



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΕΞΩΣΤΗ ΣΤΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΙ
ΡΟΪΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ
ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΑΝΟΙΓΜΑ**

**ΧΡΙΣΤΟΣ ΚΟΝΤΗΣ
ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ ΤΣΙΧΛΑΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΑΡΙΑ ΦΟΥΝΤΗ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, κ. Διονύση Κολαΐτη, για την πολύτιμη βοήθεια, τις ώρες ενασχόλησης μαζί μας και την καθοδήγησή του όλο αυτό το διάστημα. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στην Καθηγήτρια κα. Μαρία Φούντη που μας έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστούμε μαζί της και να αποτελέσουμε μέλος της ομάδας της. Ευχαριστούμε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Συστημάτων Καύσης και Ετερογενών Μειγμάτων για την υποστήριξη που μας προσέφερε ο καθένας ξεχωριστά. Ιδιαίτερως, ευχαριστούμε τον υπεύθυνο κατασκευών Χαράλαμπο Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθεια και τις εξαιρετικές κατασκευές του. Ευχαριστούμε όλους τους φίλους μας για την ηθική υποστήριξή τους. Είμαστε ευγνώμονες στους γονείς μας, για την ολόψυχη αγάπη και αμέριστη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας. Τέλος, ευχαριστούμε την Άννα και τη Δήμητρα, οι οποίες όχι μόνο υπέμειναν όλες τις αμέτρητες ώρες σκληρής δουλειάς, αλλά υποστήριξαν ένθερμα το έργο μας. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη σε εκείνες.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας εξώστη στα θερμικά και ροϊκά χαρακτηριστικά φωτιάς εξερχόμενης από άνοιγμα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα διαφορετικών συνθηκών και δεδομένων κάθε φορά. Για την πραγματοποίησή τους, έγινε χρήση πειραματικής διάταξης διαμερίσματος-πρόσοψης, μικρής κλίμακας σύμφωνα με το πρότυπο ISO9705, κλίμακας ¼, το οποίο είχε κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης. Χρησιμοποιήθηκαν μετρητικά όργανα, κατάλληλα τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις, (θερμοστοιχεία, δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, σωλήνες pitot-static, μετρητές ροής θερμότητας, ψηφιακά παροχόμετρα, αναλυτής καυσαερίων και μετρητής παροχής καυσαερίων), τα οποία συνδέθηκαν με κατάλληλο τρόπο με Η/Υ για την καταγραφή και μετέπειτα αξιολόγηση των πειραματικών τιμών. Συνολικά τοποθετήθηκαν 109 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες pitot-static, 3 μετρητές ροής θερμότητας, 2 ψηφιακά παροχόμετρα, ένας αναλυτής καυσαερίων και ένας μετρητής παροχής καυσαερίων. Μελετήθηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος (90 kW, 120 kW και 144 kW) , τέσσερα διαφορετικά βάθη εξώστη (100 mm, 200 mm, 300 mm and 400 mm) και δύο διαφορετικά ύψη εξώστη (500 mm και 600 mm) προκειμένου να μελετηθεί πώς ο κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες επηρεάζει τελικά τα χαρακτηριστικά της φλόγας. Στη συνέχεια, με τη χρήση ψηφιακών καμερών ελήφθησαν video κάθε μία δοκιμή φωτιάς, από τα οποία απομονώθηκαν τα διαστήματα μονίμων συνθηκών (steady state). Μέσω κατάλληλης ανάλυσης, επεξεργασίας εικόνας και χρήσης λογισμικού (image processing), απεικονίστηκαν οι ισοπιθανοτικές καμπύλες της φωτιάς. Τελικά, με τη βοήθεια των καμπυλών αυτών υπολογίστηκαν το ύψος, η προέκταση και το πλάτος της φλόγας. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 18 πειραματικές δοκιμές και οι πειραματικές τιμές που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες σχέσεις του Ευρωκώδικα.

ABSTRACT

The main subject of this diploma thesis is the study of the effect of the geometry of a balcony on the thermal and flow characteristics of externally venting flames (EVF). In this context, a compartment-façade experimental setup was used to perform a number of fire tests. The compartment corresponded to a ¼ scale model of the standard ISO 9705 compartment and was constructed in the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems. A large variety of measuring sensors were used (thermocouples, bi-directional velocity probes, pitot-static tubes, heat flux meters, digital flow meters, exhaust gas analyzer and exhaust gas meter) and the obtained data series were analyzed to determine the thermal and flow characteristics of EVF. Altogether, 109 thermocouples, 4 bi-directional velocity probes, 2 pitot-static tubes, 3 heat flux meters, one exhaust gas analyzer and one exhaust gas meter were employed. An extensive parametric study was performed, aiming to evaluate the impact of several operational parameters on the EVF characteristics. To that end, fire tests were done at three different fire power levels (90 kW, 120 kW, 144 kW) using four different depths of balcony (100 mm, 200 mm, 300 mm and 400 mm) and two balcony heights (500 mm and 600 mm). Then, using two digital cameras, videos were captured for each fire test performed, from which the steady state time intervals were isolated. By using specific image processing techniques and software, the flame intermittency curves of each fire test were produced. Finally, by analyzing these curves, the height, the horizontal projection and the width of the flame were determined. In total, 18 experiments were performed and the results obtained were compared to the corresponding correlations of Eurocode.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Φωτιά σε διαμέρισμα	14
1.1.1 Στάδια ανάπτυξης της φωτιάς	15
1.2 Φωτιά σε διαμέρισμα με άνοιγμα.....	18
1.2.1 Αερισμός – Λόγος ισοδυναμίας.....	18
1.2.2 Υπο-αεριζόμενη φωτιά	23
1.3 Φωτιά εξερχόμενη από άνοιγμα	24
1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά	24
1.3.2 Επίδραση εξωστών	28
1.3.3 Σκοπός της εργασίας.....	30
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	32
2.1 Εξώστες και διατάξεις οριζοντίων προεκβολών σε κτίρια - Νομοθεσία.....	33
2.1.1 Ελλάδα	34
2.1.2 Σουηδία.....	35
2.1.3 Φινλανδία	35
2.1.4 Νορβηγία	35
2.1.5 Δανία.....	36
2.1.6 Χονκ Κονγκ	36
2.1.7 Πορτογαλία.....	36
2.1.8 Ισπανία.....	36
2.1.9 Αυστραλία.....	36
2.1.10 ΗΠΑ	37
2.1.11 Γαλλία.....	38
2.1.12 Νέα Ζηλανδία.....	39
2.2 Επίδραση γεωμετρίας εξώστη σε φωτιά εξερχόμενη από άνοιγμα	41
2.2.1 Επίδραση βάθους του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα	41
2.2.2 Επίδραση του ύψους του εξώστη από το ανώφλι του ανοίγματος στην εξερχόμενη φλόγα	50

2.2.3 Επίδραση του πλάτους του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα.....	54
2.2.4 Επίδραση του τύπου του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα.....	55
2.3 Επίδραση της ταχύτητας του εξωτερικού ανέμου στην εξερχόμενη φλόγα κατά την περίπτωση ύπαρξης εξώστη πάνω από το άνοιγμα	58
2.4 Ομοιότητα.....	59
2.4.1 Δημιουργία αδιάστατων ομάδων.....	61
2.4.2 Αδιάστατες Ομάδες από Εξισώσεις Διατήρησης.....	63
2.5 Δοκιμές φωτιάς σε διαμέρισμα μικρής / μεγάλης κλίμακας με εξώστη.....	71
2.6 Θερμιδομετρία.....	79
2.6.1 Θερμιδομετρία Κατανάλωσης Οξυγόνου	80
3. ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΦΛΟΓΑΣ.....	87
3.1 Σχέσεις προσδιορισμού ύψους εξερχόμενης φλόγας.....	87
3.2 Σχέσεις προσδιορισμού μήκους της εξερχόμενης φλόγας κατά μήκος του άξονα του πλουμίου	89
3.3 Σχέσεις προσδιορισμού προέκτασης εξερχόμενης φλόγας.....	90
3.4 Σχέσεις προσδιορισμού πλάτους εξερχόμενης φλόγας.....	90
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	91
4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	91
4.1.1 Σκελετός	92
4.1.2 Τοιχώματα.....	93
4.1.3 Γεωμετρία ανοίγματος.....	94
4.1.4 Πρόσοψη.....	95
4.1.5 Εξώστης.....	96
4.2 Πηγή φωτιάς	98
4.2.1 Πορώδης καυστήρας	98
4.2.2 Δίκτυο παροχής καυσίμου	98
4.2.3 Σύγκριση ισχύος μικρής κλίμακας με πραγματική κλίμακα	98
4.3 Μετρητικές διατάξεις.....	100
4.3.1 Θερμοστοιχεία	100
4.3.2 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας.....	103
4.3.3 Μετρητές ροής θερμότητας.....	105
4.3.4 Ψηφιακά παροχόμετρα	106
4.3.5 Σωλήνες Pitot-Static	108
4.3.6 Αναλυτής καυσαερίων	109

4.3.7 Μετρητής παροχής καυσαερίων	110
4.3.8 Οπτικές κάμερες	111
4.4 Σύστημα συλλογής δεδομένων	111
4.4.1 Λογισμικό LabVIEW.....	112
4.5 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων.....	118
4.5.1 Θερμοστοιχεία	122
4.5.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας.....	123
4.5.3 Μετρητές ροής θερμότητας.....	124
4.5.4 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου.....	125
4.5.5 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσαερίων	125
5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΟΡΙΩΝ ΦΛΟΓΑΣ	127
5.1 Χρωματικά μοντέλα	128
5.1.1 Το Μοντέλο RGB	128
5.1.2 Το Μοντέλο CMY.....	129
5.1.3 Το Μοντέλο $YCbCr$ ή $Y'CbCr$	129
5.1.4 Το Μοντέλο HSI.....	130
5.2 Μεθοδολογίες οπτικής ανίχνευσης φλόγας.....	131
5.2.1 Ανίχνευση χρώματος	134
5.2.2 Ανίχνευση κινούμενου αντικειμένου	135
5.2.3 Ανάλυση κίνησης με τη χρήση μετασχηματισμών Fourier και κυματομορφών	136
5.2.4 Χρωματική μεταβολή και ανάλυση των χωρικών κυματομορφών.....	138
5.2.5 Δυναμική ανάλυση υφής και μοτίβου.....	138
5.3 Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών εξερχόμενης φλόγας.....	140
5.3.1 Λογισμικό MATLAB	141
5.3.2 Επιλογή κριτηρίων αναγνώρισης ορίων φλόγας.....	143
5.3.3 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας.....	144
6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΩΤΙΑΣ.....	148
6.1 Παραμετρικές μελέτες	149
6.1.1 Ισχύς καυστήρα.....	149
6.1.2 Προέκταση εξώστη	149
6.1.3 Ύψος εξώστη	149
6.2 Διάταξη μετρητικών συσκευών	149
6.2.1 Δοκιμές Q90-P0, Q120-P0 και Q144-P0.....	150
6.2.2 Δοκιμές Q90-P100-Z600, Q120-P100-Z600 και Q144-P100-Z600	151

6.2.3	Δοκιμές Q90-P200-Z600, Q120-P200-Z600 και Q144-P200-Z600	152
6.2.4	Δοκιμές Q90-P300-Z600, Q120-P300-Z600 και Q144-P300-Z600	153
6.2.5	Δοκιμές Q90-P400-Z600, Q120-P400-Z600 και Q144-P400-Z600	155
6.2.6	Δοκιμές Q90-P200-Z500, Q120-P200-Z500 και Q144-P200-Z500	155
7.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΦΩΤΙΑΣ	158
7.1	Πειραματικά σφάλματα.....	158
7.2	Θερμοκρασίες διαμερίσματος.....	160
7.2.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	160
7.2.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	161
7.2.3	Επίδραση ύψους εξώστη	163
7.3	Θερμοκρασίες στο άνοιγμα.....	165
7.3.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	165
7.3.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	165
7.3.3	Επίδραση ύψους εξώστη	166
7.4	Πεδίο ταχυτήτων.....	167
7.4.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	167
7.4.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	168
7.4.3	Επίδραση ύψους εξώστη	168
7.5	Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς.....	169
7.5.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	172
7.5.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	175
7.5.3	Επίδραση ύψους εξώστη	179
7.6	Θερμοκρασίες στην πρόσοψη	182
7.6.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	182
7.6.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	183
7.6.3	Επίδραση ύψους εξώστη	184
7.7	Θερμορροή στην πρόσοψη.....	184
7.7.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	185
7.7.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	186
7.7.3	Επίδραση ύψους εξώστη	186
7.8	Θερμοκρασίες εξώστη	187
7.8.1	Επίδραση προέκτασης εξώστη	187
7.8.2	Επίδραση ισχύος φωτιάς	188
7.8.3	Επίδραση ύψους εξώστη	188

7.9 Συγκεντρώσεις αερίων – Βαθμός απόδοσης καύσης.....	189
7.9.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη	190
7.9.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς	191
7.9.3 Επίδραση ύψους εξώστη	191
8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ	193
8.1 Ύψος και προέκταση εξερχόμενης φλόγας.....	193
8.2 Πλάτος εξερχόμενης φλόγας	200
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	205
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	212
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	220
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	235
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	237
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	241

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
A	Εμβαδόν διατομής	m^2
A_{duct}	Διατομή αγωγού καυσαερίων	m^2
A_0	Εμβαδόν ανοίγματος	m^2
A_v	Συνολικό εμβαδόν όλων των κατακόρυφων ανοιγμάτων των τοίχων	m^2
B	Μπλε χρωματική συνιστώσα	-
B_T	Συστηματική πηγή σφάλματος	-
C_d	Συντελεστής εκροής	-
C_{pi}	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$J/kg \cdot K$
E_{O_2}	Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου οξυγόνου	J/kg
E_{CO}	Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου μονοξειδίου του άνθρακα	J/kg
F	Δύναμη	N
Fr	Αδιάστατος αριθμός Froude	-
G	Πράσινη χρωματική συνιστώσα	-
Gr	Αδιάστατος αριθμός Grashof	-
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
H	Ύψος διαμερίσματος	m
H_{Fac}	Ύψος πρόσοψης	m
h_0	Ύψος ανοίγματος	m
h_D	Ύψος δέσμης οροφής	m
h_N	Ύψος ουδέτερου επιπέδου στο άνοιγμα	m
h_L	Απόσταση του ανοίγματος από τον εξώστη	m
h_c	Συντελεστής συναγωγής	$W/m \cdot K$
h_{eq}	Σταθμισμένος μέσος των υψών των κατακόρυφων ανοιγμάτων όλων των τοίχων	m
k	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	W/m^2K
k_p	Σταθερά του αισθητήρα μέτρησης πίεσης	m
L_L	Ύψος φλόγας	m
$L_{L,tot}$	Συνολικό ύψος φλόγας	m
L_f	Μήκος φλόγας	m
L_H	Προέκταση φλόγας	m
l	Κλίμακα μήκους	m
l_m	Φυσική διάσταση του μοντέλου	m
l_p	Φυσική διάσταση του πρωτότυπου	m
M_{O_2}	Μοριακή μάζα οξυγόνου	$kg/kmol$
M_a	Μοριακή μάζα αέρα	$kg/kmol$
m	Μάζα	kg
\dot{m}_F	Παροχή καυσίμου	kg/s
\dot{m}_F'''	Παροχή μάζας του καυσίμου που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου	$kg/s \cdot m^3$
\dot{m}_{Fan}	Παροχή μάζας ανεμιστήρα	kg/s
N	Δείγμα	-
P	Προέκταση (βάθος) εξώστη	m
Pr	Αδιάστατος αριθμός Prandtl	-
p_s	Τάση ατμών του νερού	Pa
\dot{Q}	Θερμική ισχύς	W

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
\dot{Q}_m	Θερμική ισχύς του μοντέλου	W
\dot{Q}_p	Θερμική ισχύς του πρωτότυπου	W
\dot{q}_o	Ρυθμός απωλειών θερμότητας	W
\dot{q}''	Θερμορροή ανά μονάδα εμβαδού	W/m ²
\dot{q}_r	Απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας	W
\dot{q}_c	Απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής	W
R	Κόκκινη χρωματική συνιστώσα	-
RH	Σχετική υγρασία του αέρα	-
Re	Αδιάστατος αριθμός Reynolds	-
S	Επιφάνεια ελέγχου	m ²
S_T	Τυχαία πηγή σφάλματος	-
s	Απόσταση του ανωφλίου του ανοίγματος από το άνοιγμα του άνω ορόφου	m
T_a	Θερμοκρασία αέρα	K
T_q	Θερμοκρασία καυσαερίου	K
t	Χρόνος	s
t_h	Πάχος εξώστη	m
U_{ASME}	Ολικό σφάλμα κατά ASME	-
u_g	Ταχύτητα καυσαερίων	m/s
V_i	Ταχύτητα διάχυσης	m/s ²
\dot{V}	Παροχή όγκου καυσαερίων	m ³ /s
W_1	Πλάτος διαμερίσματος	m
W_2	Βάθος διαμερίσματος	m
W_{Fac}	Πλάτος πρόσοψης	m
\dot{W}_s	Αξονικό έργο	W
w	Κατακόρυφη ταχύτητα πλουμίου	m/s
w_b	Πλάτος εξώστη	m
w_t	Πλάτος ανοίγματος	m
w_f	Πλάτος φλόγας	m
$X_{H_2O}^a$	Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα υδρατμών στον αέρα καύσης	-
$X_{CO_2}^a$	Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{Aa}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$X_{O_2}^{Ae}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στα καυσαέρια	-
$X_{CO_2}^{Aa}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης	-
$X_{CO_2}^{Ae}$	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
X_{CO}^{Ae}	Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια	-
x_i	Η κάθε τιμή μέτρησης	-
\bar{x}	Μέση τιμή του δείγματος	-
$Y_{O_2}^a$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στον αέρα καύσης	-
$Y_{O_2}^e$	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στα προϊόντα της καύσης	-
Z	Ύψος τοποθέτησης εξώστη	m
z	Κατακόρυφο ύψος	m
α	Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής	-
δ_w	Πάχος τοιχώματος	m
δ	Θερμικό πάχος	m
Δh_c	θερμότητα καύσης	J/kg

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες
Δp	Διαφορά πίεσης	Pa
ε	Συντελεστής εκπομπής	-
κ	Συντελεστής απορρόφησης	-
μ	Δυναμική συνεκτικότητα	Pa·s
ν	Κινηματική συνεκτικότητα	m/s ²
ρ_a	Πυκνότητα αέρα	kg/m ³
ρ_g	Πυκνότητα καυσαερίου	kg/m ³
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
σ_x	Τυπική απόκλιση μέσης τιμής	-
τ	Διατμητική τάση	Pa
φ	Παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου	-

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Φωτιά σε διαμέρισμα

Ο όρος «φωτιά σε διαμέρισμα» χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μη ελεγχόμενης καύσης σε έναν περιορισμένο χώρο, τα χαρακτηριστικά του οποίου καθορίζουν την παροχή αέρα και το θερμικό περιβάλλον της φωτιάς. Το είδος, η ποσότητα και η τοποθεσία των καυσίμων υλών εντός του διαμερίσματος, η γεωμετρία του χώρου, το μέγεθος και η τοποθεσία των ανοιγμάτων και οι φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό:

- Το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς
- Το μέγιστο ρυθμό καύσης
- Τη διάρκεια της φωτιάς

Συνήθως, κάθε φωτιά σε διαμέρισμα αποτελείται από δύο περιόδους, την περίοδο πριν (pre-flashover) και την περίοδο μετά (post-flashover) την καθολική ανάφλεξη. Κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου, οι θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος είναι σχετικά χαμηλές και δεν αποτελούν απειλή για τα δομικά στοιχεία, ενώ κύριο μέλημα αποτελεί η διάσωση των ανθρώπινων ζώων και η εκκένωση του κτιρίου (Harmathy and Mehaffey, 1983). Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς καθορίζονται από την ποσότητα των πυρολυτικών αερίων της καύσιμης ύλης και καλείται υπεραεριζόμενη (fuel controlled). Εφόσον υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί από αναπτυσσόμενη σε πλήρως αναπτυγμένη (fully developed fire). Η μετάβαση αυτή περιγράφεται ως καθολική ανάφλεξη (flashover). Κατά τη διάρκεια της περιόδου μετά την καθολική ανάφλεξη, η φωτιά αποκτά τη μέγιστη θερμική ισχύ της, άμεσα εξαρτώμενη από τη διαθέσιμη ποσότητα του αέρα και χαρακτηρίζεται ως υποαεριζόμενη (ventilation controlled). Κατά το στάδιο της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες αποτελούν άμεση απειλή για την αντοχή των φερόντων δομικών στοιχείων του κτιρίου. Για το λόγο αυτό, σε αυτό το στάδιο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη της αντοχής των δομικών υλικών του διαμερίσματος, με κύριο στόχο την αποφυγή κατάρρευσης κατά τη διάρκεια της φωτιάς. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζονται οι δύο χρονικές περίοδοι προ και μετά της καθολικής ανάφλεξης (pre-flashover, post-flashover) σε ένα διαμέρισμα στο οποίο έχει εκδηλωθεί φωτιά.

Σύμφωνα με τους Hurley και Rosenbaum (2015), ο σχεδιασμός πυροπροστασίας των κτιρίων μπορεί να γίνει με την ακόλουθη προσέγγιση:

1. Καθορισμός της έκθεσης της φωτιάς στην οποία δύναται να υποβληθεί το κτίριο.
2. Καθορισμός της θερμικής απόκρισης του κτιρίου. Περιλαμβάνει ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας βασισμένη στην αναμενόμενη θερμοκρασία της φωτιάς.
3. Πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών και του κτιρίου συνολικά.

Συνήθως τα κτίρια σχεδιάζονται να αντέχουν σε μία πρότυπη φωτιά (standard fire) σύμφωνα με το ISO 834 (ISO834-1 1999) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Εναλλακτικά, οι παραμετρικές φωτιές όπως ορίζονται στον Eurocode 1, Annex A (EN1991- 1-2 2002) μπορούν να εφαρμοστούν σε πυροδιαμερίσματα κάτω από 500 m². Για μεγαλύτερους χώρους λαμβάνεται υπόψη πιθανή έντονη τοπική έκθεση σε φωτιά.



Σχήμα 1.1: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της περιόδου προ της καθολικής ανάφλεξης (αριστερά) και μετά την καθολική ανάφλεξη (δεξιά) σε διαμέρισμα στο οποίο εκδηλώνεται φωτιά.

