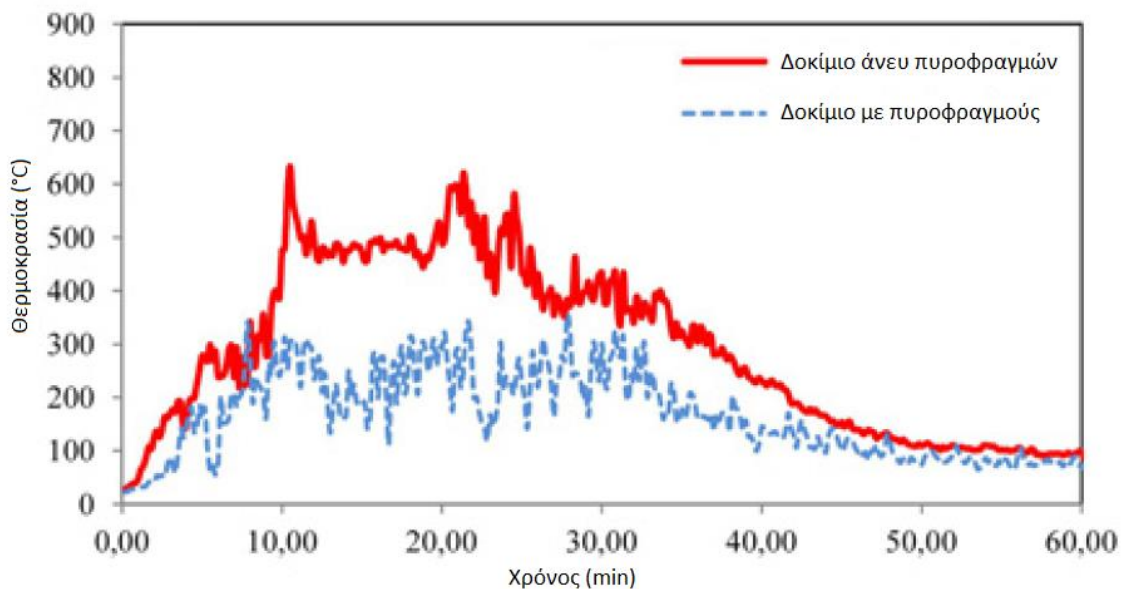


**Σχήμα 3.12** Επίδραση προβολών σε συνθήκες φωτιάς [11]

Αντίθετα οι κατακόρυφες προβολές τείνουν να ωθούν τις εξερχόμενες από τα ανοίγματα φλόγες στην πρόσοψη, αυξάνοντας την επιφάνεια πρόσπτωσής τους σε αυτήν, καθώς και την ταχύτητα των θερμών αερίων, με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου και την επιτάχυνση της διάδοσης της φωτιάς κατακόρυφα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μετάδοση της πυρκαγιάς από όροφο σε όροφο (leap-frogging) [56].

### 3.4.6 Πυροφραγμοί

Η παρεμβολή πυροφραγμών, δηλαδή στρώσεων άκαυστων υλικών (π.χ. ορυκτοβάμβακας) στο εύφλεκτο θερμομονωτικό υλικό, δύναται να βελτιώσει σημαντικά τη συμπεριφορά συστημάτων πρόσοψης σε συνθήκες φωτιάς. Σε πειραματική μελέτη των Bjegonic et al. στην οποία εξετάστηκαν όμοια δοκίμια με και χωρίς πυροφραγμούς, μετρήθηκαν σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες στα δοκίμια της πρώτης κατηγορίας [57]. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται οι μετρούμενες, σε ίδιο ύψος, θερμοκρασίες των δύο δοκιμίων.



**Σχήμα 3.13** Μετρούμενες θερμοκρασίες δοκιμίων με και χωρίς πυροφραγμούς [57]

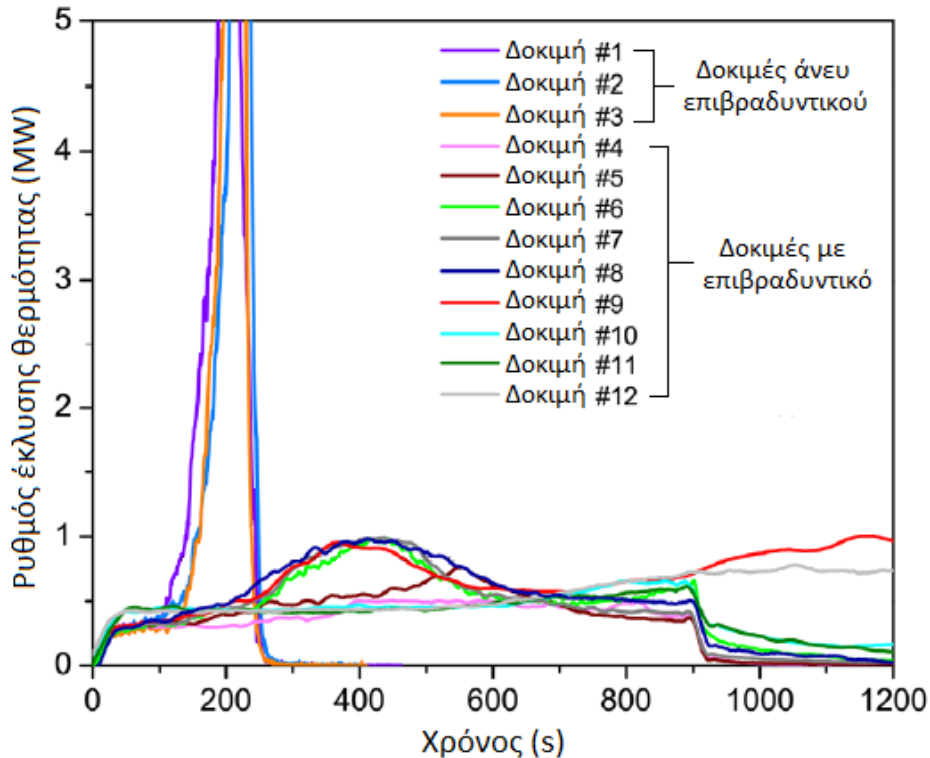
Ομοίως οι Northe et al., σε πειραματικές μελέτες παρατήρησαν αξιοσημείωτα καλύτερη συμπεριφορά στη φωτιά, δοκιμίου το οποίο διέθετε τρεις πυροφραγμούς, καθώς η πυρκαγιά εκτάθηκε σε αρκετά μικρότερο χώρο, συγκριτικά με παρόμοιο δοκίμιο, το οποίο διέθετε έναν μόνο πυροφραγμό. [55]. Στην ίδια κατεύθυνση οι Lалу et al. τονίζουν ότι η παρεμβολή πυροφραγμών στο συνεχές στρώμα θερμομόνωσης μπορεί να επιφέρει περιορισμό της κατακόρυφης διάδοσης της φλόγας και να ελαττώσει σημαντικά την πρόκληση αλλοιώσεων στην πρόσοψη, λόγω της μειωμένης θερμικής έκθεσης που συντελείται [58].

### 3.4.7 Επιβραδυντικές ουσίες

Τα επιβραδυντικά φωτιάς αποτελούν ουσίες, οι οποίες συνδυάζονται με εύφλεκτα στοιχεία των συστημάτων πρόσοψης, όπως τα θερμομονωτικά υλικά, μέσω εμποτισμού ή επικάλυψης, με σκοπό το περιορισμό της έντονης επίδρασης της φωτιάς στα εν λόγω εύφλεκτα στοιχεία. Σε πειραματική μελέτη των Agarwall et al. παρατηρήθηκε αρκετά περιορισμένη διάδοση φλόγας και ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε σύνθετα πλαίσια



αλουμινίου (ACP) και πολυστρωματικά πλαίσια υψηλής πίεσης (HPL), τα οποία διέθεταν πυρήνα εμποτισμένο με επιβραδυντικό, σε αντίθεση με αντίστοιχα πλαίσια αποτελούμενα από θερμοπλαστικούς πυρήνες [46]. Στο Σχήμα 3.14 παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα των ρυθμών έκλυσης θερμότητας των προαναφερθεισών δοκιμών.



**Σχήμα 3.14** Ρυθμός έκλυσης θερμότητας δοκιμών με και χωρίς επιβραδυντικό φωτιάς [46]

Στο ίδιο πλαίσιο οι Nakamura et al., σε δοκιμές που πραγματοποίησαν, παρατήρησαν τριπλάσια σχεδόν τιμή μέγιστης πυκνότητας θερμότητας σε δοκίμιο χωρίς εμποτισμό με επιβραδυντική ουσία, έναντι των εμποτισμένων [59]. Αντίστοιχα, σημειώθηκε αυξημένη τιμή του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας, καθώς και της συνολικά εκλυόμενης θερμότητας. Όμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και σε μελέτη των Nishio et al., στην οποία παρατηρήθηκε αρκετά μειωμένος ρυθμός ανάπτυξης της φλόγας σε κέδρινο δοκίμιο, εμποτισμένο με επιβραδυντική ουσία, σε αντιδιαστολή με αντίστοιχο μη εμποτισμένο δοκίμιο [50].

#### 3.4.8 Αερισμός

Η αυξημένη παροχή αέρα λειτουργεί ενισχυτικά στα φαινόμενα καύσης, καθώς επιτρέπει την ταχύτερη ολοκλήρωση των χημικών αντιδράσεων και ως εκ τούτου επιδρά επιβραδυντικά σε περιπτώσεις πυρκαγιών προσόψεων. Η δράση αυτή του αερισμού μελετήθηκε σε πειραματική έρευνα των Klorovic και Turan, οι οποίοι εξέτασαν δύο περιπτώσεις αερισμού εσωτερικού χώρου: η μία περιλάμβανε ρεύμα αέρα δημιουργούμενο από δύο ανοίγματα σε ανοικτή θέση (πόρτα, παράθυρο), ενώ στη δεύτερη δεν σημειωνόταν ρεύμα αέρα καθώς η πόρτα ήταν κλειστή [54]. Αναφορικά με τη επίδραση του αερισμού, συμπέραναν ότι επηρεάζει τη μορφή της αναπτυσσόμενης φλόγας, καθώς και ότι η αύξηση της έντασής του δύναται να ενισχύσει τη διάδοση της φωτιάς και το ενδεχόμενο της μετάδοσής της σε υπερκείμενο όροφο (leap-frogging).

Επιπρόσθετα, στην ίδια μελέτη, παρά τις αρχικές εκτιμήσεις, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες θερμοκρασίες και εν γένει ένταση του φαινομένου στην περίπτωση απουσίας ρεύματος αέρα. Όσον αφορά στην επίδραση των αεριζόμενων κοιλοτήτων, οι οποίες ενδέχεται να περιλαμβάνονται σε διάταξη συστημάτων προσόψεων (π.χ. αεριζόμενες προσόψεις), σε έρευνα των Bonner et al. τονίζεται η ενισχυτική στη διάδοση της φωτιάς δράση των κοιλοτήτων αυτών, ενώ ταυτόχρονα παρατηρήθηκε ότι όλα τα δοκίμια τα οποία απέτυχαν σε τουλάχιστον ένα εκ των κριτηρίων επιτυχίας των δοκιμών, διέθεταν κοιλότητα αερισμού [60]. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Agarwall et al. επισημαίνουν το μέγεθος της κοιλότητας αερισμού ως καθοριστική παράμετρο της έκτασης στην οποία αναπτύσσεται η φωτιά [46].

#### 3.4.9 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (ΡΕΘ)

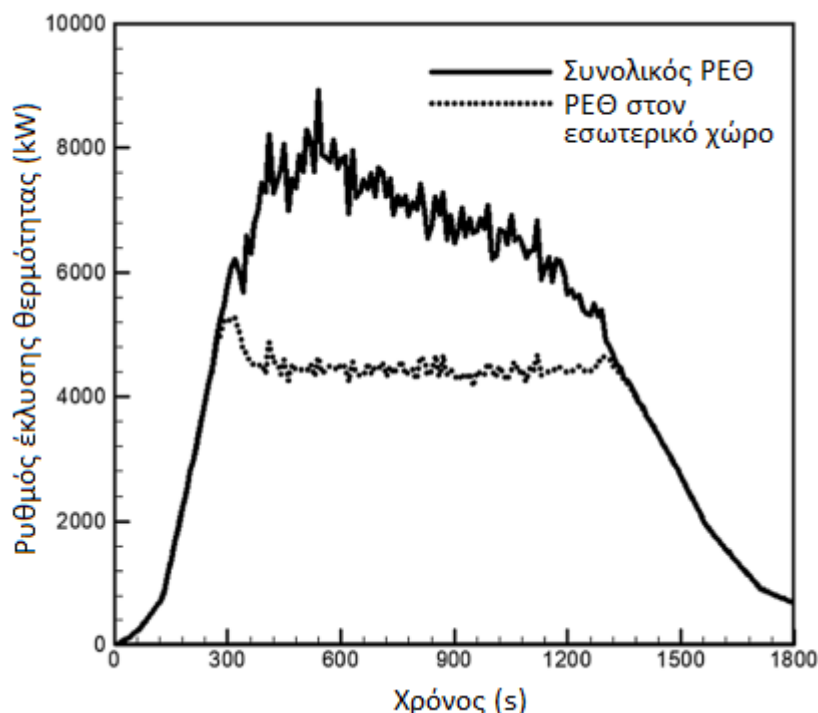
Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε εσωτερικό χώρο του κτηρίου συνιστά καθοριστικό παράγοντα για τη μετέπειτα συμπεριφορά της φωτιάς στην κτηριακή πρόσοψη. Ο Oleszkiewicz σημειώνει σε έρευνά του ότι η θερμική έκθεση των προσόψεων μεγαλώνει, όσο αυξάνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας των εσωτερικών χώρων, εκ των οποίων προέρχεται η πυρκαγιά [52]. Παράλληλα, τονίζει το γεγονός ότι η αύξηση της θερμικής έκθεσης πραγματοποιείται ταχύτερα από την αντίστοιχη αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό των καύσεων τελείται στο εξωτερικό του κτηρίου. Επιπροσθέτως, σε έρευνα του Babrauskas, παρότι δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες διαφορές στη θερμική συμπεριφορά συστημάτων προσόψεων για διαφορετικούς ΡΕΘ, τονίζεται η καθοριστική σημασία του μεγέθους αναφορικά με την επικινδυνότητα του φαινομένου, καθώς σε ενδεχόμενη διάδοση της φωτιάς από όροφο σε όροφο, ο κίνδυνος για τα παρευρισκόμενα στο κτήριο άτομα, έγκειται στο μέγεθος του ρυθμού έκλυσης θερμότητας των εσωτερικών χώρων [61]. Τέλος, οι Quintiere et al. πρότειναν την αναλογική σχέση μεταξύ του ύψους της φλόγας και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην 2/3 δύναμη [62].

### 3.5 Μελέτες υπολογιστικής προσομοίωσης

Η διενέργεια πειραματικών δοκιμών και η μελέτη τους, όπως διεφάνη στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, αποτελεί σημαντικότερη πηγή άντλησης συμπερασμάτων αναφορικά με τη συμπεριφορά συστημάτων προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς. Στην ίδια κατεύθυνση, η αντίδραση προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς δύναται να ερευνηθεί μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων. Βασικά πλεονεκτήματα των προσομοιώσεων αυτών συνιστούν το χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με την τέλεση αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών, η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών μέσω μαθηματικών μοντέλων, καθώς και η δυνατότητα μελέτης σημαντικά μεγαλύτερου αριθμού συστημάτων. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συμπεράσματα μελετών υπολογιστικών προσομοιώσεων, όπως αυτά προέκυψαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Οι Duny et al. σε εργασία τους, αναφορικά με τη συμπεριφορά των εξερχόμενων φλογών από άνοιγμα ευρισκόμενο σε πρόσοψη, παρατήρησαν επιρροή της μορφής της φλόγας από παραμέτρους όπως οι διαστάσεις του ανοίγματος, η παρουσία ανωφλιού (lintel), η παρουσία πλευρικών τοιχωμάτων στην πρόσοψη και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας του εσωτερικού φλεγόμενου χώρου [63]. Αναλυτικότερα η αύξηση των διαστάσεων του

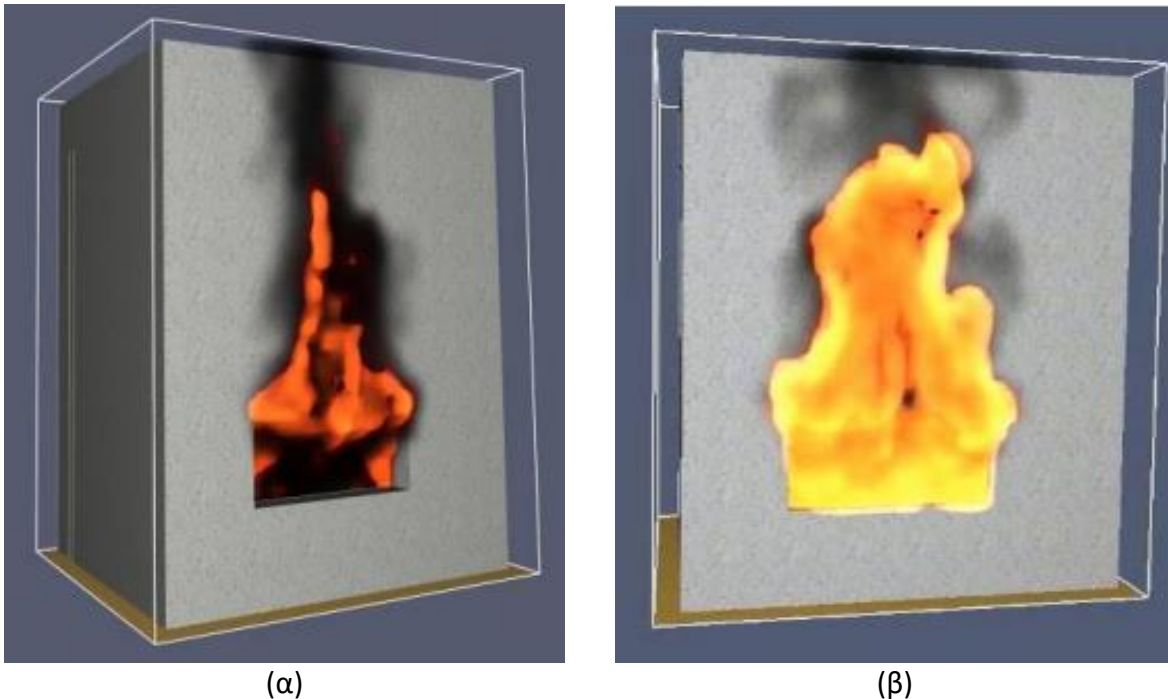
ανοίγματος, και ιδιαίτερα του ύψους του, επέφερε μείωση του ύψους και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της εξερχόμενης φλόγας και παράλληλα αύξηση του ΡΕΘ στον εσωτερικό χώρο, καθώς η αύξηση της διατομής του ανοίγματος διευκολύνει την πραγματοποίηση της καύσης στο εσωτερικό. Όσον αφορά στο ανώφλι, η παρουσία του συσχετίστηκε με μείωση του ύψους της φλόγας. Επιπρόσθετα, η παρουσία πλευρικών τοιχωμάτων στην πρόσοψη δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, ωστόσο, λόγω του φαινομένου του ελκυσμού, προκαλούν αύξηση του ύψους της εξωτερικής φλόγας. Ταυτόχρονα, στη μελέτη τονίζεται η καθοριστική επίδραση του ΡΕΘ του εσωτερικού χώρου, αφού καθορίζει την καύση τόσο στο εσωτερικό του κτηρίου, όσο και στην πρόσοψη. Σε άλλη υπολογιστική προσομοίωση των ίδιων, σε ανάλογη περίπτωση φωτιάς, σημειώνεται ότι η τιμή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και κατ' επέκταση η εξέλιξη της φωτιάς πραγματοποιείται στα ακόλουθα τέσσερα στάδια [64]: (α) Αρχική ανάπτυξη φωτιάς (initial growth phase), με την καύση να πραγματοποιείται περιορισμένα μόνο στον εσωτερικό χώρο. (β) Καθολική ανάφλεξη (flashover phase), η οποία συνοδεύεται με ταχύρρυθμη αύξηση του ΡΕΘ και κατεύθυνση της φλόγας προς το άνοιγμα, λόγω της έλλειψης οξυγόνου. (γ) Στάδιο πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς (post flashover phase), στο οποίο πραγματοποιούνται καύσεις και στον εξωτερικό χώρο, με φλόγες που εξέρχονται από το άνοιγμα (περίπου το 50% της έκλυσης θερμότητας πραγματοποιείται στον εξωτερικό χώρο). (δ) Πτωτικό στάδιο της φωτιάς (decay phase), στο οποίο η εμφάνιση φλόγας στον εξωτερικό χώρο γίνεται ανά διαστήματα, μέχρι την τελική κατάσβεση της φωτιάς. Στο Σχήμα 3.15 αναπαρίσταται η εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



**Σχήμα 3.15** Ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης [64]

Ερευνώντας τη συμπεριφορά προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς εξερχόμενης από άνοιγμα οι Yakovchuk et al. συμπέραναν ότι η τοποθεσία της πρόσοψης στην οποία η φωτιά προκαλεί τις περισσότερες αλλοιώσεις, βρίσκεται στο ανώτερο σημείο της εξερχόμενης

φλόγας από το άνοιγμα, γεγονός το οποίο επαληθεύει το αντίστοιχο συμπέρασμα που προέκυψε από ανάλογη πειραματική δοκιμή [65]. Στο Σχήμα 3.16 παρατίθενται στιγμιότυπα της προσομοίωσης.



**Σχήμα 3.16** Στιγμιότυπα προσομοίωσης σε (α) 5 min και (β) 30 min από την έναρξή της [65]

Επιπροσθέτως οι Chen et al. σε μελέτη υπολογιστικής προσομοίωσης, ερευνώντας δώδεκα περιπτώσεις προσόψεων οι οποίες διέθεταν αεριζόμενη κοιλότητα, παρατήρησαν έναυση του συστήματος πρόσοψης, όταν η εσωτερική εστία φωτιάς διέθετε ισχύ ανώτερη ή ίση των 500 kW [66]. Ταυτόχρονα, η αύξηση του μεγέθους της αεριζόμενης κοιλότητας οδήγησε σε ανάπτυξη μεγαλύτερης φλόγας.

Όσον αφορά στην επίδραση των οριζόντιων προβολών, οι Nilsson et al. παρατήρησαν σημαντικά μειωμένες τιμές θερμοκρασίας στις επιφάνειες των προσόψεων στις οποίες τοποθετήθηκαν και εν γένει καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος έναντι στη φωτιά [67]. Παράλληλα, μολονότι η αύξηση της θερμοροής της εστίας επέφερε αύξηση των θερμοκρασιών, οι εν λόγω αλλαγές, λόγω του μικρού τους μεγέθους, δεν είναι καθοριστικής σημασίας για την εξέλιξη της πυρκαγιάς.

Τέλος οι Dréan et al., σε μελέτη υπολογιστικής προσομοίωσης σύνθετων πλαισίων αλουμινίου σε συνθήκες φωτιάς, συμπέραναν ότι καθοριστικό παράγοντα για τη συμπεριφορά του συστήματος αποτελεί το υλικό του πυρήνα των πλαισίων, σε αντίθεση με το κύριο θερμομονωτικό υλικό το οποίο τοποθετείται πίσω από τα πλαίσια [45]. Πιο συγκεκριμένα, πλαίσια με πυρήνα πολυαιθυλενίου παρουσίασαν, ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου θερμομονωτικού υλικού, ραγδαία ανάπτυξη φλόγας και ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Ακόμα και σε περιπτώσεις χρήσης πολυϊσοκυανικού αφρού ως θερμομόνωση, η συμβολή του εύφλεκτου αυτού υλικού στην ανάπτυξη φλόγας, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να συγκριθεί με τη συμβολή του πολυαιθυλενίου.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Νομοθετικό πλαίσιο πυροπροστασίας κτηρίων

#### 4.1 Νομοθετικές απαιτήσεις

Η εξασφάλιση επαρκούς πυροπροστασίας των κτηριακών εγκαταστάσεων αποτελεί βασικό εχέγγυο ακεραιότητας, τόσο των κτηριακών δομών, όσο και των ευρισκόμενων ανθρώπων σε αυτές. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται διατάξεις κανονισμών πυροπροστασίας ευρωπαϊκών χωρών, οι οποίες αφορούν στην παροχή πυρασφάλειας των κτηριακών προσόψεων.

##### 4.1.1 Ελλάδα

Ο ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτηρίων [68] ορίζει τα απαιτούμενα κριτήρια επιδόσεων δεικτών πυραντίστασης των δομικών κτηριακών στοιχείων όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1** Κατηγορίες κριτηρίων δεικτών πυραντίστασης<sup>1</sup> δομικών στοιχείων [68]

Δομικά στοιχεία	Ελάχιστα κριτήρια επιδόσεων
Φέρουσα Τοιχοποιία (εξωτερική και εσωτερική)	REI
Εξωτερική μη φέρουσα τοιχοποιία	EI
Φέροντα κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα, τοιχία, συστήματα πλασιών κλπ.)	R
Πυράντοχες πόρτες, παράθυρα και παραθυρόφυλλα	EI
Εξωτερική μη φέρουσα τοιχοποιία, τοίχοι πυροπροστατευμένων οδεύσεων και τοίχοι πυροδιαμερισμάτων	EI
Διαχωριστικά δομικά στοιχεία ορόφων - πυροφραγμοί (Πλάκες και δοκοί)	REI
Τοίχοι κλιμακοστασίων	EI
Φέροντα στοιχεία κλιμακοστασίων	R
Αυτοφερόμενες επικαλύψεις στέγης (πάνελ κλπ.)	REI

Η τιμή του δείκτη πυραντίστασης καθορίζεται από το ύψος του κτηρίου, καθώς και από τη χρήση του, ενώ οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές για κάθε είδος κτηρίου παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.2.

<sup>1</sup> Ο ορισμός του δείκτη πυραντίστασης, καθώς και οι κατηγορίες του δίνονται στο υπο-κεφάλαιο 4.2.2.

**Πίνακας 4.2** Ελάχιστοι επιτρεπόμενοι δείκτες πυραντίστασης [68]

Κατ/ρία	Χρήση	Υποκ/ρία	Ελάχιστος δείκτης πυραντίστασης (min)					
			Υπόγειοι όροφοι		Υπέργειοι όροφοι			
			Ύψους > 10 m <sup>2</sup>	Ύψους ≤ 10 m <sup>2</sup>	Έως 2 όροφοι, ≤ 5 m (ανώτατη στάθμη δαπέδου)	Από 3 έως 6 όροφοι, ≤ 15 m <sup>2</sup>	Από 7 έως 10 όροφοι, ≤ 27 m <sup>2</sup>	> 27 m
A	Κατοικία		90	60	30	60	90	120
B	Προσωρινή Διαμονή		90	60	30	60	90	120
Γ	Χώροι Συνάθροισης Κοινού		120	90	60	90	120	180
Δ	Εκπαίδευση		90	60	30	60	90	120
Ε	Υγεία και Κοινωνική Πρόνοια		120	90	60	90	120	180
Z	Σωφρονισμός		120	90	60	90	120	180
Η	Εμπόριο		120	90	60	90	120	180
Θ	Γραφεία		90	60	30	60	90	120
I	Βιομηχανία - Βιοτεχνία <sup>3</sup>	Z1	120	90	60	90	120	
		Z2	180	120	90	120	180	
		Z3	240	180	90	180	240	
K	Αποθήκευση <sup>3</sup>	Z1	120	90	90	120	180	
		Z2	240	180	120	180	240	
		Z3	240		180	240		
Λ	Στάθμευση και πρατήρια υγρών καυσίμων <sup>4</sup>	Λ1, Λ2 ανοικτά	-	-	30	60	90	
		Λ1, Λ2, Λ3 κλειστά και Λ4	120	90	60	90	120	180

Προκειμένου να αποφευχθεί η μετάδοση πυρκαγιάς από και προς το εκάστοτε κτήριο, ορίζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις αναφορικά με τις εξωτερικές τοιχοποιίες, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

<sup>2</sup> Αφορά στη στάθμη δαπέδου του κατώτατου ορόφου για τα υπόγεια, ή του ανώτατου ορόφου για τα υπέργεια τμήματα από τον όροφο εκκένωσης.

<sup>3</sup> Η κατηγοριοποίηση Z1, Z2 και Z3 αντιστοιχεί σε κτήρια χαμηλού, μέσου και υψηλού βαθμού κινδύνου.

<sup>4</sup> Η κατηγοριοποίηση Λ1, Λ2, Λ3 αντιστοιχεί σε ισόγειους, υπέργειους πολυώροφους και υπόγειους χώρους στάθμευσης, ενώ η Λ4 σε καταστήματα πρατηρίων υγρών καυσίμων, πλυντήρια - λιπαντήρια αυτοκινήτων, χώρους με αντλίες καυσίμων σε ιδιωτικές επιχειρήσεις και λοιπές συναφείς χρήσεις σε χώρους πρατηρίων.

**Πίνακας 4.3** Ελάχιστες απαιτήσεις ελέγχου εξωτερικής μετάδοσης της φωτιάς<sup>5</sup> [68]

Απαίτηση	Απόσταση τοίχου από το όριο οικοπέδου ή από άλλο κτήριο			
	< 3 m	3 – 5 m	5 – 10 m	> 10 m
Δείκτης πυραντίστασης εξωτερικού τοίχου	Πλήρης <sup>6</sup>	Πλήρης <sup>6</sup>	Μισή	Χωρίς απαίτηση
Κατηγορία <sup>7</sup> αντίδρασης στη φωτιά εξωτερικής επένδυσης	B-s1, d1	B-s1, d2	C-s2, d2	D-s2, d2
	A2-s1, d0 <sup>8</sup>	A2-s1, d1 <sup>8</sup>	B-s2, d2 <sup>8</sup>	C-s2, d2 <sup>8</sup>
Ποσοστό ανοιγμάτων <sup>9</sup>	≤ 15 %	≤ 25 %	≤ 50 %	≤ 80 %

Επιπροσθέτως, η απόσταση μεταξύ εξωτερικών ανοιγμάτων τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα και δεν διαθέτουν τον απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης, ορίζεται ίση ή μεγαλύτερη των 1,40 m.

#### 4.1.2 Ηνωμένο Βασίλειο

Σύμφωνα με τον κανονισμό πυροπροστασίας κτηρίων του Ηνωμένου Βασιλείου [69], οι εξωτερικές τοιχοποιίες κτηρίων θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις που δίνονται από την τεχνική έκθεση BR 135 [70], χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις δοκιμές φωτιάς σε πρόσοψη μεγάλης κλίμακας BS 8414-1 [71] ή BS 8414-2 [72], είτε να ακολουθούν τις διατάξεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Όσον αφορά στις κοιλότητες οι οποίες βρίσκονται στο εξωτερικό του κτηρίου ο κανονισμός προβλέπει τοποθέτηση διατάξεων περιορισμού της μετάδοσης της φωτιάς (cavity barriers) στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- i. Στις άκρες κοιλοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των ανοιγμάτων.
- ii. Στις κτηριακές ενώσεις μεταξύ κοιλοτήτων εξωτερικών τοίχων και εσωτερικών δαπέδων ή τοίχων.