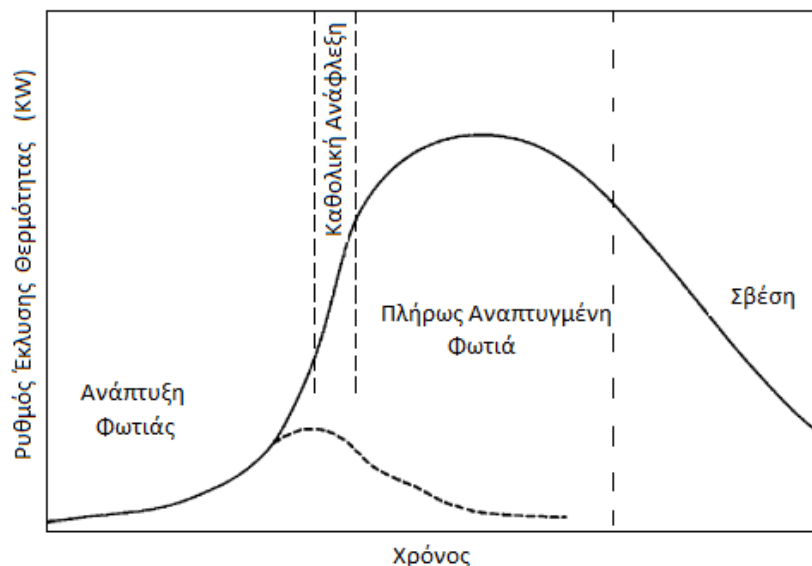
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 10-20 ετών, έχει πραγματοποιηθεί εκτενής έρευνα για την ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων προσομοίωσης φωτιάς σε διαμέρισμα. Η εξέλιξη στην τεχνολογία συνεισέφερε στη μείωση του χρόνου υπολογισμού ενώ παράλληλα το προγραμματιστικό περιβάλλον έγινε φιλικότερο προς τους χρήστες καθιστώντας τα μοντέλα αυτά ολοένα και πιο διαδεδομένα. Ο αριθμός των αριθμητικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν και αναγνωρίστηκαν από την κοινότητα της πυρομηχανικής αυξάνονται διαρκώς τα τελευταία 25 χρόνια. Ωστόσο, όσο πιο πολύπλοκα είναι τα μοντέλα, τόσο απαιτείται καλύτερη γνώση και κατανόηση των φαινομένων της φωτιάς. Τέτοια μοντέλα έχουν συνήθως υψηλό υπολογιστικό κόστος και ορισμένες φορές καταλήγουν σε λανθασμένα αποτελέσματα εξαιτίας αριθμητικών αβεβαιοτήτων. Για το λόγο αυτό, είναι επιβεβλημένο τα αριθμητικά αποτελέσματα πάντοτε να επικυρώνονται από πειραματικές μετρήσεις.

1.1.1 Στάδια ανάπτυξης της φωτιάς

Σε μία τυπική φωτιά διαμερίσματος, δημιουργείται ένα καθ' ύψος διζωνικό σύστημα. Το ανώτερο στρώμα αποτελείται από τα θερμά προϊόντα της καύσης και το κατώτερο κυρίως από τον ψυχρό αέρα περιβάλλοντος ο οποίος συμπαρασύρεται στην εστία της φωτιάς (Hurley et al., 2016). Συνήθως οι φωτιές σε πυροδιαμερίσματα μελετώνται με κριτήριο τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του διαμερίσματος συναρτήσει του χρόνου και ταξινομούνται σε αντίστοιχα στάδια (Karlsson and Quintiere, 2000). Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται μία εξιδανικευμένη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο, σε περίπτωση που δεν γίνεται καμία προσπάθεια ελέγχου της φωτιάς.

Με κριτήριο τη θερμοκρασία, είναι δυνατόν να ορισθούν πέντε στάδια κατά την εκδήλωση μιας φωτιάς:

- **Στάδιο ανάφλεξης (ignition):** Αποτελεί το πρώτο στάδιο της φωτιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα. Η έναυση, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και των καύσιμων υλών παράγοντας πυρολυτικά αέρια τα οποία αργότερα θα αναφλεγούν. Χαρακτηριστικά μεγέθη που επιδρούν στην ανάφλεξη είναι τα όρια και η περιοχή αναφλεξιμότητας καθώς και η θερμοκρασία ανάφλεξης και αυτανάφλεξης.
- **Στάδιο ανάπτυξης (growth):** Κατά το στάδιο αυτό παρατηρείται σταδιακή αύξηση του μεγέθους της φλόγας και της θερμοκρασίας, ενώ τα παραγόμενα καυσαέρια αρχίζουν να αλληλεπιδρούν με το κέλυφος του κτιρίου δημιουργώντας μία δέσμη οροφής (ceiling jet). Η φλόγα χαρακτηρίζεται ως καλώς αεριζόμενη (well ventilated fire), καθώς ο ρυθμός καύσης ελέγχεται από το καύσιμο (fuel-controlled fire). Σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό ανάπτυξης της φωτιάς είναι το είδος του καυσίμου (αν είναι υγρό ή στερεό), η τροφοδοσία του οξυγόνου, η αλληλεπίδραση του διαμερίσματος με το περιβάλλον, η γεωμετρία του διαμερίσματος καθώς και η τοποθεσία του σημείου αρχικής ανάφλεξης. Γενικά, υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι εξέλιξης της φωτιάς μετά από την τοπική ανάφλεξη του καυσίμου:
 1. **Σβέση**, χωρίς την περαιτέρω καύση άλλων καύσιμων υλικών, ειδικά στην περίπτωση που η έναυση γίνεται σε απομονωμένη καύσιμη ύλη,
 2. **Απουσία επαρκούς αερισμού**, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σβέση ή καύση με πολύ αργό ρυθμό
 3. **Σε συνθήκες επαρκούς αερισμού**, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο το διαμέρισμα, με την ανάφλεξη όλων των καύσιμων υλών.



Σχήμα 1.2: Τα στάδια ανάπτυξης της φωτιάς

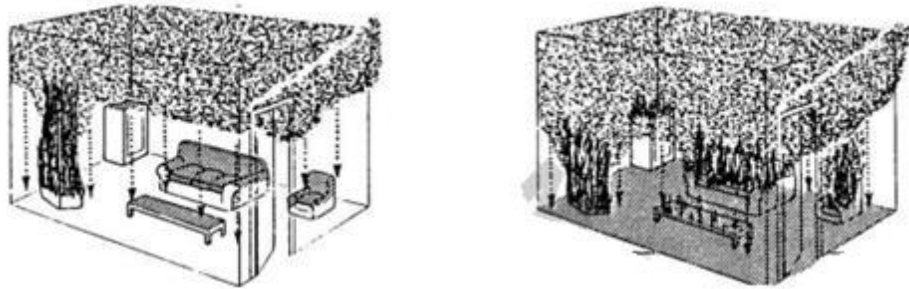
- **Στάδιο καθολικής ανάφλεξης (flashover):** Η καθολική ανάφλεξη είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο πραγματοποιείται ταχύτερη μετάβαση από το στάδιο της ανάπτυξης στο στάδιο της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς, γεγονός το οποίο οδηγεί σε απότομη αύξηση του μεγέθους και της έντασης της φωτιάς. Παρατηρείται απότομη ανάφλεξη της εκτεθειμένης επιφάνειας όλων των καύσιμων υλών στο εσωτερικό του διαμερίσματος και η φωτιά συνήθως μετατρέπεται από υπερ-αεριζόμενη σε υπο-αεριζόμενη. Η καθολική ανάφλε-

ξη οφείλεται κυρίως στην ισχυρή θερμική ακτινοβολία από το θερμό στρώμα των καυσαερίων (δέσμη οροφής) προς τα «φρέσκα» καύσιμα υλικά.

Εμπειρικά κριτήρια εμφάνισης της καθολικής ανάφλεξης είναι:

1. Μέση θερμοκρασία των καυσαερίων στην οροφή 600 °C
2. Ανηγγμένη θερμορροή στο δάπεδο 20 kW/m²
3. Έξοδος φλογών από πιθανό άνοιγμα του διαμερίσματος σε περίπτωση ισχυρά υπο-αεριζόμενων συνθηκών φωτιάς.

Οι κύριες επιπτώσεις του φαινομένου της καθολικής ανάφλεξης είναι η απότομη αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, του ρυθμού παραγωγής καυσαερίων και της θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται ένα πυροδιμέρισμα σε δύο διαφορετικά στιγμιότυπα πριν και μετά την καθολική ανάφλεξη:



Σχήμα 1.3: Ενδεικτικά στιγμιότυπα πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την καθολική ανάφλεξη

- **Στάδιο πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς (fully developed fire):** Είναι το στάδιο κατά το οποίο επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η μέγιστη θερμοκρασία των αερίων (700-1200 °C). Υπάρχει πλέον ανάφλεξη όλων των καύσιμων υλών στο διαμέρισμα και η διάρκεια του σταδίου αυτού καθορίζεται από τη διαθέσιμη ποσότητα του καυσίμου.



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση των διαδοχικών σταδίων φωτιάς σε διαμέρισμα: (α) Ανάφλεξη, (β) Ανάπτυξη, (γ) Καθολική Ανάφλεξη, (δ) Πλήρως Αναπτυγμένη Φωτιά

Οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτό το στάδιο είναι (Quintiere 2006):

1. Το μέγεθος και το σχήμα του διαμερίσματος
2. Η ποσότητα, η κατανομή και το είδος του καυσίμου
3. Η ποσότητα και η κατανομή του αερισμού του διαμερίσματος
4. Το είδος των δομικών υλικών της οροφής, των τοιχωμάτων και του δαπέδου

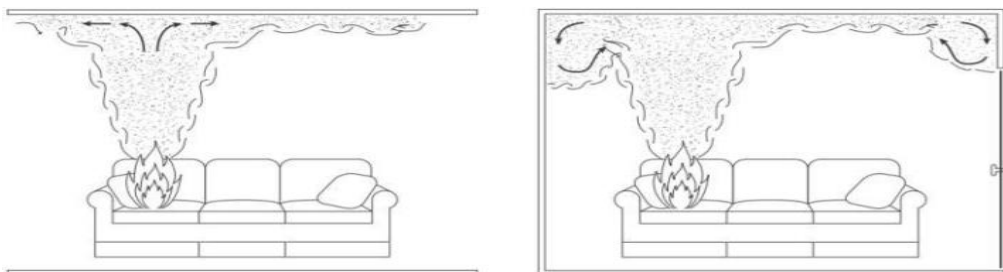
- **Στάδιο σβέσης (decay):** Είναι η σταδιακή μείωση του ρυθμού καύσης λόγω της εξάντλησης του καυσίμου. Η καύση μπορεί να συνεχιστεί σε μικρή ένταση, χωρίς φλόγα, για μεγάλο χρονικό διάστημα, διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες στο διαμέρισμα. Στο στάδιο της σβέσης μία υπο-αεριζόμενη φωτιά μπορεί να μετατραπεί σε υπερ-αεριζόμενη, λόγω της μείωσης του διαθέσιμου καυσίμου.

Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζονται τα διαδοχικά στάδια εξέλιξης της φωτιάς που εκδηλώνεται σε ένα διαμέρισμα.

1.2 Φωτιά σε διαμέρισμα με άνοιγμα

1.2.1 Αερισμός – Λόγος ισοδυναμίας

Στο εσωτερικό του διαμερίσματος, τα θερμά καυσαέρια που παράγονται από τη φωτιά κινούνται προς τα πάνω λόγω της θερμικής άνωσης, καθότι η πυκνότητα των θερμών καυσαερίων είναι μικρότερη από αυτήν του περιβάλλοντος ψυχρότερου αέρα. Όταν τα καυσαέρια φτάσουν στην οροφή, αλλάζουν κατεύθυνση και αρχίζουν να κινούνται ακτινικά, δημιουργώντας ένα θερμό στρώμα καυσαερίων ακριβώς κάτω από την οροφή (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Θερμική άνωση των καυσαερίων και δημιουργία δέσμης οροφής

Εάν υπάρχει κάποιο άνοιγμα στο διαμέρισμα στο οποίο εκδηλώνεται η φωτιά, τα θερμά καυσαέρια διαφεύγουν από την επάνω πλευρά του ανοίγματος ενώ ο φρέσκος αέρας εισέρχεται από την κάτω πλευρά του. Το ύψος διαχωρισμού των δύο στρωμάτων στο άνοιγμα, στο οποίο η διαφορά πίεσης μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του περιβάλλοντος της φωτιάς (εσωτερικό του δωματίου) είναι μηδενική, ονομάζεται **ουδέτερο επίπεδο (neutral plane)**.

Λόγω της θερμικής άνωσης εμφανίζεται το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης (stratification). Η αδράνεια και η θερμική άνωση προκαλούν τη δημιουργία μίας δέσμης θερμών καυσαερίων που καταλαμβάνει την οροφή. Ταυτόχρονα, η τύρβη και η διαφορά πίεσης προκαλεί την ανάμιξη και εν συνεχεία την παράσυρση του ατμοσφαιρικού αέρα από το πλούσιο της φωτιάς. Στο κάτω μέρος του διαμερίσματος σχηματίζεται μία ψυχρή δέσμη δαπέδου. Ανάμεσα στο άνω θερμό στρώμα και το κάτω ψυχρό στρώμα αναπτύσσεται ροή με έντονη ανακυκλοφορία. Στο μέσο αυτού του συστήματος των δύο στρωμάτων υπάρχει ένα

έντονο όριο λόγω της θερμικής διαστρωμάτωσης ανάμεσα στο ψυχρό και θερμό στρώμα. Το Σχήμα 1.6 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού ροϊκού πεδίου σε ένα πυροδιαμέρισμα στο οποίο έχει εκδηλωθεί φωτιά.



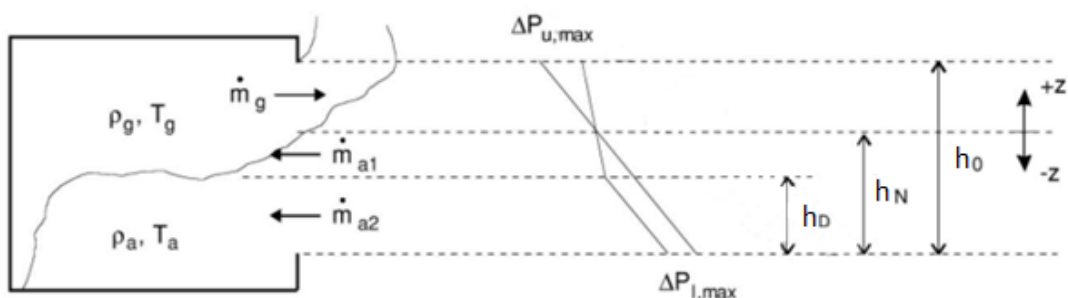
Σχήμα 1.6: Τυπικό ροϊκό πεδίο φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα

Η ροή μέσω ενός ανοίγματος καθορίζεται από τη διαφορά πιέσεων εκατέρωθεν του ανοίγματος. Η ροή έχει πάντα την κατεύθυνση από την περιοχή της υψηλής πίεσης προς την περιοχή χαμηλής πίεσης. Οι διαφορές πίεσης που παρατηρούνται κατά τη φωτιά σε διαμέρισμα οφείλονται κυρίως σε τρεις λόγους:

- **Διαφορά πίεσης λόγω θερμικής διαστολής των καυσαερίων.** Η θέρμανση ενός αερίου προκαλεί τη θερμική διαστολή του. Σε ένα κλειστό διαμέρισμα, το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση της πίεσης σε επίπεδα υψηλότερα της ατμοσφαιρικής.
- **Διαφορά πίεσης λόγω θερμικής άνωσης.** Η μεταβολή της θερμοκρασίας ενός αερίου προκαλεί την μεταβολή της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς πίεσης μεταξύ της θερμής (άνω) και της ψυχρής (κάτω) πλευράς του.
- **Διαφορά πίεσης λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.** Οι διαφορετικές θερμοκρασίες στο εσωτερικό και το εξωτερικό του διαμερίσματος οδηγούν στην εμφάνιση διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών του ανοίγματος.

Με στόχο την επίλυση των βασικών εξισώσεων διατήρησης σε ένα κλειστό χώρο με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα ζωνών.

Διζωνικό μοντέλο: Το διαμέρισμα χωρίζεται σε δύο ζώνες, τη ζώνη θερμών καυσαερίων στην άνω πλευρά και τη ζώνη ψυχρού αέρα στην κάτω πλευρά (Σχήμα 1.7). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κατά το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς (pre-flashover fire).



Σχήμα 1.7 Διζωνικό μοντέλο κατά την περίοδο προ καθολικής ανάφλεξης σε πυροδιαμέρισμα

- $h_D(m)$: Ύψος δέσμης οροφής (θερμικής ασυνέχειας) στο εσωτερικό του διαμερίσματος
- $h_N(m)$: Ύψος ουδέτερου επιπέδου στο άνοιγμα
- $h_0(m)$: Ύψος ανοίγματος
- $w(m)$: Πλάτος ανοίγματος
- $\dot{m}_{a1}(kg/s)$: Παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα στο άνω μέρος της κάτω πλευράς του ανοίγματος
- $\dot{m}_{a2}(kg/s)$: Παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα στο κάτω μέρος της κάτω πλευράς του ανοίγματος
- $\dot{m}_g(kg/s)$: Παροχή μάζας εξερχόμενων καυσαερίων στο άνω μέρος του ανοίγματος
- $\rho_a(kg/m^3), T_a(K)$: Πυκνότητα και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα
- $\rho_g(kg/m^3), T_g(K)$: Πυκνότητα και θερμοκρασία εξερχόμενου καυσαερίου

Η ταχύτητα των θερμών καυσαερίων από την άνω πλευρά του ανοίγματος ($0 < z < h_0 - h_N$) δίνεται από την Εξίσωση (1.1).

$$u_g(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)gz}{\rho_g}} \quad (1.1)$$

Η παροχή μάζας των καυσαερίων προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (1.2)

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_g (h_0 - h_N)^{3/2} \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (1.2)$$

Όπου το w_t είναι το πλάτος του ανοίγματος και ο C_d είναι ο συντελεστής εκροής (discharge coefficient). Ο υπολογισμός του C_d είναι πειραματικός και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές (PrahI και Emmons, 1975), (Steckler, 1984), (Cooper, 2002). Σύμφωνα με τους PrahI και Emmons (1975), ο συντελεστής βρέθηκε να είναι 0.68 και στις δύο περιπτώσεις -εισερχόμενης και εξερχόμενης μάζας αέρα-, ενώ σύμφωνα με το Steckler (1984) βρέθηκε 0.68 για τον εισερχόμενο αέρα και 0.73 για τον εξερχόμενο. Τέλος, ο Cooper (2002) υπέδειξε την τιμή 0.61 και στις δύο περιπτώσεις. Πάνω στη βάση αυτή, η τιμή του συντελεστή θεωρείται 0.68, όντας η καλύτερη προσέγγιση σε κάθε περίπτωση πυρκαγιάς (PrahI και Emmons, 1975).

Κατά την είσοδο του ψυχρού αέρα στο άνω μέρος της κάτω πλευράς του ανοίγματος ($-(h_N - h_D) < z < 0$), η ταχύτητα και η παροχή μάζας δίνονται από τις Εξισώσεις (1.3) και (1.4).

$$u_{a1}(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)gz}{\rho_a}} \quad (1.3)$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_a (h_N - h_D)^{3/2} \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (1.4)$$

Αντίστοιχα, για την είσοδο του ψυχρού αέρα στο κάτω μέρος της κάτω πλευράς του ανοίγματος ($-h_N < z < -(h_N - h_D)$), ισχύει:

$$u_{a2}(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g(h_N - h_D)}{\rho_a}} \quad (1.5)$$

$$\dot{m}_{a2} = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_a h_D \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g(h_N - h_D)}{\rho_g}} \quad (1.6)$$

Για τη συνολική είσοδο του ψυχρού αέρα ισχύει η Εξίσωση (1.7).

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} \quad (1.7)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (1.4), (1.5) και (1.7) προκύπτει η συνολική παροχή μάζας του ψυχρού αέρα, η οποία διατυπώνεται μέσω της Εξίσωσης (1.8).

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_a \left(h_N + \frac{1}{2} h_D \right) \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g(h_N - h_D)}{\rho_g}} \quad (1.8)$$

Το ύψος της δέσμης οροφής εντός του διαμερίσματος προσδιορίζεται και από μία εμπειρική συσχέτιση (Rocket, 1976), μέσω της Εξίσωσης (1.9).

$$\frac{T_a}{T_g} \left(\frac{h_0}{h_N} - 1 \right)^3 = \left(1 - \frac{h_D}{h_N} \right) \left(1 + \frac{h_D}{2h_N} \right)^2 \left(\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_a} \right)^2 \quad (1.9)$$

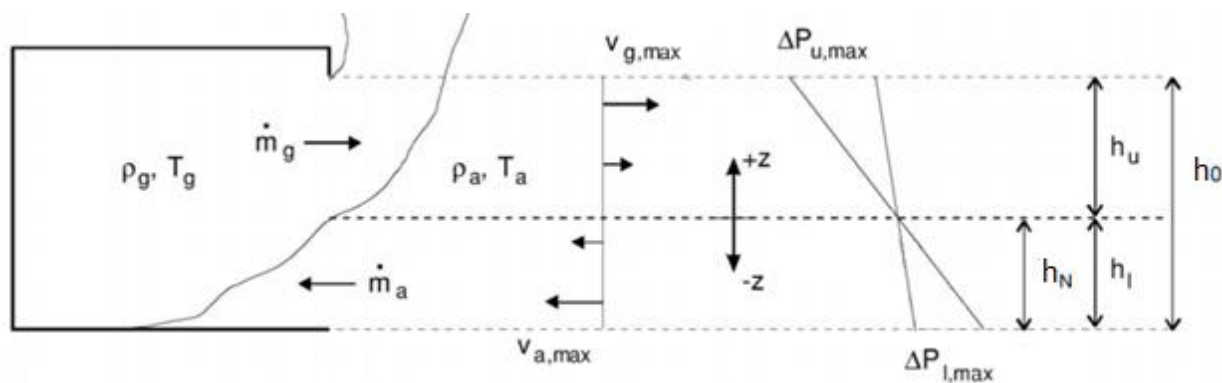
Μονοζωνικό μοντέλο: Το διαμέρισμα χωρίζεται σε μία ζώνη (Σχήμα 1.8). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κατά το στάδιο της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς (post-flashover fire). Ως όγκος ελέγχου, θεωρείται ο όγκος ολόκληρου του διαμερίσματος, ενώ λαμβάνονται οι κάτωθι παραδοχές (Yii, 2002):

- Η θερμοκρασία αερίων εντός του δωματίου είναι ομοιόμορφη
- Η δέσμη οροφής θεωρείται ότι καταλαμβάνει ολόκληρο το διαμέρισμα ($h_D = 0$)
- Η αντίδραση μεταξύ του αερίου καυσίμου και του εισερχόμενου αέρα γίνεται απείρως γρήγορα
- Το περιβάλλον της φωτιάς βρίσκεται σε ψευδο-σταθερή κατάσταση (quasi-steady)
- Τα αέρια που ρέουν εντός και εκτός του διαμερίσματος μέσω του ανοίγματος οφείλονται στις διαφορές της υδροστατικής πίεσης μεταξύ του εσωτερικού περιβάλλοντος και του εξωτερικού αέρα.

Η διαφορά πίεσης στο άνω όριο του ανοίγματος ($z = h_0 - h_N$) και το κάτω όριο του ανοίγματος ($z = -h_N$), δίνεται από τις Εξισώσεις (1.10) και (1.11), αντίστοιχα.

$$\Delta p_{up,max} = (\rho_a - \rho_g)g(h_0 - h_N) \quad (1.10)$$

$$\Delta p_{low,max} = (\rho_a - \rho_g)g(-h_N) \quad (1.11)$$



Σχήμα 1.8: Μονοζωνικό μοντέλο κατά το στάδιο της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα

Η ταχύτητα και η παροχή μάζας των εξερχόμενων θερμών καυσαερίων στην άνω πλευρά του ανοίγματος ($0 < z < h_0 - h_N$), υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (1.12) και (1.13), αντίστοιχα.

$$u_g(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)gz}{\rho_g}} \quad (1.12)$$

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_g (h_0 - h_N)^{3/2} \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} \quad (1.13)$$

Η ταχύτητα και η παροχή μάζας του εισερχόμενου ψυχρού αέρα στην κάτω πλευρά του ανοίγματος ($-h_N < z < 0$), υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (1.14) και (1.15):

$$u_a(z) = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g|z|}{\rho_a}} \quad (1.14)$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d w_t \rho_a h_N^{3/2} \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} \quad (1.15)$$

Λόγω αρχής διατήρησης μάζας, το ύψος του ουδέτερου επιπέδου (neutral plane) προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (1.16).

$$h_N = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}} \quad (1.16)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (1.15) αριθμητικές τιμές για τυπικές συνθήκες περιβάλλοντος, η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα μπορεί να προσδιοριστεί με χρήση της Εξίσωσης (1.17).

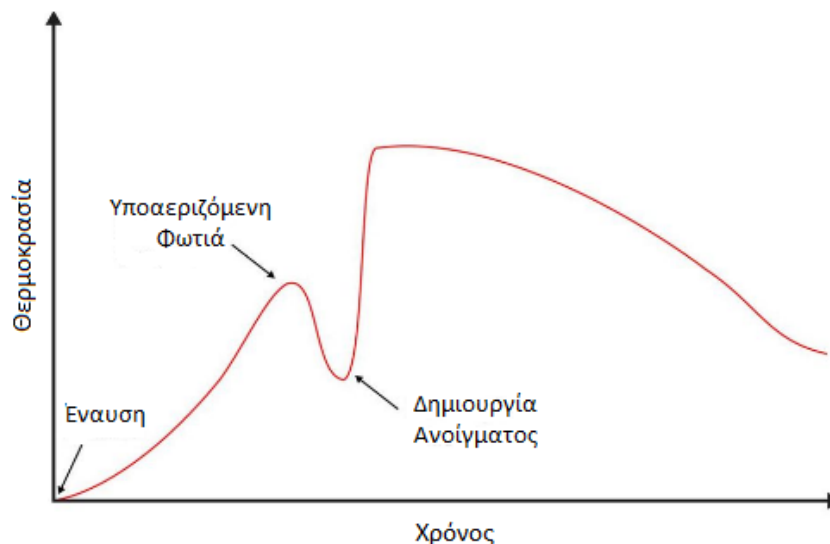
$$\dot{m}_a = 0.5A_0 \sqrt{h_0} \quad (1.17)$$

1.2.2 Υπο-αεριζόμενη φωτιά

Η επίδραση του αερισμού κατά την ανάπτυξη μίας φωτιάς σε διαμέρισμα είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό πυροπροστασίας ενός κτιρίου. Μετά την εκδήλωση μίας φωτιάς σε ένα διαμέρισμα με τυπικό πυροθερμικό φορτίο, κάποια στιγμή η φωτιά γίνεται υπο-αεριζόμενη. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση της φωτιάς καθορίζεται από την ποσότητα του «φρέσκου» αέρα που δύναται να εισέλθει στο διαμέρισμα.

Η υποαεριζόμενη φωτιά (under ventilated fire) χαρακτηρίζεται από περίσσεια καυσίμου και έλλειψη αέρα, ενώ αναπτύσσεται όταν δεν υπάρχουν ανοίγματα στο διαμέρισμα και εισέρχονται μόνο μικρές ποσότητες φρέσκου αέρα μέσω χαραμιάδων ή ρωγμών. Κατά τη διάρκεια μιας υποαεριζόμενης φωτιάς επικρατούν συνθήκες ατελούς καύσης, με έντονη παραγωγή τοξικών αερίων (CO, άκαυστοι υδρογονάνθρακες, αιθάλη) τα οποία είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία, γεγονός που καθιστά την μελέτη ζωτικής σημασίας.

Στο Σχήμα 1.9 απεικονίζεται η θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου μέσα σε ένα διαμέρισμα, το οποίο αρχικά δεν διαθέτει κάποιο άνοιγμα. Αρχικά γίνεται η έναυση της φλόγας. Κατά το πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης υπάρχει στο χώρο αρκετό οξυγόνο ώστε να αναμιχθεί με τα θερμά καυσαέρια και να προκαλέσει ανεξέλεγκτη καύση. Καθώς η μάζα του οξυγόνου καταναλώνεται, η φωτιά αρχίζει να φθίνει, ο ρυθμός καύσης μειώνεται, καθώς επίσης και η θερμοκρασία. Μόλις όμως δημιουργηθεί ένα άνοιγμα, όπως για παράδειγμα το απότομο άνοιγμα της θύρας του διαμερίσματος από την Πυροσβεστική Υπηρεσία, εισάγεται οξυγόνο που ανατροφοδοτεί τη φωτιά. Το οξυγόνο αναμιγνύεται αμέσως με τα θερμά καυσαέρια και κατά συνέπεια η ισχύς και θερμοκρασία της φωτιάς αρχίζουν να αυξάνονται. Αυτή η μεταβολή στον αερισμό μπορεί να επιφέρει απότομη ανάπτυξη της φωτιάς που θα οδηγήσει σε καθολική ανάφλεξη του διαμερίσματος και εν τέλει σε πλήρως αναπτυγμένη φωτιά.

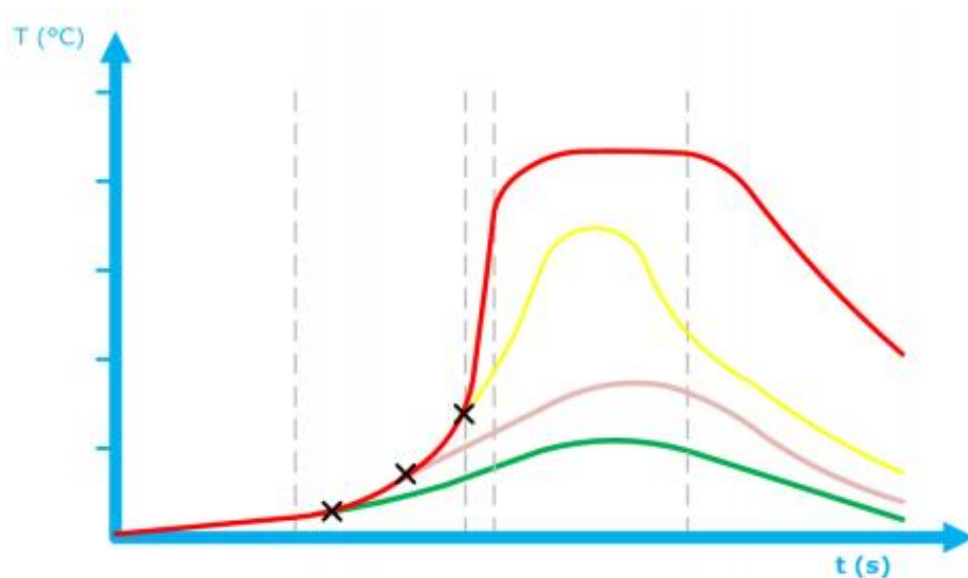


Σχήμα 1.9: Χρονική εξέλιξη φωτιάς η οποία αρχικά είναι υπο-αεριζόμενη και στη συνέχεια δημιουργείται άνοιγμα

Όταν το διαμέρισμα διαθέτει εξ' αρχής ένα μεγάλο άνοιγμα (π.χ. ένα παράθυρο), μεγάλη ποσότητα αέρα μπορεί να εισέλθει στο δωμάτιο από την αρχή του φαινομένου, κάτι το οποίο βοηθάει τη φωτιά να αναπτυχθεί χωρίς εμπόδια

οδηγώντας τελικά σε καθολική ανάφλεξη. Σε αυτή την περίπτωση όλα τα καύσιμα εντός του δωματίου θα αρχίζουν να καίγονται και η ανάγκη για αέρα αυξάνεται σημαντικά. Τα ανοίγματα όμως (παράθυρα, πόρτες) δεν είναι πλέον αρκετά για να παρέχουν τον αέρα που χρειάζεται η φωτιά. Από εκείνη τη χρονική στιγμή η φωτιά εξαρτάται από τον αερισμό και μετατρέπεται σε υπο-αεριζόμενη (ventilated controlled fire). Όπως είναι γνωστό, το μέγεθος του δωματίου, η γεωμετρία του, καθώς και ο αερισμός μέσα σε αυτό καθορίζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Yii, 2002).

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη μίας καλώς αεριζόμενης φωτιάς (κόκκινο χρώμα) σε σύγκριση με τρεις περιπτώσεις υπο-αεριζόμενης φωτιάς, κατά τις οποίες δεν παρατηρείται καθολική ανάφλεξη. Η πράσινη γραμμή αναπαριστά μία φωτιά σε ένα πολύ καλά μονωμένο αεροστεγές διαμέρισμα. Η μωβ γραμμή αναφέρεται στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος αέρας στο χώρο και η κίτρινη αντιστοιχεί σε φωτιά η οποία καθίσταται υποαεριζόμενη λίγο πριν την καθολική ανάφλεξη.



Σχήμα 1.10: Η χρονική εξέλιξη μία αεριζόμενης φωτιάς (κόκκινο χρώμα) σε σχέση με τρεις περιπτώσεις υποαεριζόμενης φωτιάς

Όπως είναι λογικό, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται κατά την περίπτωση του αεροστεγούς διαμερίσματος, όπου το διαθέσιμο οξυγόνο είναι ελάχιστο, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην καλώς αεριζόμενη φωτιά, όπου το οξυγόνο είναι επαρκές ώστε να πραγματοποιηθεί περισσότερο ολοκληρωμένη καύση.

1.3 Φωτιά εξερχόμενη από άνοιγμα

1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Όταν μια φωτιά σε ένα διαμέρισμα είναι πλήρως αναπτυγμένη, οι φλόγες είναι δυνατόν να εξέλθουν στο περιβάλλον μέσω ανοιγμάτων, δημιουργώντας μία Φωτιά Εξερχόμενη από Άνοιγμα (ΦΕΑ). Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων μιας φωτιάς διαμερίσματος, η καύση περιορίζεται στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Όταν η φωτιά εξελίσσεται περαιτέρω, υπάρχει περίπτωση οι φλόγες που

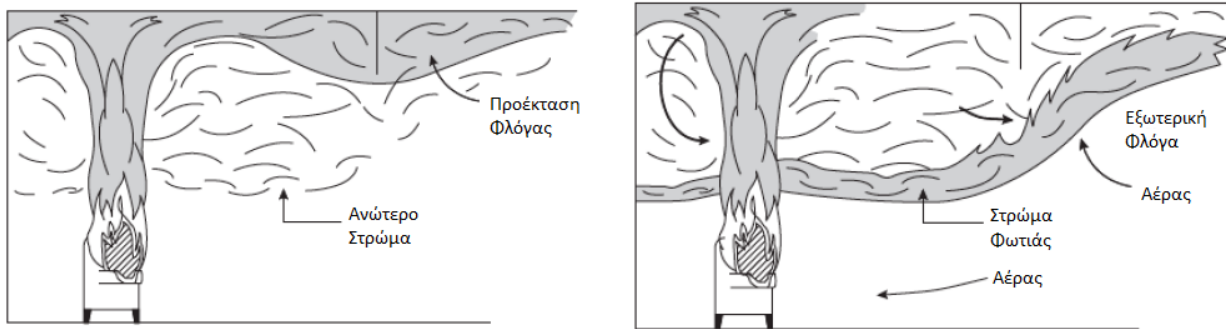
έχουν συσσωρευτεί στην οροφή, να είναι τόσο μεγάλες, ώστε να εξέλθουν από τα ανοίγματα του διαμερίσματος. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ΦΕΑ ακόμα και εάν η φωτιά είναι υπερ-αεριζόμενη (fuel controlled). Όταν η φωτιά γίνει πλέον ελεγχόμενη από τον αερισμό (υπο-αεριζόμενη), τα άκαυστα πτητικά μπορούν να εξέλθουν από το άνοιγμα, να αναμιχθούν με τον αέρα περιβάλλοντος, να αντιδράσουν με αυτόν και να δημιουργήσουν δευτερεύουσες ζώνες φωτιάς. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ΦΕΑ. Η εξωτερική φλόγα είναι δυνατό να συνοδεύεται από στρώμα φωτιάς (layer burning), το οποίο δημιουργείται από την ανάφλεξη μίας ανώτερης ζώνης καυσαερίων πλούσιας σε καύσιμο. Οι δύο περιπτώσεις δημιουργίας ΦΕΑ απεικονίζονται στο Σχήμα 1.11.

Στην περίπτωση που εκδηλωθεί πυρκαγιά στον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου είναι πιθανό οι υαλοπίνακες να αστοχήσουν, λόγω της ραγδαίας αύξησης της θερμοκρασίας, δημιουργώντας έτσι ανοίγματα, γεγονός το οποίο αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ΦΕΑ. Σύμφωνα με τον Yokoi (1960), η θραύση του γυαλιού πραγματοποιείται σε θερμοκρασία πλουμίου περί τους 400°C και η κατάρρευση περί τους 500°C. Θραύση του γυαλιού παρατηρήθηκε και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περί τους 350°C, όπως για παράδειγμα σε έρευνα των Skelly et al. (1991). Επειδή το άκαυστο καύσιμο έχει θερμανθεί επαρκώς, είναι πιθανό να υπάρξουν μεγάλα μήκη φλόγας εξωτερικά του κτιρίου με αντίστοιχα υψηλά επίπεδα θερμορροής, τα οποία δύνανται να διαδώσουν την φωτιά σε ανώτερα διαμερίσματα από αυτό στο οποίο πρωτοεκδηλώθηκε η πυρκαγιά. (Delichatsios, 2014).

Κατά την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς κατά μήκος της πρόσοψης ενός κτιρίου η ακτινοβολία από την προσκολλημένη στο τοίχωμα φλόγα προθερμαίνει τα καύσιμα δομικά υλικά της τοιχοποιίας ως την θερμοκρασία πυρόλυσης, πριν παρατηρηθεί έναυση. Ανάλογα με το υλικό, η αρχική προσκολλημένη φλόγα μπορεί να μην εκπέμπει αρκετή ακτινοβολία ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες καύσης. Η εξωτερική ακτινοβολία από φλόγες οι οποίες δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το τοίχωμα μπορεί επίσης να υποβοηθήσει στην εξάπλωση της φωτιάς. Επιπλέον, η εξωτερική ακτινοβολία αυξάνει το ρυθμό απώλειας μάζας του υλικού που καταναλώνεται στις φλόγες, δημιουργώντας μια μεγαλύτερη περιοχή φλόγας. Η ακτινοβολία από τον καπνό και τα καυσαέρια μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του τοίχου στο σημείο της ανάφλεξης, προκαλώντας κατακόρυφη διάδοση της φλόγας. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τις ΦΕΑ είναι ακόμη μεγαλύτεροι σε πολυώροφα κτίρια. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η πυροπροστασία πολυώροφων κτιρίων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν κάποια πρόσθετα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τα "συμβατικά" κτίρια χαμηλού ύψους. Επιπλέον σε πολυώροφα κτίρια, ως μέρος της ενεργειακής βελτιστοποίησής τους, γίνεται εκτεταμένη χρήση εξωτερικών μονώσεων στην πρόσοψη, κάτι το οποίο ενώ είναι χρήσιμο για την μείωση της σπατάλης ενέργειας, μπορεί να είναι επικίνδυνο, καθώς σε περίπτωση ανάφλεξης τους είναι πιθανό οι φλόγες να μεταδοθούν γρήγορα προς τα πάνω απειλώντας ολόκληρο το κτίριο (Mammoser and Bataglia, 2004).

Η γεωμετρία και η ανάπτυξη της ΦΕΑ επηρεάζεται από μία πληθώρα παραγόντων. Στα αρχικά στάδια της φωτιάς, η γεωμετρία του διαμερίσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι διαστάσεις του καθορίζουν το πόσο κοντά είναι η εστία φωτιάς σε σχέση με τα άλλα καύσιμα υλικά, τα ανοίγματα εξαερισμού και τα όρια του διαμερίσματος. Τα ανοίγματα εξαερισμού επηρεάζουν επίσης πάρα πολύ τη συμπεριφορά της φωτιάς διότι από τη στιγμή που ξεκινήσει η καύση η φωτιά εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου ώστε να διατηρηθεί. Τα

ανοίγματα επίσης ελέγχουν την ανάπτυξη της φωτιάς και τη θερμοκρασία του διαμερίσματος.



Σχήμα 1.11: Γραφική αναπαράσταση δημιουργίας ΦΕΑ σε συνθήκες υπερ-αεριζόμενης (αριστερά) και υπο-αεριζόμενης (δεξιά) φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα με ένα άνοιγμα (DiNenno, 2002).

Εάν υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα διαμέσου του οποίου εξέρχεται η φλόγα, η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα καυσαέρια και τον αέρα περιβάλλοντος δημιουργεί ένα ισχυρό ανωστικό ρεύμα που έχει ως αποτέλεσμα η φλόγα να κινείται προς τα πάνω κατά μήκος της πρόσοψης του κτιρίου. Γενικά, μία φωτιά σε εξωτερικό τοίχο μπορεί να εξαπλωθεί προς τα πάνω με τρεις τρόπους (Yung and Oleszkiewicz, 1988) :

- 1) Με εσωτερική εξάπλωση, όπου η φλόγα διαρρέει μέσα από χαραμάδες κατά τη συνένωση του εξωτερικού τοίχου με το δάπεδο.
- 2) Με μηχανισμό "αναπήδησης" της φλόγας (leap frogging) από παράθυρο σε παράθυρο, όπου τα εύφλεκτα υλικά στο εσωτερικό του επάνω διαμερίσματος αναφλέγονται ως αποτέλεσμα της έντονης θερμότητας που εκπέμπουν οι φλόγες που εξέρχονται από το κατώτερο άνοιγμα.
- 3) Με μηχανισμό επιφανειακής εξάπλωσης, όπου η φωτιά διαδίδεται προς τα πάνω κατά μήκος της τοιχοποιίας.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται μερικά πρόσφατα περιστατικά εκδήλωσης ΦΕΑ σε πολυώροφα κτίρια, γεγονός που τονίζει τη σπουδαιότητα της κατανόησης των μηχανισμών της εξωτερικής εξάπλωσης της φωτιάς. Συνήθως σε τέτοια περιστατικά η φωτιά αναφλέγει τα επιχρίσματα των εξωτερικών τοίχων καθιστώντας το φαινόμενο ιδιαίτερα περίπλοκο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η φωτιά που ξέσπασε στο κτίριο CCTV του Πεκίνου το 2009 εξαπλώθηκε από πάνω προς τα κάτω και από την πρόσοψη μεταδόθηκε στο εσωτερικό του κτιρίου. Επίσης, το πιο πρόσφατο τραγικό περιστατικό πυρκαγιάς που συνέβη στον Grenfell Tower του Λονδίνου τον Ιούνιο του 2017, που επέφερε τον θάνατο σε 71 ανθρώπους και προκάλεσε 70 τραυματισμούς, τονίζει τα αδύνατα σημεία στους κώδικες πυροπροστασίας των κρατών ανά τον κόσμο και καθιστά επιτακτική την ανάγκη βελτίωσής τους στο μέλλον.

Πίνακας 1.1: Περιστατικά ΦΕΑ σε πολυώροφα κτίρια

Κτίριο	Τοποθεσία	Έτος	Είδος πρόσοψης	Λεπτομέρειες
Grenfell Tower	Λονδίνο, Αγγλία	2017	Αλουμίνιο με εύφλεκτη μόνωση πολυαιθυλενίου	Η φωτιά εκδηλώθηκε μέσα σε διαμέρισμα από ένα ψυγείο και εξαπλώθηκε ταχύτατα εξωτερικά, 71 απώλειες και 70 τραυματισμοί

Κτίριο	Τοποθεσία	Έτος	Είδος πρόσοψης	Λεπτομέρειες
Ajman One residential cluster	Αχμάν, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2016	Πάνελ αλουμινίου με ενδιάμεση επένδυση εύφλεκτου πλαστικού	Η φωτιά εκδηλώθηκε σε έναν από τους 12 ουρανοξύστες, 1 τραυματισμός
Address Hotel	Ντουμπάι, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2016	Πάνελ αλουμινίου με ενδιάμεση επένδυση εύφλεκτου πλαστικού	Η φωτιά ξεκίνησε στον 20 ^ο όροφο του κτιρίου και επηρέασε μόνο την εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου, 16 τραυματισμοί
Docklands Apartment Tower	Μελβούρνη, Αυστραλία	2015	Πάνελ αλουμινίου	Η φωτιά ξεκίνησε από αναμμένο τσιγάρο σε μπαλκόνι του 6 ^{ου} ορόφου, καμία απώλεια ή τραυματισμός
Marina Torch Tower	Ντουμπάι, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2015	Πάνελ αλουμινίου με ενδιάμεση επένδυση εύφλεκτου πλαστικού	Η φωτιά ξεκίνησε στη μέση του κτιρίου προτού εξαπλωθεί προς τα κάτω, καμία απώλεια ή τραυματισμός
Residential Building	Γκρόσνι, Ρωσία	2013	Αεριζόμενη πρόσοψη	Η φωτιά εξαπλώθηκε μέσω της εξωτερικής μόνωσης, καμία απώλεια/ τραυματισμός
Al Baker Tower 4	Σάρτζα, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2012	Πάνελ αλουμινίου με ενδιάμεση επένδυση εύφλεκτου πλαστικού	Η φωτιά ξεκίνησε από αναμμένο τσιγάρο που ερρίφθη σε μπαλκόνι, καμία απώλεια ή τραυματισμός
Polat Tower	Κωνσταντινούπολη, Τουρκία	2012	Αεριζόμενη πρόσοψη	Η φωτιά εξαπλώθηκε μέσω της εξωτερικής μόνωσης, καμία απώλεια/ τραυματισμός
Mermoz Tower	Ρουμπώ, Γαλλία	2012	Αεριζόμενη πρόσοψη	Η φωτιά ξεκίνησε στον 2 ^ο όροφο και εξαπλώθηκε ταχέως προς τα πάνω
Wanxin Complex	Σενγιάνγκ, Κίνα	2011	Πάνελ αλουμινίου	Η ΦΕΑ προκλήθηκε από πυροτεχνήματα
Residential Building	Ντιζόν, Γαλλία	2010	Μόνωση ETICS με EPS	Η φωτιά ξεκίνησε λόγω εμπρησμού στη βάση του κτιρίου
Residential Building	Σανγκάη, Κίνα	2010	ETICS (υπό κατασκευή)	Η φωτιά ξεκίνησε κατά τη διάρκεια ανακαίνισης κατά την εγκατάσταση μόνωσης εξωτερικών τοίχων, 71 τραυματισμοί
CCTV	Πεκίνο, Κίνα	2009	Αεριζόμενη πρόσοψη με μόνωση πολυστυρενίου	Η φωτιά ξεκίνησε από παράνομη χρήση εκρηκτικών πυροτεχνημάτων στην οροφή και εξαπλώθηκε από πάνω προς τα κάτω, 7 τραυματισμοί

1.3.2 Επίδραση εξωστών

Ο εξώστης (μπαλκόνι), είναι μια οριζόντια προεξοχή κάθετη στο εξωτερικό επίπεδο ενός κατακόρυφου τοίχου και το βάθος του εξώστη είναι η απόσταση που προεξέχει από τον τοίχο. Ο όρος «γείσωμα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία οριζόντια προεκβολή η οποία τοποθετείται αποκλειστικά για λόγους πυροπροστασίας, συνήθως πάνω από παράθυρα. Χωρίς την παρουσία του εξώστη, η ΦΕΑ τείνει να κινείται ανεμπόδιστη κατακόρυφα προς τα πάνω. Αντιθέτως, η παρουσία ενός εξώστη εξαναγκάζει τη φωτιά να εκτραπεί προς έξω μακριά από το τοίχωμα, παρεμποδίζοντας την κατακόρυφη εξάπλωσή της και μειώνοντας την ακτινοβολία της προς τους υπερκείμενους ορόφους. Κατά τη λήψη μέτρων πυροπροστασίας των κτιρίων είναι πολύ σημαντική η σωστή επιλογή της γεωμετρίας του ανοίγματος και του μπαλκονιού. (Mammoser and Battaglia, 2004). Τυπικός εξώστης (μπαλκόνι) σε ελληνικό κτίριο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12 Τυπική πολυκατοικία με εξώστες στην Αθήνα, Ελλάδα

Οι φλόγες που εξέρχονται από ένα άνοιγμα τείνουν να στροβιλίζονται προς τα πίσω και να προσπίπτουν στον τοίχο πάνω από το άνοιγμα, παράγοντας θερμικές ροές συναγωγής και ακτινοβολίας προς το τοίχωμα. Όπως έχει παρατηρηθεί σε πρόσφατες πυρκαγιές υψηλών κτιρίων, το μέτρο αυτής της συνισταμένης θερμορροής είναι αρκετά υψηλό ώστε να εγκυμονεί κινδύνους εξάπλωσης της φωτιάς σε υψηλότερους ορόφους.