Παράλληλα οι εν λόγω διατάξεις απαιτείται να παρέχουν αντίσταση στη φωτιά για χρονικό διάστημα κατ' ελάχιστο 30 λεπτών.

Επιπροσθέτως, αναφορικά με την κρίσιμη απόσταση διαχωρισμού των κτηρίων από το σχετικό όριο, απόσταση η οποία επιδρά στη συμπεριφορά της εξωτερικής επένδυσης στη φωτιά, η τιμή της είναι 1 m. Για αποστάσεις μικρότερες του 1 m, όλα τα ανοίγματα απαιτείται να είναι κατασκευασμένα με υαλοπίνακες ανθεκτικούς στη φωτιά. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες της κρίσιμης, το ποσοστό των μη προστατευόμενων επιτρεπόμενων εξωτερικών ανοιγμάτων σταδιακά αυξάνεται έως το 100%. Ωστόσο η μεγιστοποίηση του εν λόγω ποσοστού σημειώνεται σε διαφορετικές τιμές της απόστασης διαχωρισμού για κτήρια διαφορετικών χρήσεων, π.χ. στα 6 m για μικρά κτήρια οικιστικής

<sup>5</sup> Για χώρους υψηλού βαθμού κινδύνου η απόσταση διπλασιάζεται.

<sup>6</sup> Η απαιτούμενη πυραντίσταση για τοίχο πυροδιαμερίσματος, σύμφωνα με τη δοκιμασία επιφανειακής εξάπλωσης της φλόγας.

<sup>7</sup> Οι κατηγορίες αυτές αφορούν στο ευρωπαϊκό σύστημα κλάσεων (Euroclass system) και αναλύονται ενδελεχώς στο υπο-κεφάλαιο 4.2.1.

<sup>8</sup> Απαίτηση για κτίρια υποκατηγορίας E1 και E3 της χρήσης υγείας και κοινωνικής πρόνοιας, ή κτίρια με θεωρητικό πληθυσμό άνω των 1000 ατόμων, ή κτίρια που στεγάζουν δημόσια και ιδιωτικά σχολεία

<sup>9</sup> Το επιτρεπόμενο μέγιστο ποσοστό ανοιγμάτων, στη συνολική επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου, διπλασιάζεται εάν τα κουφώματα έχουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον 30 λεπτών (EI 30).

χρήσης, στα 12,5 m για μεγάλα κτήρια οικιστικής χρήσης, για γραφεία, κτήρια προοριζόμενα για συνάθροιση κοινού ή ψυχαγωγία, ενώ για κτήρια εμπορικής, βιομηχανικής, αποθηκευτικής και κάθε άλλης μη οικιστικής χρήσης η απόσταση αυτή φτάνει τα 25 m [5].

**Πίνακας 4.4** Απαιτήσεις συμπεριφοράς υλικών εξωτερικών τοιχωμάτων του κανονισμού πυροπροστασίας κτηρίων του Ηνωμένου Βασιλείου [69]

Τύπος κτηρίου	Ύψος κτηρίου	Κατηγορία υλικών σε απόσταση μικρότερη των 1000 mm από το σχετικό όριο <sup>10</sup> (relevant boundary)	Κατηγορία υλικών σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000 mm από το σχετικό όριο (relevant boundary)
«Σχετικά κτήρια» <sup>11</sup>		A2-s1, d0 ή καλύτερη	A2-s1, d0 ή καλύτερη
Κτήρια ψυχαγωγίας και συνάθροισης κοινού	Άνω των 18 m	B-s3, d2 ή καλύτερη	Από το έδαφος έως τα 18 m: C-s3, d2 ή καλύτερη
	Κάτω των 18 m		Άνω των 18 m: B-s3, d2 ή καλύτερη
		Από το έδαφος έως τα 10 m: C-s3, d2 ή καλύτερη	
			Μέχρι και 10 m πάνω από μία οροφή ή οποιοδήποτε μέρος του κτηρίου προσβάσιμο από το κοινό: C-s3, d2 ή καλύτερη
Άνω των 10 m: Καμία ελάχιστη απαίτηση			
Άλλων ειδών κτήρια	Άνω των 18 m	B-s3, d2 ή καλύτερη	Από το έδαφος έως τα 18 m: C-s3, d2 ή καλύτερη
	Κάτω των 18 m		Άνω των 18 m: B-s3, d2 ή καλύτερη
	Κάτω των 18 m	B-s3, d2 ή καλύτερη	Δεν υπάρχει διάταξη

#### 4.1.3 Κύπρος

Ο κανονισμός πυροπροστασίας κτηρίων της Κύπρου [73], όσον αφορά στα θερμομονωτικά υλικά εξωτερικών τοιχοποιιών που εγκαθίστανται σε οικίες, νοσηλευτήρια και οποιοσδήποτε οικοδομές ύψους του τελευταίου ορόφου άνω των 10 m, συνιστά χρήση υλικών περιορισμένης αναφλεξιμότητας και εξάπλωσης της φωτιάς, τα οποία δεν παράγουν τοξικό καπνό. Παράλληλα, στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι κατηγορίες υλικών του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων που απαιτούνται να χρησιμοποιούνται, με

<sup>10</sup> Το σχετικό όριο του κτηρίου είναι το εκάστοτε όριο που αντικρίζει ο τοίχος ενός κτηρίου. Σχετικό όριο μπορεί να είναι το όριο του οικοπέδου στο οποίο βρίσκεται το κτήριο, το όριο του κτηρίου με χώρο που δεν προορίζεται για περπατήριω αξιοποίηση (π.χ. δρόμος), ή το νοητό όριο μεταξύ κτηρίων ευρισκόμενων στο ίδιο οικόπεδο.

<sup>11</sup> Σχετικά κτήρια ονομάζονται κτήρια τα οποία διαθέτουν όροφο τουλάχιστον 18 m άνω του εδάφους, περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες κατοικίες, ένα ίδρυμα και ένα δωμάτιο οικιστικής λειτουργίας (εκτός δωματίων ξενοδοχείων, ξενώνων κλπ.).



κριτήρια το ύψος του τελευταίου δαπέδου και της απόστασης της πρόσοψης από το σύνορο του οικοπέδου ή τεμαχίου.

**Πίνακας 4.5** Ελάχιστες απαιτήσεις ελέγχου εξωτερικής μετάδοσης της φωτιάς του Κυπριακού κανονισμού πυροπροστασίας κτηρίων [73]

Ύψος τελευταίου δαπέδου (m)	Απόσταση από το σύνορο του οικοπέδου ή τεμαχίου		
	< 2 m	2 – 6 m	> 6 m
< 10 m	A1 ή A2-s3, d2 <sup>12</sup>	B-s3, d2 ή καλύτερη	Χωρίς απαίτηση
> 10 m	A1 ή A2-s3, d2 <sup>1</sup>	B-s3, d2 ή καλύτερη	C-s3, d2 ή καλύτερη

Για οικιστικά κτήρια, κτήρια συνάθροισης κοινού, νοσηλευτήρια, οικοδομές κοινωνικής πρόνοιας υποστατικά και εμπορικά κτήρια, προβλέπεται χρήση θερμομονωτικών υλικών καλύτερης συμπεριφοράς ως προς την παραγωγή καπνού και σταγονιδίων όπως S1 και d0. Επιπροσθέτως, ο κανονισμός ορίζει τις ελάχιστες τιμές του δείκτη πυραντίστασης για εξωτερικές τοιχοποιίες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6** Ελάχιστες τιμές δεικτών πυραντίστασης για εξωτερικές τοιχοποιίες [73]

	R	E	I
Οποιοδήποτε μέρος του τοίχου σε απόσταση < 1 m από οποιοδήποτε σημείο του συνόρου	Η τιμή αντιστοιχεί σε δείκτη πυραντίστασης περιβλήματος πυροδιαμερίσματος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7	Η τιμή αντιστοιχεί σε δείκτη πυραντίστασης περιβλήματος πυροδιαμερίσματος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7	Η τιμή αντιστοιχεί σε δείκτη πυραντίστασης περιβλήματος πυροδιαμερίσματος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7
Οποιοδήποτε μέρος του τοίχου σε απόσταση ≥ 1 m από οποιοδήποτε σημείο του συνόρου	Η τιμή αντιστοιχεί σε δείκτη πυραντίστασης περιβλήματος πυροδιαμερίσματος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7	Η τιμή αντιστοιχεί σε δείκτη πυραντίστασης περιβλήματος πυροδιαμερίσματος όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7	15
Οποιοδήποτε μέρος του τοίχου παρακείμενο σε έναν εξωτερικό διάδρομο διαφυγής	30	30	Περιορισμός στους υαλοπίνακες

Ο Πίνακας 4.7 υποδεικνύει τις ελάχιστες τιμές των δεικτών πυραντίστασης του περιβλήματος των πυροδιαμερισμάτων, οι οποίες αντιστοιχούν σε δείκτες πυραντίστασης εξωτερικών τοιχοποιιών στις περιπτώσεις που σημειώθηκαν στον Πίνακα 4.6.

<sup>12</sup> Εξαιρούνται κτήρια γραφείων και ιδιωτικών κατοικιών, στα οποία η κατηγορία Euroclass δύναται να μειωθεί στις B-s3, d2 και C-s3, d2 αντίστοιχα.

Τέλος ο κανονισμός ορίζει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ εξωτερικών ανοιγμάτων διαφορετικών πυροδιαμερισμάτων σε 1,5 m.

**Πίνακας 4.7** Ελάχιστες τιμές δεικτών πυραντίστασης πυροδιαμερισμάτων [73]

Κατηγορία κινδύνου πυρκαγιάς <sup>13</sup>	Ύπαρξη καταιονισμού	Βάθος τελειωμένου δαπέδου		Ύψος από το τελειωμένο δάπεδο του υψηλότερου κατοικήσιμου ορόφου μέχρι το επίπεδο στη χαμηλότερη πλευρά της οικοδομής			
		< 5 m	> 5 m	< 5 m	< 16 m	< 28 m	> 28 m
Α	Όχι	30	Δεν ισχύει	30	60	60	Δεν ισχύει
	Ναι	30	30	30	30	30	60
Β	Όχι	60	Δεν ισχύει	60	60	60	Δεν ισχύει
	Ναι	30	60	30	30	30	60
Γ	Όχι	60	Δεν ισχύει	60	90	90	Δεν ισχύει
	Ναι	30	60	30	60	60	90
Δ	Όχι	90	Δεν ισχύει	90	90	120	Δεν ισχύει
	Ναι	60	90	60	60	90	90

#### 4.1.4 Κροατία

Ο κανονισμός πυρασφάλειας της Κροατίας, αναφορικά με τη χρήση υλικών σε συστήματα προσόψεων, καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις τους, στο σύστημα ευρωπαϊκών κλάσεων, με βάση την κατηγορία του εκάστοτε κτηρίου, όπως αυτή ορίζεται από τον κανονισμό [10]. Η εν λόγω κατηγοριοποίηση των κτηρίων διαφαίνεται στον Πίνακα 4.8.

**Πίνακας 4.8** Κατηγοριοποίηση κτηρίων του κανονισμού πυροπροστασίας της Κροατίας [10]

	Κατηγορία κτηρίου					
	ZPS1	ZPS2	ZPS3	ZPS4	ZPS5	Ουρανοξύστες
Ύψος κτηρίου (m)	7	7	7	11	< 22	≥ 22
Συνολικό εμβαδόν δαπέδου (m <sup>2</sup> )	≤ 400	≤ 1200	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου <sup>14</sup>
Ακαθάριστο εμβαδόν μονής οικιστικής ή επαγγελματικής μονάδας (m <sup>2</sup> )	≤ 400	≤ 400	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου αν υπάρχει μία οικιστική ή επαγγελματική μονάδα ≤ 400 ανά οικιστική ή επαγγελματική μονάδα	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου
Μέγιστος αριθμός μονάδων	1	≤ 3	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου	Άνευ ορίου
Αριθμός χρηστών	≤ 50	≤ 100	≤ 300	≥ 300	≥ 300 σε μία μονάδα	Άνευ ορίου

<sup>13</sup> Οι κατηγορίες κινδύνου πυρκαγιάς (ΚΚΠ) αποτελούν μια κατηγοριοποίηση των πυρκαγιών του κυπριακού κανονισμού πυροπροστασίας με βάση τη χρήση του εκάστοτε κτηρίου. Η σοβαρότητα μιας πυρκαγιάς ΚΚΠ-Β είναι μεγαλύτερη από μια ΚΚΠ-Α και ούτω καθεξής.

<sup>14</sup> Αναμένεται έκδοση ειδικής διάταξης για την κατηγοριοποίηση των ουρανοξυστών.

Εν συνεχεία, παρατίθενται στον Πίνακα 4.9 οι ελάχιστες αποδεκτές κατηγορίες δομικών υλικών προσόψεων, με βάση το σύστημα ευρωπαϊκών κλάσεων και τον κανονισμό πυροπροστασίας της Κροατίας.

**Πίνακας 4.9** Απαιτούμενες κατηγορίες δομικών υλικών προσόψεων στην Κροατία [10]

Κατασκευαστικό μέρος		Κατηγορία κτηρίου						
		ZPS1	ZPS2	ZPS3	ZPS4		ZPS5	Ουρανοξύστες
Αναρτημένα αεριζόμενα στοιχεία	Κλάση συστήματος	E	D-d1	D-d1	C-d1		B-d1	A2-d1
	Ή κατηγορίες επιμέρους στοιχείων							
	Τελική επίστρωση	E	D	D	A2-d1	ή	B-d1	A2-d1
	Υπόστρωμα							
	- Υπόστρωμα με βλήτρα (Dowel type substructure)	E	D	D	D		C	A2
	- Διάστικτο υπόστρωμα (Dotted substructure)	E	D	A2	A2		A2	A2
	Μόνωση	E	D	D	B	ή	A <sub>2</sub>	A2
Σύστημα θερμικής επαφής της πρόσοψης	Κλάση συστήματος	E	D	D-d1	C-d1		B-d1	A2-d1
	Ή επιμέρους επιστρώσεις							
	Τελική επίστρωση	E	D	D	C		B-d1	A2-d1
	Μονωτική επίστρωση	E	D	C	B		A2	A2

Επιπροσθέτως, απαιτείται η κατασκευή κατακόρυφων προβολών (στηθαίων) μεταξύ ανοιγμάτων υπερκείμενων ορόφων ύψους  $\geq 1,20$  m, ίδιας πυραντίστασης με των γειτονικών πυροδιαμερισμάτων, προκειμένου να αποφευχθεί η κατακόρυφη εξάπλωση της φωτιάς μέσω των ανοιγμάτων αυτών. Εφόσον στην κατασκευή υπάρχουν και οριζόντιες προβολές (π.χ. μπαλκόνια) το συνολικό μήκος που υπολογίζεται αποτελεί το άθροισμα του ύψους του στηθαίου και του μήκους της οριζόντιας προβολής.

## 4.2 Ταξινόμηση υλικών

Η επιλογή και εγκατάσταση κατάλληλων υλικών αποτελεί διαδικασία ιδιάζουσας σημασίας, αναφορικά με την ασφάλεια των κτηριακών μονάδων σε συνθήκες φωτιάς. Στην κατεύθυνση αυτή, χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μεταξύ άλλων και η Ελλάδα, έχουν θεσπίσει συστήματα ταξινόμησης κτηριακών υλικών και δομικών στοιχείων, ώστε η επιλογή αυτή να γίνεται όσο το δυνατόν με πιο τυποποιημένο και ασφαλή τρόπο.

## 4.2.1 Σύστημα ευρωπαϊκών κλάσεων (Euroclass system)

Το σύστημα ευρωπαϊκών κλάσεων (Euroclass system) αποτελεί μέθοδο ταξινόμησης δομικών υλικών ως προς την αντίδρασή τους σε συνθήκες φωτιάς. Η ταξινόμηση αυτή ακολουθεί τις απαιτήσεις του προτύπου EN 13501-1 και πραγματοποιείται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

## i. Συμβολή του υλικού στην ανάφλεξη και καύση

Η κατηγοριοποίηση των υλικών αναφορικά με τη συμβολή τους στην ανάφλεξη και την καύση πραγματοποιείται σε επτά κατηγορίες υλικών, τις A1, A2, B, C, D, E και F, με τις κατηγορίες A1 και A2 να αποτελούνται από πρακτικά άκαυστα υλικά, ενώ σταδιακά η συμβολή των υλικών στην καύση μεγαλώνει, οδεύοντας προς την κατηγορία F. Αναλυτικότερα, οι κατηγορίες και οι συμπεριφορές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10.

**Πίνακας 4.10** Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών σε ανάφλεξη και καύση [68]

Κατηγορία	Συμπεριφορά υλικού
A1	Πρακτικά άκαυστα υλικά τα οποία δεν συνεισφέρουν στην ανάπτυξη της φωτιάς και δεν οδηγούν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης
A2	Πρακτικά άκαυστα υλικά με άνευ σημασίας συνεισφορά στην ανάπτυξη της φωτιάς, τα οποία δεν οδηγούν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης
B	Υλικά πολύ χαμηλής αναφλεξιμότητας και συνεισφοράς στην ανάπτυξη της φωτιάς, τα οποία δεν οδηγούν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης
C	Εύφλεκτα υλικά περιορισμένης συνεισφοράς στην ανάπτυξη της φωτιάς, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης μετά από 10 min από την αρχή της δοκιμής <sup>15</sup>
D	Εύφλεκτα υλικά που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη της φωτιάς και μπορούν να οδηγήσουν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης μετά από 2 – 10 min από την αρχή της δοκιμής
E	Εύφλεκτα υλικά σημαντικής συνεισφοράς στην ανάπτυξη της φωτιάς, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε κατάσταση καθολικής ανάφλεξης σε λιγότερο από 2 min από την αρχή της δοκιμής
F	Υλικά τα οποία δεν έχουν δοκιμαστεί όσον αφορά στην αντίδρασή τους στη φωτιά ή πολύ εύφλεκτα υλικά τα οποία δεν πληρούν τις απαιτήσεις κατάταξής τους στην κατηγορία E

## ii. Συμβολή του υλικού στην παραγωγή καπνού

Η κατάταξη των υλικών αναφορικά με τη συμβολή τους στην παραγωγή καπνού παρατίθεται στον Πίνακα 4.11.

<sup>15</sup> Δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο EN 13501-1

**Πίνακας 4.11** Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών στην παραγωγή καπνού [68]

Κατηγορία	Συμπεριφορά υλικού
s1	Μηδενική ή πολύ μικρή παραγωγή καπνού
s2	Μέτρια παραγωγή καπνού
s3	Σημαντική παραγωγή καπνού

- iii. Συμβολή του υλικού στην παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων  
 Η κατάταξη των υλικών αναφορικά με τη συμβολή τους στην παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων παρατίθεται στον Πίνακα 4.12.

**Πίνακας 4.12** Ευρωπαϊκές κλάσεις συμβολής υλικών στην παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων [68]

Κατηγορία	Συμπεριφορά υλικού
d0	Μηδενική παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων
d1	Μικρή παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων
d2	Σημαντική παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων

Η τελική ταξινόμηση των υλικών προκύπτει μέσω συνδυασμών των κατηγοριών που προαναφέρθηκαν, ενώ το σύνολο των πιθανών συνδυασμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.13.

**Πίνακας 4.13** Πιθανοί συνδυασμοί κατηγοριών του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων [68]

A1		
A2-s1, d0	A2-s1, d1	A2-s1, d2
A2-s2, d0	A2-s2, d1	A2-s2, d2
A2-s3, d0	A2-s3, d1	A2-s3, d2
B-s1, d0	B-s1, d1	B-s1, d2
B-s2, d0	B-s2, d1	B-s2, d2
B-s3, d0	B-s3, d1	B-s3, d2
C-s1, d0	C-s1, d1	C-s1, d2
C-s2, d0	C-s2, d1	C-s2, d2
C-s3, d0	C-s3, d1	C-s3, d2
D-s1, d0	D-s1, d1	D-s1, d2
D-s2, d0	D-s2, d1	D-s2, d2
D-s3, d0	D-s3, d1	D-s3, d2
E		E-d2 <sup>16</sup>
F		

#### 4.2.2 Δείκτες πυραντίστασης

Ο ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτηρίων [68] ορίζει την πυραντίσταση ως «την ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου να αντιστέκεται για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, που ονομάζεται δείκτης πυραντίστασης, στα θερμικά αποτελέσματα μιας φωτιάς, χωρίς απώλεια της ευστάθειας, της ακεραιότητας και της

<sup>16</sup> Η παραγωγή καπνού στα υλικά της κατηγορίας E θεωρείται δεδομένη και ως εκ τούτου δεν εξετάζονται ως προς το κριτήριο αυτό.

αντίστασης στη δίοδο της θερμότητας». Οι εν λόγω δείκτες υπολογίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών ακολουθώντας το πρότυπο EN 13501-2. Τις τιμές των δεικτών συνοδεύουν τα κριτήρια πυραντίστασης, εκ των οποίων τα σημαντικότερα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

**Πίνακας 4.14** Κριτήρια αξιολόγησης για τον καθορισμό του δείκτη πυραντίστασης [68]

Σύμβολο	Κριτήριο	Περιγραφή κριτηρίου
R	Ευστάθεια ή φέρουσα ικανότητα (load bearing capacity)	Ικανότητα ενός φέροντος στοιχείου της οικοδομής, εκτεθειμένου στη φωτιά, να αντέχει μηχανικές δράσεις, χωρίς απώλεια της δομικής του ευστάθειας – ικανότητας
E	Ακεραιότητα (integrity)	Ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, εκτεθειμένου σε φωτιά στη μία του πλευρά, να μην επιτρέπει τη διέλευση φλογών, θερμών αερίων και καπνού, αποτρέποντας την εμφάνισή τους στη μη εκτεθειμένη στη φωτιά πλευρά
I	Θερμομονωτική ικανότητα (thermal insulation)	Ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, εκτεθειμένου στη φωτιά στη μία του πλευρά, να περιορίζει την άνοδο της θερμοκρασίας στη μη εκτεθειμένη πλευρά, εντός καθορισμένων ορίων
W	Περιορισμός θερμικής ακτινοβολίας (limitation of radiation)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου, εκτεθειμένου στη φωτιά στη μία του πλευρά, να περιορίζει την πιθανότητα μετάδοσης της θερμικής ακτινοβολίας διαμέσου του στοιχείου ή από τη μη εκτεθειμένη του πλευρά σε γειτονικά υλικά
M	Μηχανική αντοχή (mechanical resistance)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να αντιστέκεται στην επιρροή μιας προκαθορισμένης δύναμης πρόσκρουσης, λόγω δομικής αστοχίας ενός άλλου στοιχείου
C	Ικανότητα αυτοσφράγισης (self closure)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου (θύρας ή ρολού) να κλείνει πλήρως και αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, ανεξαρτήτως της διαθεσιμότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
S	Διαρροή καπνού (smoke leakage)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μειώνει ή να περιορίζει τη δίοδο θερμών αερίων και καπνού από τη μία πλευρά του στην άλλη

Ο δείκτης πυραντίστασης, όπως προαναφέρθηκε αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσότερων κριτηρίων αξιολόγησης με μία εκ των προτύπων κατηγοριών χρονικής διάρκειας σε min (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360). Η χρονική διάρκεια που επιλέγεται για το εκάστοτε υλικό, αντιστοιχεί στη μέγιστη πρότυπη χρονική κατηγορία για την οποία ικανοποιεί το εξεταζόμενο κριτήριο πυραντίστασης. Ο δείκτης πυραντίστασης έχει τη μορφή XX tt, όπου XX το κριτήριο αξιολόγησης και tt το αντίστοιχο πρότυπο χρονικό διάστημα. Εφόσον απαιτηθεί εφαρμογή περισσότερων από ένα κριτηρίων, στο πεδίο XX του δείκτη αναγράφονται οι συμβολισμοί των απαιτούμενων κριτηρίων, ενώ στο πεδίο tt το μέγιστο πρότυπο χρονικό διάστημα για το οποίο υπάρχει ταυτόχρονη ικανοποίηση των κριτηρίων που εξετάζονται.

### 4.3 Πρότυπες δοκιμές φωτιάς προσόψεων

Ο έλεγχος της συμπεριφοράς στοιχείων κτηριακών προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς, διενεργείται με την τέλεση πρότυπων δοκιμών. Το προκαθορισμένο μέγεθος της εκάστοτε εξεταζόμενης διάταξης καθορίζει την κλίμακα της δοκιμής, η οποία μπορεί να είναι μεγάλου (large scale), μεσαίου (medium scale), ή μικρού μεγέθους (small scale). Στο προκείμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τέτοιες δοκιμές μεγάλης κλίμακας, τριών διαφορετικών Ευρωπαϊκών χωρών. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει κάποιο κοινό εναρμονισμένο Ευρωπαϊκό πρότυπο για την εκτέλεση δοκιμών φωτιάς σε συστήματα πρόσοψης.

#### 4.3.1 Δοκιμές BS 8414-1:2020, BS 8414-2:2020 [71], [72]

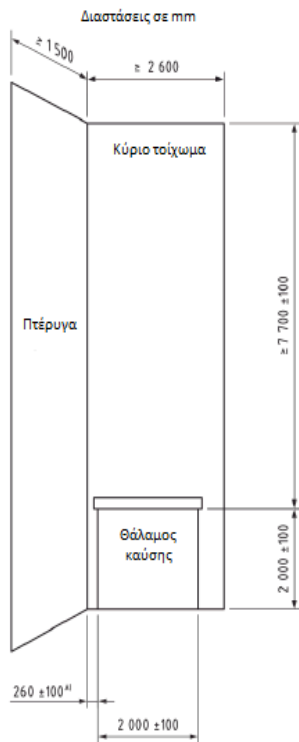
Οι δοκιμές BS 8414-1:2020 και BS 8414-2:2020 συνιστούν μεθόδους διερεύνησης της συμπεριφοράς μη φερόντων συστημάτων κτηριακών προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς, υποστηριζόμενων από υποστρώματα τοιχοποιίας και δομικών χαλύβδινων πλαισίων, αντίστοιχα. Η χώρα προέλευσής τους είναι το Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ κατατάσσονται στις δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Η έκθεση των συστημάτων πρόσοψης στη φωτιά προσομοιώνει την αντίδρασή τους σε φωτιά εξωτερικής εστίας ή σε πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά εσωτερικού χώρου η οποία, μέσω ανοίγματος του κτηρίου, επιδρά εξωτερικά στην πρόσοψη. Το σύστημα που εξετάζεται αποτελείται από έναν κατακόρυφο τοίχο ή από ένα χαλύβδινο πλαίσιο αντίστοιχα, πλαισιωμένο από μία πτέρυγα, ευρισκόμενη στη μία του πλευρά σε γωνία 90°, καθώς και από έναν θάλαμο καύσης. Η διάταξη της δοκιμής, καθώς και οι διαστάσεις των επιμέρους στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.

Όσον αφορά στη δοκιμή BS 8414-1, τα στοιχεία που απαρτίζουν την τοιχοποιία (blocks) απαιτούνται να διαθέτουν:

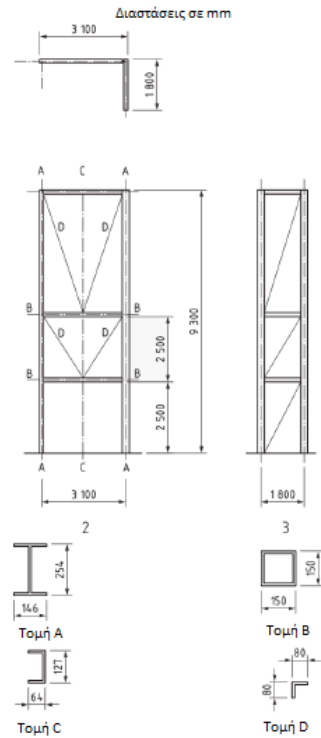
1. Θλιπτική αντοχή 7,3 N/mm<sup>2</sup>
2. Πυκνότητα 730 kg/m<sup>3</sup>
3. Θερμική αγωγιμότητα 0,18 W/mK
4. Πάχος 215 mm

Παράλληλα, στην περίπτωση της δοκιμής BS 8414-2, το χαλύβδινο πλαίσιο οφείλει να είναι ικανό να αντέχει το φορτίο του συστήματος, καθώς και τις εν δυνάμει καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στο Σχήμα 4.2 παρατίθεται μια τυπική διάταξη ενός τέτοιου πλαισίου.

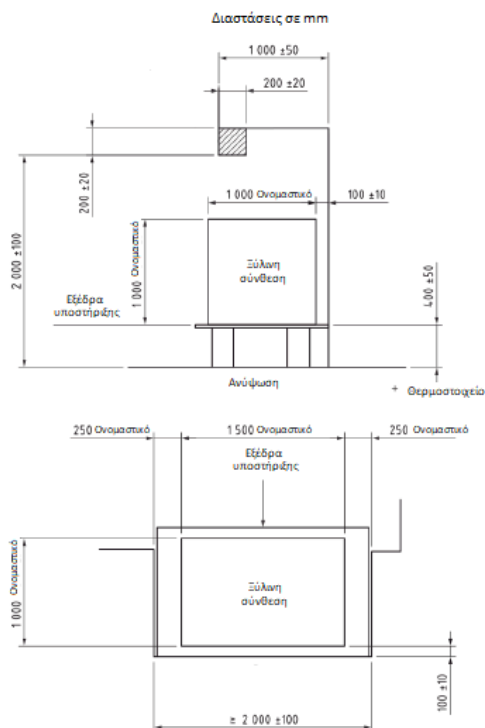
Η εστία φωτιάς αποτελείται από ένα σύνολο ξύλινων ράβδων (timber crib) η διάταξη του οποίου παρουσιάζεται αναλυτικά στη βιβλιογραφία [71], [72]. Η αρχική ανάφλεξη επιτυγχάνεται με την έναυση δύο λωρίδων ινοσανίδων (fibreboard), οι οποίες έχουν πρωτίτερα εμποτιστεί με τερεβινθέλαιο για χρονικό διάστημα 5 min (ο συνολικός αριθμός λωρίδων ινοσανίδων εμποτισμένων με τερεβινθέλαιο είναι δεκαέξι, ωστόσο αρχικά αναφλέγονται δύο). Αναλυτικά, η διάταξη του θαλάμου καύσης και η θέση των ξύλινων ράβδων παρατίθεται στο Σχήμα 4.3. Επιπρόσθετα, προκειμένου να ληφθούν θερμοκρασιακές μετρήσεις, χρησιμοποιούνται εσωτερικά και εξωτερικά θερμοστοιχεία τύπου K, διαμέτρου 1,5 mm, τα οποία θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του προτύπου EN 60584-1:2013.