Οι κώδικες πυροπροστασίας περιορίζουν τους κινδύνους αυτούς ορίζοντας ένα ελάχιστο ύψος μεταξύ δύο διαδοχικών ανοιγμάτων (srandrel wall) ή εναλλακτικά μία προεκβολή πάνω από το εκτεθειμένο άνοιγμα. Η «προεκβολή» αυτή μπορεί να είναι κάποιο μπαλκόνι, ή γείσωμα. Η ενδιάμεση τοιχοποιία θα πρέπει να αποτελείται υποχρεωτικά από πυράντοχο άκαυστο υλικό χωρίς ανοίγματα (Oleszkiewicz, 1991).

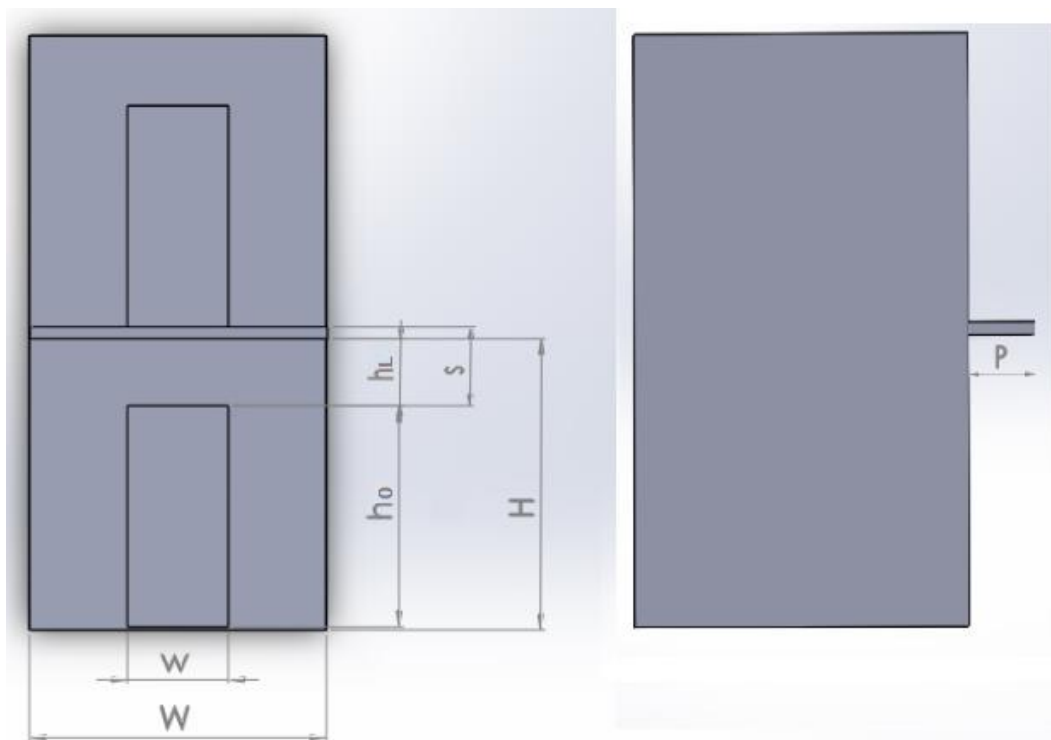
Στο Σχήμα 1.13 αναπαρίσταται η επίδραση της οριζόντιας προεκβολής στο πλούσιο της φωτιάς που εξέρχεται από παράθυρο. Παρατηρείται ότι η φλόγα εκτρέπεται από την αρχική της τροχιά λόγω της ύπαρξης του εξώστη και απομακρύνεται

από το άνοιγμα. Αντιθέτως, το αρχικό πλούμιο προσκολλάται επάνω στον τοίχο αυξάνοντας κατά πολύ την θερμική ακτινοβολία.



Σχήμα 1.13: Επίδραση οριζόντιας προεκβολής στο πλούμιο ΦΕΑ

Στο Σχήμα 1.14 απεικονίζεται ένα πυροδιαμέρισμα με ένα άνοιγμα πάνω από το οποίο υπάρχει οριζόντια προεκβολή. Σημειώνονται όλες οι χαρακτηριστικές αποστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία και έπειτα δίνονται οι επεξηγήσεις τους.



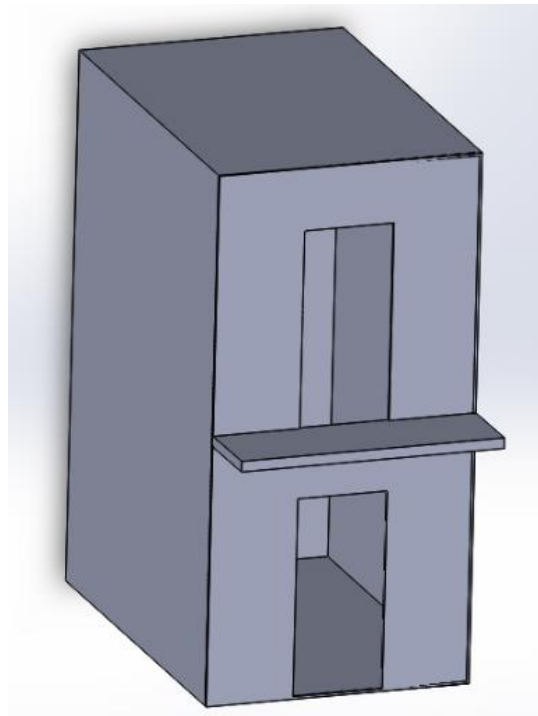
Σχήμα 1.14: Πρόσοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά) διώροφου κτιρίου με εξώστη. Το πυροδιαμέρισμα ανήκει στο ισόγειο, όπου καταδεικνύονται οι συμβολισμοί όλων των χαρακτηριστικών διαστάσεων

Όπου:

- P (m): Το βάθος της οριζόντιας προεκβολής
- h_o (m): Το ύψος του ανοίγματος
- w_t (m): Το πλάτος του ανοίγματος
- H (m): Το ύψος του διαμερίσματος
- W_l (m): Το πλάτος του διαμερίσματος
- s (m): Η απόσταση του ανοίγματος από το άνοιγμα του άνω ορόφου
- h_L (m): Η απόσταση του ανοίγματος από τον εξώστη

Στο Σχήμα 1.15 απεικονίζεται η τρισδιάστατη όψη του δώροφου κτιρίου.

Οι αποστάσεις από άνοιγμα σε άνοιγμα και οι ελάχιστες διαστάσεις της οριζόντιας προεξοχής διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τη μελέτη διαφόρων κωδικών κτιρίων είναι ότι το επίπεδο προστασίας διαφέρει και ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα για την εξωτερική εξάπλωση της φωτιάς ανάμεσα σε γειτονικά διαμερίσματα.



Σχήμα 1.15: Τρισδιάστατη όψη δώροφου κτιρίου με εξώστη. Το πυροδιαμέρισμα ανήκει στο ισόγειο και πάνω από το άνοιγμα (πόρτα) τοποθετείται οριζόντια προεκβολή

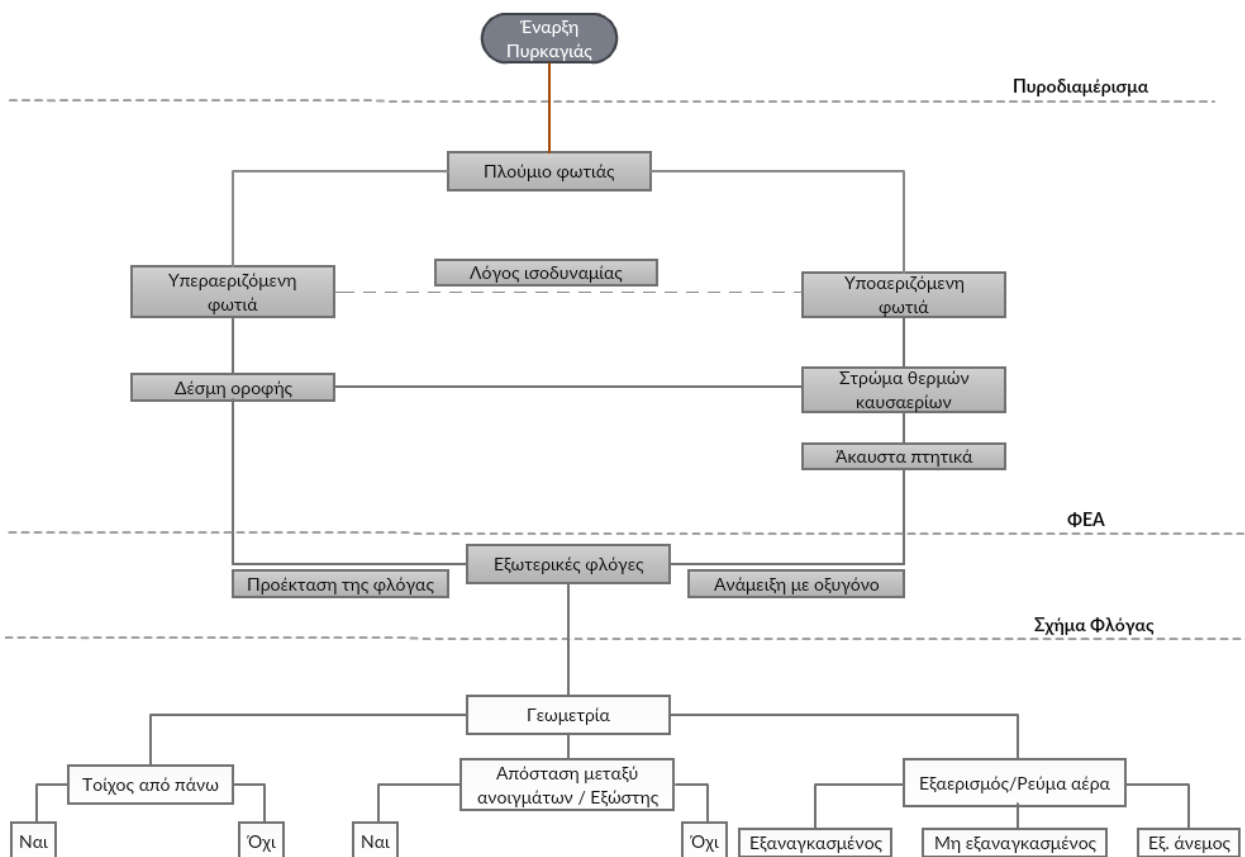
1.3.3 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών φωτιάς εξερχόμενης από άνοιγμα (ΦΕΑ) κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Μελετάται ο τρόπος με τον οποίο η παρουσία εξώστη, το βάθος του εξώστη, η απόστασή του από το άνοιγμα, και η ισχύς της φωτιάς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της φλόγας. Εξάγονται συμπεράσματα, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, σχετικά με τις θερμοκρασίες εντός και εκτός του δωματίου και πώς αυτές μεταβάλλονται, με τη μεταβολή ενός

από τους παραπάνω παράγοντες. Παρατηρείται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων τόσο του πυροδιαμερίσματος όσο και της πρόσοψης. Μελετάται επίσης η θερμορροή στην πρόσοψη, οι ταχύτητες των αερίων, τόσο εισερχόμενων όσο και εξερχόμενων στο άνοιγμα, η ταχύτητα των καυσαερίων σε απόσταση 100mm από την ακμή του εξώστη και η ταχύτητα των καυσαερίων σε ένα δεδομένο σημείο επί της πρόσοψης ($x=50\text{mm}$, $z=1200\text{mm}$). Τέλος, με τη χρήση καμερών και μέσω ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (image processing), προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ΦΕΑ (ύψος, πλάτος και οριζόντια προεκβολή), τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των εξισώσεων του Ευρωκώδικα (Eurocode 1), προκειμένου να επαληθευτούν αυτές, αλλά και η ακρίβεια με την οποία περιγράφουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η ραγδαία εξέλιξη στον κατασκευαστικό τομέα τα τελευταία χρόνια, έδωσε τη δυνατότητα για τη σχεδίαση και κατασκευή όλο και μεγαλύτερων κτιρίων και εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται ως κατοικίες (π.χ. πολυκατοικίες, ουρανοξύστες κ.α.), βιομηχανίες, εργοστάσια, νοσοκομεία, γραφεία κ.α. Η δημιουργία τέτοιων κατασκευών επέφερε την ανάγκη μελέτης των διαφόρων κινδύνων που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω φυσικών αιτιών και μη, όπως σεισμοί, πυρκαγιές κ.α., οι οποίοι μπορεί να αποβούν μοιραίοι για τους ανθρώπους που ζουν και δραστηριοποιούνται σε αυτές τις κατασκευές. Σε περιπτώσεις διαμερισμάτων ελλοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης πυρκαγιάς, η οποία μπορεί να δημιουργηθεί είτε από ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών μέσα στα διαμερίσματα, είτε από ανάφλεξη εκτιθέμενων εύφλεκτων επιφανειών στην πρόσοψη αυτών. Για την αντιμετώπιση τέτοιων κινδύνων και τη λήψη απαραίτητων μέτρων πυροπροστασίας, είναι απαραίτητη η μελέτη όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο, όπως είναι τα χαρακτηριστικά, η γεωμετρία του διαμερίσματος, ο τύπος δομικών υλικών των τοιχωμάτων, οι συνθήκες αερισμού του διαμερίσματος, η ύπαρξη ή όχι εξώστη, η ύπαρξη τοίχου πάνω από το άνοιγμα. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται οι βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού των ΦΕΑ ανάλογα με το λόγο ισοδυναμίας αέρα – καυσίμου καθώς επίσης και οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους.



Σχήμα 2.1: Βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού των ΦΕΑ και παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους

Εάν υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα, η διαφορά θερμοκρασίας των θερμών πτητικών και του ατμοσφαιρικού αέρα δημιουργεί ένα ισχυρό ανωστικό ρεύμα που εξαναγκάζει τη ΦΕΑ να κινηθεί ανοδικά κατά μήκος της πρόσοψης. Έχει αποδειχθεί ότι η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων και ο εξώστης επηρεάζουν ιδιαίτερα τη γεωμετρία της φλόγας (Yokoi, 1960, Oleszkiewicz, 1991), όπως επίσης και οι συνθήκες αερισμού (Cao and Guo, 2003).

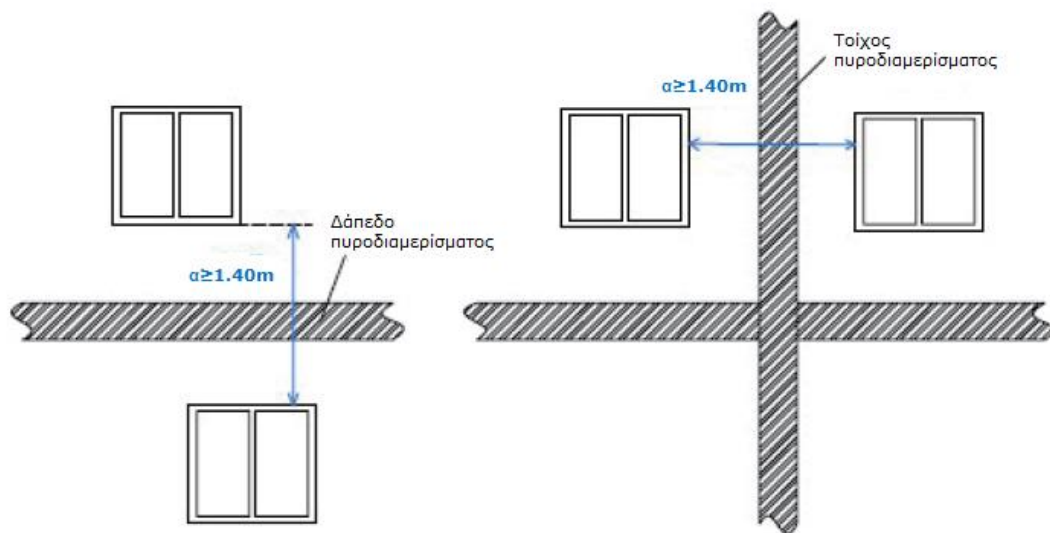
Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά γίνεται αναφορά στους τυπικούς εξώστες και τις διατάξεις των οριζόντιων προεκβολών διεθνώς καθώς και σε σχετικές νομοθετικές προβλέψεις. Στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση της γεωμετρίας του εξώστη σε φωτιά εξερχόμενη από άνοιγμα με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Έπειτα, αναλύονται οι νόμοι ομοιότητας που συνδέουν ένα πυροδιαμέρισμα φυσικής κλίμακας με το αντίστοιχο υπό κλίμακα και ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά περιπτώσεις εργαστηριακών δοκιμών μικρής και μεγάλης κλίμακας που έχουν πραγματοποιηθεί από πληθώρα ερευνητών. Στην τελευταία ενότητα περιγράφεται η θερμιδομετρία οξυγόνου, μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της πραγματικής θερμικής ισχύος που εκλύεται από την φωτιά.

2.1 Εξώστες και διατάξεις οριζοντίων προεκβολών σε κτίρια - Νομοθεσία

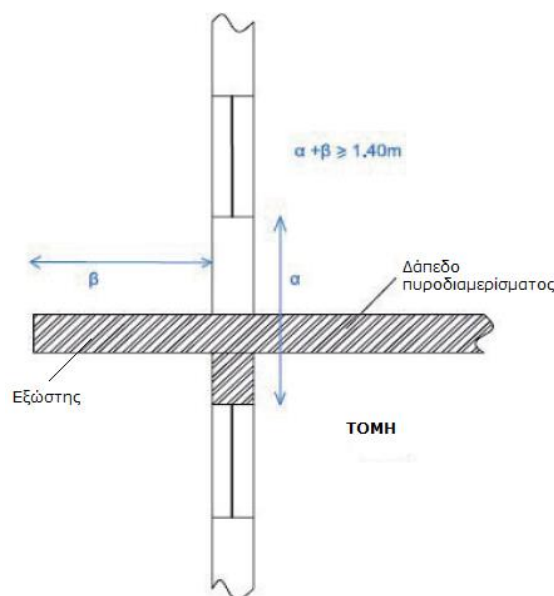
Οι ΦΕΑ αποτελούν τον πρωτεύοντα κίνδυνο εξάπλωσης της φωτιάς από όροφο σε όροφο μέσω της πρόσοψης. Πυρκαγιές τέτοιου τύπου αποτελούν το 1.3 - 3 % των συνολικών πυρκαγιών σε κτίρια (White and Delichatsios, 2014). Σε μια φωτιά πρόσοψης το πιο σημαντικό καθήκον του μηχανικού πυρασφάλειας προκειμένου να διασφαλιστεί το απαραίτητο επίπεδο ασφαλείας στα πλαίσια του Σχεδιασμού Πυρομηχανικής όπως αυτός επιβάλλεται μέσω των Κανονισμών Πυροπροστασίας, είναι να αποτρέψει την κάθετη εξάπλωση της φλόγας. Μέτρα πυροπροστασίας προβλέπονται από την νομοθεσία κάθε χώρας κατά τη μελέτη και κατασκευή ενός κτιρίου συμβάλλοντας τόσο στην πρόληψη όσο και στην αντιμετώπιση του ενδεχομένου πυρκαγιάς σε ένα κτίριο. Προκειμένου να επιτευχθεί ένας αποδεκτός βαθμός πυροπροστασίας, βάσει των αρχών της πυρομηχανικής, είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται νομοθετικές απαιτήσεις συναρτήσει τριών βασικών αξόνων: την προστασία της ανθρώπινης ζωής και υγείας, την προστασία της περιουσίας και της επιχείρησης και την προστασία του περιβάλλοντος. Βασικές ενέργειες που απαιτούνται κατά τον σχεδιασμό των κτιρίων περιλαμβάνουν την επιλογή κατάλληλων υλικών που αποτρέπουν τη μετάδοση της φωτιάς μέσα στους χώρους του κτιρίου, το διαχωρισμό του κτιρίου σε πυροδιαμερίσματα με στόχο τον περιορισμό της κατά το δυνατόν στο χώρο όπου εκδηλώνεται, την επιλογή κατάλληλων δομικών στοιχείων (τοιχοί, οροφή, δάπεδο) με έναν ελάχιστο δείκτη πυραντίστασης και την τοποθέτηση πυράντοχων υλικών στην πρόσοψη του κτιρίου. Επίσης, μία πληθώρα πειραμάτων απέδειξε (Yokoi, 1960, Oleszkiewicz, 1990, Mammoser and Battaglia, 2003) ότι η ύπαρξη εξώστη ή οριζόντιας προεξοχής πάνω από το άνοιγμα επηρεάζει πολύ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φωτιάς και συμβάλλει στην αποτροπή διάδοσης της σε ανώτερους ορόφους μειώνοντας δραστικά τη θερμική ακτινοβολία. Ακολούθως γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της νομοθεσίας διαφόρων κρατών, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, η οποία αφορά στην αποσόβηση της κατακόρυφης εξάπλωσης της ΦΕΑ.