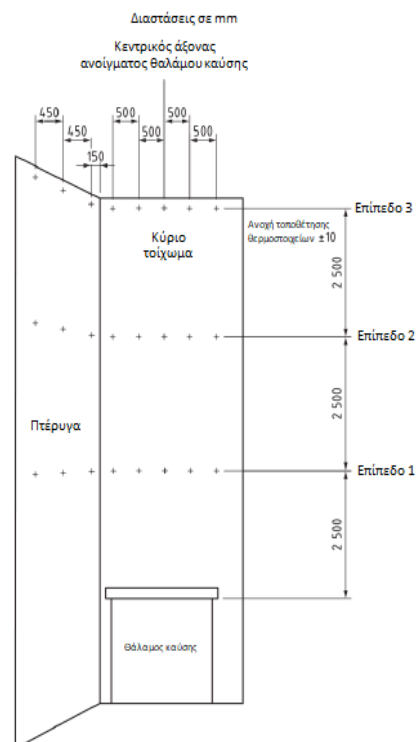
**Σχήμα 4.1** Διάταξη δοκιμών BS 8414-1, BS 8414-2 [71], [72]



**Σχήμα 4.2** Τυπική διάταξη δομικού χαλύβδινου πλαισίου δοκιμής BS 8414-2 [72]



**Σχήμα 4.3** Διάταξη του θαλάμου καύσης δοκιμών BS 8414-1, BS 8414-2 [71], [72]



**Σχήμα 4.4** Σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων στις διατάξεις δοκιμών BS 8414-1, BS 8414-2 [71], [72]



Η λήψη μετρήσεων των θερμοστοιχείων πραγματοποιείται ανά 10 s. Η τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στη διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Προκειμένου να καταστεί δυνατός ένας ενδεχόμενος πρόωρος τερματισμός της δοκιμής σχεδιάζεται μία γραμμή αναφοράς στο επίπεδο 3 (Σχήμα 4.4), ενώ παράλληλα απαιτείται η ύπαρξη συσκευής οπτικοακουστικής καταγραφής της δοκιμής καθ' όλη τη διάρκειά της. Τέλος απαιτείται η ύπαρξη εξοπλισμού μέτρησης της ταχύτητας του αέρα περιβάλλοντος ακρίβειας  $\pm 0,1$  m/s και συσκευή μέτρησης χρόνου ακρίβειας τουλάχιστον 5 s/h.

Αναφορικά με τις διαστάσεις του δείγματος της δοκιμής, λαμβάνοντας ως αρχικό σημείο το εσωτερικό σημείο ένωσης της κύριας πλευράς με την πτέρυγα, θα πρέπει να εκτείνεται κατ' ελάχιστον 2400 mm στην κύρια πλευρά και κατ' ελάχιστον 1200 mm στην πτέρυγα, ενώ το ύψος του, μετρούμενο από τη βάση, πρέπει να είναι  $(7700 \pm 100)$  mm. Σε περίπτωση ύπαρξης αρθρώσεων ή φραγμάτων κοιλοτήτων οι απαιτούμενες διατάξεις περιγράφονται αναλυτικά στη βιβλιογραφία [71], [72]. Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου στη διάταξη και πριν τη διενέργεια της δοκιμής, το δοκίμιο αφήνεται στη θέση αυτή για κάποιο χρονικό διάστημα σύμφωνα με τις εκάστοτε οδηγίες.

Για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 5 min πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής θα πρέπει να τηρηθούν οι ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $(20 \pm 15)$  °C, μετρούμενη ως μέση θερμοκρασία των θερμοστοιχείων του επιπέδου 1 (Σχήμα).
2. Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα αέρα 2 m/s, μετρούμενη σε απόσταση  $(1000 \pm 10)$  mm εμπρός από τον κεντρικό άξονα του ανοίγματος του θαλάμου καύσης.
3. Απουσία ομίχλης ή βροχοπτώσεων για δοκιμές οι οποίες πραγματοποιούνται σε εξωτερικό χώρο.
4. Αρχή λήψης μετρήσεων

Η απόσβεση της φωτιάς πραγματοποιείται 30 min μετά την αρχική ανάφλεξη, ενώ η διαδικασία της δοκιμής διαρκεί συνολικά 60 min. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρείται και καταγράφεται η μηχανική καταπόνηση στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, δηλαδή φλεγόμενα ή μη υπολείμματα καύσης, τα οποία φωτογραφίζονται 29 min 50 s μετά την ανάφλεξη, καθώς και η έκταση διάδοσης των φλογών στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, τόσο κατά τη διάρκεια της δοκιμής, όσο και μετέπειτα κατά τη διάρκεια της κατάσβεσης της φωτιάς.

Μετά την περάτωση της δοκιμής, με μέγιστο χρονικό περιθώριο 24 h, πραγματοποιείται οπτική διερεύνηση κατά την οποία πραγματοποιείται λήψη φωτογραφιών στο εσωτερικό και εξωτερικό του δοκιμίου και εντοπίζονται ζημιές και αλλοιώσεις που προκλήθηκαν πέραν αυτών που οφείλονται στον παραγόμενο καπνό. Αναλυτικότερα, πραγματοποιείται μέτρηση της ποσοστιαίας έκτασης του συστήματος στην οποία προκλήθηκαν υλικές ζημιές, μέτρηση της έκτασης δράσης της φωτιάς εντός κοιλοτήτων, εφόσον υπάρχουν, και σημείωση παρατηρήσεων βοηθητικών στην ποσοτικοποίηση της έκτασης δράσης των φλογών στα επιμέρους στοιχεία του δοκιμίου και στα εσωτερικά επίπεδα του συστήματος.

#### 4.3.2 Δοκιμή DIN 4102-20 (Draft) [5], [74]

Το πρότυπο DIN 4102-20 αποτελεί δοκιμή μεγάλης κλίμακας γερμανικής προέλευσης, η οποία προσομοιώνει την αντίδραση συστημάτων πρόσοψης σε συνθήκες φωτιάς, εξερχόμενης από άνοιγμα κτηρίου στη βάση του τοιχώματος. Η εξέδρα της δοκιμής αποτελείται από δύο πτέρυγες, μία κεντρική, πλάτους 2,5 m και ύψους 6 m, καθώς και από μία πλευρική πλάτους 1,5 m και ύψους 6 m επίσης.

Ο θάλαμος καύσης τοποθετείται στη βάση της κεντρικής πτέρυγας, στο σημείο ένωσής της με την πλευρική, μέσα σε ένα άνοιγμα που δημιουργείται σε εκείνο το σημείο του τοίχου. Το πλάτος και το ύψος του θαλάμου καύσης είναι 1 m, ενώ το μήκος του 0,8 m. Όσον αφορά στο καύσιμο της δοκιμής υπάρχουν δύο δυνατές περιπτώσεις. Η πρώτη είναι ένας καυστήρας αερίου (προπανίου), μήκους 800 mm, πλάτους 312 mm και βάθους 200 mm, παροχής προπανίου ( $7,4 \pm 5\%$ ) g/s και αέρα ( $24 \pm 5\%$ ) g/s, πίεσης 4 bar. Η δεύτερη περίπτωση, η οποία αντικαταστάθηκε από τον καυστήρα [5], είναι ένα σύνολο ξύλινων ράβδων μάζας ( $30 \pm 1,5$ ) kg, μήκους 500 mm, πλάτους 500 mm και ύψους 480 mm, στην οποία παρέχεται αέρας ( $400 \pm 40$ ) m<sup>3</sup>/h μέσω κυκλικής οπής διαμέτρου 300 mm, ευρισκόμενης στο μέσο του οπίσθιου τοίχου του θαλάμου καύσης. Η εστία της φωτιάς παραμένει ενεργή για 20 min, εφόσον το σύστημα πρόσοψης είναι εύφλεκτο και 30 min για μη εύφλεκτα συστήματα πρόσοψης, ενώ η λήψη μετρήσεων και οι παρατηρήσεων διαρκεί συνολικά 60 min από την αρχική ανάφλεξη. Η θερμική έκθεση που προκαλείται από τη φωτιά είναι 60 kW/m<sup>2</sup> σε απόσταση 0,5 m από το άνοιγμα του τοίχου, 35 kW/m<sup>2</sup> στο 1 m και 25 kW/m<sup>2</sup> στο 1,5 m. Παράλληλα, η μέγιστη σημειούμενη εξωτερική θερμοκρασία είναι 780 – 800°C σε απόσταση 1 m από το άνω άκρο του ανοίγματος, ενώ το μέγιστο ύψος των φλογών φτάνει τα 2,5 m περίπου πάνω από το άνοιγμα για μη εύφλεκτη πρόσοψη.

Τέλος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η αξιολόγηση του συστήματος πρόσοψης πραγματοποιείται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια - απαιτήσεις:

- i. Μη πρόκληση αλλοιώσεων της δομής του υλικού λόγω της φωτιάς, σε ύψος μεγαλύτερο των 3,5 m από το άνω άκρο του ανοίγματος, εξαιρώντας αλλοιώσεις που οφείλονται σε τήξη ή πυροσυσσωμάτωση (sintering).
- ii. Μέγιστες μετρούμενες θερμοκρασίες τιμής 500°C στην επιφάνεια των τοιχωμάτων, καθώς και εντός εσωτερικών στρωμάτων και κοιλοτήτων του, σε απόσταση μεγαλύτερη των 3,5 m από το άνω άκρο του ανοίγματος.
- iii. Μη παρατήρηση συνεχούς ύπαρξης φλογών για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 30 s, σε απόσταση μεγαλύτερη των 3,5 m από το άνω άκρο του ανοίγματος.
- iv. Μη παρατήρηση φλόγας στο άνω άκρο του δείγματος σε οποιαδήποτε στιγμή της δοκιμής.
- v. Τερματισμός της πτώσης φλεγόμενων σταγονιδίων, της πτώσης φλεγόμενων ή μη συντριμμίων – σωματιδίων, καθώς και της πλευρικής εξάπλωσης της φωτιάς μέσα σε χρονικό διάστημα 90 s από το κλείσιμο του καυστήρα ή της κατάσβεσης των ξύλινων ράβδων.

#### 4.3.3 Δοκιμή SP Fire 105 [5], [74], [75]

Η δοκιμή SP Fire 105, σουηδικής προέλευσης, αποτελεί δοκιμή μεγάλης κλίμακας και προσομοιώνει την αντίδραση ολοκληρωμένων συστημάτων εξωτερικών τοιχωμάτων και συστημάτων επένδυσης προσόψεων σε συνθήκες εξωτερικής φωτιάς, προερχόμενης από



Τελικά, η αξιολόγηση του εξεταζόμενου δοκιμίου διενεργείται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- i. Για δοκίμια τα οποία αφορούν κτήρια μέχρι και οκτώ ορόφων, εκτός νοσοκομείων απαιτείται να μη σημειωθεί:
  - a. Έκταση της φλόγας ή πρόκληση αλλοιώσεων στο δοκίμιο σε σημείο υψηλότερο από το κάτω άκρο του ανοίγματος του δεύτερου επιπέδου.
  - b. Πτώση μεγάλων κομματιών υλικών του δοκιμίου.
  - c. Θερμοκρασία άνω των 500°C για περισσότερο από 2 min ή άνω των 450°C για περισσότερο από 10 min, μετρούμενη στο ύψος της μαρκίζας.
- ii. Για δοκίμια τα οποία αφορούν όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις κτηρίων, συμπεριλαμβανομένων των νοσοκομείων, απαιτείται η κάλυψη των προαναφερθέντων κριτηρίων και επιπρόσθετα απαιτείται η ροή θερμότητας, μετρούμενη στο κέντρο του ανοίγματος του δεύτερου επιπέδου, να μην ξεπερνάει τα 80 kW/m<sup>2</sup>.

## Κεφάλαιο 5°

### *Πρότυπη δοκιμή «Αντίδρασης στη φωτιά» EN ISO 11925-2:2020*

Η πρότυπη δοκιμή φωτιάς EN ISO 11925-2:2020 [76] αποσκοπεί στη διερεύνηση της συμπεριφοράς δομικών υλικών σε συνθήκες φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζει την αναφλεξιμότητα των υλικών, φέρνοντάς τα σε επαφή με φλόγα, η οποία λόγω του μικρού της μεγέθους δεν προσδίδει πρακτικά ακτινοβολία στο δοκίμιο. Παράλληλα, εξετάζεται η έκταση εξάπλωσης της φλόγας στην επιφάνεια του δείγματος, καθώς και η παραγωγή φλεγόμενων σταγονιδίων ή σωματιδίων κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

#### 5.1 Διάταξη δοκιμής

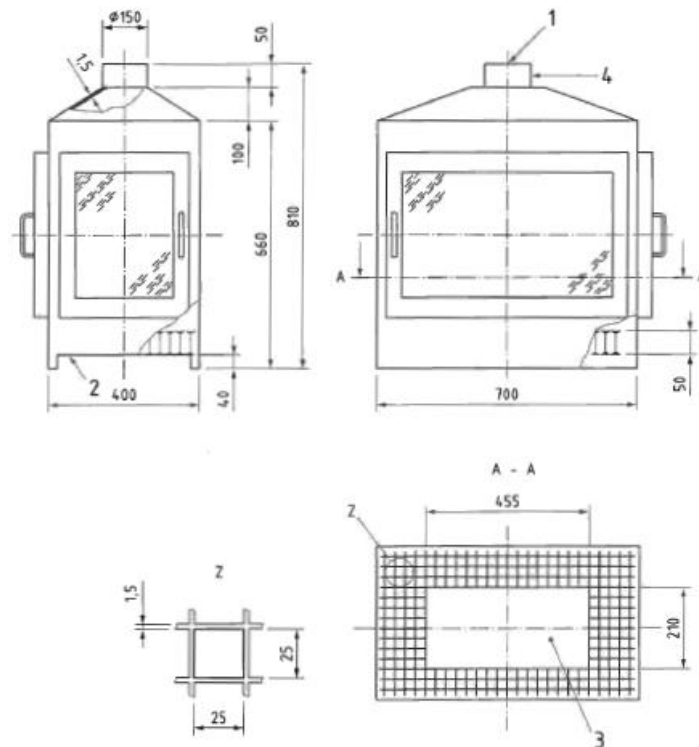
Η διάταξη της δοκιμής [76] αποτελείται από έναν θάλαμο καύσης, στον οποίο πέραν του δοκιμίου περιέχονται ο καυστήρας, ο υποδοχέας του δοκιμίου, η υποστήριξη του υποδοχέα, ένα ανεμόμετρο και διηθητικό χαρτί για την παρατήρηση φλεγόμενων σταγονιδίων/σωματιδίων. Παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλα στοιχεία, αναγκαία για την τέλεση της δοκιμής, τα οποία δεν τοποθετούνται στο εσωτερικό του θαλάμου κατά τη διάρκειά της.

##### 5.1.1 Θάλαμος καύσης

Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα και θερμοανθεκτικές γυάλινες πόρτες, ώστε να καθίσταται δυνατή η οπτική παρατήρηση του δοκιμίου. Στη βάση του σχηματίζονται τετραγωνικές οπές, ύψους 50 mm και διατομής 25 mm x 25 mm, κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 1,5 mm, προκειμένου να επιτυγχάνεται αερισμός του θαλάμου. Για τον ίδιο λόγο, ο θάλαμος τοποθετείται πάνω σε στηρίγματα ύψους 40 mm. Στην κορυφή του θαλάμου υπάρχει συσκευή εξαερισμού για την απομάκρυνση των καυσαερίων. Η διάταξη του θαλάμου καύσης παρατίθεται στο Σχήμα 5.1, ενώ στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το εξωτερικό του θαλάμου καύσης που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας.

##### 5.1.2 Καυστήρας

Η κατασκευή του καυστήρα οφείλει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη χρήση του σε γωνία 45° και 90° ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Επιπλέον, απαιτείται η τοποθέτησή του πάνω σε μηχανισμό, ο οποίος επιτρέπει στον χειριστή της δοκιμής να μετακινεί τον καυστήρα με ομαλό τρόπο στον οριζόντιο άξονα, από και προς το δοκίμιο. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στη δοκιμή είναι προπάνιο εμπορίου, ελάχιστης καθαρότητας 95% και πίεσης 10–50 kPa. Στο Σχήμα 5.3 παρατίθεται η διάταξη του καυστήρα, καθώς και τα επιμέρους στοιχεία του, ενώ στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ο καυστήρας που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας.



**Υπόμνημα**

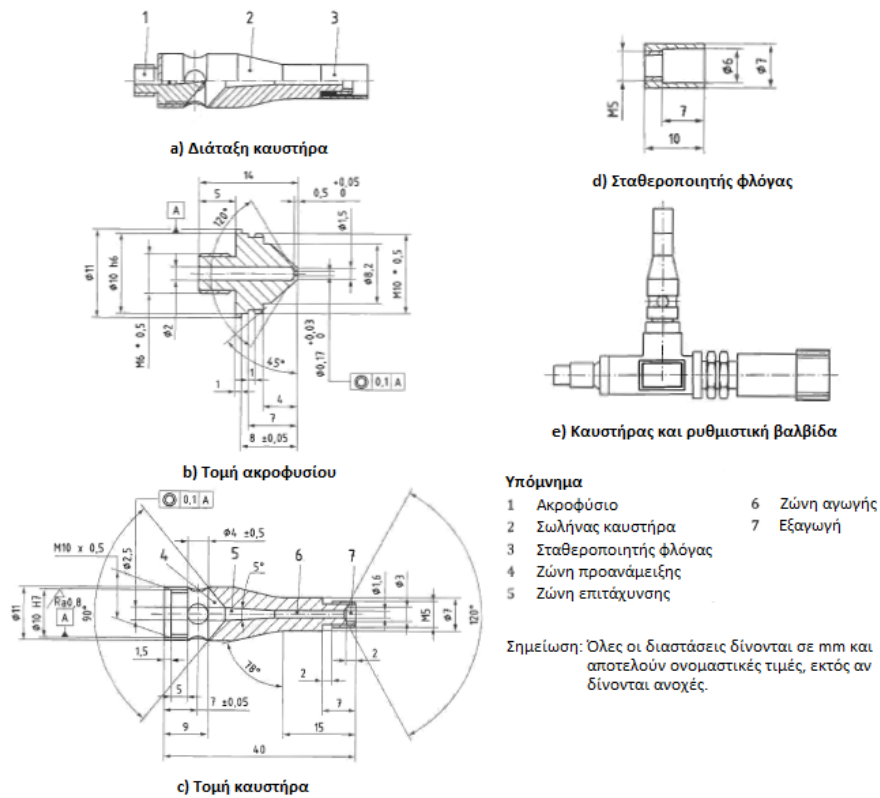
- 1 Σημείο μέτρησης ταχύτητας αέρα
- 2 Χαλύβδινο πλέγμα
- 3 Οριζόντια βάση
- 4 Καπνοδόχος

Σημείωση: Όλες οι διαστάσεις δίνονται σε mm και αποτελούν ονομαστικές τιμές

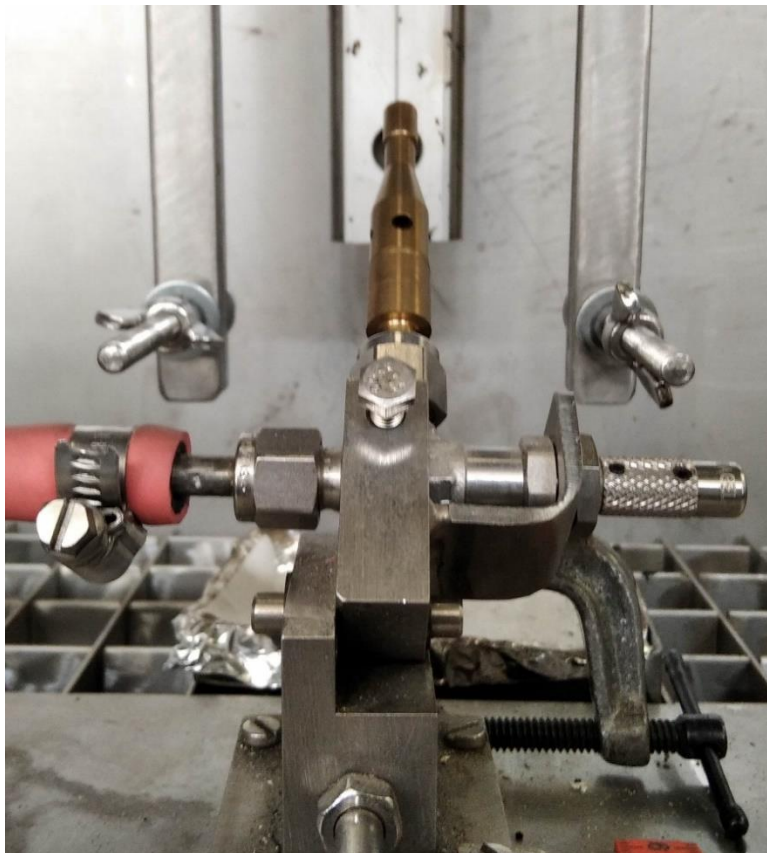
**Σχήμα 5.1** Θάλαμος καύσης δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]



**Σχήμα 5.2** Θάλαμος καύσης εργαστηρίου



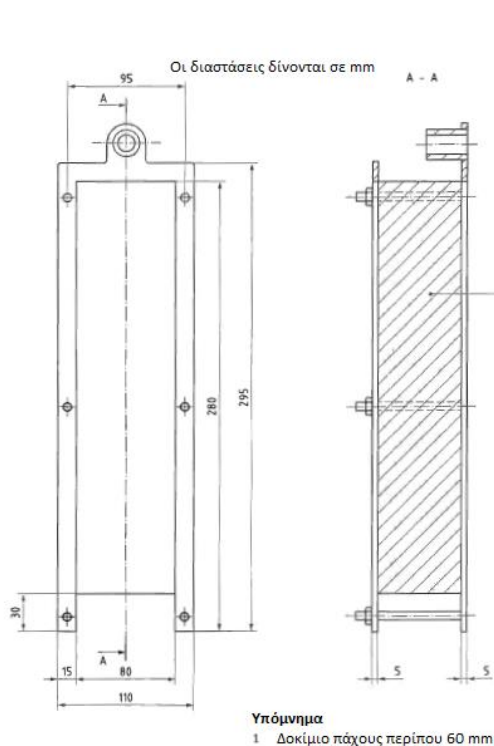
**Σχήμα 5.3 Καυστήρας δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]**



**Σχήμα 5.4 Καυστήρας εργαστηρίου**

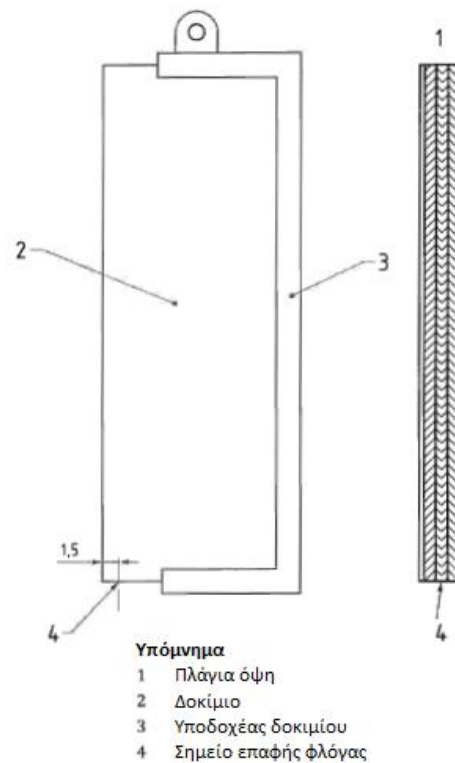
### 5.1.3 Υποδοχέας δοκιμίου

Ο υποδοχέας δοκιμίου αποτελείται από δύο πλαίσια σχήματος «U», ανοξείδωτου χάλυβα, πάχους  $(5 \pm 1)$  mm. Η συγκράτηση των δύο αυτών πλαισίων μεταξύ τους πραγματοποιείται με χρήση κοχλιών ή σφικκτάρων. Οι διαστάσεις του υποδοχέα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5. Για δείγματα πάχους μεγαλύτερου από 10 mm, αποτελούμενα από πολλαπλά στρώματα, γίνεται χρήση υποδοχέα του οποίου η μορφή διαφαίνεται στο Σχήμα 5.6. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται διάταξη υποδοχέα δοκιμίων υλικών πλήρωσης (loose fill materials). Στο συγκεκριμένο τύπο δοκιμίων απαιτείται επίσης η χρήση 11 κατακόρυφων τυλιγμάτων σύρματος, πάχους 0,2 mm, ώστε να εξασφαλιστεί η σταθεροποίηση του δοκιμίου στον υποδοχέα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. Στο σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, έγινε χρήση υποδοχέα τυπικής διάταξης (Σχήμα 5.5).



**Σχήμα 5.5** Τυπικός υποδοχέας δείγματος δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]

Οι διαστάσεις δίνονται σε mm



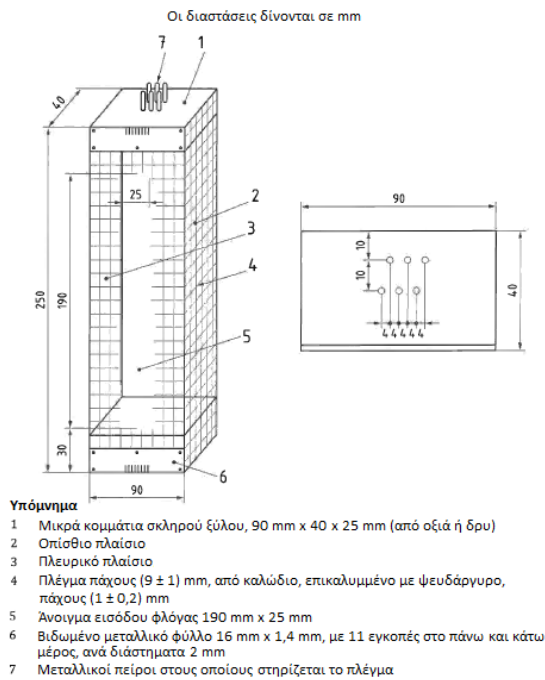
**Σχήμα 5.6** Υποδοχέας δοκιμίου πολλαπλών στρωμάτων, δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]

### 5.1.4 Υποστήριξη υποδοχέα

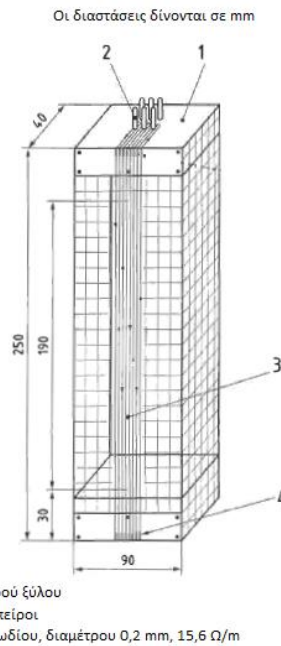
Η υποστήριξη του υποδοχέα αποτελείται από μία κατακόρυφη βάση στην οποία είναι προσαρτημένος ο υποδοχέας, με τρόπο τέτοιο ώστε να κρέμεται κάθετα και να επιτυγχάνεται η προβλεπόμενη έκθεση του δοκιμίου στη φλόγα. Η απόσταση μεταξύ της κάτω πλευράς του δείγματος και της κορυφής της οριζόντιας πλάκας, ευρισκόμενης πάνω από το μεταλλικό πλέγμα, είναι  $(125 \pm 10)$  mm για φλόγα που βρίσκεται σε επαφή με την ακμή του δείγματος και  $(85 \pm 10)$  mm για φλόγα που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του δείγματος. Στο σύνολο των δοκιμών που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, η πρόσπτωση της φλόγας πραγματοποιήθηκε στην επιφάνεια των δοκιμίων. Στο



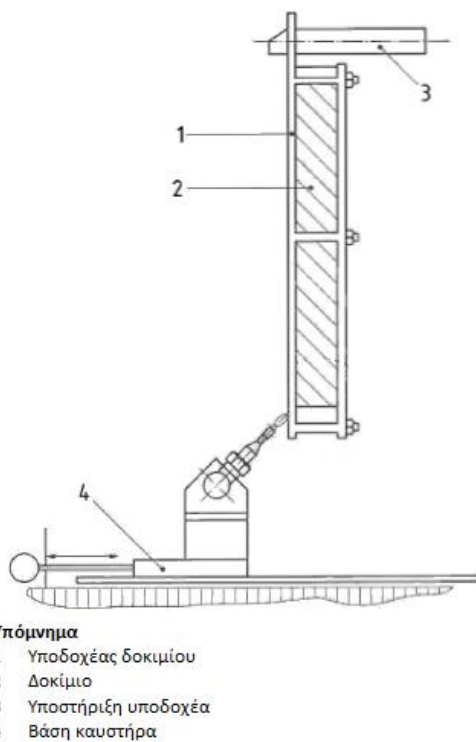
Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη καυστήρα – δείγματος – υποδοχέα – υποστήριξης.



**Σχήμα 5.7** Υποδοχέας δοκιμίου υλικών πλήρωσης, δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]



**Σχήμα 5.8** Σταθεροποίηση δοκιμίων χαλαρής πλήρωσης, δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]



**Σχήμα 5.9** Διάταξη εντός του θαλάμου καύσης, δοκιμής EN ISO 11925-2 [76]



**Σχήμα 5.10** Πλάγια όψη του θαλάμου καύσης του εργαστηρίου

### 5.1.5 Λοιπός εξοπλισμός

Το ανεμόμετρο, ακρίβειας  $\pm 0,1$  m/s, τοποθετείται στην κορυφή του θαλάμου καύσης και συγκεκριμένα στο κέντρο της εισαγωγής της καπνοδόχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η μετρούμενη ταχύτητα αέρα στη θέση αυτή οφείλει να είναι  $(0,7 \pm 0,1)$  m/s, όταν λειτουργεί ο καυστήρας.

Το διηθητικό χαρτί οφείλει να έχει λόγο μάζας προς επιφάνεια  $(75 \pm 15)$  g/m<sup>2</sup> και περιεκτικότητα σε τέφρα μικρότερη του 0,1%. Ο δίσκος μέσα στον οποίο τοποθετείται το διηθητικό χαρτί αποτελείται από φύλλο αλουμινίου, έχει διαστάσεις 100 mm x 50 mm και τοποθετείται κάτω από τον υποδοχέα δείγματος.

Επιπρόσθετα, πέραν του εσωτερικού του θαλάμου εξοπλισμού, υπάρχουν επιπλέον στοιχεία, απαραίτητα για την τέλεση των δοκιμών. Συγκεκριμένα, απαιτείται η χρήση συσκευής χρονομέτρησης ακρίβειας 5s ανά 1h, καθώς και ενός πρότυπου μεταλλικού δοκιμίου μήκους  $250^{+0}_{-1}$  mm και πλάτους  $90^{+0}_{-1}$  mm για την κατάλληλη διαστασιολόγηση – κοπή των εξεταζόμενων δοκιμών. Επιπλέον, χρησιμοποιείται συσκευή μέτρησης του μήκους της φλόγας ( $20 \pm 0,1$ ) mm και όργανα ελέγχου της απόστασης του άκρου του καυστήρα από το προκαθορισμένο σημείο επαφής της φλόγας με το δείγμα. Τέλος, για την καταγραφή των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, βιντεοκάμερα Panasonic HC-VX1, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11.