2.1.1 Ελλάδα

Σύμφωνα με την παράγραφο 6.9 του νέου κανονισμού πυροπροστασίας κτιρίων που εκδόθηκε στις 7 Μαΐου 2018, η οριζόντια απόσταση (a) ανοιγμάτων σε εξωτερικές τοιχοποιίες, που ανήκουν σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.40 m, εφόσον τα ανοίγματα δεν έχουν τον απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης. Η ίδια ελάχιστη απόσταση ισχύει και για την περίπτωση υπερκειμένων πυροδιαμερισμάτων, μεταξύ του ανώτερου σημείου του κάτω ανοίγματος και του κατώτερου σημείου του επάνω ανοίγματος, προσμετρούμενης και της προεξοχής που παρεμβάλλεται (Σχήμα 2.2) και πάντοτε υπό την προϋπόθεση ότι τα ανοίγματα δεν έχουν τον απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης για το πυροδιαμέρισμα. Στην τελευταία περίπτωση, ο τοίχος που παρεμβάλλεται καθώς και η προεξοχή πρέπει να έχουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον ίσο με τον απαιτούμενο για το δάπεδο του πυροδιαμερίσματος (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2: Απόσταση ανοιγμάτων σε εξωτερικές τοιχοποιίες



Σχήμα 2.3: Απόσταση ανοιγμάτων σε εξωτερικές τοιχοποιίες

2.1.2 Σουηδία

Οι απαιτήσεις πυροπροστασίας για τα παράθυρα τα οποία είναι κατακόρυφα ευθυγραμμισμένα στην εξωτερική πρόσοψη του κτιρίου και σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα καθορίζονται στο Τμήμα 5:553 του Σουηδικού Κανονισμού Πυροπροστασίας BBR (BBR, 2015). Σύμφωνα με τις γενικές συστάσεις για τον σχεδιασμό κτιρίων, ένας τρόπος για να επιτευχθεί η προστασία από την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς είναι η εφαρμογή των οδηγιών του Πίνακα 5:553. Ο Πίνακας 5:553 αναφέρει ότι για εξωτερικά παράθυρα που ανήκουν σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα και απέχουν 1.2 m καθ' ύψος, θα πρέπει είτε το ένα παράθυρο να έχει δείκτη πυραντίστασης E30, είτε και τα δύο παράθυρα να έχουν δείκτη πυραντίστασης E15. Για ανοίγματα που απέχουν περισσότερο από 1.2 m δεν υπάρχουν απαιτήσεις. Ο BBR επίσης προβλέπει ότι τα παράθυρα που υποβάλλονται σε ταξινόμηση με βάση την πυραντίστασή τους δεν θα πρέπει να δύνανται να ανοιχθούν παρά μόνο με τη χρήση κάποιου ειδικού εργαλείου ή κλειδιού. Δεν παρατίθενται περαιτέρω συστάσεις ή σχεδιαστικές λύσεις στις γενικές οδηγίες του BBR.

Η νομοθεσία αυτή εφαρμόζεται εδώ και αρκετά χρόνια στη Σουηδία και μάλιστα θεωρείται ένα πρακτικό μέτρο για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το συνολικό βάθος του ορόφου είναι 2.5-3 m, κάτι που αποτελεί συνήθη τρόπο οικοδόμησης στη χώρα. Στις περιπτώσεις αυτές, οι εξωτερικοί τοίχοι με απόσταση μεταξύ ανοιγμάτων ίση με 1.2 m φέρουν παράθυρα με συμβατικό μέγεθος και θέση. Εάν στο κτίριο εγκατασταθούν παράθυρα που αποκλίνουν από το συμβατικό μέγεθος, π.χ. στην περίπτωση που καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος της πρόσοψης, θα πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα ώστε να διασφαλισθεί ότι δεν θα παρατηρηθεί κατακόρυφη εξάπλωση της φωτιάς.

2.1.3 Φινλανδία

Στη Φινλανδία αναγράφονται κάποιες προβλεπόμενες απαιτήσεις στους οικοδομικούς κανονισμούς όσον αφορά την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς ανάμεσα σε διαδοχικά ανοίγματα που ανήκουν σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα. Υπάρχει ένα επίσημο έγγραφο, το οποίο παραθέτει επεξηγήσεις σε αποδεκτές λύσεις, αναφέροντας γενικά τιμές χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς, με εξαίρεση την περίπτωση της εσωτερικής γωνίας, όπου η ελάχιστη απόσταση θα πρέπει να είναι 2.0 m εάν η γωνία που σχηματίζεται είναι μικρότερη από 135°. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες τοπικές οδηγίες στη Φινλανδία σύμφωνα με τις οποίες η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.0 m.

2.1.4 Νορβηγία

Οι νορβηγικοί οικοδομικοί κώδικες (2015) δηλώνουν ότι η πιθανότητα εξάπλωσης της εξωτερικής πυρκαγιάς μεταξύ διαδοχικών πυροδιαμερισμάτων μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων είναι τουλάχιστον 1.2 m ή εάν υπάρχει μια οριζόντια προεξοχή που εκτείνεται τουλάχιστον 1.2 m από την πρόσοψη. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να παραληφθούν εάν έχει εγκατασταθεί αυτόματο σύστημα καταιονητήρων.

2.1.5 Δανία

Στη Δανία δεν καθορίζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις στους οικοδομικούς κανονισμούς για την εξωτερική κατακόρυφη διάδοση φωτιάς μεταξύ ανοιγμάτων σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα

2.1.6 Χονγκ Κονγκ

Στο Χονγκ Κονγκ, ο Κώδικας Πυρασφάλειας των Κτιρίων προβλέπει μία απόσταση μεταξύ ανοιγμάτων όχι μικρότερη από 0.9 m. με δείκτη πυραντίστασης (Fire Resisting Rating - FRR) όχι μικρότερο από αυτόν του παρεμβαλλόμενου ορόφου. Μια εναλλακτική μέθοδος προστασίας είναι η κατασκευή μιας οριζόντιας προεξοχής μήκους 0.5 m με δείκτη πυραντίστασης όχι μικρότερο από αυτόν του παρεμβαλλόμενου ορόφου (Hong Kong Buildings Department, 2012).

2.1.7 Πορτογαλία

Σύμφωνα με το Νόμο 1532/2008 του οικοδομικού κανονισμού της Πορτογαλίας, η μέθοδος προστασίας από κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς μεταξύ ανοιγμάτων στην πρόσοψη ενός κτιρίου είναι η ακόλουθη (Morgado et al., 2013):

« Η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων στην Πορτογαλία είναι 1.10 m, αλλά όταν υπάρχει εξωτερικός εξώστης (μπαλκόνι) που εκτείνεται τουλάχιστον 1.0 m από την κάθε πλευρά του ανοίγματος, η απόσταση αυτή μπορεί να μειωθεί κατά το βάθος του μπαλκονιού. Σημειώνεται ότι τα μπαλκόνια θα πρέπει να διαθέτουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον EI60.»

2.1.8 Ισπανία

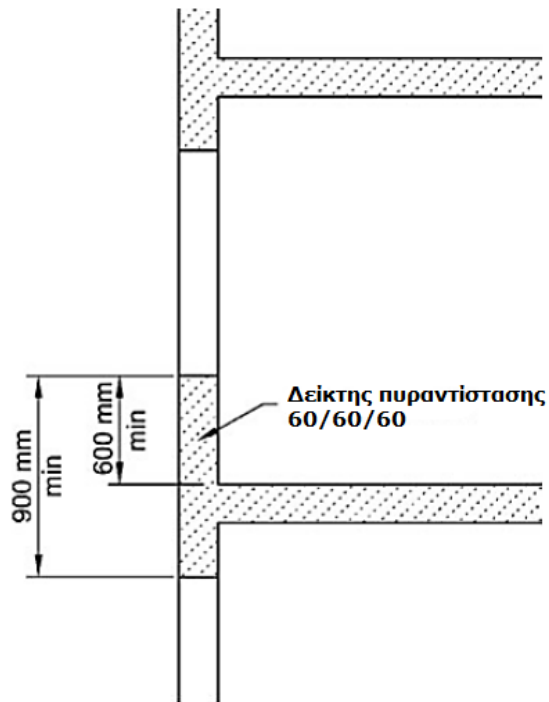
Στον ισπανικό οικοδομικό κανονισμό, προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος εξάπλωσης της φωτιάς μεταξύ κατακόρυφων πυροδιαμερισμάτων διαμέσου της πρόσοψης, η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.0 m και η ενδιάμεση τοιχοποιία να έχει δείκτη πυραντίστασης EI60. Στην περίπτωση που προστεθεί οριζόντια προεξοχή, η απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων μπορεί να μειωθεί κατά το μήκος της προβόλου που εξέρχεται από την πρόσοψη (Morgado and Rodrigues, 2013).

2.1.9 Αυστραλία

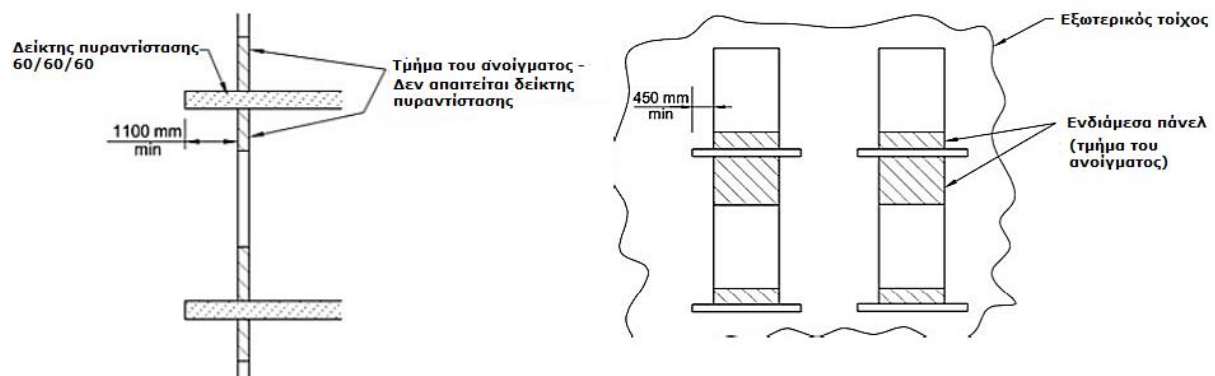
Ο πρώτος τόμος του κώδικα κτιρίων της Αυστραλίας (Building Code of Australia – BCA) περιλαμβάνει τις προδιαγραφές για τα πολυώροφα κτίρια κατοικιών, τα βιομηχανικά - εμπορικά κτίρια και τα δημόσια κτίρια. Ο κατακόρυφος διαχωρισμός διαδοχικών ανοιγμάτων στην πρόσοψη ενός κτιρίου επιτυγχάνεται με μία από τις ακόλουθες μεθόδους (BCA, 2015):

1. Με ενδιάμεση απόσταση μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων συνολικού ύψους 0.9 m ή περισσότερο και τοιχοποιία από μη εύφλεκτο υλικό με δείκτη πυραντίστασης 60/60/60 (REI 60), η οποία εκτείνεται τουλάχιστον 0.6 m ή περισσότερο πάνω από την άνω επιφάνεια του ενδιάμεσου ορόφου. Η μέθοδος αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.
2. Με χρήση πυράντοχης οριζόντιας προεξοχής, π.χ. μπαλκονιού, που εκτείνεται 1.1 m ή περισσότερο από την πρόσοψη του κτιρίου, η οποία θα πρέπει να προεκτείνεται κατά 0.45 m τουλάχιστον κατά πλάτος και από τις

δύο πλευρές του ανοίγματος και να φέρει δείκτη πυραντίστασης 60/60/60. Η 2^η μέθοδος που προτείνεται από τον κώδικα κτιρίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: 1^η μέθοδος προστασίας από την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς σύμφωνα με τον κώδικα κτιρίων της Αυστραλίας



Σχήμα 2.5: 2^η μέθοδος προστασίας από την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς σύμφωνα με τον κώδικα κτιρίων της Αυστραλίας με χρήση μη εύφλεκτης οριζόντιας προεξοχής

2.1.10 ΗΠΑ

Στις ΗΠΑ δεν υπάρχει επίσημη νομοθεσία για την πυροπροστασία των κτιρίων αναπτυγμένη σε εθνικό επίπεδο. Αντ' αυτού, κάποιοι αναγνωρισμένοι οργανισμοί αναπτύσσουν κώδικες οι οποίοι υιοθετούνται από κρατικές ή τοπικές κυβερνήσεις. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε από το Διεθνές Συμβούλιο Κωδικών (International Code Council - ICC) είναι ένας από τους οικοδομικούς κανονισμούς που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ. Ο Διεθνής Οικοδομικός Κώδικας προβλέπει ότι τα ανοίγματα σε εξωτερικούς τοίχους γειτονικών ορόφων πρέπει να διαχωρίζονται κατακόρυφα όταν τα παρακείμενα ανοίγματα απέχουν λιγότερο από 1.524 m σε

οριζόντια διεύθυνση και το άνοιγμα στον κατώτερο όροφο διαθέτει μικρότερο δείκτη πυραντίστασης από 45 λεπτά. Τέτοιου είδους ανοίγματα θα πρέπει να διαχωρίζονται κατακόρυφα ως εξής:

1. Η ελάχιστη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων θα πρέπει να είναι 0.914 m και το ενδιάμεσο τοίχωμα να περιλαμβάνει δοκούς, επιχρίσματα και γενικότερα δομικά στοιχεία που να έχουν δείκτη πυραντίστασης όχι λιγότερο από 1 ώρα και να είναι κατάλληλα για έκθεση σε φωτιά και από τις δύο πλευρές.
2. Σε περίπτωση που τα ανοίγματα διαχωρίζονται μεταξύ τους από πυροφραγμούς, τότε οι τελευταίοι θα πρέπει να έχουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον 1 ώρας και να εκτείνονται οριζόντια όχι λιγότερο από 0.762 m από τον εξωτερικό τοίχο.

2.1.11 Γαλλία

Οι απαιτήσεις για την προστασία από την εξαπλωση εξωτερικής πυρκαγιάς στους γαλλικούς οικοδομικούς κώδικες μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο και τη χρήση του κτιρίου καθώς και τη θερμική επίδραση της εύφλεκτης επένδυσης στην πρόσοψη. Οι γαλλικοί κτιριακοί κώδικες διαφοροποιούνται αρχικά ως προς το εάν πρόκειται για δημόσια κτίρια ή για κτίρια κατοικιών και στη συνέχεια ως προς την πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου, M . Οι διαστάσεις μιας οριζόντιας προεξοχής περιγράφονται στη συνέχεια από τον κανόνα των $s + P$, όπου το s αντιστοιχεί στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων και το P στο βάθος της πλάκας του μπαλκονιού (Κώδικας κατασκευής και κατοικίας - Code de la construction et de l'habitation, 2009 & 2015).

Σε δημόσια κτίρια, προβλέπεται:

- $s+P \geq 1.0$ m εάν $M \leq 130$ MJ/m²
- $s+P \geq 1.3$ m εάν $M > 130$ MJ/m²

Σε κτίρια κατοικιών, για κτίρια *τρίτης κατηγορίας A* (κτίρια με πρόσβαση σε σκάλα, με μέγιστο αριθμό ορόφων προς κατοίκηση 7 και διαδρομή εκκένωσης μικρότερη από 7 μέτρα από πόρτα σε σκάλα), προβλέπονται τα εξής:

- $s+P \geq 0.6$ m εάν $M \leq 25$ MJ/m²
- $s+P \geq 0.8$ m εάν 25 MJ/m² $\leq M \leq 80$ MJ/m²
- $s+P \geq 1.1$ m εάν $M > 80$ MJ/m²

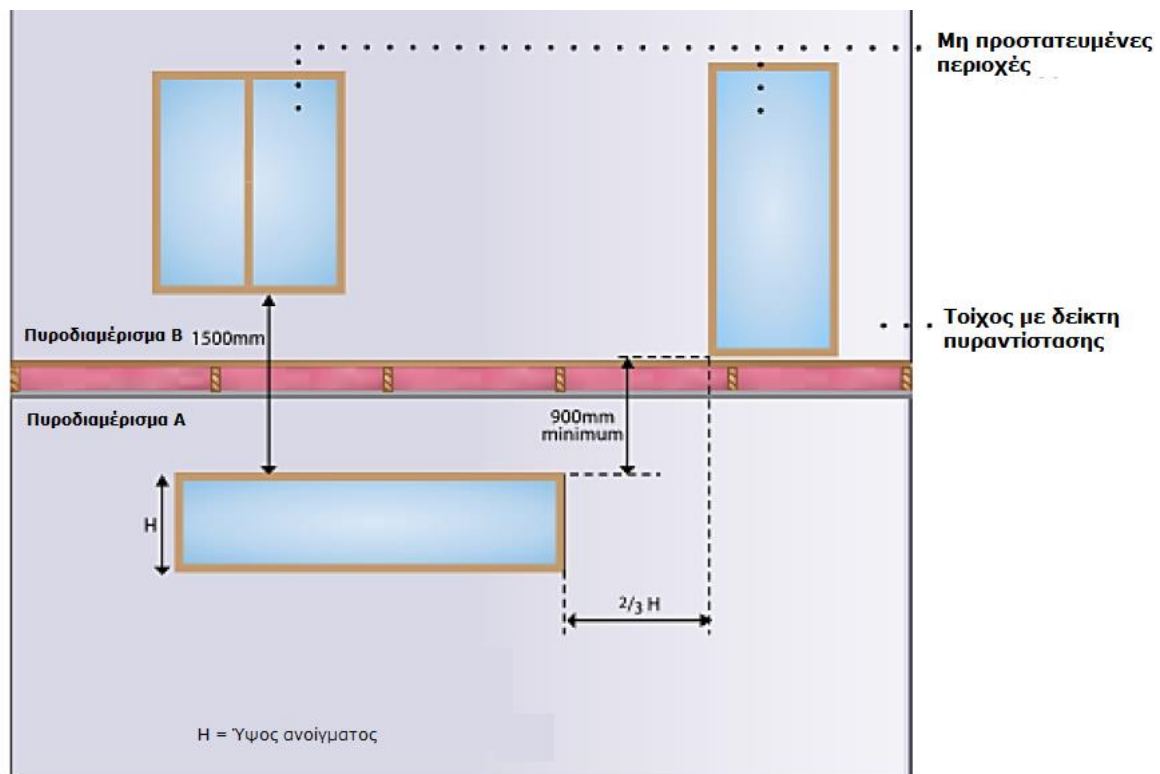
Σε κτίρια κατοικιών, για κτίρια *τρίτης κατηγορίας B* (κτίρια εκτός της τρίτης κατηγορίας A αλλά με μέγιστο ύψος του τελευταίου ορόφου προς κατοίκηση τα 28 m) και για κτίρια *τέταρτης κατηγορίας B* (κτίρια με μέγιστο ύψος του τελευταίου ορόφου προς κατοίκηση μεταξύ 28 m και 50 m), προβλέπονται τα παρακάτω:

- $s+P \geq 0.8$ m εάν $M \leq 25$ MJ/m²
- $s+P \geq 1.0$ m εάν 25 MJ/m² $\leq M \leq 80$ MJ/m²
- $s+P \geq 1.3$ m εάν $M > 80$ MJ/m²

2.1.12 Νέα Ζηλανδία

Σύμφωνα με τον οικοδομικό κώδικα της Νέας Ζηλανδίας τα μη προστατευόμενα ανοίγματα στο εξωτερικό τοίχωμα πρέπει να προστατεύονται από την κάθετη εξάπλωση της φωτιάς, όταν οι θύρες εξόδου των πυροδιαμερισμάτων έχουν ύψος διαφυγής 10 m ή περισσότερο. Μη προστατευόμενα ανοίγματα θα πρέπει επίσης να προστατεύονται από την κάθετη διάδοση της φωτιάς αν το πυροδιαμερίσματα που περιέχουν εύφλεκτα υλικά ευρίσκονται το ένα πάνω από το άλλο. Δεδομένων των ανωτέρω συνθηκών και αν οι μη προστατευμένες περιοχές είναι ευθυγραμμισμένες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, τότε η απόσταση από άνοιγμα σε άνοιγμα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5 m.

Εάν οι μη προστατευμένες περιοχές σε ένα επίπεδο είναι οριζόντια μετατοπισμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός άλλου επιπέδου, τότε η απόσταση που διαχωρίζει δύο διαδοχικά παράθυρα δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0.9 m. Οι δύο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Οι προδιαγραφές για τις αποστάσεις μεταξύ ανοιγμάτων και τις οριζόντιες προεξοχές στον οικοδομικό κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας

Ο οικοδομικός κανονισμός της Νέας Ζηλανδίας επίσης ορίζει ότι η ενδιάμεση τοιχοποιία μπορεί να παραληφθεί εάν κατασκευαστεί μία οριζόντια προεξοχή μήκους τουλάχιστον 0.6 m. Τέλος, ο εξώστης θα πρέπει να έχει δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον ίσο με του ορόφου που διαχωρίζει τα ανώτερα με τα κατώτερα πυροδιαμερίσματα. Εξαιρέση των παραπάνω αποτελεί η ύπαρξη συστήματος καταιονισμού.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι προδιαγραφές για προστασία από ΦΕΑ για όλες τις προαναφερθείσες χώρες.

Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές για προστασία από ΦΕΑ για διάφορες χώρες

Χώρα	Απόσταση από άνοιγμα σε άνοιγμα (m)	Οριζόντια Προεξοχή (m)	Παρατηρήσεις
Ελλάδα	1.4	1.4	Εάν δεν υπάρχει εξώστης δεν απαιτείται δείκτης πυραντίστασης στα ανοίγματα. Αν υπάρχει τότε πρέπει να είναι ίσος με του ενδιάμεσου δαπέδου
Αυστραλία	0.9	1.1	Μη αναφλέξιμο ανώφλι με FLR από 60/60/60 Μη αναφλέξιμη οριζόντια προεξοχή με FLR από 60/60/60, έχοντας μία προέκταση τουλάχιστον 450mm κατά μήκος του τοίχου
Φινλανδία	1.0	-	Δεν υπάρχουν ρυθμιστικές προδιαγραφές στους κανονισμούς κτιρίων οι οποίες σχετίζονται με ΦΕΑ
Γαλλία	0.6 – 1.3	0.6 – 1.3	Οι διαστάσεις του ανωφλίου και της οριζόντιας προεξοχής εξαρτώνται από τον κανόνα s και P, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από πολλές μεταβλητές
Χονγκ Κονγκ	0.9	0.5	Ο ενδιάμεσος τοίχος έχει πυροπροστασία τουλάχιστον όσο ο ενδιάμεσος όροφος
Νέα Ζηλανδία	1.5	0.6	Ο κώδικας κτιρίων της Ν. Ζηλανδίας παρέχει επιπλέον πίνακα με περαιτέρω συνδυασμούς προεξοχών
Νορβηγία	1.2	1.2	Αυτές οι προδιαγραφές μπορούν να παραληφθούν εάν το κτίριο διαθέτει σύστημα καταιονητήρων.
Πορτογαλία	1.1	1.1 – το βάθος της οριζόντιας προεξοχής	Η οριζόντια προεξοχή θα πρέπει να έχει ελάχιστη προέκταση τουλάχιστον 1000 mm κατά μήκος του τοίχου και να έχει πυραντίσταση EI60
Ισπανία	1.0	1.0 – το βάθος της οριζόντιας προεξοχής	Ενδιάμεση τοιχοποιία κλάσης EI60
Σουηδία	1.2	-	Κατακόρυφα ανοίγματα εντός 1200 mm έχουν διαβάθμιση ως προς την φωτιά, είτε ένα παράθυρο κλάσης E30 είτε και τα δύο παράθυρα κλάσης E15.
ΗΠΑ	Διεθνείς Κώδικες: 0.914	Διεθνείς Κώδικες: 0.762	Διεθνείς Κώδικες: τα ανοίγματα πρέπει να διαχωρίζονται κατακόρυφα, όταν η οριζόντια απόσταση μεταξύ τους είναι ε-ντός 1524 mm και το άνοιγμα στον κατώτερο όροφο δεν διαθέτει πυροπροστασία κλάσης μικρότερης από ¾ hrs

2.2 Επίδραση γεωμετρίας εξώστη σε φωτιά εξερχόμενη από άνοιγμα

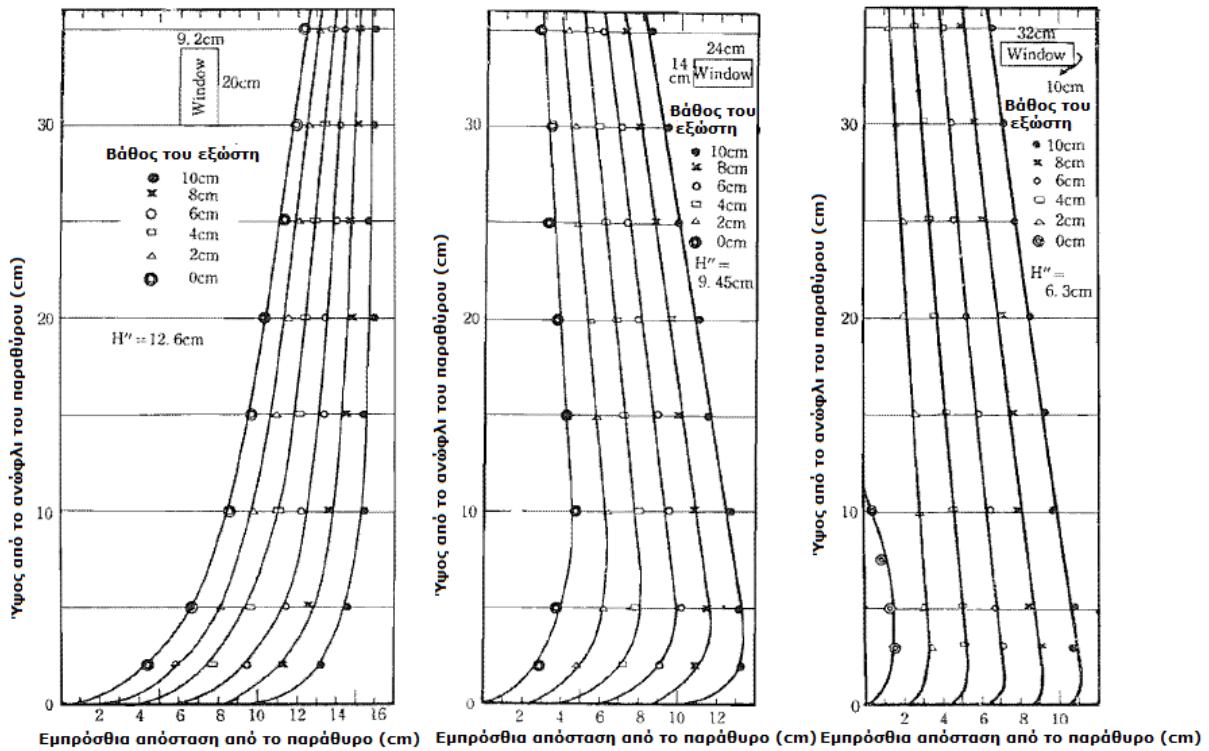
Τα τελευταία 60 χρόνια έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες σχετικά με τη χρήση της οριζόντιας προεξοχής ως μέτρο προστασίας για την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς κατά μήκος της πρόσοψης ενός κτιρίου. Είτε κατασκευάστηκαν πειραματικές διατάξεις φυσικής ή μικρής κλίμακας με σκοπό την παραμετρική μελέτη της συμπεριφοράς της φωτιάς με και χωρίς την παρουσία εξώστη, είτε πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα με τη χρήση εξειδικευμένων υπολογιστικών προγραμμάτων (FDS, STAR-CD, FLOW-3D κ.α.), είτε εφαρμόστηκαν και οι δύο μέθοδοι προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μία ομαδοποίηση των γεωμετρικών και άλλων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την φωτιά που εξέρχεται από άνοιγμα.

2.2.1 Επίδραση βάθους του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα

Ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών ομάδων ασχολήθηκε με την επίδραση του βάθους μίας οριζόντιας προεξοχής στη θερμοκρασία της ΦΕΑ, στη θερμοκρασία του τοιχώματος πάνω και κάτω από τον εξώστη, στην τροχιά της ΦΕΑ κ.α. Γενικά, υπάρχει συμφωνία των υπολογιστικών και πειραματικών ερευνών στο γεγονός ότι *όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του εξώστη, τόσο πιο αποτελεσματικά εμποδίζεται η κατακόρυφη διάδοση φλόγας κατά μήκος της πρόσοψης, ελαττώνοντας σημαντικά τις θερμοκρασίες του τοιχώματος πάνω από τον εξώστη* (Yokoi, 1960, Yung and Oleszkiewicz, 1988, Oleszkiewicz, 1991, Suzuki et al. 2000, Ohmiya et al., 2001, Luo et al., 2001, Mammoser and Battaglia, 2003, Cao and Guo, 2003, Xing et al., 2013, Zhao et al., 2014, Fu et al., 2015, An et al., 2017, Nilsson et al., 2018 κ.α.).

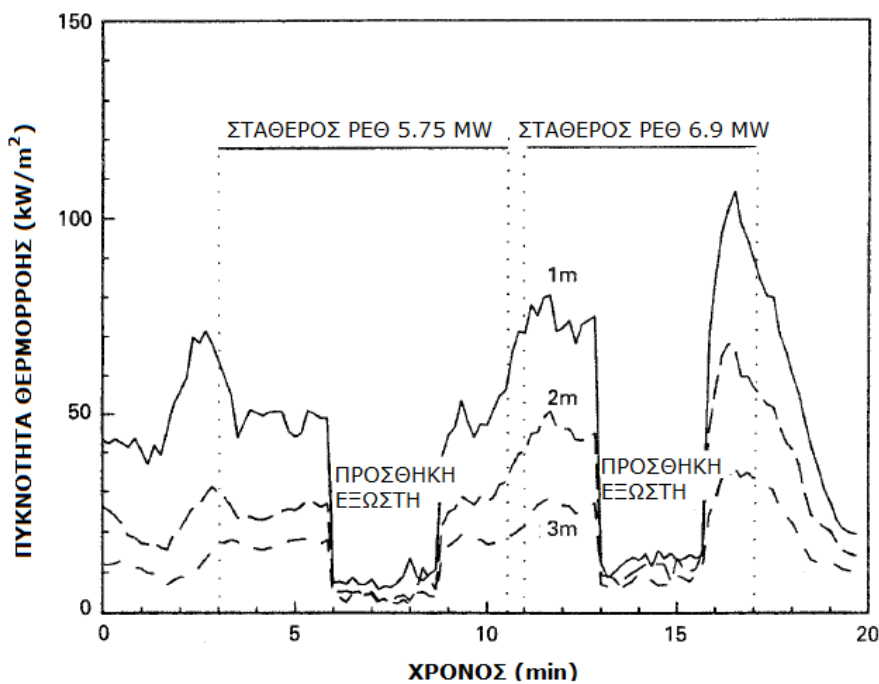
Πρωτοπόρος σε αυτού του είδους τις έρευνες ήταν ο Yokoi (1960), ο οποίος διεξήγαγε μία σειρά πειραμάτων μικρής και μεγάλης κλίμακας, προκειμένου να διερευνήσει τα πιθανά μέτρα προστασίας από την κατακόρυφη διάδοση της ΦΕΑ. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ευρήματα της έρευνάς του ήταν η επίδραση που έχει ο εξώστης στην τροχιά των καυσαερίων. Μέσω των πειραμάτων μικρής κλίμακας ανακάλυψε ότι παρόλο που όσο αυξάνεται το βάθος της οριζόντιας προεξοχής το πλούμιο απομακρύνεται από την πρόσοψη, σε μεγαλύτερο ύψος η τροχιά του συγκλίνει με την τροχιά που διαγράφουν τα καυσαέρια στην περίπτωση που δεν υπάρχει καθόλου εξώστης. Στο Σχήμα 2.7 φαίνονται οι τροχιές του πλουμίου για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες παραθύρου. Το βάθος του εξώστη αυξάνει προοδευτικά ανά 2 cm αρχίζοντας από μηδενική τιμή. Η σύγκλιση των καμπυλών είναι εμφανής και στις τρεις περιπτώσεις. Ωστόσο, παρατηρείται ότι όταν το άνοιγμα είναι στενό και ψηλό (1^ο σενάριο), το πλούμιο απομακρύνεται πολύ από τον τοίχο. Αντίθετα, όταν γίνει πολύ πλατύ και κοντό (3^ο σενάριο), τείνει να προσκολληθεί στο τοίχωμα ολοένα και πιο γρήγορα. Το πειραματικό έργο του Yokoi οδήγησε στην εφαρμογή σημαντικών αλλαγών στον οικοδομικό κώδικα της Ιαπωνίας, θέτοντας την απαίτηση τα νεόδμητα κτίρια να φέρουν οπωσδήποτε οριζόντιες προεξοχές βάθους 0.74 m πάνω από τα παράθυρα, ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς κατά μήκος της πρόσοψης να προστατευτούν οι υαλοπίνακες των ανώτερων ορόφων από πιθανή θραύση.

Ο Oleszkiewicz (1991) διεξήγαγε πειράματα πραγματικής κλίμακας και απέδειξε παραστατικά τη μεγάλη προστασία που προσφέρει μία οριζόντια προεξοχή στους επάνω ορόφους.



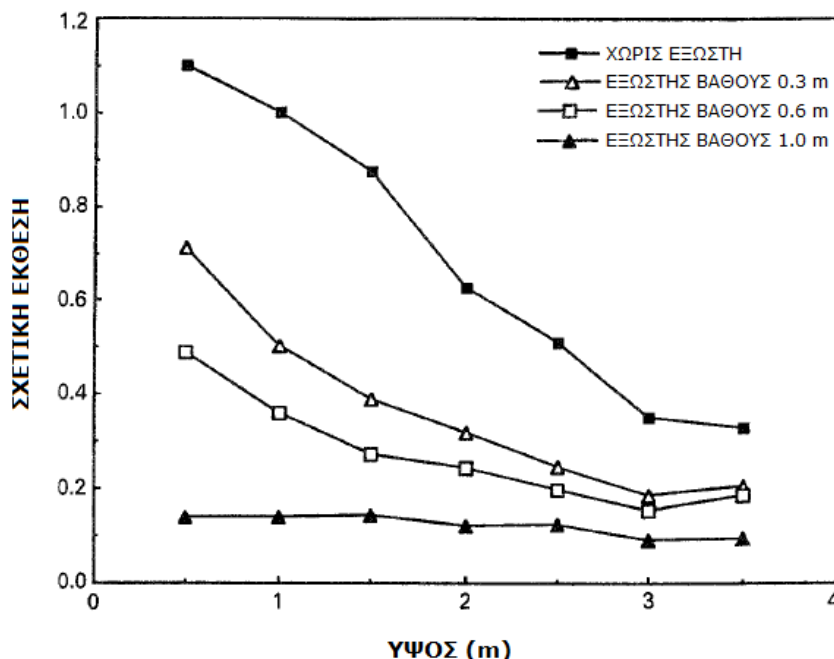
Σχήμα 2.7: Τροχιές του εξερχόμενου πλουμίου για διάφορα βάθη εξώστη και για 3 γεωμετρίες παραθύρου (Yokoi, 1960)

Χρησιμοποιώντας έναν εξώστη βάθους 1 m μελέτησε την συμπεριφορά του τοποθετώντας και αφαιρώντας τον ακαριαία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και ενώ ο ΡΕΘ είχε σταθεροποιηθεί. Στο Σχήμα 2.8 καταγράφεται η πυκνότητα της θερμορροής συναρτήσει του χρόνου για τρία διαφορετικά ύψη από το άνοιγμα.

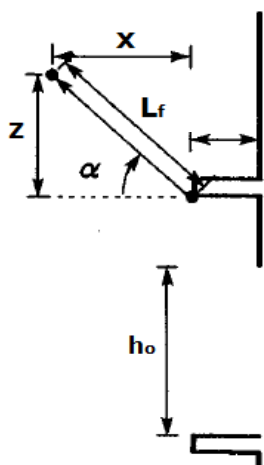


Σχήμα 2.8: Διακυμάνσεις της θερμορροής σε 1,2 και 3 m πάνω από το άνοιγμα για εξώστη βάθους 1 m (Oleszkiewicz, 1991)

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται εμφανώς η δραστική μείωση της πυκνότητας της θερμορροής στην πρόσοψη αμέσως μόλις τοποθετείται ο εξώστης, ενώ επανέρχεται ταχύτατα στα προηγούμενα επίπεδα της μόλις αφαιρεθεί. Ο Oleszkiewicz επίσης συνέκρινε την επίδραση εξωστών τριών διαφορετικών βαθών (0.3, 0.6 και 1 m) στον εξωτερικό τοίχο. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η σχετική έκθεση του εξωτερικού τοιχώματος, η οποία έχει κανονικοποιηθεί με βάση τις τιμές θερμορροής στην περίπτωση που δεν υπήρχε καθόλου εξώστης. Με την προσθήκη εξώστη βάθους 60 cm η θερμορροή μειώνεται κατά 60% σε σύγκριση με το σενάριο της απουσίας του εξώστη. Η αντίστοιχη μείωση που επιφέρει η προσθήκη εξώστη βάθους 1 m φτάνει το 85%.



Σχήμα 2.9 Ύψος συναρτήσει της σχετικής έκθεσης του τοίχου σε ύψος 1 m για 3 βάθη εξώστη (Oleszkiewicz, 1991)

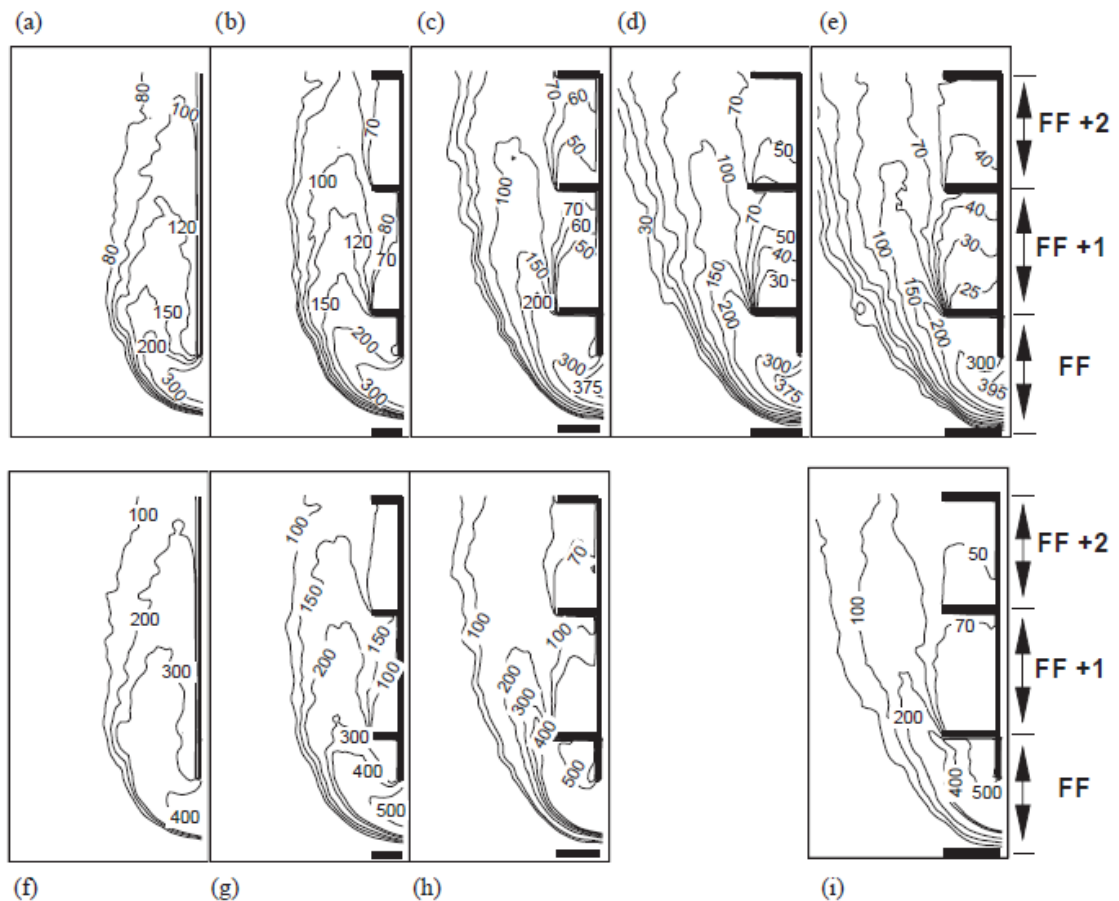


Σχήμα 2.10: Σύμβολα των χαρακτηριστικών μεγεθών της ΦΕΑ με εξώστη (Suzuki et al., 2000)

Οι Suzuki et al. (2000), εκτελώντας πειράματα κλίμακας 1/7, διαπίστωσαν ότι όταν στη διάταξη υπάρχει εξώστης οι θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος είναι υψηλότερες από όταν δεν υπάρχει. Επίσης παρατήρησαν ότι όσο μειώνεται το βάθος του εξώστη τόσο η τροχιά του πλουμίου προσεγγίζει τον εξωτερικό τοίχο, επιβεβαιώνοντας την έρευνα του Yokoϊ (Σχήμα 2.7). Αναλύοντας στιγμιότυπα της φωτιάς, τα οποία ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι ερευνητές βρήκαν πειραματικά ότι όσο το βάθος του εξώστη αυξάνεται, η γωνία της εξερχόμενης φλόγας και το κατακόρυφο μήκος της μειώνονται, ενώ το οριζόντιο μήκος της δεν εξαρτάται από το βάθος του εξώστη. Στο Σχήμα 2.10 διακρίνονται τα σύμβολα των ανωτέρω χαρακτηριστικών μεγεθών. Το h_o αντιστοιχεί στο ύψος του ανοίγματος και το P στο βάθος του εξώστη. Το μήκος της φλόγας παριστάνεται με το σύμβολο L_f ενώ οι συνιστώσες του ορίζονται κατά την οριζόντια διεύθυνση x και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση z . Τέλος, η γωνία που σχηματίζει η ΦΕΑ με τον οριζόντιο άξονα συμβολίζεται με το γράμμα α . Οι παρατηρήσεις του Suzuki για το μήκος της

φλόγας συμπληρώνονται από την έρευνα των Fu et al. (2015), οι οποίοι βρήκαν ότι η ακτινική ταχύτητα της φλόγας παραμένει σχεδόν σταθερή παρά την αύξηση του βάθους του εξώστη.

Οι Mammoser και Battaglia (2003) πραγματοποίησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το μοντέλο κτιρίου του Suzuki προκειμένου να συγκρίνουν τα πειραματικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες της ΦΕΑ για διάφορα βάθη εξώστη. Στην επάνω σειρά (a-e) απεικονίζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης και στην κάτω σειρά τα πειραματικά αποτελέσματα του Suzuki.

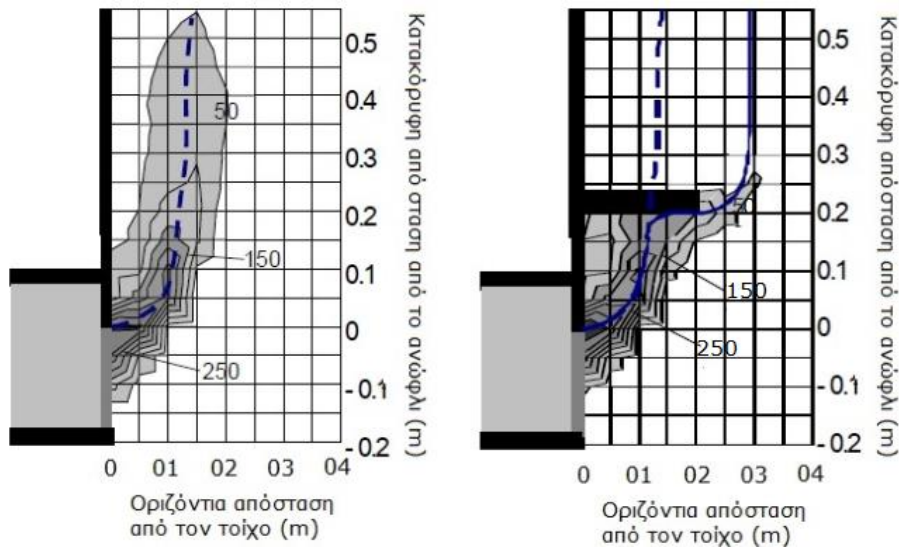


Σχήμα 2.11 Σύγκριση των ισοθερμοκρασιακών καμπυλών για φωτιά προπανίου ισχύος 48 kW που προέκυψαν από την υπολογιστική προσομοίωση (επάνω) με τις αντίστοιχες πειραματικές του Suzuki (κάτω). Βάθη των εξωστών:(a,f) 0 cm, (b,g) 10 cm, (c,h) 15 cm, (d) 17.5 cm και (e,i) 20 cm (Mammoser & Battaglia,2003)

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα με εξαίρεση κάποιες μικρές διαφορές, οι οποίες αποδίδονται κυρίως στην αδιαβατική οριακή συνθήκη που τέθηκε σε όλες τις επιφάνειες κατά την προσομοίωση, σε αντίθεση με την πραγματική συμπεριφορά των πειραματικών επιφανειών. Γενικά πάντως από το Σχήμα 2.11 συμπεραίνεται ότι η δραστική μείωση της θερμοκρασίας της πρόσοψης που προκαλεί η αύξηση του βάθους του εξώστη όχι μόνο μπορεί να αποτρέψει την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς, αλλά δυνητικά αυξάνει κατά πολύ την πιθανότητα επιβίωσης των ανθρώπων που βρίσκονται σε ορόφους ακριβώς πάνω από το πυροδιαμέρισμα (Mammoser and Battaglia, 2003).