**Σχήμα 5.11** Βιντεοκάμερα καταγραφής των εργαστηριακών δοκιμών

### 5.1.6 Δοκίμια

Η κοπή των δοκιμών στις απαιτούμενες διαστάσεις, δηλαδή σε μήκος ( $250 \pm 2$ ) mm και πλάτος ( $90 \pm 2$ ) mm, πραγματοποιείται με τη βοήθεια του πρότυπου μεταλλικού δοκιμίου. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πάχος των δειγμάτων είναι  $\leq 60$  mm και θα πρέπει να τίθενται υπό δοκιμή στο μέγιστο πάχος τους. Δοκίμια μεγαλύτερου πάχους διαμορφώνονται κατάλληλα (μέσω κοπής κατά το πάχος τους) ώστε να πληρούν τις προβλεπόμενες διαστάσεις, με την πλευρά στην οποία πραγματοποιείται η κοπή να μην εκτίθεται στη φλόγα. Επιπροσθέτως, προβλέπεται η χρήση τουλάχιστον έξι δειγμάτων για κάθε υλικό το οποίο εξετάζεται, ωστόσο στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα για κάθε υλικό, εκτός ορισμένων περιπτώσεων, στις οποίες το δοκίμιο απέτυχε και διενεργήθηκε νέα δοκιμή μικρότερου χρόνου έκθεσης στη φλόγα. Η αποθήκευση των δοκιμών μέχρι τη διενέργεια της δοκιμής πραγματοποιείται σε συνθήκες θερμοκρασίας 23 °C και υγρασίας αέρα 50%. Πριν και μετά την αποθήκευσή τους πραγματοποιείται μέτρηση της μάζας τους.

## 5.2 Διαδικασία δοκιμής

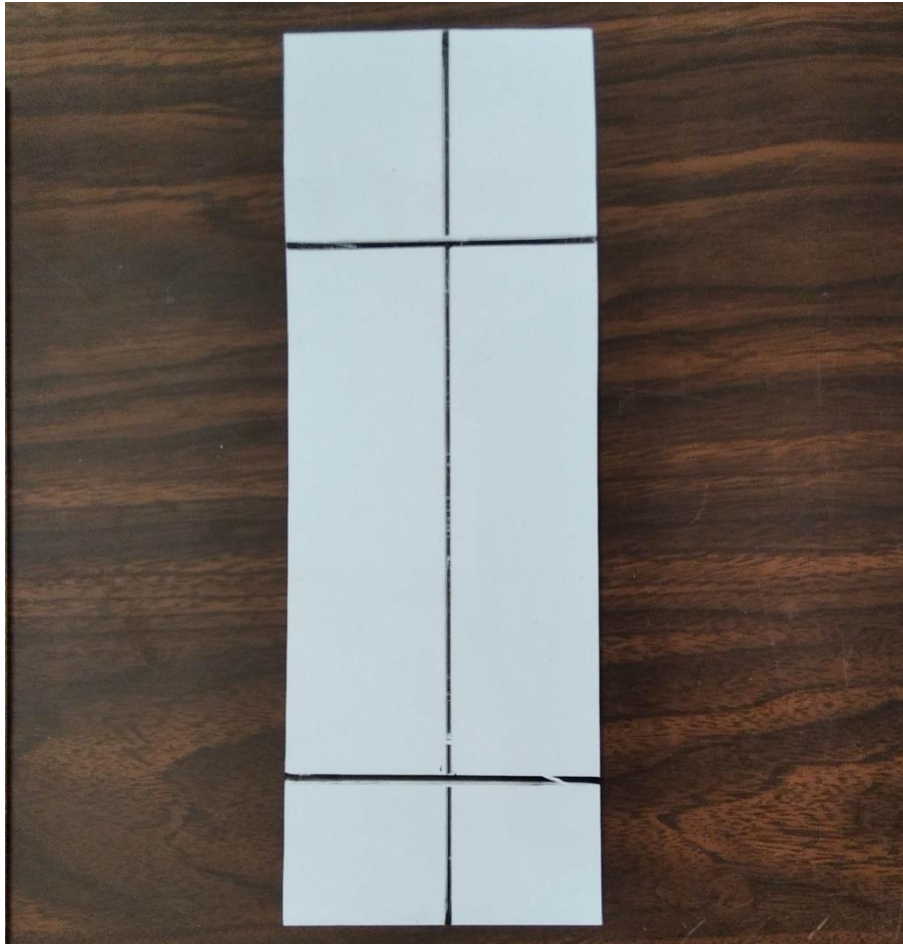
Πριν την έναρξη της δοκιμής ελέγχεται η απαιτούμενη ταχύτητα αέρα στην κορυφή του θαλάμου καύσης. Τα δοκίμια, μετά την απομάκρυνσή τους από το χώρο αποθήκευσης, ζυγίζονται. Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, σχεδιάστηκαν επάνω στα δείγματα δύο οριζόντιες γραμμές, μία στο επίπεδο πρόσπτωσης της φλόγας και μια 150 mm πάνω από αυτό, καθώς και μία κατακόρυφη στο μέσο του δείγματος. Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζεται δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές, στο οποίο διακρίνονται οι εν λόγω γραμμές ελέγχου. Επιπλέον, ελέγχεται η τήρηση της προβλεπόμενης απόστασης μεταξύ του καυστήρα και του δείγματος, ενώ το διηθητικό χαρτί τοποθετείται τελευταίο στο θάλαμο καύσης, όχι περισσότερο από 3 min πριν την έναρξη της δοκιμής.

Μετά το πέρας των παραπάνω διαδικασιών, πραγματοποιείται έναυση του καυστήρα σε κάθετη θέση και ρύθμιση του μήκους της φλόγας στην κατάλληλη τιμή. Στη συνέχεια ο καυστήρας παίρνει κλίση 45° και με ομαλό τρόπο μετακινείται έως ότου η φλόγα να έλθει σε επαφή με το δοκίμιο στο προκαθορισμένο σημείο, στιγμή κατά την οποία ξεκινά η χρονομέτρηση. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται για χρονικό διάστημα 15 s ή 30 s, το οποίο προαποφασίζεται πριν την έναρξή τους. Ο συνολικός χρόνος δοκιμής για χρονικό διάστημα επαφής της φλόγας 15 s είναι 20 s, ενώ για χρονικό διάστημα επαφής της φλόγας 30 s είναι 60 s.

Κατά τη διάρκεια τέλεσης της δοκιμής καταγράφονται:

- i. Η θέση εφαρμογής της φλόγας στο δοκίμιο. Η καταγραφή της θέσης αυτής προκύπτει από το σημείο τομής της κατακόρυφης και της κάτω οριζόντιας σχεδιαζόμενης γραμμής.
- ii. Η παρατήρηση ή όχι ανάφλεξης στο δοκίμιο.
- iii. Ύψος εξάπλωσης της φλόγας το οποίο να ξεπερνά τα 150 mm από το αρχικό σημείο εφαρμογής της στο δοκίμιο ή όχι και η χρονική στιγμή που το γεγονός αυτό λαμβάνει χώρα. Η παρατήρηση αυτή καθίσταται δυνατή μέσω της άνω οριζόντιας σχεδιαζόμενης γραμμής.

iv. Επιπλέον παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του δοκίμιου.



**Σχήμα 5.12** Γραμμές ελέγχου σε δοκίμιο

Μετά το πέρας της διαδικασίας και αναλόγως της επιτυχούς ή μη δοκιμής του εκάστοτε δείγματος, δηλαδή παρατήρησης ή μη εξάπλωσης της φλόγας σε ύψος μεγαλύτερο των 150 mm από το αρχικό σημείο επαφής, το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 13501-1 [77] ακολούθως:

- i. Κατηγορία D ή ανώτερη για επιτυχή δοκιμή, συνολικού χρονικού διαστήματος 60 s.
- ii. Κατηγορία E ή F για μη επιτυχή δοκιμή, συνολικού χρονικού διαστήματος 60 s.
- iii. Κατηγορία E για επιτυχή δοκιμή, συνολικού χρονικού διαστήματος 20 s.
- iv. Κατηγορία F για μη επιτυχή δοκιμή, συνολικού χρονικού διαστήματος 20 s.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Πειραματικές δοκιμές

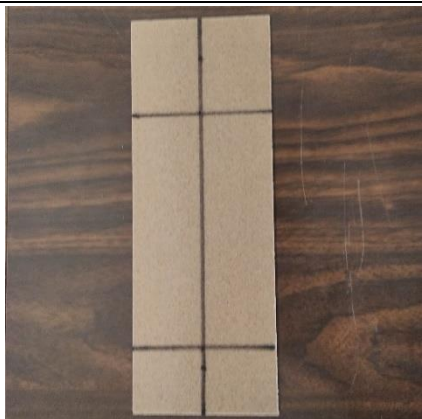
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διενεργήθηκαν πειραματικές δοκιμές στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 11925-2. Κατά τις δοκιμές αυτές εξετάστηκαν δείγματα υλικών, προοριζόμενων για εγκατάσταση σε κτηριακές προσόψεις, ως προς την αντίδρασή τους σε συνθήκες φωτιάς.

#### 6.1 Παραμετρικές μελέτες

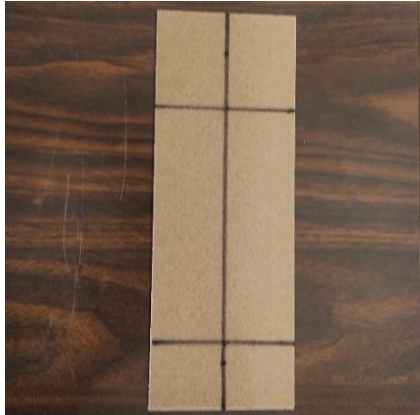
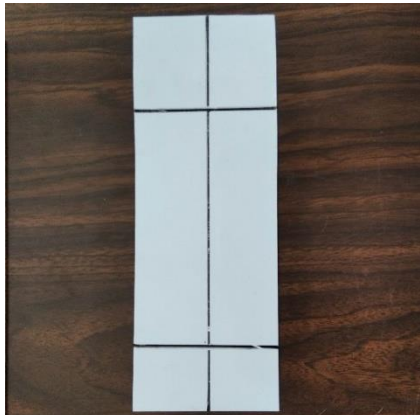
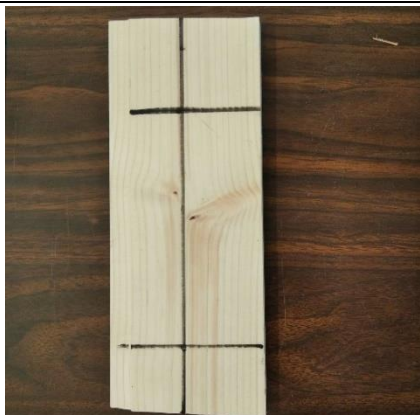
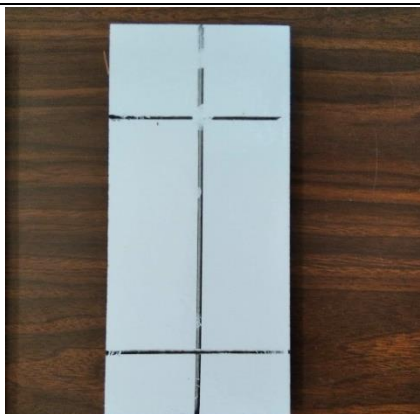
##### 6.1.1 Δομικά υλικά

Κατά την τέλεση της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δέκα δείγματα, οκτώ διαφορετικών δομικών υλικών. Η διαφοροποίηση μεταξύ αριθμού υλικών και δειγμάτων σημειώνεται διότι έγιναν επιπλέον δοκιμές για δείγματα αποτελούμενα από ίδιο υλικό, με διαφορετικό όμως πάχος. Η συμπεριφορά των δειγμάτων σε συνθήκες φωτιάς ερευνήθηκε υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες: στην πρώτη εξετάστηκαν τα δείγματα αυτούσια, ενώ στις υπόλοιπες εξετάστηκαν δείγματα επικαλυμμένα με στρώσεις συγκεκριμένων εμπορικών ασταριών και πυράντοχων βαφών. Η διαστασιολόγηση των δειγμάτων έγινε σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή EN ISO 11925-2 [76] (μήκος 250 mm, πλάτος 90 mm). Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα εν λόγω υλικά και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους.

**Πίνακας 6.1** Συστάσεις υλικών και χαρακτηριστικά δειγμάτων της πειραματικής δοκιμής.

Αρίθμηση δειγμάτων	Σύσταση υλικού - Χαρακτηριστικά	Πάχος δείγματος	Ενδεικτική φωτογραφία
1a	Ίνες σκληρού ξύλου (hardwood fiber) με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο (polypropylene copolymer), σε αναλογία 50:50	2,1 mm	

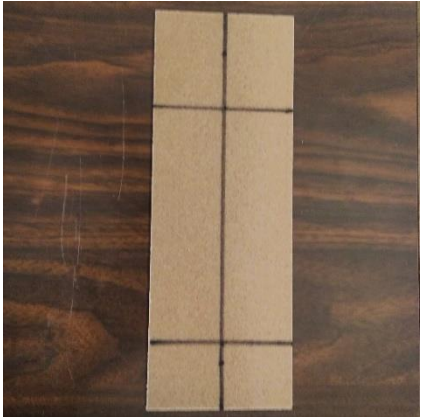
**Πίνακας 6.1** Συστάσεις υλικών και χαρακτηριστικά δειγμάτων της πειραματικής δοκιμής (συνέχεια).

1b	Ίνες ξύλου (wood fiber) με προπιονική κυτταρίνη (cellulose propionate), η οποία αποτελεί θερμοπλαστικό υλικό, σε αναλογία 70:30	2,2 mm	
2	Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (FRP – Fiber reinforced plastic). Το FRP αποτελείται από ίνες γυαλιού, ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη (UP – Unsaturated Polyester Resin) και μία τελική επίστρωση βασισμένη στην UP	1,5 mm	
3	Ξύλο ελάτου εμποτισμένο με αλκυδική ρητίνη (alkyd resin), για αδιαβροχοποίηση και προστασία από τη φωτιά	10,6 mm	
4	Πολυϊσοκυανουρικός αφρός (PIR) και αφρός πολυουρεθάνης (PUR) με ακρυλική επένδυση. Η επένδυση δημιουργεί μία λεία εξωτερική επιφάνεια και προστατεύει το εσωτερικό από την υπεριώδη ακτινοβολία του ηλίου.	9,4 mm	

**Πίνακας 6.1** Συστάσεις υλικών και χαρακτηριστικά δειγμάτων της πειραματικής δοκιμής (συνέχεια).

5	Ξύλο-πλαστικό συνθετικό (WPC - Wood Plastic Composite) αποτελούμενο από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και ίνες ξύλου, σε αναλογία 50:50	25,8 mm	
6	Πυρήνας πολυουρεθάνης (PUR) με εξωτερική επένδυση φύλλου χάλυβα πάχους 0,8 mm, επικαλυμμένου με ακρυλική επίστρωση που προσδίδει στο δείγμα λεία εξωτερική επιφάνεια και προστασία από τις υπεριώδεις ακτίνες του ηλίου	30,0 mm	
7	Πυρήνας αποτελούμενος από αφρό πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) με ακρυλική επένδυση που προσδίδει στο δείγμα λεία εξωτερική επιφάνεια και προστασία από τις υπεριώδεις ακτίνες του ηλίου	24,9 mm	
8a	Ίνες σκληρού ξύλου (hardwood fiber) με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο (polypropylene copolymer), σε αναλογία 50:50 (Σύσταση ίδια με το 1a)	0,55 mm	

**Πίνακας 6.1** Συστάσεις υλικών και χαρακτηριστικά δειγμάτων της πειραματικής δοκιμής (συνέχεια).

8b	Ίνες ξύλου (wood fiber) με προπιονική κυτταρίνη (cellulose propionate), σε αναλογία 70:30 (Σύσταση ίδια με το 1b)	0,7 mm	
----	---	--------	--

### 6.1.2 Πυράντοχες βαφές

Πέραν της δοκιμής των δειγμάτων στην αρχική τους μορφή, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπρόσθετες σειρές δοκιμών, στις οποίες ελέγχθηκαν δείγματα επικαλυμμένα με δύο διαφορετικές αλληλουχίες βαφών, τεσσάρων στρώσεων η κάθε μία. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση των ακόλουθων<sup>17</sup>:

α) 1<sup>ος</sup> τύπος αλληλουχίας στρώσεων (κωδικοποίηση N)

i. **Εποξειδικό αστάρι Stancolac 812** (1 στρώση, πάχους 0,087 mm)

Το αστάρι αυτό αναμειγνύεται με πολυαμίδιο, το οποίο δρα ως σκληρυντής, με αναλογία ανάμειξης 5:1 και διαθέτει αντοχή σε θερμοκρασία έως και 120°C. Περιέχει φωσφορικό ψευδάργυρο, ο οποίος προσδίδει προστασία από διάβρωση, ενώ είναι πιστοποιημένο με το πρότυπο ISO 12994 για τις αντιδιαβρωτικές – αντισκωριακές του ιδιότητες. Η χρήση του προτείνεται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ενισχυμένου χάλυβα, στις οποίες απαιτείται προστασία από διάβρωση.

ii. **Πυράντοχη βαφή Nullfire SC803** (2 στρώσεις, συνολικού πάχους 0,525 ± 0,224 mm)

Η εν λόγω βαφή είναι υδατοδιαλυτή και θερμοδιογκούμενη<sup>18</sup>. Παρέχει στην επικαλυπτόμενη επιφάνεια αντοχή στη φωτιά έως και 90 min, ενώ με μία μόνο στρώση επιτυγχάνεται αντοχή 60 min στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Για τις πυράντοχες ιδιότητές της έχει λάβει την πιστοποίηση EN 13381-8. Η χρήση της προτείνεται σε εσωτερικές ή μερικώς εκτεθειμένες εξωτερικές χαλύβδινες κατασκευές.

iii. **Τελική βαφή Stancolac Metalux** (1 στρώση, πάχους 0,100 ± 0,001 mm)

Η βαφή αποτελείται από ρητίνη αλκυδικού ελαίου και έχει αντοχή σε θερμοκρασία έως και 80°C. Διαθέτει αντισκωριακές - αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, πιστοποιημένες σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12944. Προτείνεται η εφαρμογή της ως τελική βαφή επιφανειών μετάλλων, επικαλυμμένων με πυράντοχες βαφές, ενώ είναι κατάλληλη

<sup>17</sup> Οι πληροφορίες αντλήθηκαν από ενημερωτικά έντυπα των χρησιμοποιούμενων προϊόντων.

<sup>18</sup> Οι θερμοδιογκούμενες βαφές έχουν την ικανότητα να διογκώνονται σε συνθήκες φωτιάς, με αποτέλεσμα να προστατεύουν την επικαλυπτόμενη επιφάνεια.



για χρήση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα λόγω της υψηλής της αντοχής σε ανάλογες συνθήκες.

β) 2<sup>ος</sup> τύπος αλληλουχίας στρώσεων (κωδικοποίηση V)

i. **Αστάρι Vitex Acrylan Unco Eco** (1 στρώση, πάχους  $0,055 \pm 0,004$  mm)

Το αστάρι αυτό είναι ακρυλικό, σιλικονούχο και υδατοδιαλυτό, ενώ έχει λάβει οικολογική πιστοποίηση, βάσει των κριτηρίων του συμβουλίου απονομής οικολογικού σήματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επιπλέον, έχει μεγάλη διεισδυτικότητα, ενώ παράλληλα η εφαρμογή του καθίσταται δυνατή σε πλήθος διαφορετικών επιφανειών, εσωτερικών και εξωτερικών, οι οποίες πρόκειται να επικαλυφθούν με υδατοδιαλυτές βαφές. Ταυτόχρονα, αδιαβροχοποιεί και παρουσιάζει πολύ χαμηλή απορρόφηση νερού. Τέλος, η αραιώσή του πραγματοποιείται με νερό, το ποσοστό της οποίας είναι αντιστρόφως ανάλογο της απορροφητικότητας της εκάστοτε επιφάνειας, με τιμές αραιώσης 0 – 100%.

ii. **Πυράντοχη βαφή Vitex Fire Resistant** (3 στρώσεις, συνολικού πάχους  $0,280 \pm 0,001$  mm)

Η προκείμενη βαφή είναι υδατοδιαλυτή και θερμοδιογκούμενη. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της φωτιάς διατηρεί την ακεραιότητα και τη θερμομονωτική της ικανότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα, εξαρτώμενο από το συνολικό πάχος των στρώσεων της βαφής. Κατατάσσεται στην κατηγορία EI 240 σύμφωνα με το πρότυπο EN 13501-2, δηλαδή διατηρεί τις προαναφερθείσες ιδιότητες για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 240 min, σε συνθήκες φωτιάς. Το προϊόν, πριν χρησιμοποιηθεί, αραιώνεται μέχρι και 10% με νερό.

## 6.2 Αποτελέσματα δοκιμών EN ISO 11925-2

Στο πλαίσιο της εργασίας, εξετάστηκαν πειραματικά δύο σειρές δοκιμών. Στην πρώτη, εξετάστηκαν δώδεκα μη επικαλυμμένα δοκίμια (βλ. Πίνακα 6.1), ενώ στη δεύτερη έξι επικαλυμμένα δοκίμια με αλληλουχία στρώσεων (N), καθώς και έξι επικαλυμμένα δοκίμια με αλληλουχία στρώσεων (V). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 11925-2 [76].

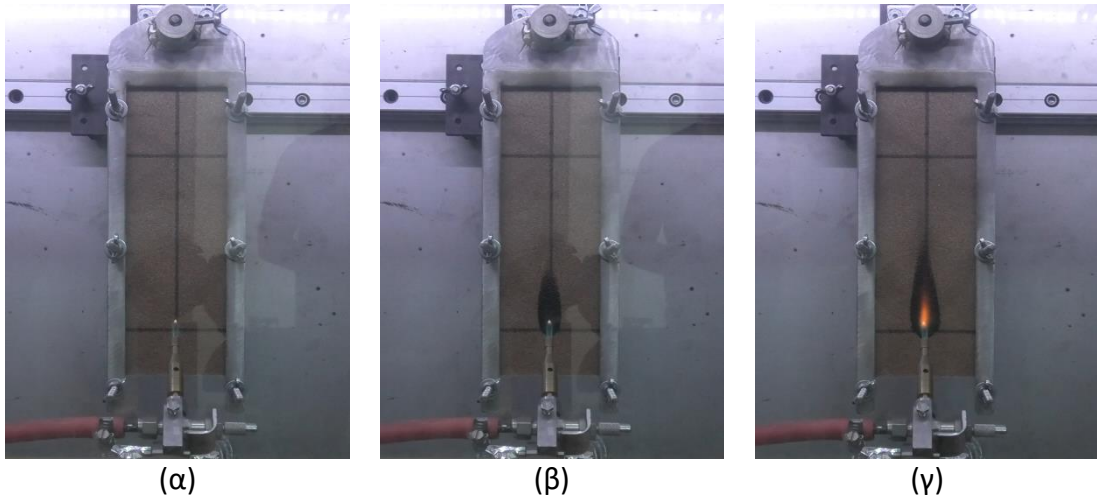
### 6.2.1 Μη επικαλυμμένα δοκίμια

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο των δειγμάτων που παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 6.1.1, με τα υλικά να εκτίθενται αυτούσια στη φλόγα. Καθώς χρειάστηκε επανεξέταση ορισμένων δοκιμών για συνολικό χρονικό διάστημα 20 s, έναντι των αρχικών 60 s, λόγω της αδυναμίας τους να επιτύχουν στη δοκιμή, τα δοκίμια έλαβαν κατά την αρίθμησή τους επιπλέον αριθμητική κατάληξη, πέραν αυτής που ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 6.1.1. Αναλυτικότερα, ακολουθούν αποτελέσματα και παρατηρήσεις που προέκυψαν από την τέλεση των εν λόγω δοκιμών:

i. **Δοκίμιο 1a.1**

Το δοκίμιο, μάζας 39,89 g και πάχους 2,1 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Κατά το πρώτο μισό της δοκιμής (0 – 30 s), χρονικό διάστημα κατά το οποίο η φλόγα επαφίεται στο δοκίμιο, δεν σημειώθηκε ορατή

φλόγα. Η ανάφλεξη του δοκιμίου προέκυψε λίγο μετά την απομάκρυνση του ακροφυσίου του καυστήρα, κατά το δεύτερο μισό της δοκιμής (30 – 60 s), με το μέγιστο ύψος εξάπλωσης της φλόγας να φτάνει λίγο κάτω από τη μέση του ορίου των 150 mm. Ως εκ τούτου, το δείγμα πέρασε επιτυχώς τη δοκιμή και κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων (Euroclass system). Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής.

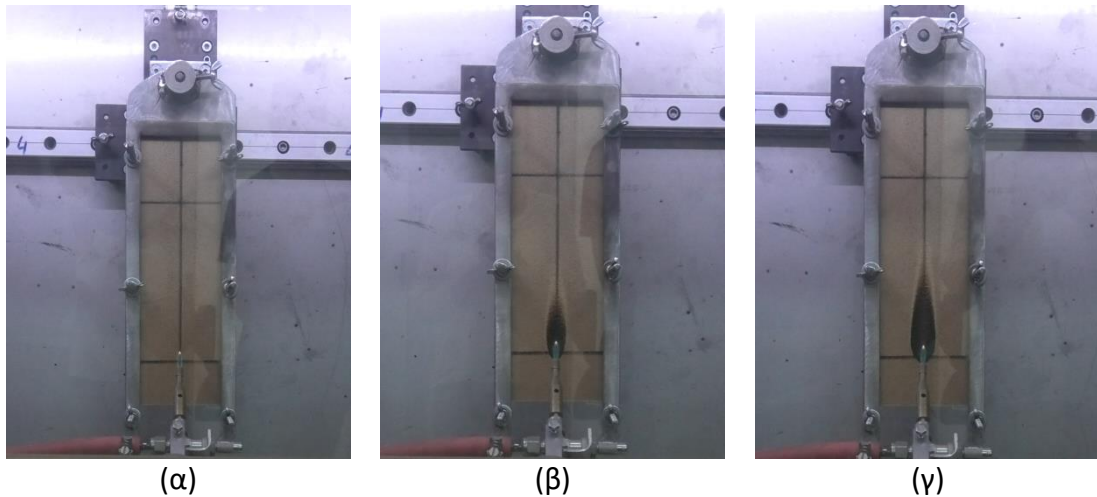


**Σχήμα 6.1** Δοκίμιο 1a.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

#### ii. Δοκίμιο 1b.1

Το δοκίμιο, μάζας 50,4 g και πάχους 2,2 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Στο χρονικό διάστημα επαφής της φλόγας με το δείγμα δεν παρατηρήθηκε ύπαρξη φλόγας, ωστόσο μετά την απομάκρυνσή της σημειώθηκε ανάφλεξη και παρουσία ισχνής φλόγας, η έκταση της οποίας δεν ξεπέρασε το 25% των 150 mm. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.3 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Οι φωτογραφίες δειγμάτων μετά το πέρας του προκαθορισμένου χρόνου δοκιμής τους δεν μπορούν να θεωρηθούν κατ' ανάγκη ενδεικτικές της συμπεριφοράς των δοκιμών σε φωτιά, καθώς σε ορισμένες εκ των δοκιμών η φλόγα εξακολούθησε να επιδρά στο δείγμα και μετά το τέλος του εν λόγω χρονικού διαστήματος.



Σχήμα 6.2 Δοκίμιο 1b.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

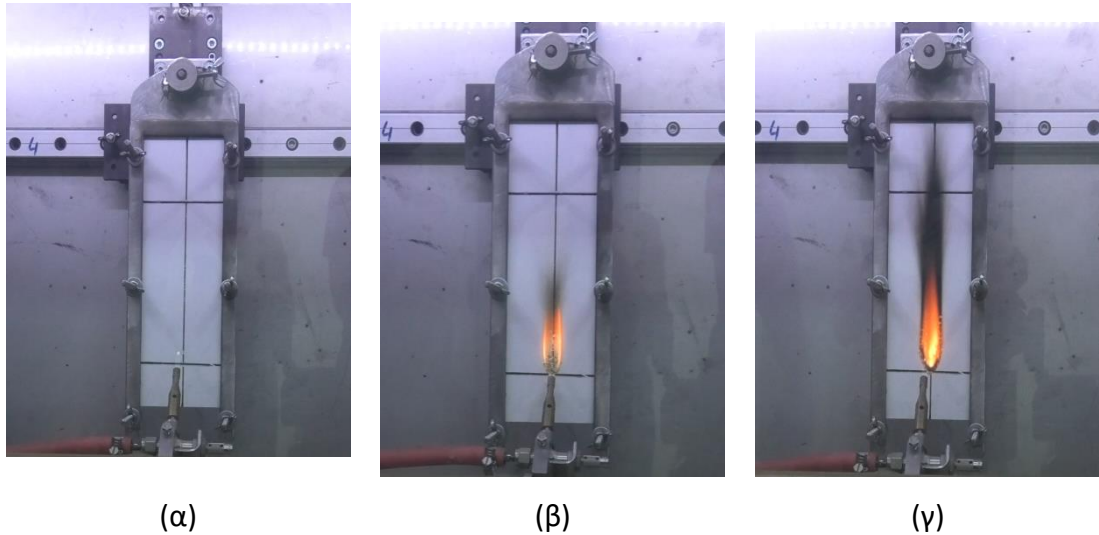


Σχήμα 6.3 Δοκίμιο 1b.1 μετά το πέρας της δοκιμής

### iii. Δοκίμιο 2.1

Το δοκίμιο, μάζας 45,85 g και πάχους 1,5 mm, αποτελείται από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής σημειώθηκε ανάφλεξη 7 s μετά την αρχική επαφή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία και σταδιακή ανάπτυξη φλόγας η οποία δεν έσβησε πριν το πέρας των 60 s. Κατά το πρώτο μισό του πειράματος το μήκος εξάπλωσης της φλόγας δεν ξεπέρασε το μέσο των 150 mm, ενώ στο δεύτερο μισό άγγιξε το 80% του κρίσιμου ύψους<sup>20</sup>. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αποκόλληση και πτώση σωματιδίων, τα οποία ωστόσο δεν οδήγησαν σε ανάφλεξη του διηθητικού χαρτιού, δημιουργία εμφανούς πλουμίου καπνού και σημαντικές αλλοιώσεις της προσβαλλόμενης από τη φωτιά επιφάνειας. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.5 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.

<sup>20</sup> Ως κρίσιμο ύψος ορίζεται η απόσταση που σχηματίζεται κατά τον κατακόρυφο άξονα, μεταξύ των δύο οριζόντιων, σχεδιαζόμενων γραμμών και έχει μήκος 150 mm.