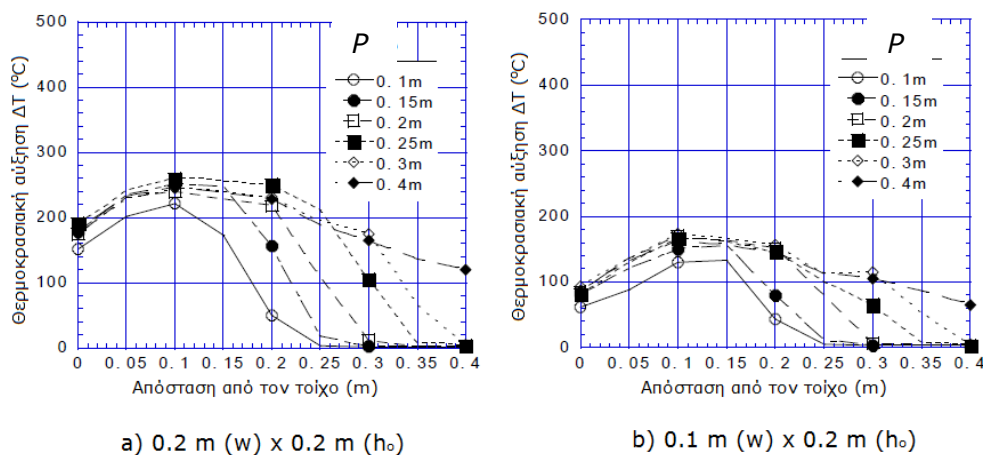
Οι Ohmiya et al. (2001) βρήκαν ότι η θέση του άξονα του πλουμίου κάτω από τον εξώστη παραμένει σχεδόν αμετάβλητη ανεξάρτητα από το αν υπάρχει εξώστης ή όχι. Μόλις το πλούμιο προσκρούσει πάνω στον εξώστη, η ζώνη υψηλών

θερμοκρασιών επεκτείνεται πλευρικά κατά μήκος του εξώστη. Η παρουσία του εξώστη προκαλεί υψηλότερες θερμοκρασίες στην περιοχή ανάμεσα στο άνοιγμα και το άκρο του εξώστη. Στο Σχήμα 2.12 διακρίνεται ότι ο κεντρικός άξονας του πλουμίου είναι ίδιος στο σενάριο χωρίς εξώστη (αριστερά) με το σενάριο με εξώστη (δεξιά) έως τη στιγμή που προσκρούει στην κάτω επιφάνειά του και μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Επίσης είναι εμφανής ο ρόλος του εξώστη ως φράγμα για την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς προς τον επόμενο όροφο.



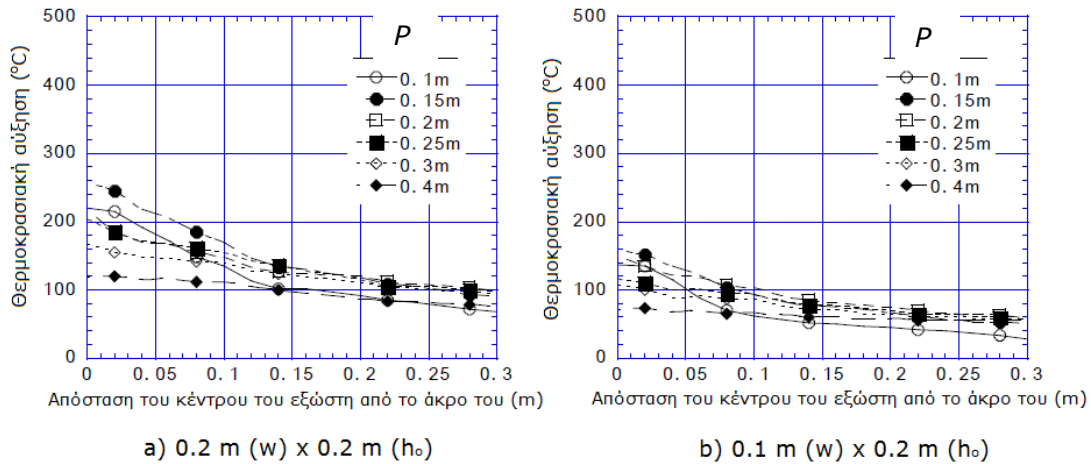
Σχήμα 2.12 Σύγκριση των ισοθερμοκρασιακών καμπυλών και της θέσης του άξονα του πλουμίου για σενάριο χωρίς εξώστη (αριστερά) και σενάριο με εξώστη (δεξιά) για άνοιγμα διαστάσεων 0.1 m x 0.2 m.

Σε επίπεδο 5 mm κάτω από τον εξώστη, όταν αυτός τοποθετήθηκε σε ύψος 0.2 m στα πειράματα μικρής κλίμακας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος του εξώστη δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις με τη μεταβολή του βάθους P του εξώστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Θερμοκρασιακή αύξηση ΔT συνάρτησε της απόστασης από τον τοίχο για διάφορα βάθη εξώστη για ανοίγματα διαστάσεων 0.2 m x 0.2 m (αριστερά) και 0.1 m x 0.2 m (δεξιά), (Ohmiya et al., 2001)

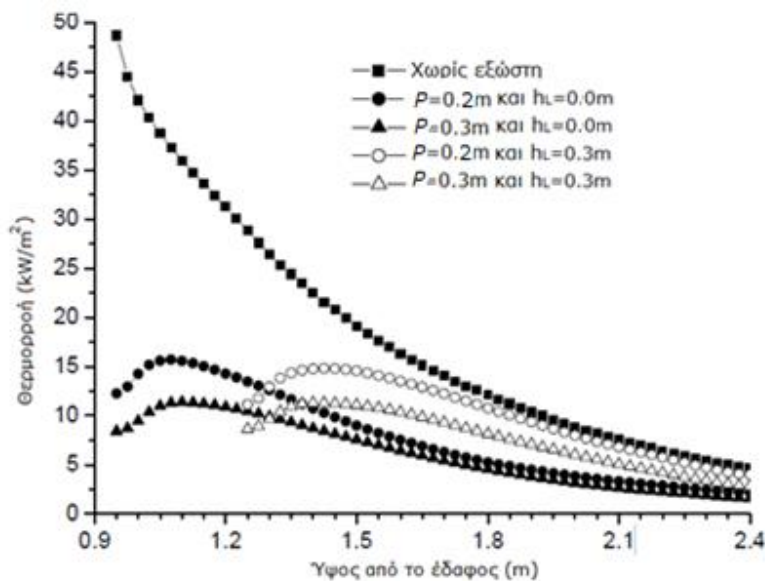
Το Σχήμα 2.14 δείχνει ότι όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη, η μέγιστη θερμοκρασία κατά μήκος της ακμής του εξώστη καθώς και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας από το κέντρο προς τη γωνία ελαττώνονται.



Σχήμα 2.14: Θερμοκρασιακή αύξηση ΔΤ συναρτήσει της απόστασης του κέντρου του εξώστη από το άκρο του για διάφορα βάθη. Το αριστερό διάγραμμα αφορά άνοιγμα διαστάσεων 0.2 m x 0.2 m και το δεξί 0.1 m x 0.2 m (Ohmiya et al., 2001)

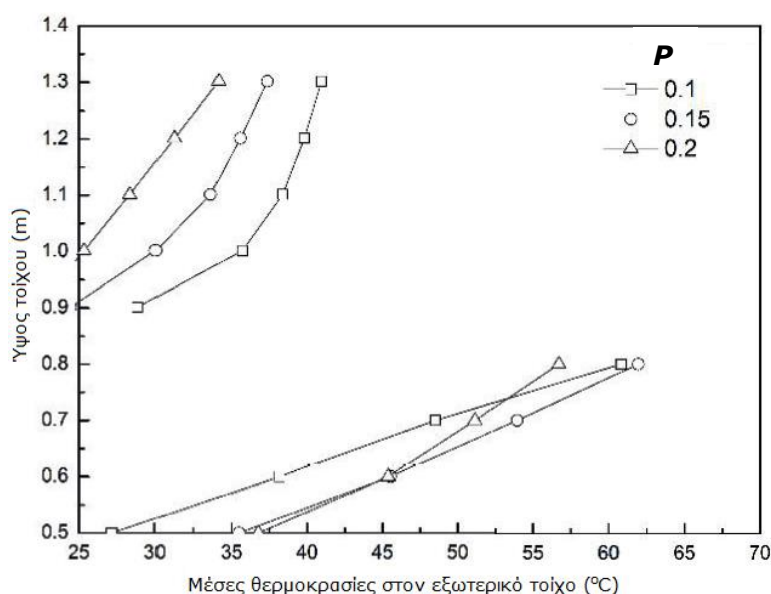
Οι Luo et al. (2001), εξετάζοντας τον οικοδομικό κώδικα του Χονκ Κονγκ, διαπίστωσαν υπολογιστικά ότι μία οριζόντια προεξοχή βάθους 500 mm είναι πιο αποδοτική στην παρεμπόδιση της κατακόρυφης διάδοσης μίας ΦΕΑ σε σύγκριση με έναν ενδιάμεσο τοίχο μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων μήκους 900 mm.

Το 2003, οι Cao & Guo (2003) πραγματοποίησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις για δύο τιμές βάθους ($P=0.2, 0.3$ m) και δύο τιμές ύψους του εξώστη από το ανώφλι ($h_L=0.2, 0.3$ m). Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η θερμορροή συναρτήσει του ύψους πάνω από το ανώφλι του ανοίγματος για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς συμπεριλαμβανομένου και του σεναρίου χωρίς εξώστη. Είναι εμφανές ότι με την προσθήκη του εξώστη βάθους 0.2 m η θερμορροή μειώνεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό, ειδικά στα μικρότερα ύψη από το ανώφλι. Αυξάνοντας το βάθος στα 0.3 m, η θερμορροή μειώνεται περαιτέρω.



Σχήμα 2.15: Θερμορροή συναρτήσει το ύψους για διάφορα βάθη και ύψη του εξώστη (Cao & Guo, 2003)

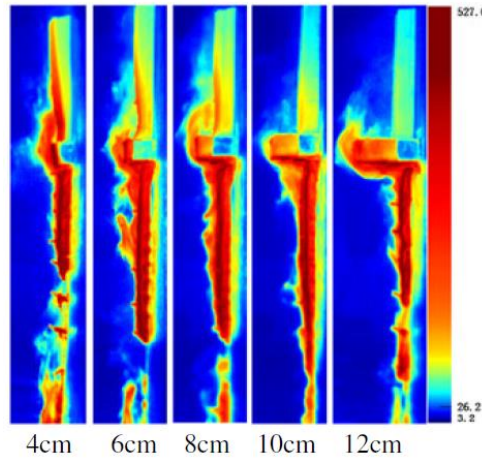
Μερικά χρόνια αργότερα, ερευνητικές ομάδες από την Κίνα (Xing et al., 2013, Zhao et al., 2014, Wang et al., 2016) εκτέλεσαν μία σειρά υπολογιστικών προσομοιώσεων, θεωρώντας ότι η κρίσιμη και επικίνδυνη θερμοκρασία επάνω από τον εξώστη είναι οι 70°C. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ανάμεσα στη γεωμετρία του ανοίγματος, το ύψος του εξώστη από το ανώφλι και το βάθος του εξώστη, η τελευταία παράμετρος παίζει τον κυριότερο ρόλο ως μέτρο παρεμπόδισης της κατακόρυφης διάδοσης της φωτιάς. Οι Xing et al. (2013) βρήκαν ότι το ελάχιστο βάθος του εξώστη που απαιτείται για την αποφυγή της κρίσιμης θερμοκρασίας είναι τα 1.2 m. Στην έρευνα των Wang et al. (2016), παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι βρέθηκε ότι το πιο αποδοτικό βάθος εξώστη είναι τα 0.6 m. Με περαιτέρω αύξησή του στα 0.8 m η προστασία του άνω ορόφου δεν αυξάνεται, κάτι που έρχεται σε αντιπαράθεση με τα ευρήματα του Oleszkiewicz. Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται η επίδραση του βάθους P του εξώστη στη μέση θερμοκρασία του τοίχου πάνω από το άνοιγμα (άνω τμήμα των καμπυλών).



Σχήμα 2.16: Μέσες θερμοκρασίες στην πρόσοψη του κτιρίου συνάρτησε του ύψους για διάφορα βάθη του εξώστη (Zhao et al., 2014)

Οι An et al. (2017) διεξάγοντας πειραματικές δοκιμές με κάμερες καταγραφής, μελέτησαν την επίδραση του βάθους της οριζόντιας προεξοχής στην ανοδική διάδοση της φωτιάς κατά μήκος της πρόσοψης ενός κτιρίου η οποία ήταν επενδεδυμένη με υλικό θερμομόνωσης. Το υλικό που επελέγη ήταν ο αφρός XPS και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετρήθηκαν το ύψος της φλόγας, το εμβαδόν της φλόγας, το πεδίο θερμοκρασιών και η θερμοροή. Βρέθηκε ότι με την αύξηση του βάθους του εξώστη, τόσο το ύψος της φλόγας όσο και το εμβαδόν της μειώνονται. Η μείωση του εμβαδού είναι περισσότερο αξιοσημείωτη από αυτή του ύψους, γεγονός που αποδεικνύει ότι με την αύξηση του βάθους του εξώστη επέρχεται μείωση του πλάτους της φλόγας πάνω από τον εξώστη. Επίσης, η θερμοκρασία του τοιχώματος πάνω από τον εξώστη ελαττώνεται όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη. Το πεδίο των θερμοκρασιών για διάφορα βάθη εξώστη απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17. Η μέση τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας κάτω από τον εξώστη αρχικά μειώνεται και έπειτα αυξάνεται με την αύξηση του εξώστη, κάτι που έρχεται σε αντιπαράθεση με τις έρευνες των Fu και Wang. Το πειραματικό έργο του Fu έδειξε ότι η θερμοκρασία κάτω από την οριζόντια προεκβολή συσχε-

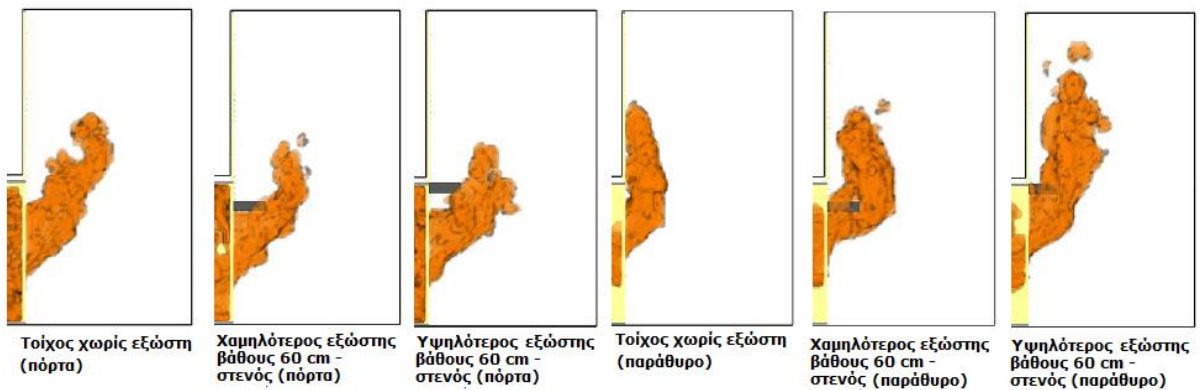
τίζεται θετικά με την αύξηση του βάθους της (Fu, 2016). Οι Wang et al. βρήκαν ότι η αύξηση του βάθους του εξώστη μειώνει τον κίνδυνο πάνω από τον εξώστη αλλά παράλληλα αυξάνει τον κίνδυνο κάτω από αυτόν (Wang, 2016). Επομένως και οι δύο ερευνητές έδειξαν ότι η συνάρτηση που συνδέει το βάθος του εξώστη με τη θερμοκρασία από κάτω του είναι μονότονη.



Σχήμα 2.17: Πεδίο θερμοκρασιών για διάφορα βάθη του εξώστη (An et al., 2017)

Τέλος, όσον αφορά τη θερμορροή, οι An et al. (2017) διαίρεσαν το χρόνο έκθεσης της πρόσοψης σε θερμορροή σε τέσσερα στάδια: το στάδιο της έναυσης, το στάδιο της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του καπνού, το στάδιο της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της φλόγας και το στάδιο της ύφεσης. Βρέθηκε ότι και στα τέσσερα στάδια η θερμορροή ελαττώνεται με την αύξηση του βάθους του εξώστη. Η μέγιστη τιμή της θερμορροής παρατηρήθηκε κατά το τρίτο στάδιο, κατά το οποίο η θερμορροή αυξάνεται γραμμικά με το εμβαδό της φλόγας.

Η πιο πρόσφατη έρευνα, η οποία ασχολήθηκε με μία πληθώρα θεμάτων, δημοσιεύθηκε από τους Nilsson et al. (2018) του πανεπιστημίου της Λουντ της Σουηδίας. Πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός υπολογιστικών προσομοιώσεων, αφού πρώτα αυτά επικυρώθηκαν από πειραματικά αποτελέσματα. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι ανοιγμάτων (πόρτα και παράθυρο) και το βάθος του εξώστη που επελέγη για τα σενάρια ήταν 60 cm. Στο Σχήμα 2.18 απεικονίζονται δύο σενάρια φωτιάς εξερχόμενης από διαφορετικούς τύπους ανοιγμάτων (πόρτα/ παράθυρο). Το κάθε σενάριο περιλαμβάνει 3 περιπτώσεις: ΦΕΑ χωρίς εξώστη, ΦΕΑ με εξώστη βάθους 60 cm στο ύψος του ανωφλίου και ΦΕΑ με εξώστη βάθους 60 cm τοποθετημένο 35 cm πιο ψηλά από το ανώφλι του ανοίγματος.



Σχήμα 2.18: Σύγκριση των ΦΕΑ για σενάρια πόρτας (αριστερά) και παραθύρου (δεξιά) για την περίπτωση χωρίς εξώστη, με εξώστη σε χαμηλή θέση και με εξώστη σε υψηλή θέση (Nilsson et al., 2018)

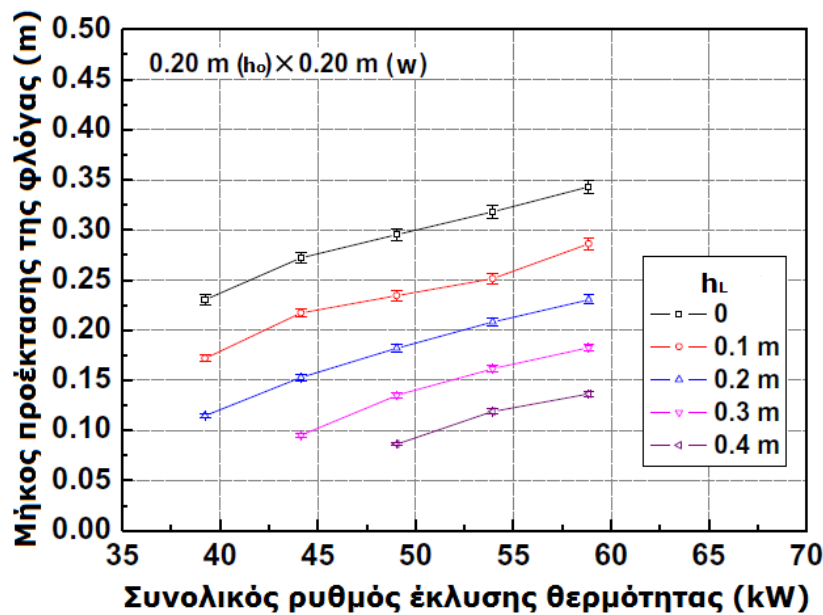
Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα και τα σχόλια των ερευνών που περιγράφηκαν ανωτέρω.

Πίνακας 2.2: Συμπεράσματα για την επίδραση του βάθους του εξώστη στη ΦΕΑ

A/A	Παραπομπή	Σχόλια / Συμπεράσματα
1	Yokoi (1960)	Οι τροχιές του πλουμίου για διάφορα βάθη εξώστη τείνουν να συγκλίνουν σε μεγαλύτερο ύψος.
2	Yung and Oleszkiewicz (1988)	Ο εξώστης αποτελεί εμπόδιο για την κατακόρυφη διάδοση της ΦΕΑ, ενώ η κατακόρυφη προεξοχή την υποβοηθά.
3	Oleszkiewicz (1991)	Ένας εξώστης βάθους 60 cm μειώνει κατά 60% τη θερμορροή και ένας εξώστης βάθους 1 m κατά 85% σε σχέση με την περίπτωση απουσίας εξώστη.
4	Suzuki et al. (2000)	Όσο το βάθος του εξώστη αυξάνεται, οι θερμοκρασίες εντός πυροδιαμερισματος αυξάνονται, η γωνία της ΦΕΑ και το κατακόρυφο μήκος της μειώνονται, ενώ το οριζόντιο μήκος της δεν εξαρτάται από το βάθος του εξώστη.
5	Ohmiya et al. (2001)	Με την αύξηση του βάθους του εξώστη η κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος του δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, η μέγιστη θερμοκρασία κατά μήκος της ακμής του εξώστη καθώς και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας από το κέντρο προς τη γωνία ελαττώνονται
6	Luo et al. (2001)	Ένας εξώστης βάθους 500 mm είναι πιο αποδοτικός στην παρεμπόδιση της κατακόρυφης διάδοσης μίας ΦΕΑ σε σύγκριση με έναν ενδιάμεσο τοίχο μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων μήκους 900 mm
7	Mammoser and Battaglia (2003)	Επιβεβαίωση πειραμάτων Suzuki et al, (2000) για τη σημαντική προστασία που προσφέρει ο εξώστης έναντι των ΦΕΑ
8	Cao and Guo (2003)	Όσο το βάθος του εξώστη αυξάνεται, η θερμορροή και οι θερμοκρασίες πάνω από τον εξώστη μειώνονται.
9	Xing et al. (2013)	Το ελάχιστο απαιτούμενο βάθος του εξώστη για την αποφυγή της κρίσιμης θερμοκρασίας (70°C) είναι τα 1.2 m.
10	Zhao et al. (2014)	Ανάμεσα στη γεωμετρία του ανοίγματος, το ύψος του εξώστη από το ανώφλι και το βάθος του εξώστη, το τελευταίο παίζει τον κυριότερο ρόλο ως μέτρο παρεμπόδισης της κατακόρυφης διάδοσης της φωτιάς.
11	Fu et al. (2015)	Η ακτινική ταχύτητα της φλόγας παραμένει σχεδόν σταθερή παρά την αύξηση του βάθους του εξώστη
12	Wang et al. (2016)	Το ιδανικό βάθος του εξώστη που προσφέρει τη μέγιστη δυνατή προστασία είναι 0.6 m. Περαιτέρω αύξησή του στα 0.8 m δεν βελτιώνει την επίδραση στο πλούμιο. Αντίθετα προκαλεί υπερχειλίση και εξάπλωση του πλουμίου στην κορυφή του ανοίγματος και στα γειτονικά κτίρια.
13	An et al. (2017)	Όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη, το εμβαδόν, το ύψος και το πλάτος της φλόγας πάνω από τον εξώστη μειώνονται, όπως επίσης και η θερμορροή πάνω από τον εξώστη. Η μέση τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας πάνω από τον εξώστη αρχικά μειώνεται και έπειτα αυξάνεται.
14	Nilsson et al. (2018)	Ο εξώστης 60 cm ανακόπτει την κατακόρυφη διάδοση της ΦΕΑ και είναι πιο αποδοτικός από ενδιάμεση τοιχοποιία μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων που έχει μήκος 1.2 m

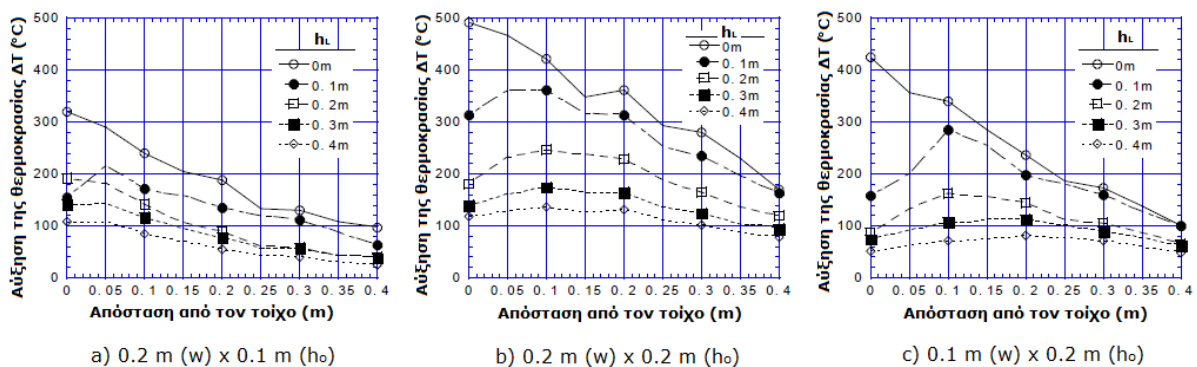
2.2.2 Επίδραση του ύψους του εξώστη από το ανώφλι του ανοίγματος στην εξερχόμενη φλόγα

Μία σημαντική παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τη γεωμετρία της ΦΕΑ και χρήζει διερεύνησης είναι το ύψος του εξώστη από το ανώφλι του ανοίγματος. Οι Lu et al. (2017) μελέτησαν πειραματικά την επίδραση της ισχύος της φωτιάς στο μήκος της προέκτασης της φλόγας, μεταβάλλοντας παραμετρικά την κατακόρυφη απόσταση του εξώστη από το άνοιγμα. Στο Σχήμα 2.18 είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της προέκτασης της φλόγας. Επίσης, για σταθερό ρυθμό έκλυσης θερμότητας, όσο αυξάνεται το ύψος του εξώστη από το ανώφλι h_L το μήκος της προέκτασης της φλόγας μειώνεται.