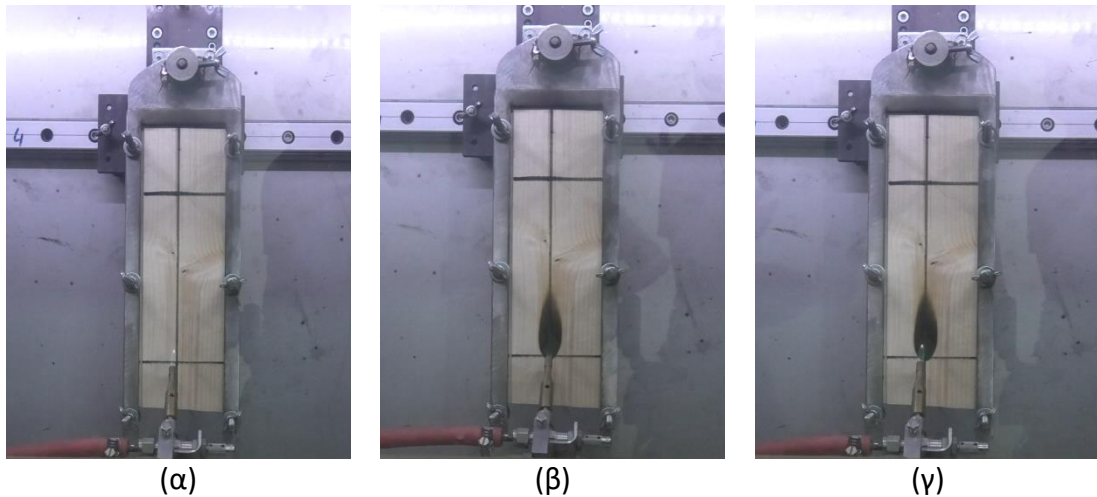
Σχήμα 6.4 Δοκίμιο 2.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.5 Δοκίμιο 2.1 μετά το πέρας της δοκιμής

#### iv. Δοκίμιο 3.1

Το δοκίμιο, μάζας 105,19 g και πάχους 10,6 mm, αποτελούμενο από ξύλο ελάτου εμποτισμένο με αλκυδική ρητίνη, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Στο πρώτο μισό της δοκιμής, πέραν της σταδιακής αλλαγής του χρώματος μικρού μέρους του δείγματος σε μαύρο, κοντά στο σημείο επαφής του με τη φλόγα του ακροφυσίου, δεν παρατηρήθηκε δημιουργία φλόγας ή οποιαδήποτε άλλη αλλοίωση στη δομή του. Μετά την απομάκρυνση της φλόγας δεν σημειώθηκε καμία άλλη επίδραση. Η δοκιμή κρίθηκε επιτυχής και το δείγμα κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.7 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



Σχήμα 6.6 Δοκίμιο 3.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

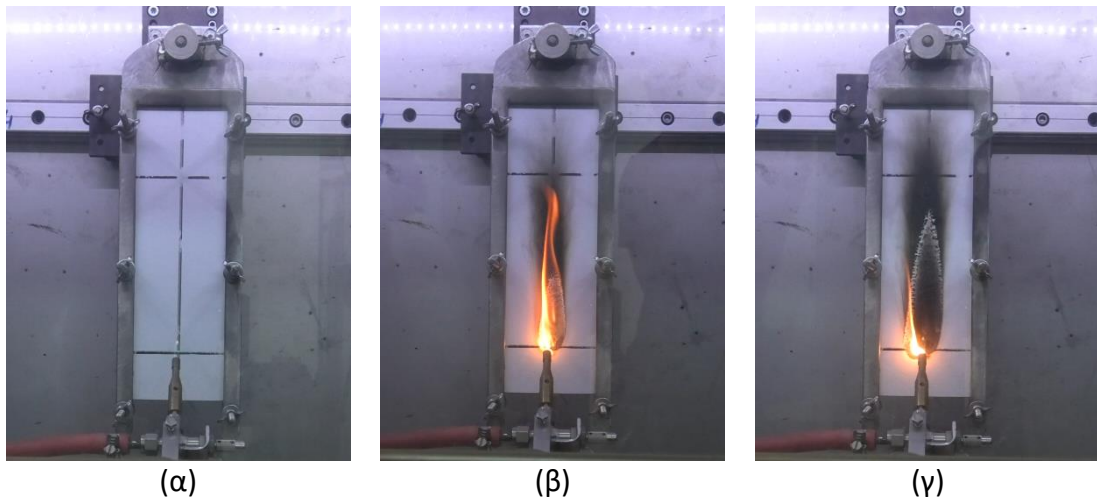


Σχήμα 6.7 Δοκίμιο 3.1 μετά το πέρας της δοκιμής

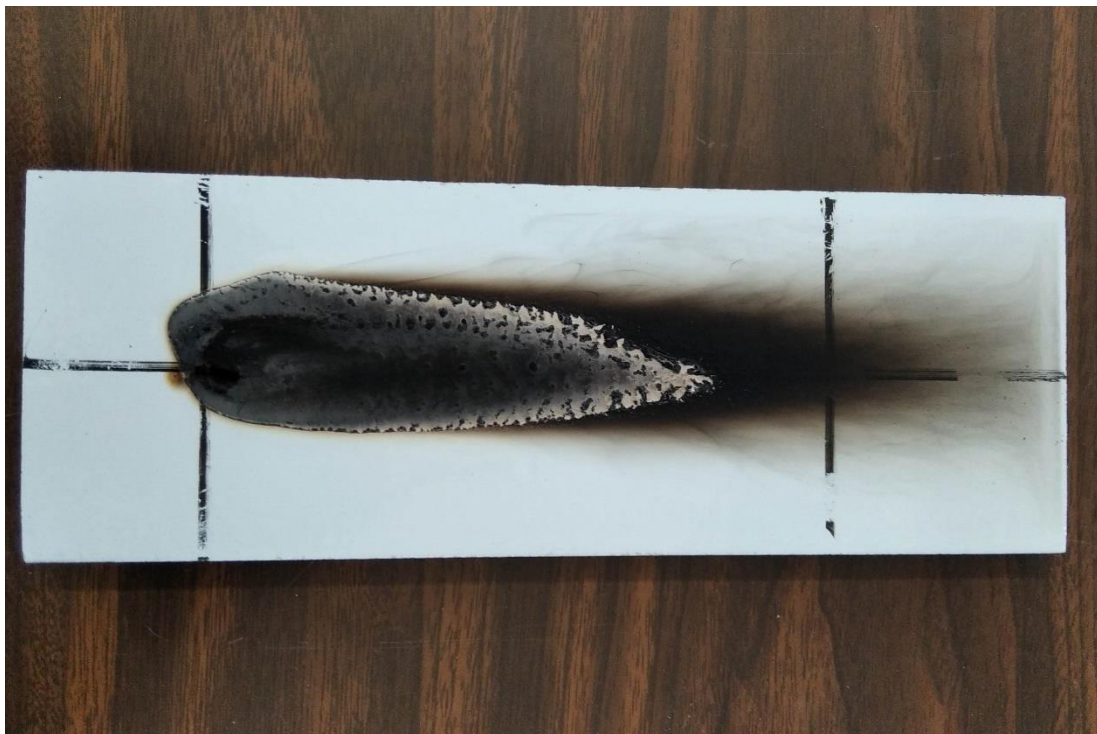
#### v. Δοκίμιο 4.1

Το δοκίμιο, μάζας 37,31 g και πάχους 9,4 mm, αποτελούμενο από πολυϊσοκυανουρικό αφρό και αφρό πολυουρεθάνης με ακρυλική επένδυση, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Ήδη από το πρώτο μισό της δοκιμής παρατηρήθηκε έναυση σε λιγότερο από 10 s, παραγωγή ορατού πλουμίου καπνού, σοβαρές αλλοιώσεις στη δομή του υλικού και φλόγα που ξεπέρασε το όριο των 150 mm, σε χρονικό διάστημα 25 s. Μετά την απομάκρυνση της εστίας από το δοκίμιο, αυτό εξακολούθησε να φλέγεται, ενώ προκλήθηκαν περαιτέρω αλλοιώσεις στη δομή του, οι οποίες σημειώθηκαν έως και το 80% της κρίσιμης απόστασης, στο επίπεδο του κατακόρυφου άξονα. Η δοκιμή κρίθηκε μη επιτυχής και το δείγμα κατατάσσεται προσωρινά σε κατηγορία E ή F του συστήματος Euroclass, μέχρι την τέλεση επιπρόσθετης δοκιμής για την οριστικοποίηση της

κατηγορίας του. Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.9 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



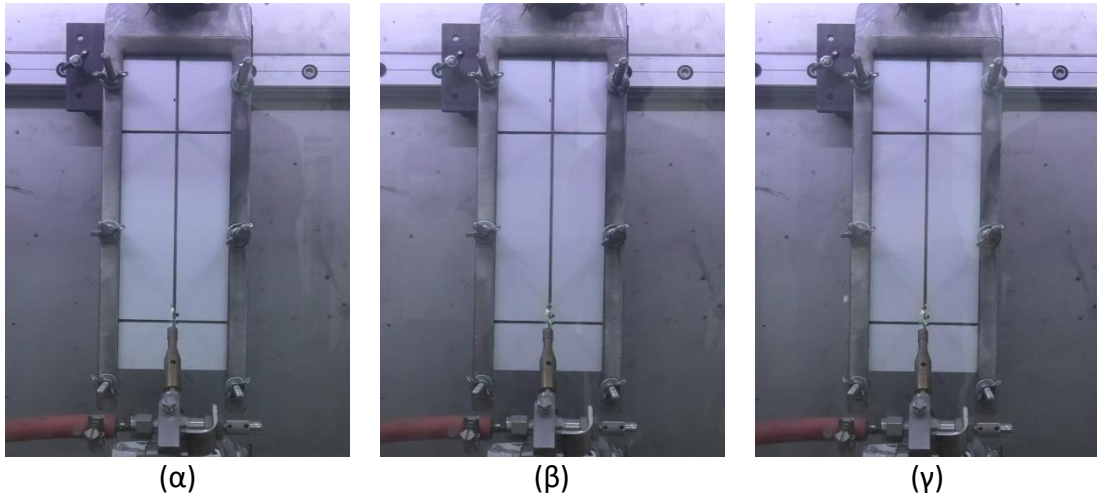
**Σχήμα 6.8** Δοκίμιο 4.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



**Σχήμα 6.9** Δοκίμιο 4.1 μετά το πέρας της δοκιμής

#### vi. Δοκίμιο 4.2

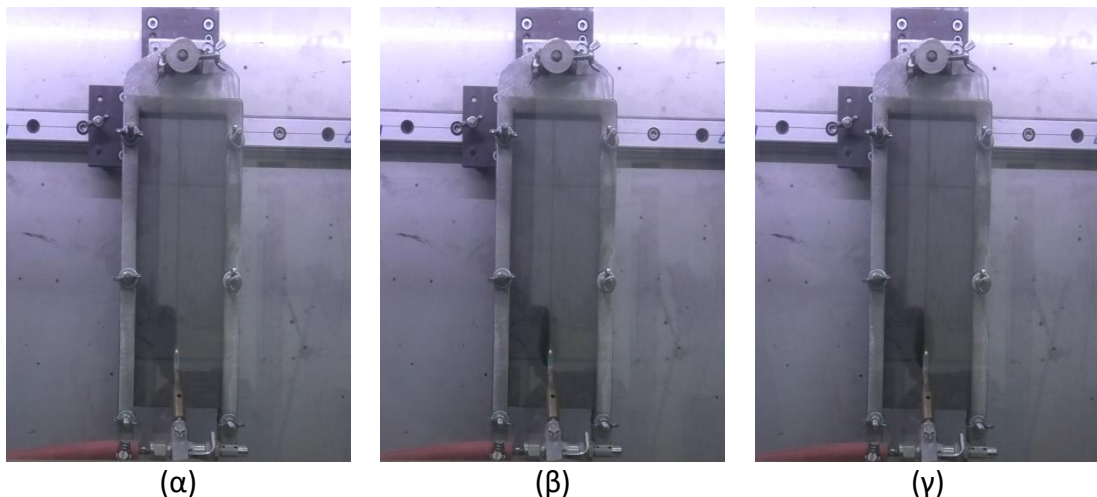
Καθώς το αρχικό δείγμα δεν πέρασε τη δοκιμή κατηγορίας D ή καλύτερης, επανεξετάστηκε νέο δοκίμιο, μάζας 37,31 g και πάχους 9,4 mm, για χρονικό διάστημα 20 s (κατηγορία E). Κατά τη διάρκεια τέλεσης της δοκιμής δεν σημειώθηκε ανάφλεξη, ως εκ τούτου, η δοκιμή κρίθηκε επιτυχής και το δείγμα τελικά κατατάσσεται στην κατηγορία E του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής.



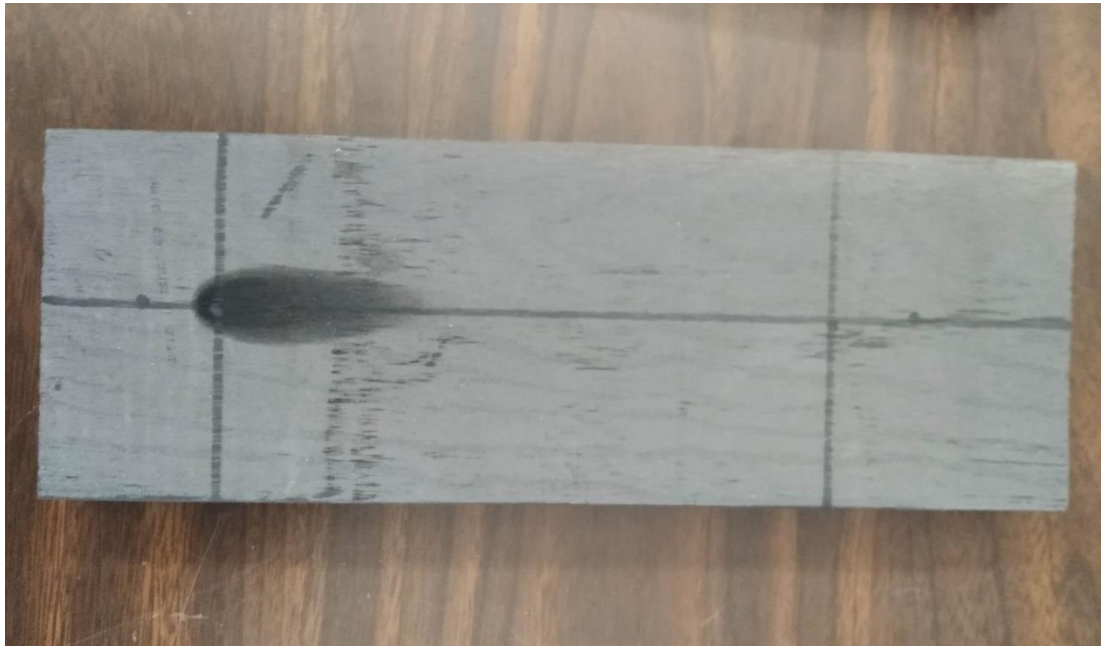
**Σχήμα 6.10** Δοκίμιο 4.2 σε (α) 0 s, (β) 15 s και (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής

**vii. Δοκίμιο 5.1**

Το δοκίμιο, μάζας 272,24 g και πάχους 25,8 mm, αποτελούμενο από πολυβινυλοχλωρίδιο και ίνες ξύλου, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Δεν παρατηρήθηκε ανάφλεξη του καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, ενώ πέραν μίας ελαφράς αλλαγής του χρώματός του στο σημείο επαφής του με τη φλόγα του ακροφυσίου κατά το πρώτο στάδιο της δοκιμής, δεν σημειώθηκε άλλη επίδραση. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.12 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



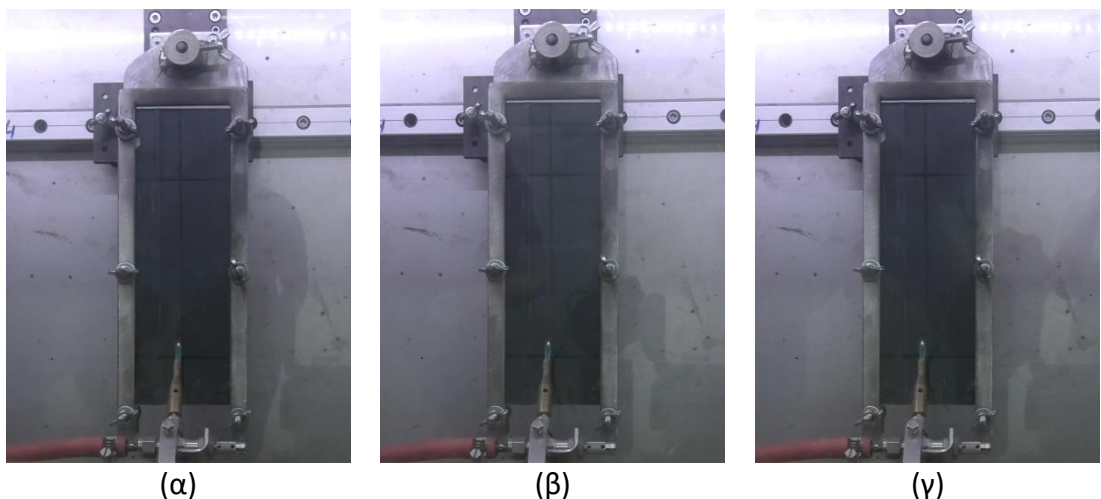
**Σχήμα 6.11** Δοκίμιο 5.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.12 Δοκίμιο 5.1 μετά το πέρας της δοκιμής

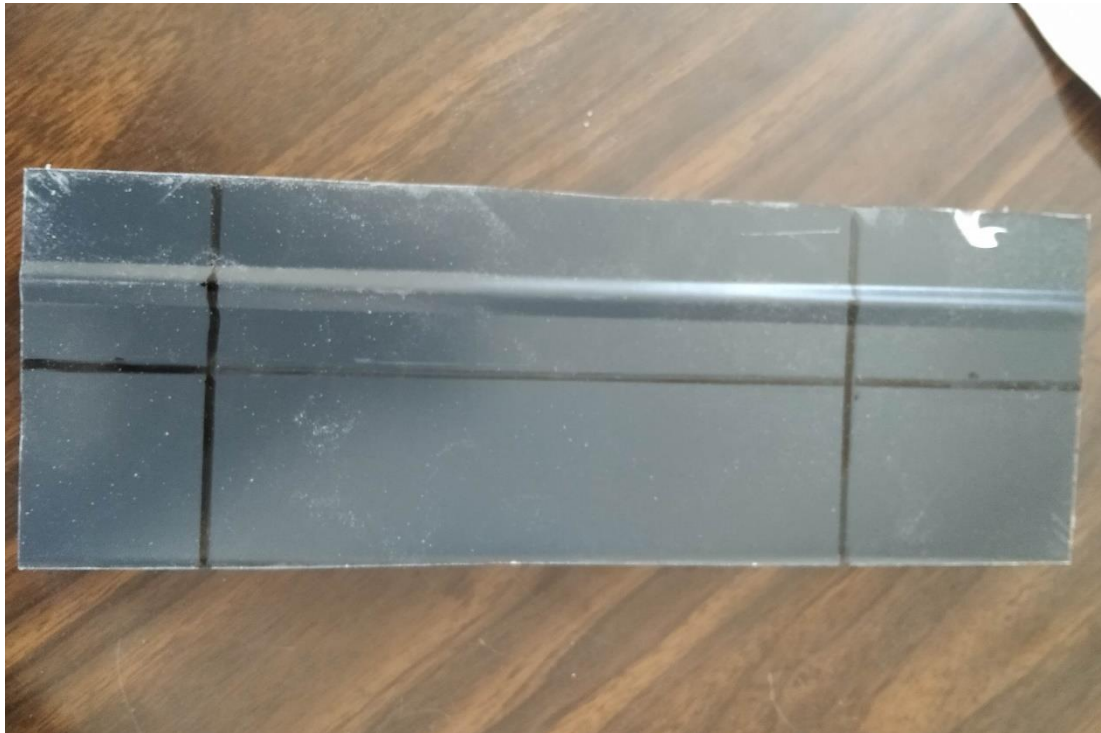
#### viii. Δοκίμιο 6.1

Το δοκίμιο, μάζας 128,25 g και πάχους 30,0 mm, αποτελούμενο από πολυουρεθάνη με εξωτερική επένδυση φύλλου χάλυβα, επικαλυμμένου με ακριλική επίστρωση, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Στο συνολικό χρόνο τέλεσης της δοκιμής δεν σημειώθηκε ανάφλεξη, καθώς και ουδεμία εμφανής αλλοίωση στη δομή του. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.14 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



Σχήμα 6.13 Δοκίμιο 6.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

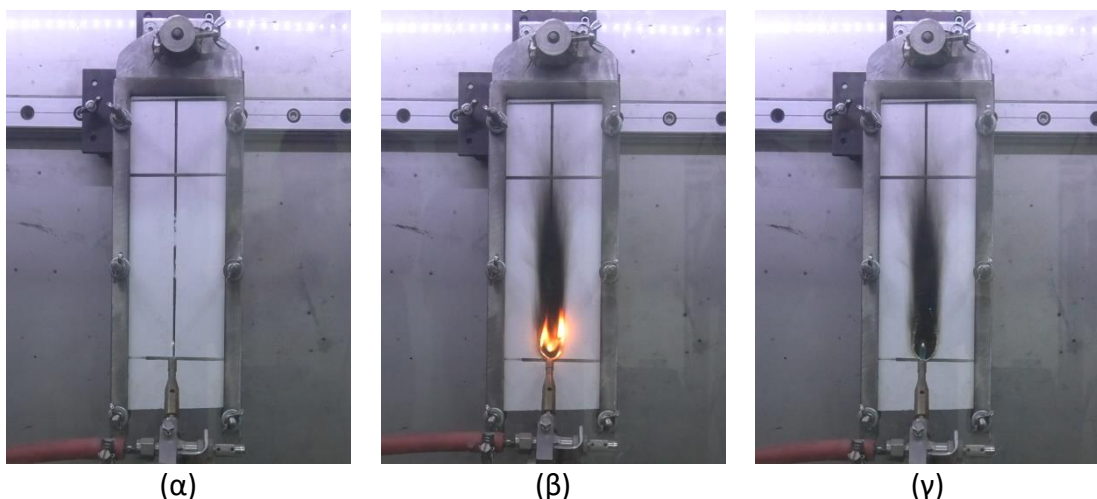




Σχήμα 6.14 Δοκίμιο 6.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**ix. Δοκίμιο 7.1**

Το δοκίμιο, μάζας 220,15 g και πάχους 24,9 mm, αποτελούμενο από αφρό πολυβινυλοχλωριδίου με ακρυλική επένδυση, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Σημειώθηκε ανάφλεξη του δείγματος 5 s μετά την εκκίνηση της δοκιμής και αναπτύχθηκε φλόγα μέγιστου ύψους εξάπλωσης ίσου με το 35% περίπου των 150 mm. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε πλούσιο καπνού και αλλοιώσεις στη δομή του δείγματος, σε έκταση που ταυτίζεται με το χώρο δράσης της φλόγας. Αμέσως μετά την απομάκρυνση του ακροφυσίου, η φλόγα έσβησε και δεν παρατηρήθηκε άλλη μεταβολή της συμπεριφοράς του δείγματος, το οποίο πέρασε τη δοκιμή και κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.16 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



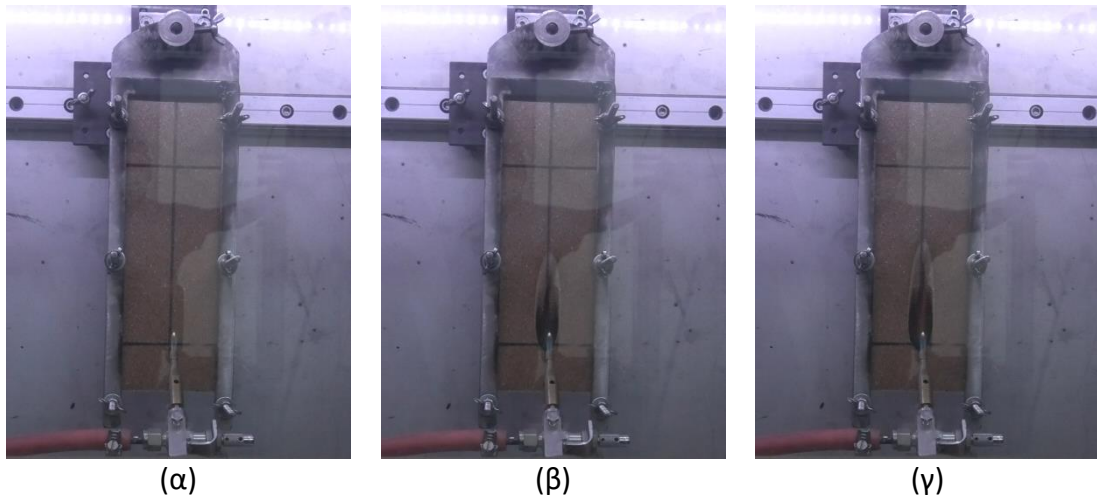
Σχήμα 6.15 Δοκίμιο 7.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s και (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.16 Δοκίμιο 7.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**κ. Δοκίμιο 8a.1**

Το δοκίμιο, μάζας 12,49 g και πάχους 0,55 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 20 s, λόγω του μικρού πάχους του. Η ανάφλεξη σημειώθηκε 15 s μετά την έναρξη της δοκιμής, στο χρονικό σημείο απομάκρυνσης του ακροφυσίου δηλαδή, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη φλόγας μέγιστου ύψους το οποίο άγγιξε το 50% της κρίσιμης απόστασης. Μολονότι το συνολικό χρονικό διάστημα της δοκιμής είναι μικρό, παρατηρήθηκε ανάπτυξη φλόγας αξιοσημείωτου μεγέθους, συγκριτικά πάντα με το δοθέν χρονικό διάστημα. Παράλληλα, η ανάφλεξη σημειώθηκε σε 15 s, δηλαδή στο ήμισυ περίπου του χρόνου που προέκυψε η ανάφλεξη του δοκιμίου 1a.1. Καθοριστικής σημασίας παράγοντας για τα προαναφερθέντα φαινόμενα φαίνεται να αποτελεί το μικρό πάχος του δοκιμίου (0,55 mm) έναντι του δοκιμίου 1a.1 (πάχους 2,1 mm), καθώς το γεγονός αυτό συνεπάγεται μικρότερη θερμοχωρητικότητα του δείγματος και πιο εύκολη πρόσβαση της φλόγας στη μη εκτεθειμένη στη φωτιά επιφάνεια του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάπτυξη δευτερογενούς φλόγας. Το δοκίμιο πληροί τις απαιτήσεις κατάταξής του στην κατηγορία E του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.18 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας, στο οποίο παρατηρείται δημιουργία διαμπερούς οπής στο κάτω μέρος του δοκιμίου.



Σχήμα 6.17 Δοκίμιο 8a.1 σε (α) 0 s, (β) 15 s, (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής



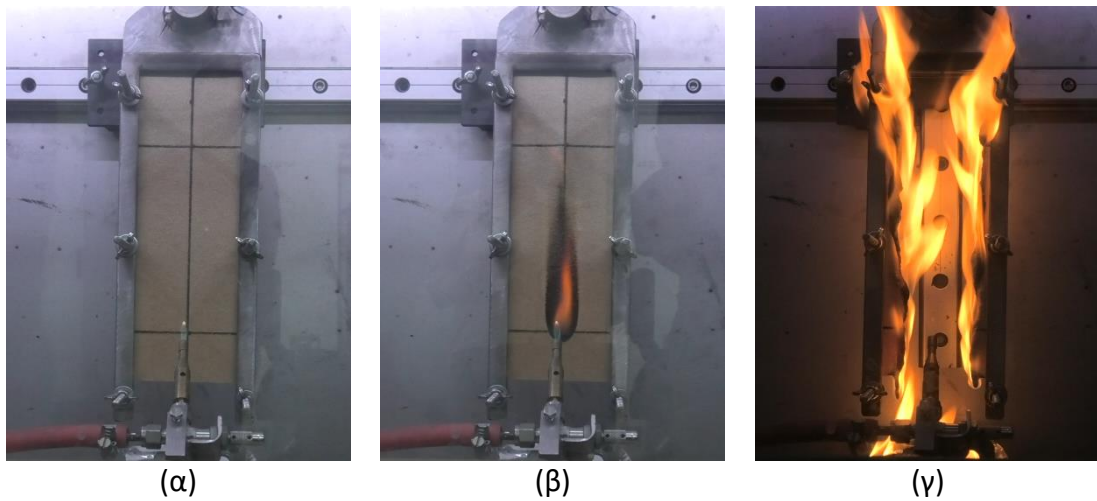
Σχήμα 6.18 Δοκίμιο 8a.1 μετά το πέρας της δοκιμής<sup>21</sup>

#### xi. Δοκίμιο 8b.1

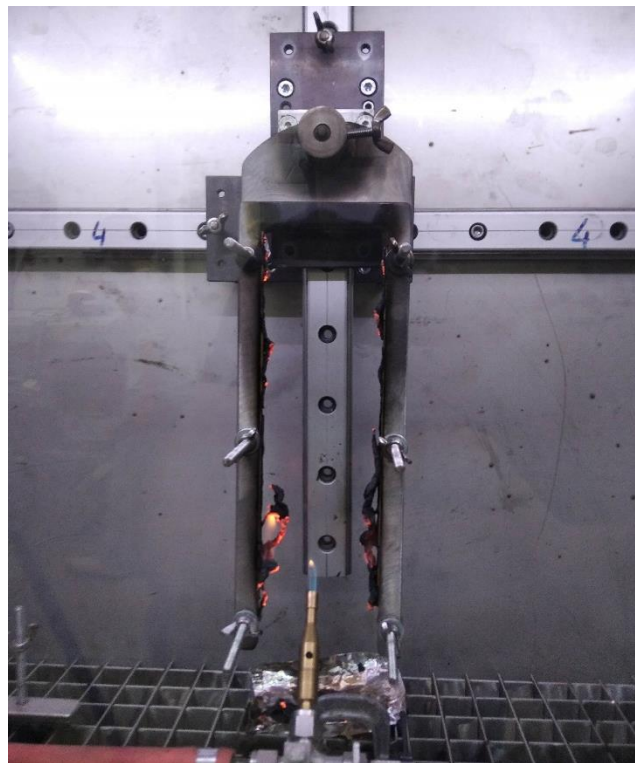
Το δοκίμιο, μάζας 14,62 g και πάχους 0,7 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Η ανάφλεξη του δοκιμίου σημειώθηκε 15 s μετά την αρχική επαφή μεταξύ φλόγας και δοκιμίου, ενώ πριν ακόμα την απομάκρυνση του ακροφυσίου, στα 25 s συγκεκριμένα, η εξάπλωση της φλόγας πέρασε το όριο των 150 mm. Κατά το δεύτερο μισό της δοκιμής η ισχύς της φλόγας, σε συνδυασμό με το μικρό πάχος του δοκιμίου (0,7 mm), οδήγησε στην δημιουργία διαμπερούς οπής, με αποτέλεσμα την καύση και της μη εκτιθέμενης επιφάνειας το δείγματος. Το γεγονός αυτό συντέλεσε όχι μόνο στην αναμενόμενη, για τα δεδομένα της δοκιμής, πτώση φλεγόμενων σταγονιδίων/σωματιδίων, αλλά στην ανάφλεξη ολόκληρου σχεδόν του δείγματος και εν τέλει στην ολοκληρωτική του καύση. Το δοκίμιο δεν κάλυψε τις απαιτήσεις κατάταξής του σε κατηγορία D ή ανώτερη, επομένως κατατάσσεται σε κατηγορία E ή F του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.19

<sup>21</sup> Η δημιουργία της οπής που παρατηρείται, σημειώθηκε μετά το πέρας του χρόνου δοκιμής.

παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.20 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



Σχήμα 6.19 Δοκίμιο 8b.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

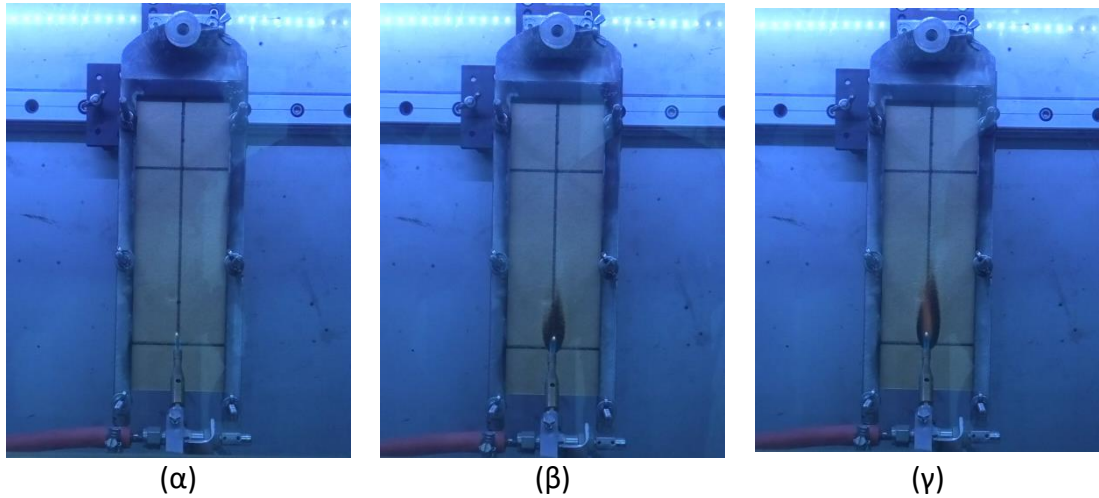


Σχήμα 6.20 Δοκίμιο 8b.1 μετά το πέρας της δοκιμής

#### xii. Δοκίμιο 8b.2.

Λόγω της αδυναμίας του δοκιμίου 8b.1 να περάσει τη δοκιμή, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για χρονικό διάστημα 20 s, με δείγμα μάζας 14,18 g και πάχους 0,7 mm. Κατά τη δοκιμή σημειώθηκε ανάφλεξη 15 s μετά την έναρξή της, δηλαδή στο χρονικό σημείο απομάκρυνσης του ακροφυσίου. Η φλόγα στο μέγιστο ύψος της έφτασε το 40% της κρίσιμης απόστασης, με αποτέλεσμα την επιτυχή περάτωση της δοκιμής και το δείγμα 8b.2 να κατατάσσεται τελικά στην κατηγορία E του

συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.22 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



**Σχήμα 6.21** Δοκίμιο 8b.2 σε (α) 0 s, (β) 15 s, (γ) 20 s μετά την έναρξη της δοκιμής



**Σχήμα 6.22** Δοκίμιο 8b.2 μετά το πέρας της δοκιμής<sup>22</sup>

Αξίζει τέλος να σημειωθεί, ότι η δοκιμή του δείγματος 8a.1 πραγματοποιήθηκε κατόπιν της δοκιμής 8b.2 και ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματά της, καθώς και την παρόμοιο σύσταση και μορφολογία των δοκιμίων, αποφασίστηκε να διενεργηθεί δοκιμή 20 s για το δείγμα 8a.1.

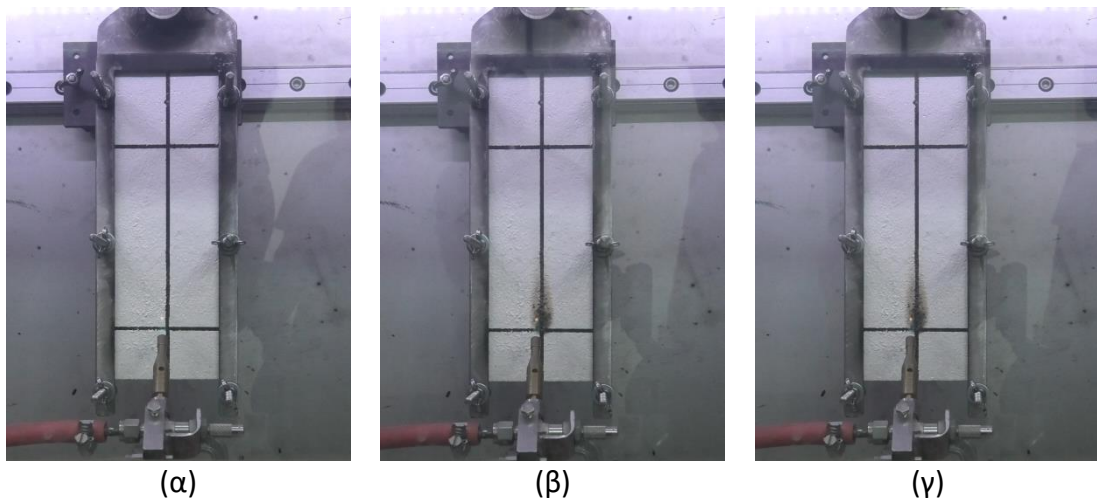
<sup>22</sup> Η δημιουργία της οπής που παρατηρείται, σημειώθηκε μετά το πέρας του χρόνου δοκιμής

### 6.2.2 Δοκίμια επικαλυμμένα με πυράντοχες βαφές

Η τέλεση των δοκιμών συνεχίστηκε με τη εξέταση δειγμάτων επικαλυμμένων με αλληλουχίες στρώσεων, όπως αυτές επισημάνθηκαν στο υποκεφάλαιο 6.1.2. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε σε δείγματα τα οποία κατά την εξέτασή τους σε δοκιμές 60 s, απέτυχαν ή πέρασαν τη δοκιμή, παρουσιάζοντας ωστόσο επισφαλή συμπεριφορά. Επιπλέον, όσον αφορά στην κωδικοποίηση των δοκιμών, έγινε προσθήκη των δεικτών N ή V ανά περίπτωση, ενδεικτικών της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης βαφής. Πιο αναλυτικά πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

#### i. Δοκίμιο 1a.N.1

Το δοκίμιο, μάζας 53,32 g και πάχους 2,6 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν σημειώθηκε ανάφλεξη, ωστόσο παρατηρήθηκε μικρής έκτασης διόγκωση της πυράντοχης, θερμοδιογκούμενης βαφής στον κατακόρυφο άξονα, σε μήκος περίπου ίσο με το 20% των 150 mm, κατά το πρώτο μισό της δοκιμής. Μετά την απομάκρυνση του καυστήρα, δεν σημειώθηκε καμία επιπρόσθετη επίδραση στο δοκίμιο, το οποίο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.23 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.24 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



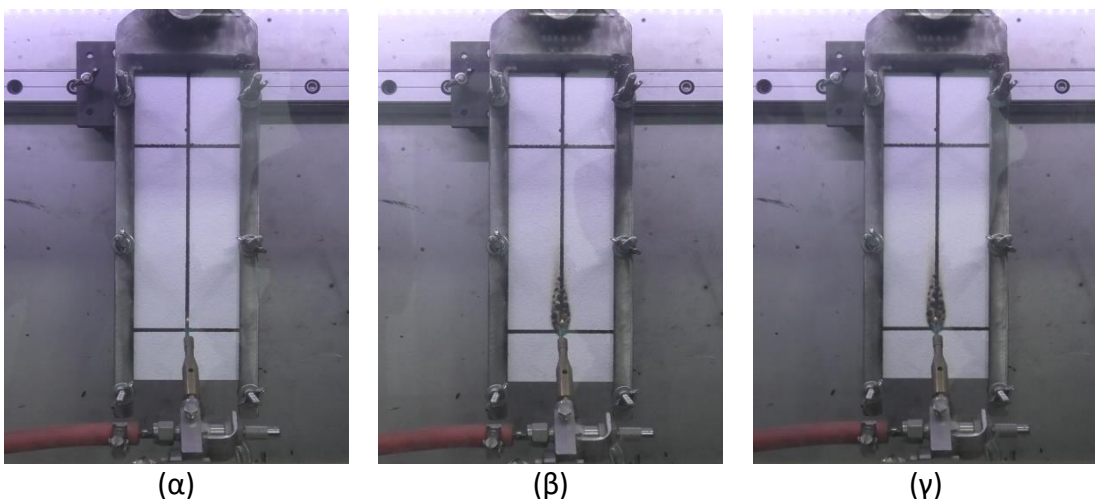
**Σχήμα 6.23** Δοκίμιο 1a.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



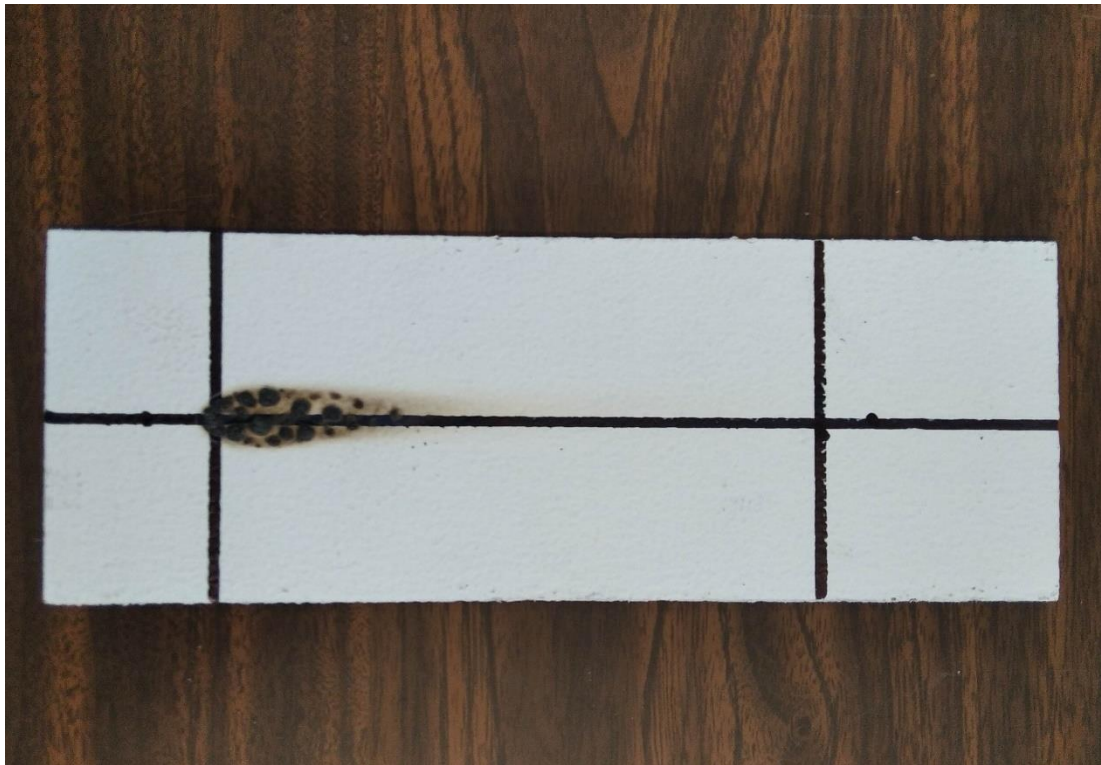
Σχήμα 6.24 Δοκίμιο 1a.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής

ii. **Δοκίμιο 1a.V.1**

Το δοκίμιο, μάζας 47,35 g και πάχους 2,25 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Όπως και στο δοκίμιο 1a.N.1 σημειώθηκε διόγκωση κατά τον κατακόρυφο άξονα, χωρίς ανάφλεξη του δείγματος. Η διόγκωση στην εξεταζόμενη περίπτωση εκτάθηκε σε μεγαλύτερο μήκος, στο 30% της κρίσιμης απόστασης περίπου, ενώ παράλληλα ήταν εντονότερη και πιο ογκώδης ανά μονάδα επιφάνειας. Η πρόκληση αλλοιώσεων στο δοκίμιο έλαβε τέλος μετά τα 30 s. Το δείγμα πέρασε με επιτυχία τη δοκιμή και κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.26 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



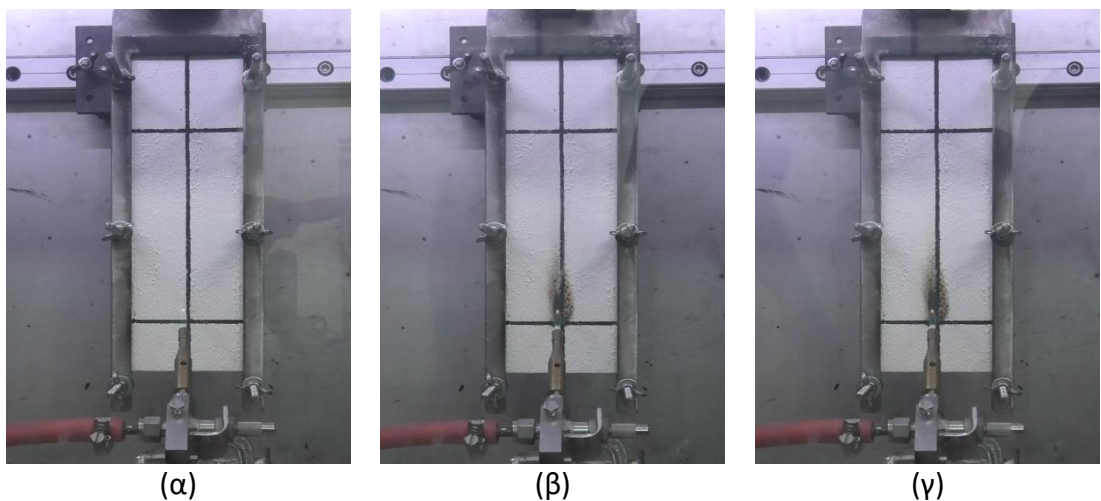
Σχήμα 6.25 Δοκίμιο 1a.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.26 Δοκίμιο 1a.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής

iii. Δοκίμιο 1b.N.1

Το δοκίμιο, μάζας 59 g και πάχους 2,6 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Στο πρώτο στάδιο της δοκιμής παρατηρήθηκε διόγκωση που εκτάθηκε μέχρι το 25% περίπου των 150 mm, χωρίς να σημειωθεί ανάφλεξη, φαινόμενο που τερματίστηκε με την απομάκρυνση του ακροφυσίου. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.27 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.28 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



Σχήμα 6.27 Δοκίμιο 1b.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

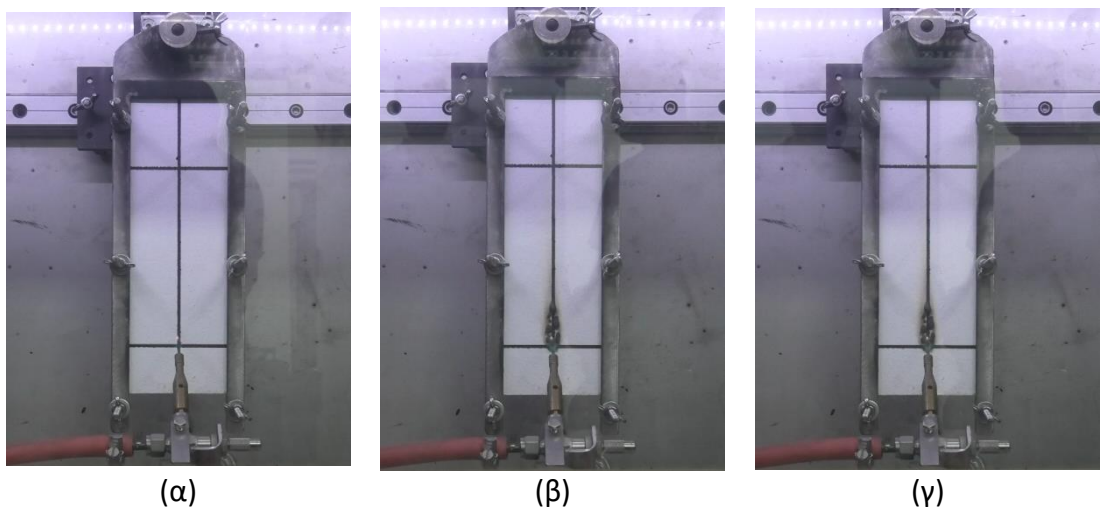




Σχήμα 6.28 Δοκίμιο 1b.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**iv. Δοκίμιο 1b.V.1**

Το δοκίμιο, μάζας 60,6 g και πάχους 2,5 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Δεν παρατηρήθηκε ανάφλεξη του δείγματος, ωστόσο σημειώθηκε διόγκωση κατά το πρώτο στάδιο, η οποία κάλυψε το 25% του κρίσιμου ύψους, παρόμοια δηλαδή με αυτήν του δοκιμίου 1b.N.1, εντονότερη όμως και πιο ογκώδης ανά μονάδα επιφάνειας. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.29 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.30 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



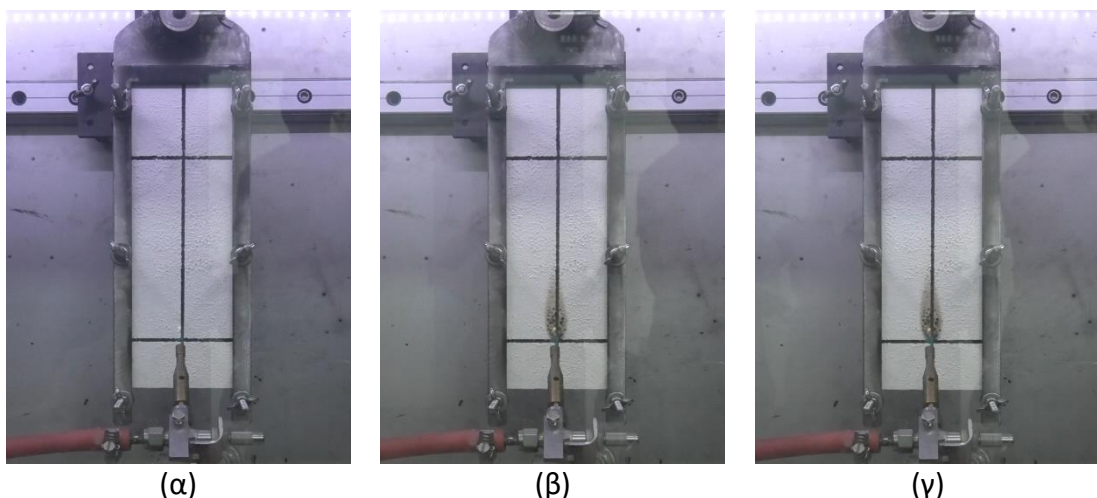
Σχήμα 6.29 Δοκίμιο 1b.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.30 Δοκίμιο 1b.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**v. Δοκίμιο 2.N.1**

Το δοκίμιο, μάζας 57,67 g και πάχους 2,0 mm, αποτελούμενο από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, δεν αναφλέχθηκε, αλλά έδρασε η θερμοδιογκούμενη βαφή, σημειώνοντας διόγκωση έκτασης ίσης με το 20% σχεδόν των 150 mm, φαινόμενο το οποίο έπαψε τη δράση του μετά την απομάκρυνση της φλόγας. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.31 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.32 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



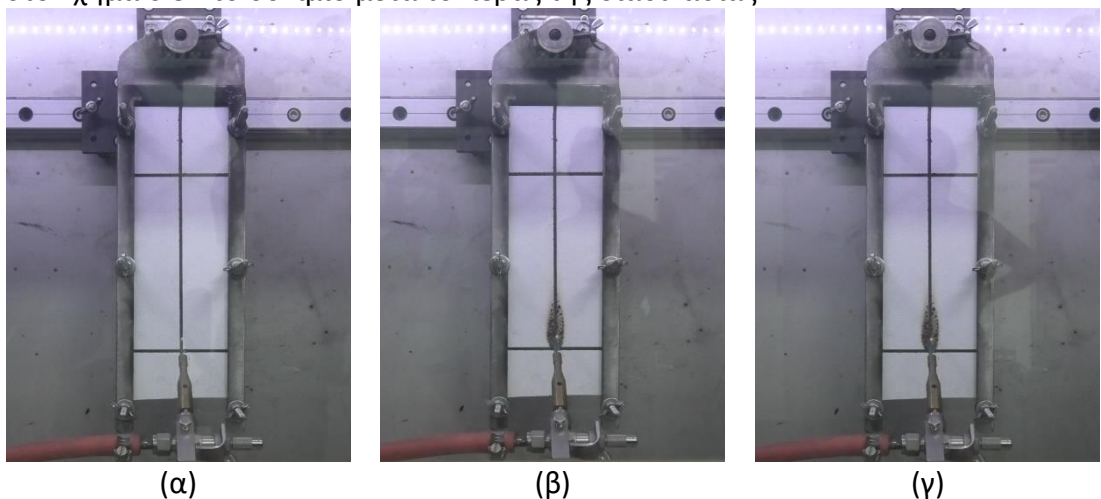
Σχήμα 6.31 Δοκίμιο 2.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.32 Δοκίμιο 2.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**vi. Δοκίμιο 2.V.1**

Το δοκίμιο, μάζας 49,91 g και πάχους 1,7 mm, αποτελούμενο από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Παρατηρήθηκε διόγκωση της βαφής κατά το χρονικό διάστημα επαφής της πρωτογενούς φλόγας στο δοκίμιο, μεγαλύτερου όγκου και μήκους από την αντίστοιχη του δοκιμίου 2.N.1, η οποία κάλυψε το 25% των 150 mm. Επιπλέον το δείγμα δεν αναφλέχθηκε, ενώ επιτυγχάνοντας τη δοκιμή κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.33 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.34 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



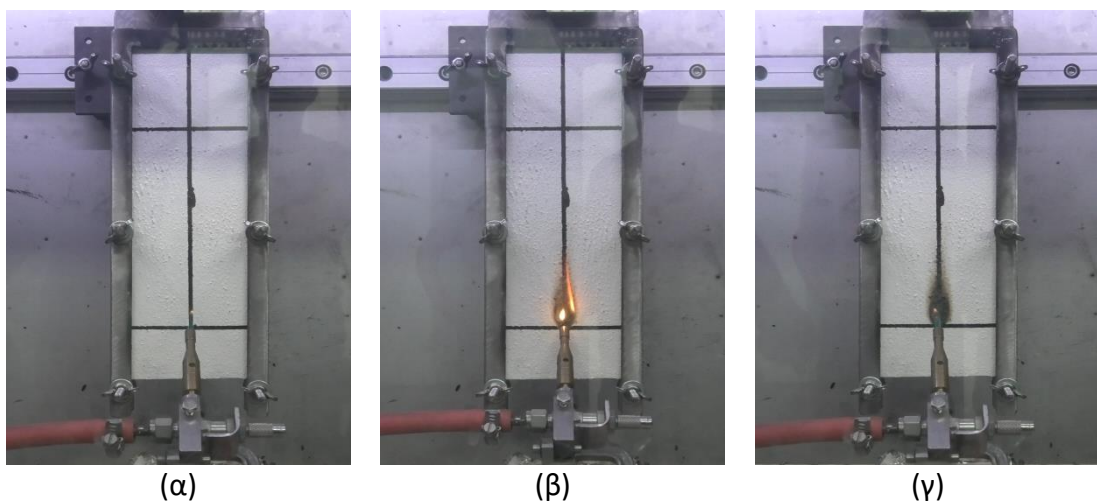
Σχήμα 6.33 Δοκίμιο 2.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.34 Δοκίμιο 2.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής

#### vii. Δοκίμιο 7.N.1

Το δοκίμιο, μάζας 230,51 g και πάχους 25,5 mm, αποτελούμενο από αφρό πολυβινυλοχλωριδίου με ακρυλική επένδυση, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Η ανάφλεξη προέκυψε λίγο πριν τα 10 s, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτερογενούς φλόγας, με μέγιστο ύψος ίσο περίπου με το 35% της κρίσιμης απόστασης. Επιπλέον, σημειώθηκε διόγκωση έκτασης ίσης με το 20% της ίδιας απόστασης. Τα φαινόμενα αυτά τερματίστηκαν με την απομάκρυνση του καυστήρα και το δοκίμιο, επιτυγχάνοντας τη δοκιμή, κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.35 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.36 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



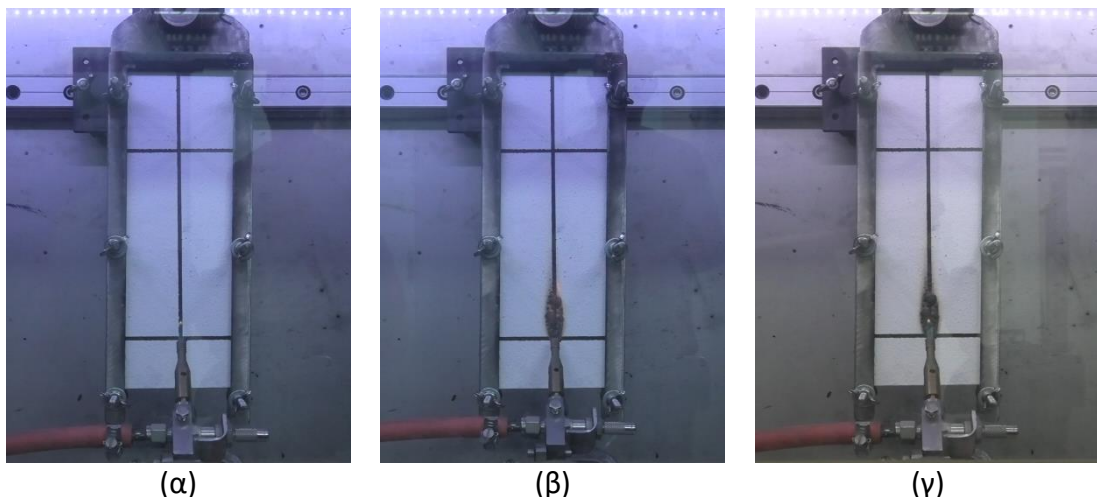
Σχήμα 6.35 Δοκίμιο 7.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.36 Δοκίμιο 7.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής

#### viii. Δοκίμιο 7.V.1

Το δοκίμιο, μάζας 224,02 g και πάχους 25,2 mm, αποτελούμενο από αφρό πολυβινυλοχλωριδίου με ακρυλική επένδυση, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής σημειώθηκε ανάφλεξη σε 23 s μετά την έναρξή της και δημιουργία φλόγας, ύψους ίσου με το 30% των 150 mm, η οποία έσβησε μετά τα 30 s. Παράλληλα, η βαφή διογκώθηκε, καταλαμβάνοντας έκταση ίση με το 25% της προαναφερθείσας απόστασης. Παρατηρήθηκε επομένως ύπαρξη ελαφρώς μικρότερης εξάπλωσης της φλόγας και μεγαλύτερης διόγκωσης συγκριτικά με το δοκίμιο 7.N.1. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.37 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.38 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



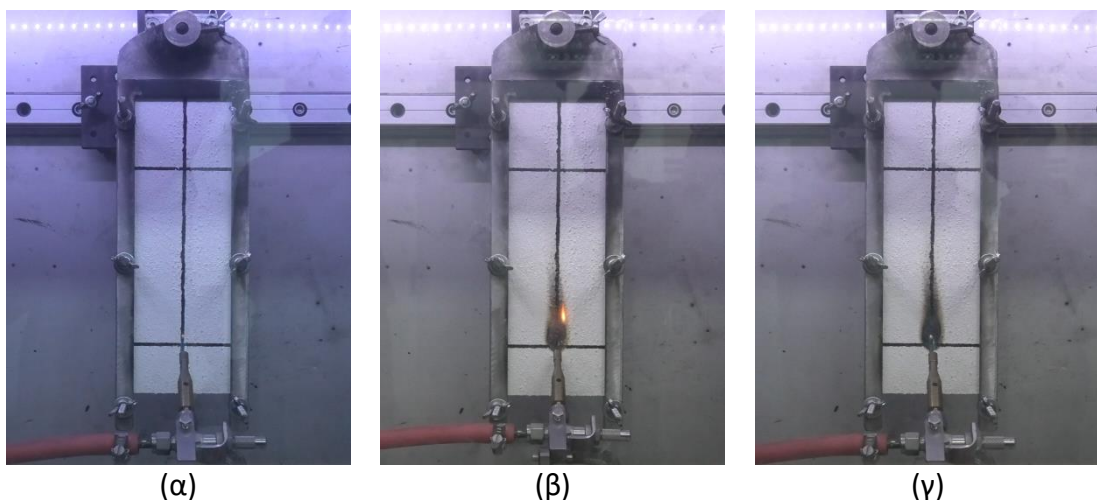
Σχήμα 6.37 Δοκίμιο 7.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



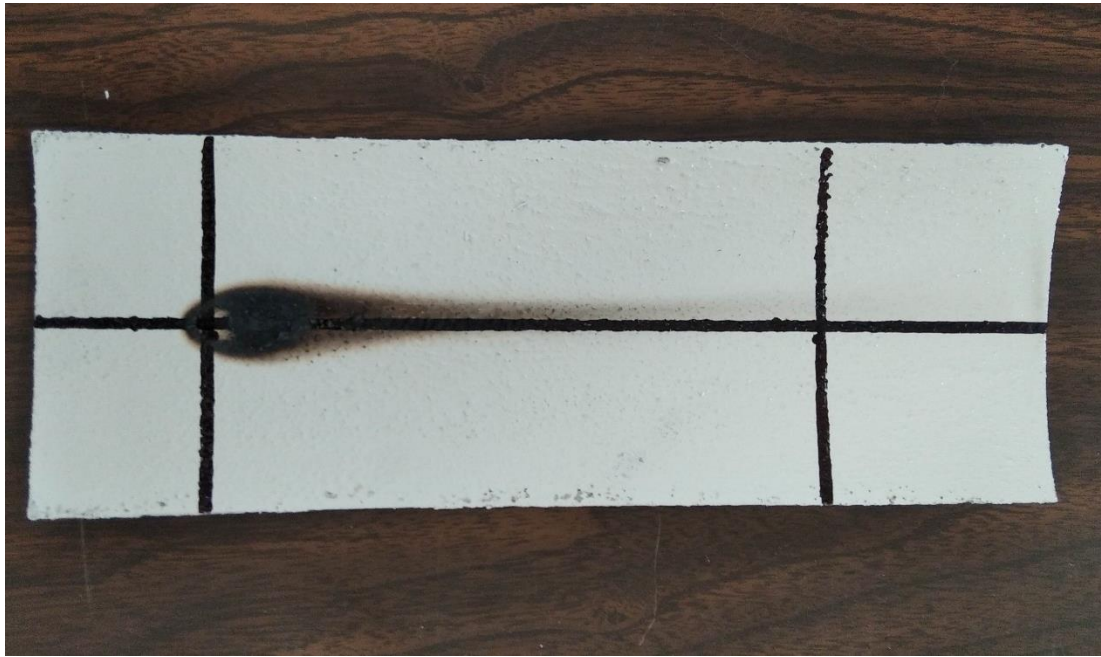
Σχήμα 6.38 Δοκίμιο 7.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**ix. Δοκίμιο 8a.N.1**

Το δοκίμιο, μάζας 24,73 g και πάχους 1,2 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. 10 s μετά την έναρξη της δοκιμής σημειώθηκε ανάφλεξη, με την παραγόμενη φλόγα να σημειώνει μέγιστο ύψος εξάπλωσης ίσο με το 40% της απόστασης μεταξύ του σημείου επαφής και του ορίου των 150 mm. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε δημιουργία πλουμίου καπνού και διόγκωσης, έκτασης ίσης με το 20% της κρίσιμης απόστασης. Μετά την απομάκρυνση του ακροφυσίου, τόσο η φλόγα, όσο και η διόγκωση τερματίστηκαν. Το δοκίμιο κατατάσσεται σε κατηγορία D ή κ ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.39 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.40 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



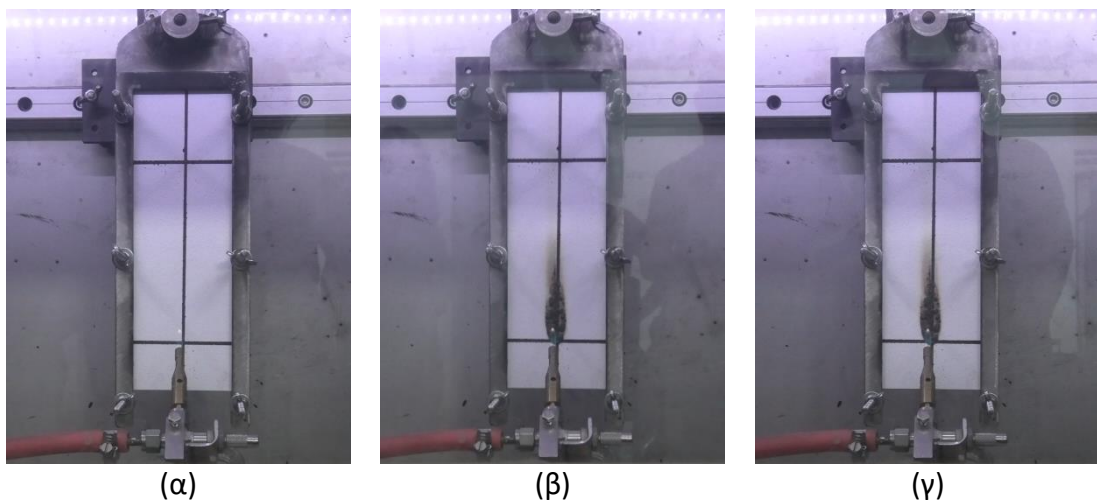
Σχήμα 6.39 Δοκίμιο 8a.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.40 Δοκίμιο 8a.N.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**κ. Δοκίμιο 8a.V.1**

Το δοκίμιο, μάζας 17,93 g και πάχους 0,75 mm, αποτελούμενο από ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο, σε αναλογία 50:50, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής προέκυψε διόγκωση της βαφής, έκτασης που ισούται με 35% των 150 mm, η οποία έπαψε να επεκτείνεται όταν η φλόγα απομακρύνθηκε από το δοκίμιο. Επιπλέον, σε αντίθεση με το δοκίμιο 8a.N.1, δεν παρατηρήθηκε ανάφλεξη, ενώ παράλληλα η σημειούμενη διόγκωση του εξεταζόμενου δοκιμίου ήταν μεγαλύτερη σε μήκος και όγκο. Το δείγμα πέρασε με επιτυχία τη δοκιμή και κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.41 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.42 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



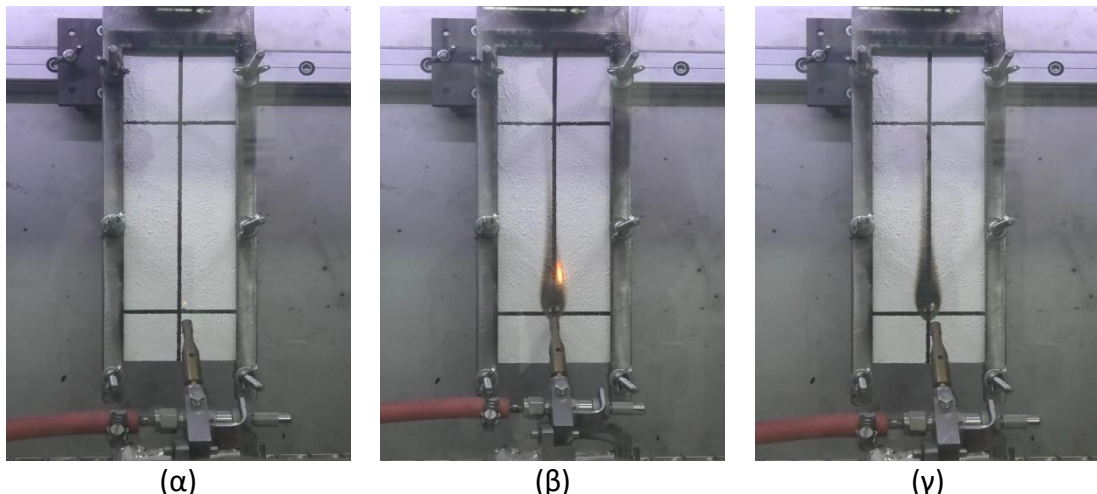
Σχήμα 6.41 Δοκίμιο 8a.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



Σχήμα 6.42 Δοκίμιο 8a.V.1 μετά το πέρας της δοκιμής

**xi. Δοκίμιο 8b.N.1**

Το δοκίμιο, μάζας 26,11 g και πάχους 1,2 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Η ανάφλεξη του δοκίμιου σημειώθηκε 10 s περίπου μετά την έναρξη, γεγονός που συντέλεσε σε ανάπτυξη φλόγας μέγιστου ύψους ίσου με το 35% των 150 mm, η οποία έσβησε τελικά στα 30 s. Ταυτόχρονα, παρουσιάστηκε διόγκωση της βαφής, που εκτάθηκε μέχρι το 20% του κρίσιμου ύψους, καθώς και παραγωγή πλουμίου καπνού, φαινόμενα που έπαψαν να εξελίσσονται μετά τα 30 s. Το δείγμα κατατάσσεται σε κατηγορία D ή καλύτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.43 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής.



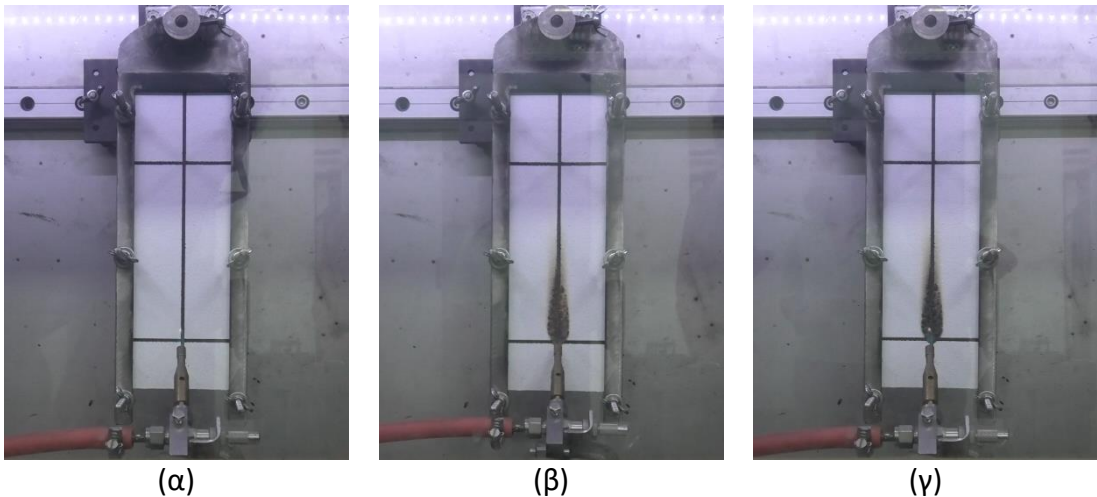
Σχήμα 6.43 Δοκίμιο 8b.N.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής

**xii. Δοκίμιο 8b.V.1**

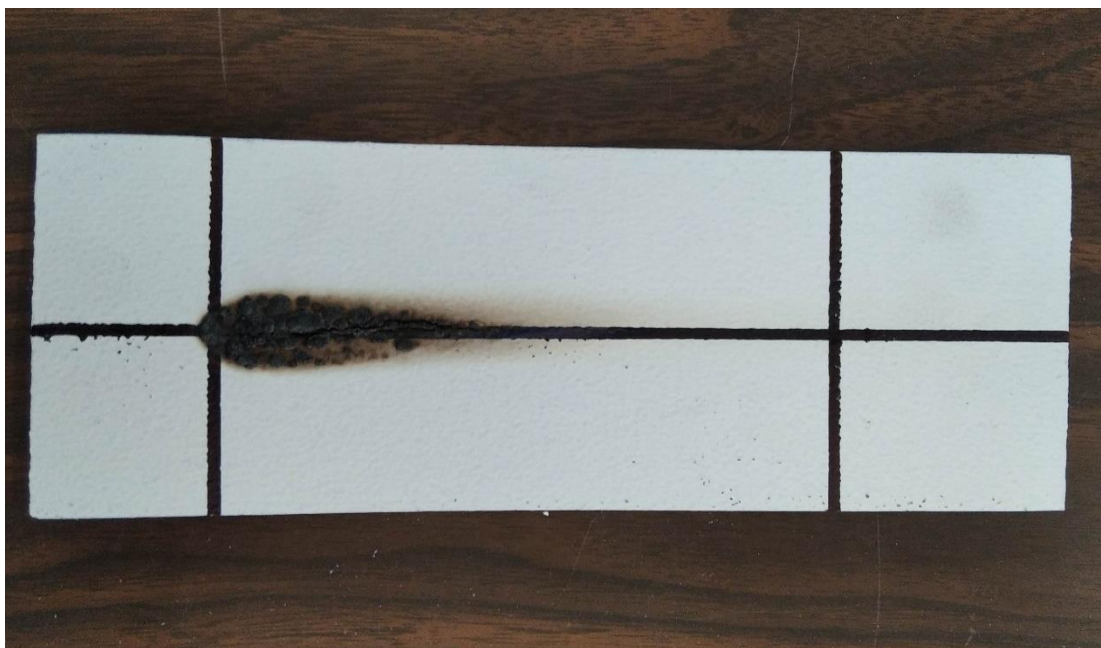
Το δοκίμιο, μάζας 19,34 g και πάχους 0,85 mm, αποτελούμενο από ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη, σε αναλογία 70:30, εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 60 s. Η



ανάφλεξη του δείγματος συντελέστηκε κατά το πρώτο ήμισυ της δοκιμής, ωστόσο το μέγεθος της παραγόμενης φλόγας ήταν ιδιαιτέρως μικρό. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε διόγκωση σε μήκος ίσο με το 40% των 150 mm, η οποία συγκρινόμενη με την αντίστοιχη του δοκιμίου 8b.N.1 είναι μεγαλύτερη σε μήκος και όγκο. Το δείγμα πέρασε τη δοκιμή και κατατάσσεται σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Στο Σχήμα 6.44 παρουσιάζεται η εξέλιξη της δοκιμής, ενώ στο Σχήμα 6.45 το δοκίμιο μετά το πέρας της διαδικασίας.



**Σχήμα 6.44** Δοκίμιο 8b.V.1 σε (α) 0 s, (β) 30 s, (γ) 60 s μετά την έναρξη της δοκιμής



**Σχήμα 6.45** Δοκίμιο 8b.V.2 μετά το πέρας της δοκιμής

### 6.3 Συμπεράσματα δοκιμών

Στον Πίνακα 6.2, καθώς και στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα του συνόλου των δοκιμών.

Πίνακας 6.2 Σύγκριση δοκιμών EN ISO 11925-2 (α)

Δοκίμιο	Σύσταση υλικού	Μάζα (g)	Πάχος (mm)	Διάρκεια δοκιμής (s)	Ανάφλεξη δοκιμίου	Φλόγα στα 150 mm / Χρόνος στα 150 mm (s)	Ανάφλεξη διηθητικού χαρτιού	Κατηγορία Euroclass
1a.1	Ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο σε αναλογία 50:50	39,89	2,1	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
1a.N.1		53,32	2,6	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
1a.V.1		47,35	2,25	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
1b.1	Ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη σε αναλογία 70:30	50,4	2,2	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
1b.N.1		59	2,6	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
1b.V.1		60,6	2,5	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
2.1	Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού	45,85	1,5	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
2.N.1		57,67	2	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
2.V.1		49,91	1,7	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
3.1	Ξύλο ελάτου εμποτισμένο με αλκυδική ρητίνη	105,19	10,6	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
4.1	Πολυϊσοκυανουρικός αφρός και αφρός πολυουρεθάνης με ακρυλική επένδυση	37,31	9,4	60	Ναι	Ναι / 25	Όχι	E
4.2		37,31	9,4	20	Όχι	Όχι / -	Όχι	
5.1	Πολυβινυλοχλωρίδιο με ίνες ξύλου σε αναλογία 50:50	272,24	25,8	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
6.1	Πολυουρεθάνη με εξωτερική επένδυση φύλλου χάλυβα, επικαλυμμένου με ακρυλική επίστρωση	128,25	30,0	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
7.1	Αφρός πολυβινυλοχλωριδίου με ακρυλική επένδυση	220,15	24,9	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
7.N.1		230,51	25,5	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
7.V.1		224,02	25,2	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
8a.1	Ίνες σκληρού ξύλου με συμπολυμερές πολυπροπυλένιο σε αναλογία 50:50	12,49	0,55	20	Ναι	Όχι / -	Όχι	E
8a.N.1		24,73	1,2	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
8a.V.1		17,93	0,75	60	Όχι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
8b.1	Ίνες ξύλου με προπιονική κυτταρίνη σε αναλογία 70:30	14,62	0,7	60	Ναι	Ναι / 25	Ναι	E
8b.2		14,18	0,7	20	Ναι	Όχι / -	Όχι	
8b.N.1		26,11	1,2	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη
8b.V.1		19,34	0,85	60	Ναι	Όχι / -	Όχι	D ή ανώτερη

**Πίνακας 6.3** Σύγκριση δοκιμών EN ISO 11925-2 (β)

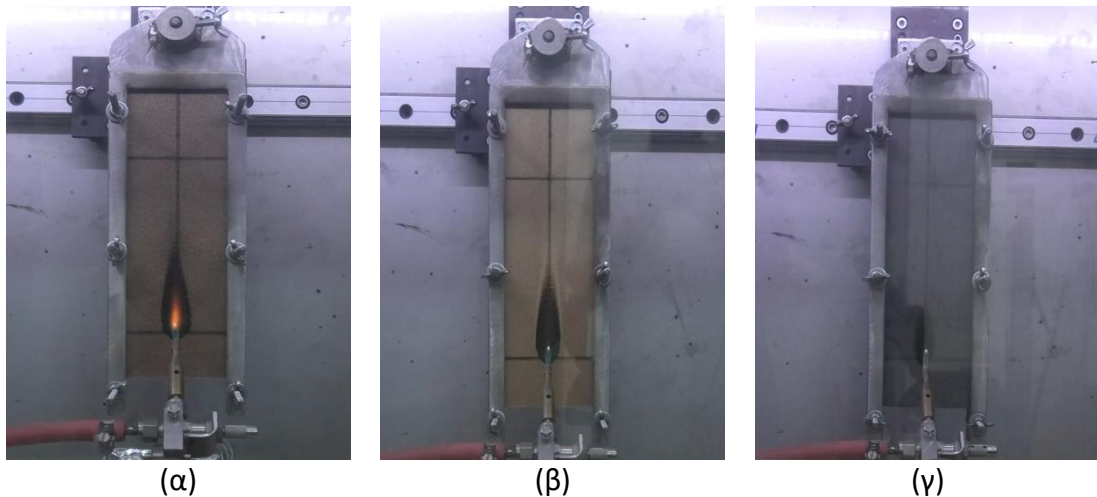
Δοκίμιο	Κατά προσέγγιση μέγιστο ποσοστιαίο μήκος εξάπλωσης φλόγας επί των 150 mm (%)	Κατά προσέγγιση ποσοστιαίο μήκος διόγκωσης της βαφής επί των 150 mm (%)	Επιπρόσθετες παρατηρήσεις
1a.1	50	-	-
1a.N.1	-	20	-
1a.V.1	-	30	-
1b.1	25	-	-
1b.N.1	-	25	-
1b.V.1	-	25	-
2.1	80	-	Αποκόλληση σωματιδίων, πλούμιο καπνού, σημαντικές αλλοιώσεις
2.N.1	-	20	-
2.V.1	-	25	-
3.1	-	-	-
4.1	> 100	-	Πλούμιο καπνού, σημαντικές αλλοιώσεις στο 80 % της κρίσιμης απόστασης
4.2	-	-	-
5.1	-	-	-
6.1	-	-	-
7.1	35	-	Πλούμιο καπνού, αλλοιώσεις στο 35% της κρίσιμης απόστασης
7.N.1	35	20	-
7.V.1	30	25	-
8a.1	50	-	-
8a.N.1	40	20	Πλούμιο καπνού
8a.V.1	-	35	-
8b.1	> 100	-	Ρευστοποίηση και ολοκληρωτική καύση του δοκιμίου
8b.2	40	-	-
8b.N.1	35	20	Πλούμιο καπνού
8b.V.1	Εξαιρετικά μικρό	40	-

### 6.3.1 Επίδραση υλικού

- Εξετάζοντας τα δοκίμια 1a.1 και 1b.1, παρατηρείται σημαντικά μειωμένο μέγεθος φλόγας στο δεύτερο. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο 1a.1, σημειώνει διπλάσιο μέγιστο ύψος εξάπλωσης της φλόγας συγκριτικά με το αντίστοιχο του δοκιμίου 1b.1, ενώ τα πάχη των δειγμάτων είναι περίπου ίδια (2,1 mm και 2,2 mm αντίστοιχα). Στην ίδια κατεύθυνση, το δοκίμιο 8a.1, πάχους 0,55 mm, παρουσιάζει μέγιστο ύψος φλόγας ίσο με το 50% των 150 mm, έναντι του δοκιμίου 8b.2, πάχους 0,7 mm, με

ποσοστό 40%, σε ίδιο χρόνο δοκιμής. Παρατηρείται δηλαδή, ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά του υλικού 1b – 8b, σε σχέση με το υλικό 1a – 8a. Το γεγονός αυτό πιθανότατα συνδέεται με την ύπαρξη προπιονικής κυτταρίνης στις ίνες ξύλου από τις οποίες αποτελούνται τα 1b – 8b (σε αναλογία 30:70), σε αντίθεση με το συμπολυμερές πολυπροπυλένιο που συναντάται στα 1a – 8a (σε αναλογία 50:50).

- Το δοκίμιο 5.1, αποτελούμενο από πολυβινυλοχλωρίδιο και ίνες ξύλου (σε αναλογία 50:50), παρουσίασε ιδιαίτερα καλή αντίδραση στη φωτιά, χωρίς να σημειωθεί ανάφλεξη, σε αντιδιαστολή με τα δοκίμια 1a.1, 1b.1, 8a.1 και 8b.2. Το φαινόμενο αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στο συνδυασμό PVC με τις ίνες ξύλου, σε αντίθεση με το πολυπροπυλένιο ή την κυτταρίνη που χρησιμοποιήθηκαν στα υπόλοιπα δείγματα. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συμβολή του πάχους του δοκιμίου 5.1, το οποίο είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερο των υπολοίπων. Στο Σχήμα 6.46 παρουσιάζεται σύγκριση των δοκιμών 1a.1, 1b.1 και 5.1, κατά τη στιγμή ολοκλήρωσης των δοκιμών τους.

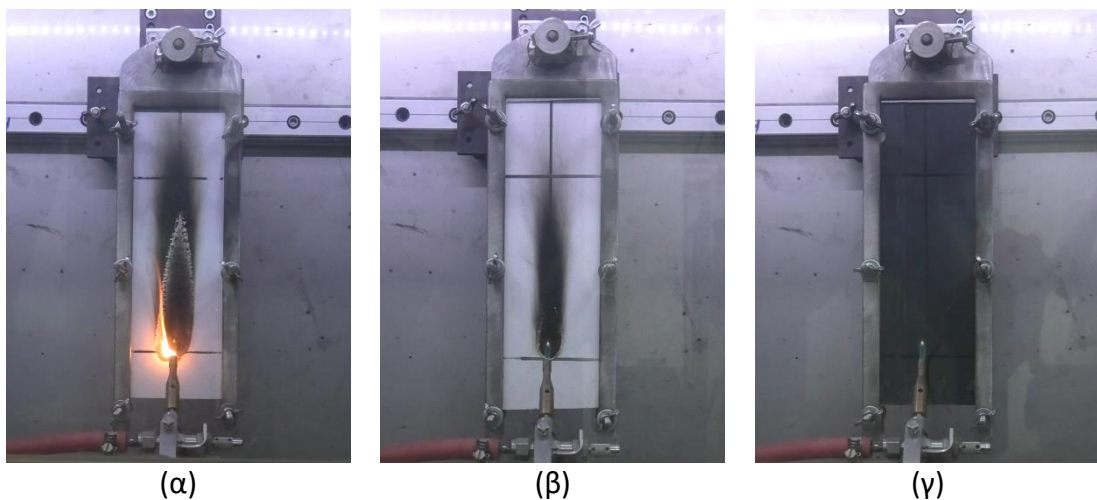


**Σχήμα 6.46** Σύγκριση των δειγμάτων (α) 1a.1, (β) 1b.1, (γ) 5.1 στα 60 s

- Παρόλη την επιτυχή έκβαση της δοκιμής 2.1, η αντίδραση του υλικού, αποτελούμενου από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, στην φωτιά δημιούργησε αμφιβολίες αναφορικά με τη συμπεριφορά του σε δοκιμές μεγαλύτερης κλίμακας, καθώς και σε ενδεχόμενες εγκαταστάσεις του υλικού σε κτήρια. Πέραν του μεγάλου μεγέθους της φλόγας, το ύψος εξάπλωσης της οποίας άγγιξε το 80% της κρίσιμης απόστασης, προέκυψαν σημαντικές αλλοιώσεις της δομής του δοκιμίου, παραγωγή πλούσιου καπνού και αποκολλήσεις σωματιδίων.
- Το δοκίμιο 3.1, κατασκευασμένο από ξύλο ελάτου, σημείωσε ιδιαίτερα καλή αντίδραση στη φωτιά, με μηδενική παραγωγή δευτερογενούς φλόγας, στην οποία συνεισφέρει η πυράντοχη δράση της αλκυδικής ρητίνης, με την οποία έχει εμποτιστεί.
- Το δείγμα 4.1, αποτελούμενο από πολυϊσοκυανουρικό αφρό και αφρό πολουρεθάνης με ακρυλική επένδυση, είχε μη επαρκή συμπεριφορά κατά τη δοκιμή, με φλόγα που ξεπέρασε το όριο των 150 mm, ενώ παράλληλα διαπέρασε την ακρυλική επένδυση του δοκιμίου και προκάλεσε σημαντικές αλλοιώσεις, καταστρέφοντας μεγάλο μέρος της μόνωσης (80% της κρίσιμης απόστασης κατά τον κατακόρυφο άξονα). Αντίστοιχα, το δοκίμιο 7.1, αποτελούμενο από αφρό

πολυβινυλοχλωριδίου με ακρυλική επένδυση, παρότι πέρασε επιτυχώς τη διαδικασία, ανέπτυξε φλόγα ύψους ίσου με το 35% της απόστασης μεταξύ του σημείου επαφής και του ορίου, η οποία διαπέρασε την ακρυλική επένδυση και προκάλεσε αλλοιώσεις στο μονωτικό υλικό. Παρατηρείται λοιπόν, έντονη αναφλεξιμότητα υλικών που διαθέτουν ακρυλική εξωτερική επένδυση.

- Το δοκίμιο 6.1, ενώ διαθέτει ακρυλική επένδυση και περιέχει πολυουρεθάνη ως μονωτικό υλικό, όπως το δοκίμιο 4.1 (το οποίο περιέχει και πολυϊσοκυανουρικό αφρό στη μόνωση), αποτέλεσε ίσως το δείγμα με την καλύτερη συμπεριφορά κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών, καθώς δεν παρουσίασε οποιαδήποτε αλλοίωση υπό την επίδραση της φλόγας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα φύλλα χάλυβα που παρεμβάλλονται μεταξύ μόνωσης και επένδυσης. Στο Σχήμα 6.47 παρουσιάζεται σύγκριση των δειγμάτων 4.1, 7.1 και 6.1, κατά τη στιγμή ολοκλήρωσης των δοκιμών τους.



Σχήμα 6.47 Σύγκριση των δειγμάτων (α) 4.1, (β) 7.1, (γ) 6.1 στα 60 s

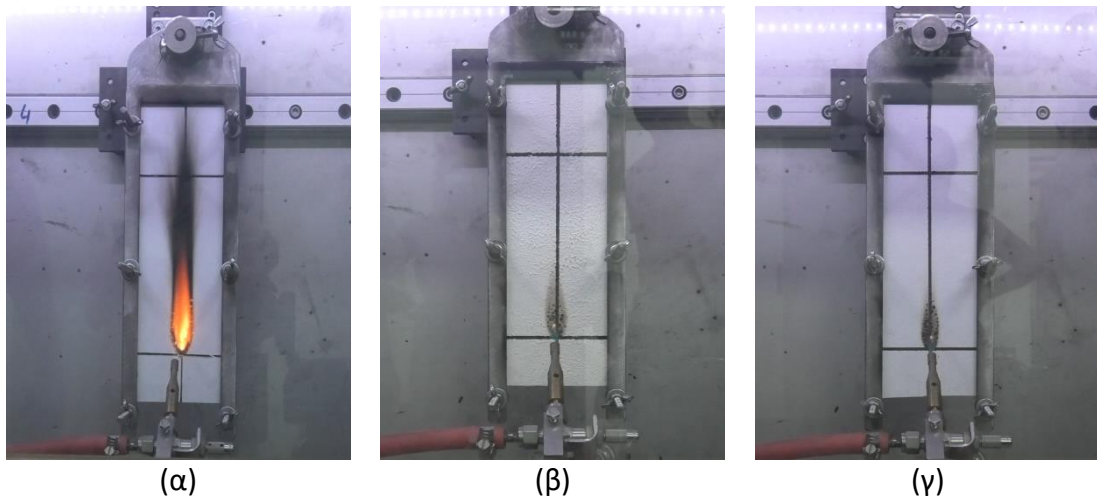
- Όσον αφορά στη μάζα των δοκιμών, παρατηρείται συσχέτιση της με την επίδοση των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, τα πέντε πρώτα δείγματα με τη χειρότερη συμπεριφορά στη φωτιά, δηλαδή το σύνολο των δοκιμών τα οποία κατατάχθηκαν σε κατηγορία E του συστήματος Euroclass (8a.1, 8b.2, 4.1), καθώς και τα δοκίμια με το μεγαλύτερο μέγεθος εξάπλωσης φλόγας σε κατηγορία D ή ανώτερη (1a.1, 2.1), συνιστούν τα πέντε πιο ελαφρά δοκίμια<sup>23</sup>. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μικρότερη είναι η μάζα, τόσο μικρότερη είναι και η συνολική θερμοχωρητικότητα του δοκιμίου, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αντοχή του σε μεγάλα θερμικά φορτία και συνεπώς την κακή αντίδρασή του σε συνθήκες φωτιάς.

### 6.3.2 Επίδραση πυράντοχης βαφής

- Κανένα δείγμα με επικάλυψη πυράντοχης βαφής δεν απέτυχε κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρονικού διαστήματος 60 s και ως εκ τούτου όλα κατατάχθηκαν σε κατηγορία D ή ανώτερη του συστήματος Euroclass. Επιπροσθέτως σε κανένα εκ των δοκιμών δεν σημειώθηκαν αλλοιώσεις στις δομές των επικαλυμμένων υλικών.

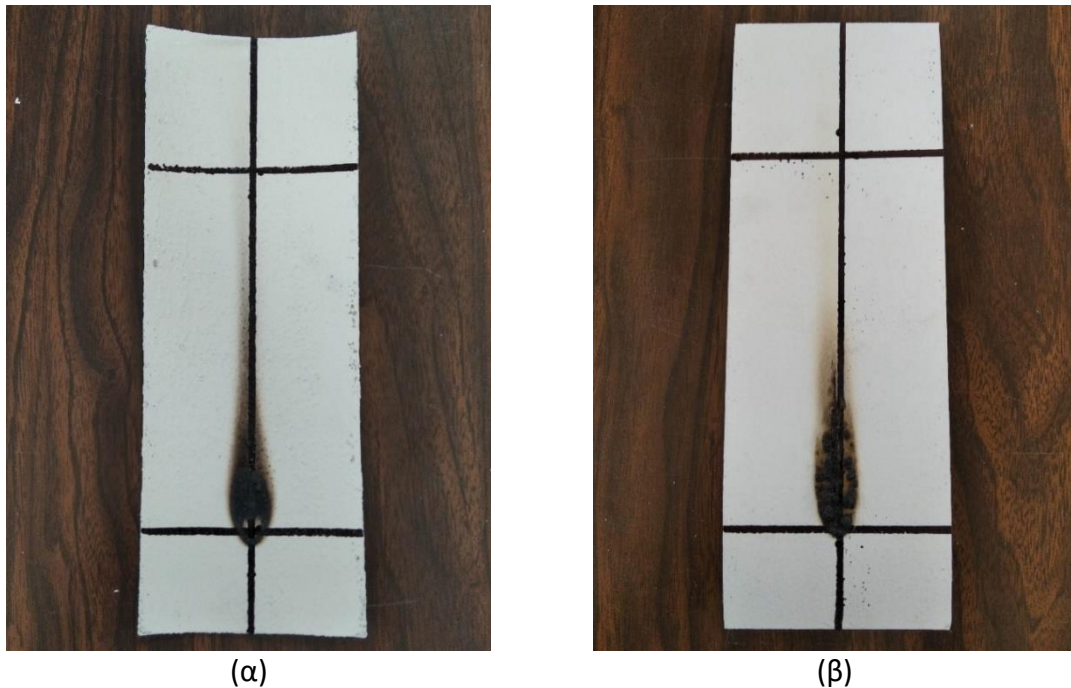
<sup>23</sup> Η κατάταξη αφορά μη επικαλυμμένα δοκίμια.

- Τα δοκίμια 1a.N.1, 1a.V.1, 1b.N.1, 1b.V.1, 2.N.1 και 2.V.1 δεν παρουσίασαν ανάφλεξη, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα, μη επικαλυμμένα δοκίμια. Στο Σχήμα 6.48 παρουσιάζονται συγκριτικά τα δείγματα 2.1, 2.N.1 και 2.V.1 στη λήξη των δοκιμών τους.
- Παρά την εκδήλωση φλόγας ίδιου περίπου μεγέθους των δοκιμών 7.N.1 και 7.1, η θερμική συμπεριφορά του πρώτου θεωρείται καλύτερη, καθώς δεν σημειώθηκαν αλλοιώσεις και αποκολλήσεις. Όσον αφορά στο δοκίμιο 7.V.1, εκδηλώθηκε φλόγα μικρότερου μεγέθους των προηγούμενων.
- Το δοκίμιο 8a.N.1 εκδήλωσε φλόγα μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με το δοκίμιο 8a.1, το οποίο εξετάστηκε για χρονικό διάστημα 20 s. Το δείγμα 8a.V.1 δεν παρουσίασε ανάφλεξη.
- Τα δοκίμια 8b.N.1 και 8b.V.1 αναφλέχθηκαν, αναπτύσσοντας φλόγες μικρότερου μεγέθους της αντίστοιχης του δοκιμίου 8b.2, μολοντί εξετάστηκε για 20 s.



**Σχήμα 6.48** Σύγκριση των δειγμάτων (α) 2.1, (β) 2.N.1, (γ) 2.V.1 στα 60 s

- Στο σύνολο των δοκιμών που αναφλέχθηκαν, τα δείγματα βαφής V παρουσίασαν φλόγα μικρότερου μεγέθους από τα αντίστοιχα βαφής N. Επιπλέον, το δοκίμιο 8a.V.1 δεν αναφλέχθηκε, σε αντιδιαστολή με το δοκίμιο 8a.N.1.
- Η διόγκωση των δειγμάτων βαφής V ήταν στο σύνολο των δοκιμών μεγαλύτερη ή ίση σε επιφάνεια και αποκλειστικά μεγαλύτερη σε όγκο, συγκριτικά με τη διόγκωση δειγμάτων βαφής N. Το γεγονός αυτό συνιστά πλεονέκτημα της βαφής V, καθώς το μέγεθος της διόγκωσης καθορίζει το μέγεθος της απορροφούμενης θερμότητας από τη βαφή, και συνεπώς το ποσό της θερμότητας που αποτρέπεται να απορροφηθεί από το επικαλυπτόμενο υλικό. Στο Σχήμα 6.49 παρουσιάζεται σύγκριση των διογκώσεων των δοκιμών 8a.N.1 και 8a.V.1.



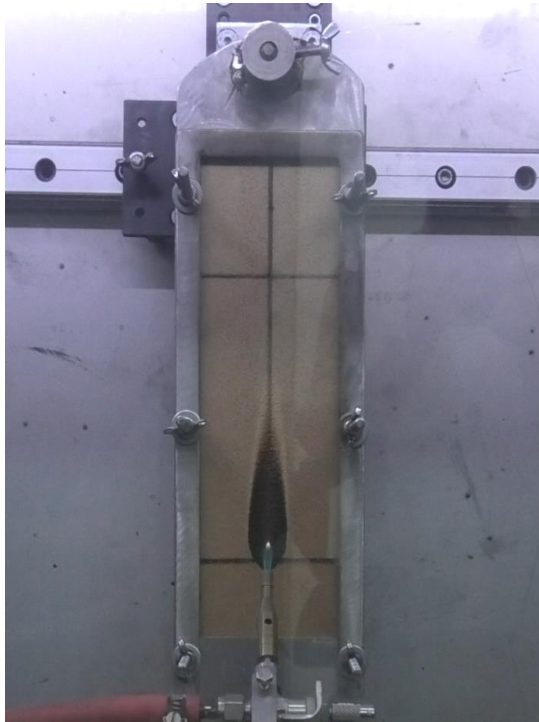
**Σχήμα 6.49** Διόγκωση δειγμάτων (α) 8a.N.1 και (β) 8a.V.1 μετά το πέρας των δοκιμών

- Σε κάθε περίπτωση η χρήση βαφών στα δείγματα επέφερε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μη επικαλυμμένα δοκίμια. Ταυτόχρονα, η βαφή V παρουσίασε σημαντικότερη πυράντοχη δράση σε σχέση με τη βαφή N σε όλες τις δοκιμές, μολονότι το συνολικό πάχος των στρώσεων της, κατά τις επικαλύψεις των δοκιμίων, ήταν μικρότερο της N.

### 6.3.3 Επίδραση πάχους υλικού

Όσον αφορά στο πάχος του υλικού του εκάστοτε δοκιμίου, παρατηρείται συσχέτιση του με τη συμπεριφορά του δοκιμίου στη φωτιά. Συγκεκριμένα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων το μικρό πάχος συνεπάγεται αδυναμία επαρκούς αντίδρασης στη φωτιά. Το σύνολο σχεδόν των δοκιμών με πάχος μικρότερο των 3 mm (1a.1, 1b.1, 2.1, 8a.1, 8b.2) σημείωσε τις χειρότερες επιδόσεις κατά την τέλεση των δοκιμών<sup>24</sup>. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο 4.1, που ενώ κατατάχθηκε στη κατηγορία E, έχει πάχος 9,4 mm. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η διαφορά στην κατάταξη των δοκιμίων, αποτελούμενων από ίδιο υλικό, 1a.1 – 8a.1 και 1b.1 – 8b.2 στο σύστημα Euroclass, με τα παχύτερα δείγματα (1a.1, 1b.1) να κατατάσσονται σε κατηγορία D ή ανώτερη, ενώ τα πιο λεπτά (8a.1, 8b.2) στην κατηγορία E. Στο Σχήμα 6.50 παρουσιάζεται σύγκριση των δειγμάτων 1b.1 (πάχους 2,2 mm) και 8b.1 (πάχους 0,7 mm) σε 60 s μετά την έναρξη των δοκιμών τους.

<sup>24</sup> Η κατάταξη, όπως και στην περίπτωση της μάζας, αφορά μη επικαλυμμένα δοκίμια.



(α)



(β)

**Σχήμα 6.50** Σύγκριση δειγμάτων (α) 1b.1 και (β) 8b.1 στα 60 s



## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### *Γενικά συμπεράσματα*

Η αυξανόμενη αναγκαιότητα μείωσης των κτηριακών ενεργειακών απωλειών, αλλά και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, οδηγούν στη χρήση διαρκώς εξελισσόμενων σύνθετων θερμομονωτικών συστημάτων προσόψεων. Οι ιδιότητες των συστημάτων αυτών προσφέρουν κατά κύριο λόγο βελτιωμένη θερμομονωτική ικανότητα, στις κτηριακές δομές στις οποίες εγκαθίστανται, σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους μόνωσης, αλλά και ένα πλήθος επιπρόσθετων πλεονεκτημάτων ανά περίπτωση, όπως ηχομόνωση, προστασία από την υγρασία, αύξηση της αντοχής των δομικών στοιχείων του κτηρίου, καθώς και βελτίωση της συνολικής του αισθητικής.

Στον αντίποδα, η αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας των συστημάτων συνεπάγεται, ως επί το πλείστον, τη χρήση εύφλεκτων πολυμερών υλικών, όπως ο αφρός εξηλασμένου ή διογκωμένου πολυστερενίου, ο πολυϊσοκυανικός αφρός, ο αφρός πολυουρεθάνης, το πολυαιθυλένιο κ.α. Οι εν δυνάμει πυρκαγιές που προκύπτουν σε προσόψεις στις οποίες χρησιμοποιούνται τέτοια υλικά μπορούν να έχουν καταστρεπτικές συνέπειες, τόσο σε επίπεδο υλικών ζημιών, όσο και στο επίπεδο της ασφάλειας των παρευρισκόμενων, ιδιαίτερα σε κτήρια μεγάλου ύψους. Η αρχική εστία της φωτιάς δύναται να βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο και να εξέλθει μέσω ανοιγμάτων προς την πρόσοψη, καθώς και σε εξωτερικό χώρο σε επαφή με την πρόσοψη ή σε απόσταση από αυτήν. Εν συνεχεία, οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης της φωτιάς είναι η κατακόρυφη μετάδοση της πυρκαγιάς από όροφο σε όροφο μέσω ανοιγμάτων, η εξάπλωσή της στην εξωτερική επιφάνεια της πρόσοψης ή σε εσωτερικές κοιλότητες και μονωτικά στρώματα τα οποία διαθέτει και η πτώση φλεγόμενων αντικειμένων, τα οποία προκαλούν ανάφλεξη σε χαμηλότερα κτηριακά επίπεδα.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης πειραματικών μελετών και υπολογιστικών προσομοιώσεων αντλήθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τις παραμέτρους εκείνες που επιδρούν στην εξέλιξη της πυρκαγιάς. Τέτοιοι, επιδραστικοί στο φαινόμενο, παράγοντες αποτελούν μεταξύ άλλων τα υλικά που αποτελούν το σύστημα πρόσοψης, καθώς και οι διαστάσεις τους, η σύσταση των υλικών στα οποία σημειώνεται η έναυση, η γεωμετρία της πρόσοψης, οι συνθήκες αερισμού, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, καθώς και η ενδεχόμενη παρουσία ανοιγμάτων, πυροφραγμών και επιβραδυντικών φωτιάς στο σύστημα. Αναλυτικότερα, στοιχεία του συστήματος με αυξημένη ευφλεκτότητα οδηγούν σε ενίσχυση της φωτιάς και σε πιθανή μετάδοσή της. Ταυτόχρονα, όσο το πάχος των εύφλεκτων στοιχείων μεγαλώνει, ως επί το πλείστον τείνει να επιδεινώνει την ένταση της φωτιάς λόγω της επιπρόσθετης καύσιμης ύλης που παρέχεται, ενώ αντίθετα αποτελέσματα παρατηρούνται κατά την αύξηση του πάχους των άκαυστων στοιχείων. Επιπλέον, το υλικό που συνιστά την αρχική εστία της πυρκαγιάς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξή της, τόσο μέσω της διαθέσιμης ποσότητάς του, όσο και μέσω των ιδιοτήτων του κατά την καύση. Αναφορικά με τη γεωμετρία της πρόσοψης, οι έρευνες συγκλίνουν στην κατευναστική συνεισφορά των οριζόντιων προβολών (μπαλκόνια), σε

αντιδιαστολή με τις κατακόρυφες προβολές οι οποίες επιταχύνουν την κατακόρυφη εξάπλωση της φλόγας. Η ενίσχυση του αερισμού, όπως είναι αναμενόμενο, οδηγεί στην αύξηση των αντιδράσεων καύσης. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί σε συστήματα τα οποία εμπεριέχουν αεριζόμενες κοιλότητες καθώς, πέραν του επιπρόσθετου αερισμού που παρέχουν, προκαλούν ραγδαία κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς λόγω του φαινομένου του ελκυσμού. Η ύπαρξη ανοιγμάτων αποτελεί κομβικής σημασίας παράγοντα για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Ανοιγματα μεγάλης επιφάνειας και ιδιαίτερα αυτά των οποίων το πλάτος είναι μεγαλύτερο από το ύψος ενισχύουν τη μετάδοση των φλογών στο εξωτερικό του κτηρίου. Πέραν αυτού, η παρουσία διαδοχικών υπερκείμενων ανοιγμάτων δύναται να επιτρέψει την εξάπλωση της πυρκαγιάς από όροφο σε όροφο (leap-frogging). Τέλος, όσον αφορά στον περιορισμό της διάδοσης της φωτιάς, η εγκατάσταση πυροφραγμών, καθώς και η χρήση επιβραδυντικών φωτιάς στα στοιχεία των συστημάτων πρόσοψης αποφέρει θετικά αποτελέσματα.

Λόγω της ανάγκης προστασίας από τις καταστροφικές συνέπειες των κτηριακών πυρκαγιών όλα τα κράτη έχουν θεσπίσει κανονισμούς πυροπροστασίας. Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν τμήματα τέτοιων κανονισμών μερικών ενδεικτικών Ευρωπαϊκών χωρών, με γνώμονα την επίτευξη πυρασφάλειας στις προσόψεις. Μολονότι οι κανονισμοί αυτοί παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους, αξίζει να σημειωθεί η κοινή τους βάση, η χρήση δηλαδή του συστήματος ευρωπαϊκών κλάσεων (Euroclass system) της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ταξινόμηση υλικών με βάση την ευφλεκτότητά τους, την παραγωγή καπνού και φλεγόμενων σωματιδίων/σταγονιδίων. Στην ίδια κατεύθυνση, γίνεται χρήση των δεικτών πυραντίστασης με σκοπό να προσδιοριστεί η ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου να αντισταθεί για ορισμένο χρονικό διάστημα στην επίδραση της φωτιάς. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν ορισμένες πρότυπες δοκιμές φωτιάς προσόψεων μεγάλης κλίμακας (large scale) μέσω των οποίων πραγματοποιείται έλεγχος της συμπεριφοράς συστημάτων προσόψεων σε συνθήκες φωτιάς με παρουσία ανοιγμάτων στη διάταξη (DIN 4102-20 (Draft), SP Fire 105), αλλά και χωρίς (BS 8414-1:2020, BS 8414-2:2020).

Αναφορικά με το πειραματικό σκέλος της εργασίας διενεργήθηκαν δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 11925-2:2020. Η πρότυπη αυτή δοκιμή είναι μικρής κλίμακας (small scale) και αποσκοπεί στον έλεγχο της αναφλεξιμότητας και της ενδεχόμενης παραγωγής φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων των εξεταζόμενων υλικών. Κατά τις δοκιμές που τελέστηκαν στο εργαστήριο εξετάστηκαν συνολικά 24 δείγματα. Οι διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των δοκιμών προκλήθηκαν, ως επί το πλείστον, λόγω της σύστασης του εκάστοτε υλικού, του πάχους των δοκιμών, ενώ καταλυτικό παράγοντα για τον κατευνασμό του φαινομένου αποτέλεσε η επικάλυψη των υλικών με πυράντοχος βαφές. Συγκεκριμένα, τα δείγματα με ακρυλική εξωτερική επένδυση επέδειξαν κατά κόρον μεγάλη αναφλεξιμότητα. Η χρήση μεταλλικής επένδυσης και δει φύλλων χάλυβα σημείωσε ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά στη φωτιά, όπως και ο εμποτισμός του ξύλου (έλατο) με επιβραδυντικό φωτιάς. Ταυτόχρονα, ο συνδυασμός ινών ξύλου με προπιονική κυτταρίνη παρουσίασε μικρότερη αναφλεξιμότητα από τον αντίστοιχο συνδυασμό ινών ξύλου με συμπολεμερές πολυπροπυλένιο, ωστόσο και τα δύο αυτά υλικά, μολονότι για ορισμένο πάχος δείγματος πέρασαν επιτυχώς τις δοκιμές, ανέπτυξαν αξιοσημείωτο μήκος φλόγας. Σε αντιδιαστολή με τα προαναφερθέντα, ο συνδυασμός πολυβινυλοχλωριδίου με ίνες ξύλου δεν σημείωσε ανάφλεξη του δείγματος. Όσον αφορά στη μάζα και στο πάχος

των δειγμάτων, παρατηρήθηκε ότι όσο τα μεγέθη αυτά ελαττώνονται, τόσο η συμπεριφορά των δειγμάτων σε συνθήκες φωτιάς επιδεινώνεται, λόγω της σημαντικής ελάττωσης της συνολικής θερμοχωρητικότητάς τους. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με την τάση των εύφλεκτων στοιχείων προσόψεων να ενισχύουν τη φωτιά όσο το πάχος τους μεγαλώνει και πιθανότατα συμβαίνει διότι μέγεθος των δοκιμίων είναι εν γένει μικρό σε σχέση με ένα ολοκληρωμένο σύστημα κτηριακής πρόσοψης. Η επικάλυψη δοκιμίων με πυράντοχες βαφές επιβεβαίωσε την κατευναστική τους επίδραση έναντι της φωτιάς. Η θερμοδιογκούμενη δράση των βαφών αυτών απορροφά τη θερμότητα που μεταδίδεται από την εστία, με αποτέλεσμα να μειώνει σε μεγάλο βαθμό τη θερμική ενέργεια που απορροφάται από το επικαλυμμένο δείγμα, με χαρακτηριστικό αποτέλεσμα την επιτυχή έκβαση όλων των δοκιμών.

Τέλος, όσον αφορά στη δυνατότητα επέκτασης της παρούσας μελέτης, αυτή θα ήταν δυνατή με την υλοποίηση επιπρόσθετων δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η διενέργεια πειραμάτων σε μεγαλύτερη ποικιλία υλικών, αλλά και η τέλεση δοκιμών μεγαλύτερης κλίμακας, στις οποίες εξετάζονται ολοκληρωμένα συστήματα προσόψεων. Η άντληση συμπερασμάτων σε μια τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να είναι πιο λεπτομερής, ενώ θα δινόταν παράλληλα, η δυνατότητα μελέτης επιδραστικών στην ανάπτυξη της φωτιάς παραμέτρων, πέραν της σύστασης των υλικών, όπως οι συνθήκες αερισμού, η παρουσία ανοιγμάτων κ.α.

## Βιβλιογραφία

- [1] M. Bonner και G. Rein, «Flammability and Multi-objective Performance of Building Façades: Towards Optimum Design,» *International Journal of High-Rise Buildings*, τόμ. 7, αρ. 4, pp. 363-374, 12 2018.
- [2] R. Booth, «Grenfell costs surpass £500m as council bill revealed,» *The Guardian*, 21 5 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.theguardian.com/uk-news/2021/may/21/grenfell-costs-surpass-500m-as-council-bill-revealed>. [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [3] D. I. Kolaitis, «Safety Aspects of Façade Fires: Novel Risks and Challenges Posed by High-Rise Buildings,» σε *Novel Approaches in Risk, Crisis and Disaster Management*, Athens, Nova, 2018, pp. 305-320.
- [4] *Planned Cover, Aluminium composite panels (ACP) and Expanded polystyrene (EPS) Guidance for Architects*, Australia, 2018.
- [5] N. White και D. Michael, *Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components*, New York: Springer, 2015.
- [6] Allianz Risk Consulting, «Aluminum Composite Panels,» *Tech Talk*, τόμ. 20, pp. 1-5, 2020.
- [7] Haomei Aluminum, «Aluminium Composite Material,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://aluminum-composition-panel.com/aluminium-composite-material.html>. [Πρόσβαση 11 10 2021].
- [8] Alumatech Facade Systems Pvt. Ltd., «ACP Cladding,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.alumatechfacade.com/acp.html>. [Πρόσβαση 12 10 2021].
- [9] AIYIA Steel, «Aluminium Honeycomb Panel,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/aluminium-honeycomb-panel-i-bond\\_1600094141943.html](https://www.alibaba.com/product-detail/aluminium-honeycomb-panel-i-bond_1600094141943.html). [Πρόσβαση 12 10 2021].
- [10] M. Jelčić Rukavina, M. Carević και I. Banjad Pečur, *Fire Protection of Facades*, Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2017.
- [11] D. J. O'Connor, «The Building Envelope: Fire Spread, Construction Features and Loss Examples,» σε *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th επιμ., New York, Springer-Verlag, 2016, pp. 3242-3282.
- [12] Mr. BIM Architects, «ETICS – External thermal insulation,» 20 4 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://mrbbimarchitects.com/blog-en/etics-thermal-insulation-system/>. [Πρόσβαση 12 10 2021].
- [13] EAE, «ETICS are Amazing: Save Climate - Reduce Energy Consumption - Create Jobs,» European Association for External Thermal Insulation Composite Systems, Baden-Baden, 2012.
- [14] Arpa Industriale, «Technical Information Part 1: Thin HPL,» *HPL for Interior Design*, 5 2013.
- [15] DoubleMHomz, «HPL Cladding,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doublemhomz.com/hpl-cladding/>. [Πρόσβαση 12 10 2021].

- [16] Polybett, «6mm To 25mm HPL Board Compact Grade HPL Panel,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://china-hpl.com/6mm-To-25mm-Hpl-Board-Compact-Grade-Hpl-Panel-pd42684645.html>. [Πρόσβαση 12 10 2021].
- [17] P. Rungthonkit, "Structural Behaviour of Structural Insulated Panels (SIPs)," Birmingham, 2012.
- [18] M. Panjehpour, A. A. Abang Ali και Y. L. Voo, «Structural Insulated Panels: Past, Present, and Future,» *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, τόμ. 3, αρ. 1, pp. 2-8, 2013.
- [19] Insulspan, «Arthur Residence - New Zealand,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.insulspan.com/project-library/project-photos/>. [Πρόσβαση 12 10 2021].
- [20] Proteus Cladding Systems & Facades, «What are the Benefits of Rainscreen Cladding,» 4 7 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://proteusfacades.com/benefits-of-rainscreen-cladding/>. [Πρόσβαση 14 10 2021].
- [21] CGL Facades, «Aluminum Ventilated Facade CGL RAINSCREEN SYSTEM,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.archiexpo.com/prod/cgl/product-50368-72876.html>. [Πρόσβαση 14 10 2021].
- [22] T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki και D. Bikas, «Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades,» *Procedia Environmental Sciences*, τόμ. 38, pp. 397-404, 2017.
- [23] D. Bikas, K. Tsikaloudaki, K. J. Kontoleon, C. Giarma, S. Tsoka και D. Tsirigoti, «Ventilated Facades: Requirements and Specifications Across Europe,» *Procedia Environmental Sciences*, τόμ. 38, pp. 148-154, 2017.
- [24] D. E. Attoye, K. A. Tabet Aoul και A. Hassan, «A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade,» *Al Ain*, 2017.
- [25] Avancis, «BIPV in Switzerland: New solar façade with AVANCIS modules for energy-efficient building in Bern. Reduction of the energy consumption costs of the building with CIGS modules.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.avancis.de/en/new-solar-facade-with-avancis-modules-for-energy-efficient-buildingavancis-restarts-production-facility-in-south-korea-production-start-of-cigs-premium-module-factory-scheduled-for-2019-2/>. [Πρόσβαση 14 10 2021].
- [26] O. Ahmed Vefa, «A Review on Adaptive Photovoltaic Facades,» İzmir, 2018.
- [27] X. Zhang, J. Shen, Y. Lu, W. He, P. Xu, X. Zhao, Z. Qiu, Z. Zhu, J. Zhou και X. Dong, «Active Solar Thermal Facades (ASTFs): From concept, application to research questions,» Kingston upon Hull, 2015.
- [28] Amorim Cork Insulation, «Caldonazzi Passive House,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.amorimcorkinsulation.com/en/projects/Caldonazzi-Passive-House/217/>. [Πρόσβαση 14 10 2021].
- [29] I. Bolton, «Understanding fire behaviour,» Firefighting in Canada, 10 2 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.firefightingincanada.com/understanding-fire-behaviour-17988/>. [Πρόσβαση 2 11 2021].
- [30] F. N. P. Bong, «Fire Spread on Exterior Walls,» University of Canterbury, Christchurch, 2000.
- [31] I. Kotthoff και J. Riemesch-Speer, «Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA "Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems",» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 9, 2013.

- [32] T. Crimi, «The Leap-frog Effect: Protecting tall buildings from exterior fire spread,» *The Construction Specifier*, 31 5 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.constructionspecifier.com/the-leap-frog-effect/>. [Πρόσβαση 4 11 2021].
- [33] E. Potton, «Grenfell Tower Fire: Background,» *House of Commons Library*, τόμ. CBP 8305, 20 1 2020.
- [34] «Grenfell Tower fire,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell\\_Tower\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell_Tower_fire). [Πρόσβαση 2 11 2021].
- [35] «19 Expert witnesses - The Grenfell Tower Inquiry Podcast,» BBC, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bbc.com/news/uk-40301289>. [Πρόσβαση 2 11 2021].
- [36] «Beijing Television Cultural Center fire,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing\\_Television\\_Cultural\\_Center\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing_Television_Cultural_Center_fire). [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [37] C. Sarns, «A Record of Major High-Rise Fires Worldwide,» *Architects & Engineers for 9/11 Truth*, 10 3 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ae911truth.org/evidence/technical-articles/articles-by-ae911truth/648-a-record-of-major-high-rise-fires-worldwide>. [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [38] «Florida woman suing over Monte Carlo fire,» *Las Vegas Review - Journal*, 19 1 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.reviewjournal.com/business/florida-woman-suing-over-monte-carlo-fire/>. [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [39] «Park MGM,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Park\\_MGM](https://en.wikipedia.org/wiki/Park_MGM). [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [40] «Wooshin Golden Suites fire,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wooshin\\_Golden\\_Suites\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Wooshin_Golden_Suites_fire). [Πρόσβαση 3 11 2021].
- [41] I. Oleszkiewicz, «Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding,» *Fire Technology*, τόμ. 26, p. 357–375, 11 1990.
- [42] P. Cancelliere, P. Canzani, S. Sassi, A. Lucchini, S. Messa and E. Anselmi, "A new test method to determine the fire behavior of façades with etic system," *Fire and Materials*, vol. 45, p. 624– 637, 2021.
- [43] M. Hajduković, N. Knez, J. Kolšek και F. Knez, «Fire Performance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) Facades with Expanded Polystyrene (EPS) Insulation and Thin Rendering,» *Fire Technology*, τόμ. 53, 2016.
- [44] E. Guillaume, T. Fateh, R. Schillinger, R. Chiva και S. Ukleja, «Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method,» *Fire and Materials*, τόμ. 42, p. 561– 577, 2018.
- [45] V. Dréan, B. Girardin, E. Guillaume και T. Fateh, «Numerical simulation of the fire behaviour of facade equipped with aluminium composite material-based claddings-Model validation at large scale,» *Fire and Materials*, τόμ. 43, p. 839– 856, 2019.
- [46] G. Agarwal, Y. Wang και S. Dorofeev, «Fire performance evaluation of cladding wall assemblies using the 16-ft high parallel panel test method of ANSI/FM 4880,» *Fire and Materials*, τόμ. 45, pp. 609-623, 2021.
- [47] J. Zehfuß, C. Northe και O. Riese, «An investigation of the fire behavior of ETICS facades with polystyrene under fire loads of different size and location,» *Fire and Materials*, τόμ. 42, 2017.

- [48] Y. Nishio, H. Yoshioka, T. Noguchi, M. Kanematsu, T. Ando, M. Tamura και Y. Hase, «Fire propagation over combustible exterior facades exposed to intensified flame in Japan,» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 46, 2016.
- [49] G. Jeffs, H. Klingelhöfer, F. Prager και H. Rosteck, «Fire-performance of a Ventilated Facade Insulated with a B2-classified Rigid Polyurethane Foam,» *Fire and Materials*, τόμ. 10, pp. 79-89, 1986.
- [50] Y. Nishio, T. Noguchi, T. Ando, H. Yoshioka, M. Kanematsu, Y. Hase και T. Hayakawa, «Fire Spread Caused by Combustible Facades in Japan,» *Fire Technology*, τόμ. 52, pp. 1081-1106, 2016.
- [51] J. Anderson , L. Boström , R. Jansson και B. Milovanović, «FIRE DYNAMICS IN FAÇADE FIRE TESTS, Measurement, modeling and repeatability,» Dubrovnik, 2015.
- [52] I. Oleszkiewicz, «Heat transfer from a window fire plume to a building facade,» National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction, 1989.
- [53] H. Cheng και G. V. Hadjisophocleous, «Experimental study and modeling of radiation from compartment fires to adjacent buildings,» *Fire Safety Journal*, τόμ. 53, pp. 43-62, 2012.
- [54] S. Klopovic και Ö. Turan, «Flames venting externally during full-scale flashover fires: two sample ventilation cases,» *Fire Safety Journal*, τόμ. 31, αρ. 2, pp. 117-142, 1998.
- [55] C. Northe, O. Riese και J. Zehfuß, «Experimental investigations of the fire behaviour of facades with EPS exposed to different fire loads,» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 46, pp. 1-11, 2016.
- [56] D. Yung και I. Oleszkiewicz, «Fire Spread Via Exterior Walls of Buildings,» National Research Council Canada. Institute for Research in Construction, 1988.
- [57] D. Bjegovic, I. Banjad Pecur, B. Messerschmidt, B. Milovanovic και M. Alagusic, «Influence of fire barriers on fire performance of facades with combustible insulation,» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 46, 2016.
- [58] O. Lalu, T. Lennon, R. Darmon και I. Anghel, «Performance of fire breaks installed within EPS-insulated façade systems,» *Fire and Materials*, τόμ. 45, pp. 638-647, 2021.
- [59] M. Nakamura, H. Yoshioka, M. Kanematsu, T. Noguchi, S. Hagihara, A. Yamaguchi, K. Shimizu, T. Sugita, Y. Matsumoto, Y. Nishio και T. Hayakawa, «Reaction-to-fire performance of fire-retardant treated wooden facades in Japan with respect to accelerated weathering,» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 46, 2016.
- [60] M. Bonner, W. Wegrzynski, B. K. Papis και G. Rein, «KRESNIK: A top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data,» *Building and Environment*, τόμ. 169, 2020.
- [61] V. Babrauskas, «Façade fire tests: Towards an international test standard,» *Fire Technology*, τόμ. 32, pp. 219-230, 1996.
- [62] J. G. Quintiere, M. Harkleroad και Y. Hasemi, «Wall Flames and Implications for Upward Flame Spread,» *Combustion Science and Technology*, τόμ. 48, pp. 191-222, 1986.
- [63] M. Dunny, D. Dhima, J. Garo και H. Wang, «Numerical investigation on window ejected facade flames,» *Journal of Building Engineering*, τόμ. 8, pp. 305-312, 2016.
- [64] M. Dunny, D. Dhima, J. Garo και H. Wang, «Numerical and Theoretical Evaluations of a

- Full-Scale Compartment Fire with an Externally Venting Flame,» *Fire Technology*, τόμ. 55, pp. 2087-2113, 2019.
- [65] R. Yakovchuk, A. Kuzyk, O. Kagitin, A. Ivanusa και S. Yemelyanenko, «FDS simulation of fire spreading on facade heat insulating system,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, τόμ. 635, 2021.
- [66] T. B. Y. Chen, A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, W. Yang και Q. N. Chan, «Fire Risk Assessment of Combustible Exterior Cladding Using a Collective Numerical Database,» *Fire 2*, τόμ. 1, 2019.
- [67] M. Nilsson, B. Husted, A. Mossberg, J. Anderson και R. Jansson McNamee, «A numerical comparison of protective measures against external fire spread,» *Fire and Materials*, τόμ. 42, pp. 493-507, 2018.
- [68] Π.Δ. 31, «Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτηρίων,» *ΦΕΚ 80*, τόμ. Α, 7 - 5 - 2018.
- [69] Ministry of Housing, Communities & Local Government, «Fire Safety Approved Document B Volume 1: Dwellings,» *The Building Regulations 2010*, τόμ. 1, 2010.
- [70] C. Sarah και T. Baker, *Fire Performance of External Thermal Insulation for Walls of Multistorey Buildings*, Watford: BREPress, 1989.
- [71] B. S. Institution, «Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to, and supported by, a masonry substrate». UK Ευρεσιτεχνία BS 8414-1:2020, 2020.
- [72] B. S. Institution, «Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to, and supported by, a structural steel frame». UK Ευρεσιτεχνία BS 8414-2:2020, 2020.
- [73] Κ.Δ.Π. 400, «Ο περί ρυθμίσεως οδών και οικοδομών νόμος, Κανονισμός πυροπροστασίας,» *Επίσημη Εφημερίδα της Κυπριακής Δημοκρατίας*, τόμ. IV, 27 - 8 - 2020.
- [74] L. Boström, A. Hofmann-Böllinghaus, S. Colwell, R. Chiva, P. Tóth, I. Moder, J. Sjöström, J. Anderson και D. Lange, «Development of a European approach to assess the fire performance of facades,» 2018.
- [75] J. Andersson, L. Boström και R. Jansson McNamee, «Fire Safety of Facades,» *Brandforsk*, Borås, 2017.
- [76] International Organisation for Standardization, «Reaction to fire tests - Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test». Geneva, Switzerland Ευρεσιτεχνία ISO 11925-2:2020, 2020.
- [77] British Standards Institution, «Fire classification of construction products and building elements». UK Ευρεσιτεχνία BS EN 13501-1:2018, 2018.