Σχήμα 2.19: Μήκος προέκτασης της φλόγας συναρτήσει του ΡΕΘ με παράμετρο την απόστασης του εξώστη από το ανώφλι (Lu et al., 2017)

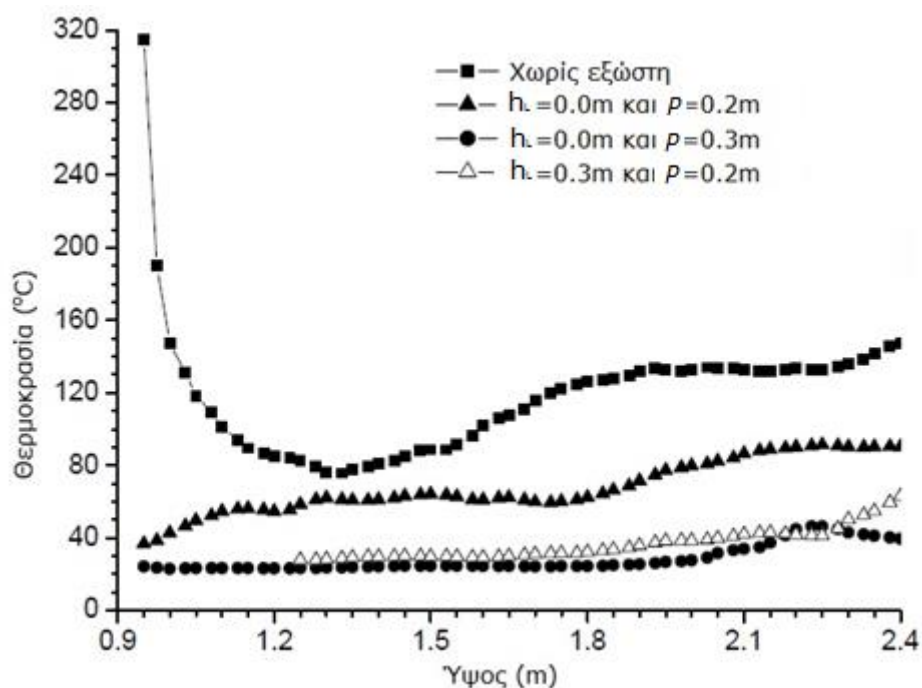
Η ερευνητική ομάδα των Ohmiya et al. (2001) από την Ιαπωνία διαπίστωσε πειραματικά ότι για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες ανοιγμάτων όσο αυξάνεται η απόσταση του εξώστη από το ανώφλι τόσο ελαττώνεται η θερμοκρασιακή αύξηση κάτω από τον εξώστη, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20: Αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από τον τοίχο με παράμετρο το ύψος του εξώστη από το ανώφλι. Εξετάζονται τρεις γεωμετρίες ανοιγμάτων (Ohmiya et al., 2001)

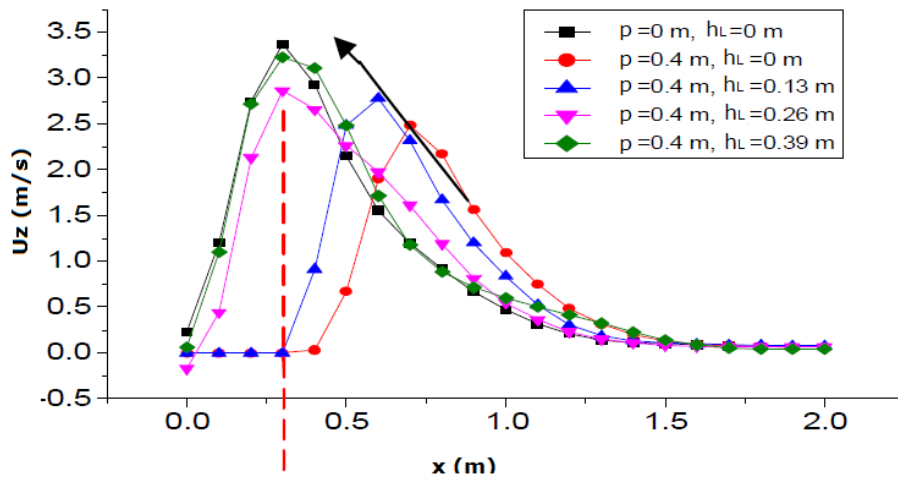
Στην περίπτωση α, όπου το άνοιγμα έχει πλάτος 0.2 m και ύψος 0.1 m, η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται σε κάποια απόσταση από τον τοίχο μόνο όταν το ύψος του εξώστη ήταν 0.1 m. Για τα υπόλοιπα ύψη παρατηρείται πολύ κοντά στο τοίχωμα. Στις περιπτώσεις b ($w=0.2$ m, $h_o=0.2$ m) και c ($w=0.1$ m, $h_o=0.2$ m), η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται σε μεγαλύτερη απόσταση από το τοίχωμα όσο το ύψος του εξώστη αυξάνεται.

Οι Cao and Guo (2003), μελέτησαν συνδυαστικά την επίδραση του βάθους και του ύψους του εξώστη. Από το Σχήμα 2.15 συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του ύψους του εξώστη μειώνεται η μέση θερμορροή που δέχεται ο εξωτερικός τοίχος. Οι καμπύλες του διαγράμματος είναι πανομοιότυπες αλλά μετατοπισμένες ως προς τον άξονα x , που αντιστοιχεί στο ύψος από το έδαφος. Η επίδραση της αύξησης του ύψους του εξώστη στη θερμοκρασία πάνω από τον εξώστη είναι εμφανής στο Σχήμα 2.21, όπου η εξαιρετική μείωση της θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός εξώστη βάθους 0.3 m στο ύψος του ανωφλίου σχεδόν επιτυγχάνεται επίσης με την προσθήκη ενός εξώστη μικρότερου βάθους 0.2 m τοποθετημένου 0.3 m ψηλότερα από το ανώφλι του ανοίγματος.



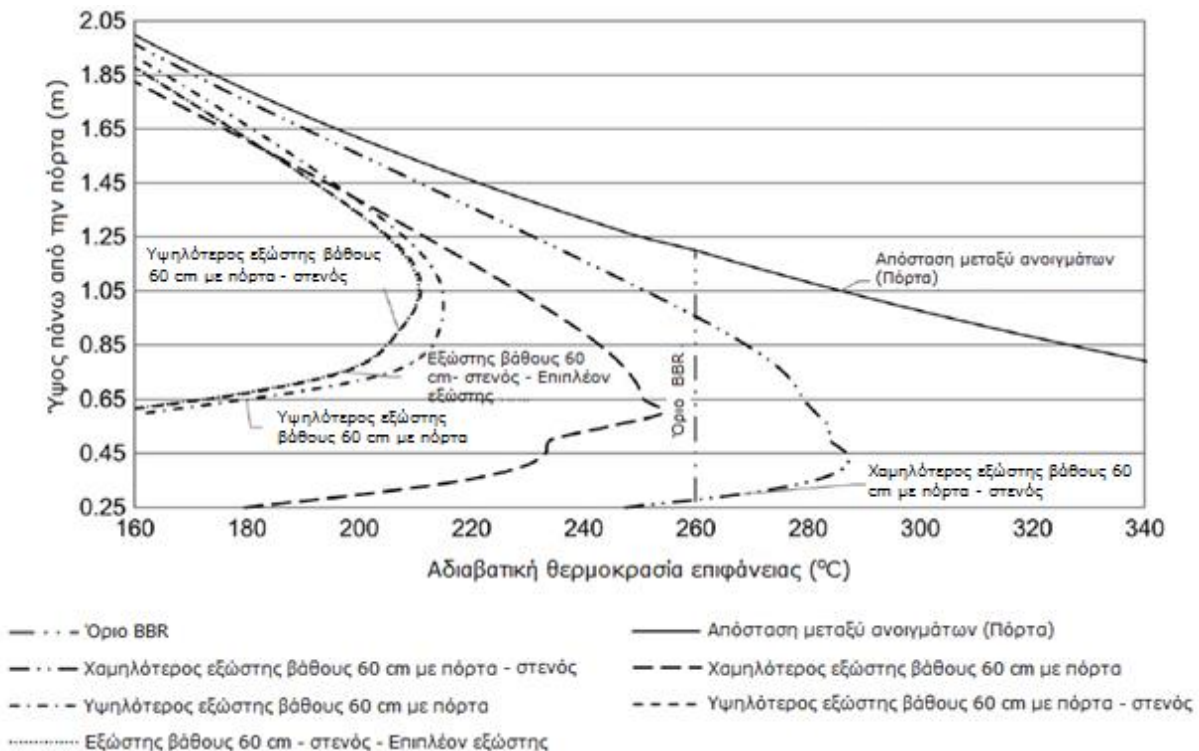
Σχήμα 2.21: Θερμοκρασία συναρτήσει του ύψους από το έδαφος για τρεις συνδυασμούς βάθους και ύψους του εξώστη από το έδαφος (Cao & Guo, 2003)

Το 2015, ο Fu με την ερευνητική του ομάδα (Fu et al., 2015) έδειξαν ότι η θερμοκρασία στον άξονα του πλουμίου αυξάνεται όσο ο εξώστης τοποθετείται ψηλότερα για σταθερό βάθος εξώστη. Έτσι, εάν η οριζόντια προεξοχή τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από το άνοιγμα και αυξηθεί επαρκώς το βάθος της, επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προστασία από την κάθετη διάδοση του πλουμίου. Αυτό φαίνεται να συμφωνεί με το Σχήμα 2.21, όπου η περίπτωση του εξώστη βάθους 0.3 m τοποθετημένου ακριβώς πάνω από το ανώφλι είναι η πιο αποδοτική. Η σταδιακή αύξηση της μέγιστης τιμής της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας u_z όσο το ύψος του εξώστη αυξάνεται απεικονίζεται στο Σχήμα 2.22. Το βάθος του εξώστη παραμένει σταθερό και ίσο με 0.2 m, ενώ εξετάζεται και η περίπτωση χωρίς εξώστη.



Σχήμα 2.22: Κατανομή της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας για διάφορα ύψη του εξώστη πάνω από το ανώφλι και για σταθερό βάθος εξώστη (Fu et al., 2015)

Οι Nilsson et al. (2018) από το πανεπιστήμιο Λουντ της Σουηδίας, αφού επικύρωσαν τις υπολογιστικές προσομοιώσεις με τις πειραματικές δοκιμές, διεξήγαγαν μία σειρά υπολογιστικών πειραμάτων μεταβάλλοντας αρκετές γεωμετρικές παραμέτρους, μία εκ των οποίων ήταν το πλάτος του εξώστη. Το μετρούμενο μέγεθος σε όλες τις περιπτώσεις ήταν η αδιαβατική θερμοκρασία επιφάνειας. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν για δύο τύπους ανοιγμάτων, πόρτα και παράθυρο, με βάθος εξώστη ίσο με 60 cm. Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζεται η αδιαβατική θερμοκρασία επιφάνειας συναρτήσει του ύψους πάνω από την πόρτα για διάφορες περιπτώσεις εξώστη, ενώ περιλαμβάνεται και η περίπτωση απουσίας εξώστη και αντικατάστασής του με ενδιάμεση τοιχοποιία μεταξύ διαδοχικών ανοιγμάτων.



Σχήμα 2.23 Σύγκριση της αδιαβατικής θερμοκρασίας επιφάνειας στην πρόσοψη πάνω από τον εξώστη για διαφορετικά σενάρια (Nilsson et al., 2018)

Σημειώνεται ότι ο όρος BBR προέρχεται από τις λέξεις Boverkets Byggregler και αντιστοιχεί στον οικοδομικό κώδικα της Σουηδίας. Η μέγιστη επιτρεπόμενη αδιαβατική θερμοκρασία επιφανείας βάσει του κώδικα είναι οι 280°C. Ένα από τα πολλαπλά συμπεράσματα που εξάγονται από το Σχήμα 2.23 και αφορά το ύψος του εξώστη, είναι ότι η μείωση που επιφέρει στην αδιαβατική θερμοκρασία η τοποθέτηση του ίδιου εξώστη ψηλότερα κατά 35 cm είναι εξαιρετικά μεγάλη. Όταν ο στενός εξώστης βάθους 60 cm τοποθετηθεί σε υψηλότερη θέση, οι τιμές της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια καθόλο το ύψος της διάταξης. Όταν όμως τοποθετηθεί στο ύψος του ανωφλίου, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από 280°C μέχρι και 1 m πάνω από την πόρτα.

Συνοψίζοντας τις παραπάνω έρευνες μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η αύξηση του ύψους του εξώστη από το ανώφλι του ανοίγματος επιφέρει αισθητή μείωση των θερμοκρασιών πάνω από τον εξώστη και επιδρά θετικά στην παρεμπόδιση της κατακόρυφης εξάπλωσης της ΦΕΑ. Όσον αφορά τη θερμοκρασία κάτω από τον εξώστη παρατηρείται αντιπαράθεση ανάμεσα την έρευνα των Ohmiya et al. (2001), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται όταν ο εξώστης τοποθετείται ψηλότερα, με τους Fu et al. (2015), σύμφωνα με τους οποίους η θερμοκρασία στον άξονα του πλουμίου αυξάνεται με την αύξηση του ύψους του εξώστη. Επίσης, όταν αυξάνεται το ύψος του εξώστη το μήκος της προεκτεινόμενης ΦΕΑ μειώνεται. Τα σχόλια και τα συμπεράσματα των ερευνητών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Συμπεράσματα για την επίδραση του ύψους του εξώστη πάνω από το ανώφλι του ανοίγματος στη ΦΕΑ

A/A	Παραπομπή	Σχόλια / Συμπεράσματα
1	Ohmiya et al. (2001)	Όσο αυξάνεται η απόσταση του εξώστη από το ανώφλι τόσο ελαττώνεται η θερμοκρασιακή αύξηση κάτω από τον εξώστη.
2	Cao and Guo (2003)	Με την αύξηση του ύψους του εξώστη η θερμορροή που δέχεται ο εξωτερικός τοίχος «μετατοπίζεται» σε μεγαλύτερο ύψος από το έδαφος ενώ οι θερμοκρασίες πάνω από τον εξώστη μειώνονται αισθητά.
3	Fu et al. (2015)	Η θερμοκρασία στον άξονα του πλουμίου και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητα αυξάνονται όσο ο εξώστης τοποθετείται ψηλότερα για σταθερό βάθος εξώστη. Έτσι, εάν η οριζόντια προεξοχή τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από το άνοιγμα και αυξηθεί επαρκώς το βάθος της, επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προστασία από την κάθετη διάδοση του πλουμίου.
4	Lu et al. (2017)	Όσο αυξάνεται το ύψος του εξώστη από το ανώφλι, το μήκος της προέκτασης της φλόγας μειώνεται.
5	Nilsson et al. (2018)	Η μείωση που επιφέρει στην αδιαβατική θερμοκρασία επιφανείας η τοποθέτηση εξώστη βάθους 60 cm ψηλότερα κατά 35 cm είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με την τοποθέτηση στο ύψος του ανωφλίου. Στην 1 ^η περίπτωση τα επιτρεπόμενα όρια τους σουηδικού κώδικα κτιρίων δεν υπερβαίνονται, ενώ στη 2 ^η περίπτωση υπερβαίνονται για 1 m πάνω από το ανώφλι.

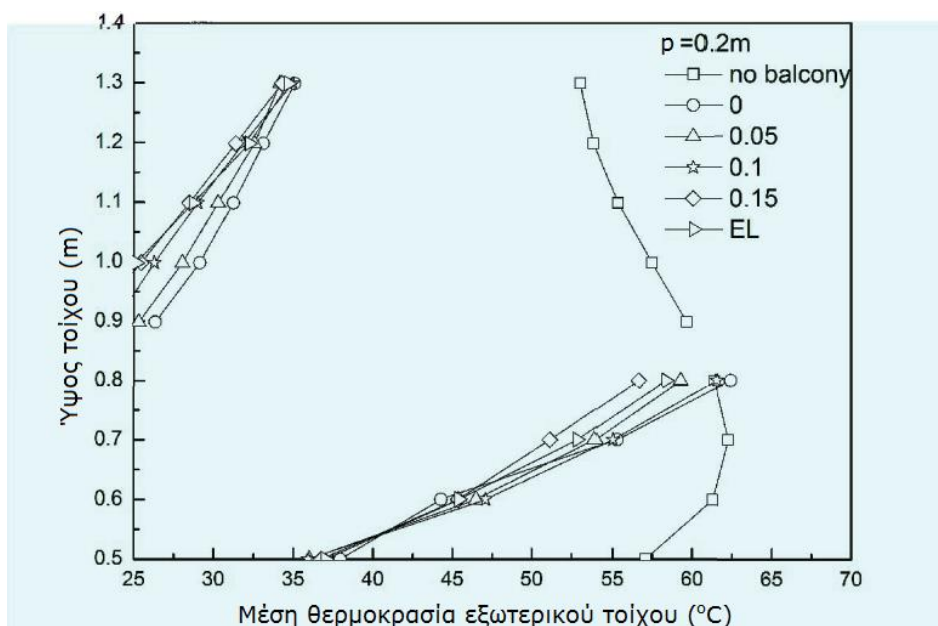
2.2.3 Επίδραση του πλάτους του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα

Μελετώντας τα αποτελέσματα ερευνών κατά τις οποίες έγιναν πειραματικές και υπολογιστικές δοκιμές με μεταβλητά πλάτη εξώστη, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του εξώστη, τόσο καλύτερα παρεμποδίζεται η κατακόρυφη διάδοση της φλόγας. Επίσης, οι θερμοκρασίες πάνω από τον εξώστη είναι χαμηλότερες, καθότι η ΦΕΑ διατηρείται μακριά από το τοίχωμα της πρόσοψης (Morgado et al., 2013, Nilsson et al., 2018).

Η έρευνα των Morgado et al. (2013) από το πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα της Πορτογαλίας, η οποία περιλαμβάνει πειραματικές δοκιμές και υπολογιστική προσομοίωση, αναφέρει ότι εάν ο εξώστης προεκταθεί κατά πλάτος κατά 1 m και από τις δύο πλευρές του ανοίγματος, οι θερμοκρασίες πάνω από τον εξώστη θα είναι αρκετά χαμηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία το πλάτος του εξώστη ισούται με το πλάτος του ανοίγματος και πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει καθόλου εξώστης.

Στην έρευνα των Nilsson et al. (2018) η επίδραση του πλάτους του εξώστη μελετάται για δύο διαφορετικά ύψη του εξώστη από το άνοιγμα. Για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων χρησιμοποιείται και πάλι το Σχήμα 2.22. Στην περίπτωση κατά την οποία ο εξώστης βρίσκεται χαμηλά, δηλαδή ακριβώς πάνω από το ανώφλι του ανοίγματος, είναι εμφανές ότι ο πλατύτερος εξώστης οδηγεί σε πολύ χαμηλότερες τιμές της αδιαβατικής θερμοκρασίας επιφάνειας σε σύγκριση με τον στενότερο. Είναι ενδιαφέρον ότι με τη χρήση του πλατύτερου εξώστη οι τιμές των θερμοκρασιών δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια που ορίζονται από τον οικοδομικό κώδικα, ενώ στην άλλη περίπτωση οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερη από 280 °C από το ανώφλι της πόρτας έως και περίπου 1 m καθ' ύψος. Στην περίπτωση κατά την οποία ο εξώστης τοποθετείται σε μεγαλύτερο ύψος πάνω από το ανώφλι (συγκεκριμένα 35 cm), το Σχήμα 2.22 δείχνει ότι ο στενότερος εξώστης συμπεριφέρεται ελαφρώς αποδοτικότερα από τον πλατύτερο, καθώς οι θερμοκρασίες της επιφάνειας είναι λίγο χαμηλότερες καθ'όλο το ύψος πάνω από το ανώφλι. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνεται ότι οι έρευνες των Morgado και Nilsson συμφωνούν εν μέρει μεταξύ τους.

Τέλος, η ερευνητική ομάδα των Zhao et al. (2014) πραγματοποιώντας μία σειρά υπολογιστικών δοκιμών στις οποίες μεταβαλλόταν το βάθος και το πλάτος του εξώστη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για σταθερό βάθος του εξώστη, όταν το πλάτος του αυξάνεται η θερμοκρασία στην πρόσοψη του κτιρίου ελαττώνεται. Στο Σχήμα 2.24 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης θερμοκρασίας της πρόσοψης συναρτήσει του ύψους από το έδαφος. Παρατηρείται μία ασυνέχεια σε όλες τις καμπύλες, καθώς το κάτω τμήμα των καμπυλών αφορά το τμήμα της πρόσοψης κάτω από το άνοιγμα και το επάνω αφορά το τμήμα της πρόσοψης πάνω από τον εξώστη. Ως βάθος του μπαλκονιού έχουν επιλεγεί τα 20 cm, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό. Εξετάζοντας το άνω τμήμα των καμπυλών, συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται το πλάτος του ανοίγματος οι μέσες θερμοκρασίες της πρόσοψης μειώνονται ελαφρώς. Επισημαίνεται ότι οι τιμές 0, 0.05, 0.1 και 0.15 m αναφέρονται στην κατά πλάτος προέκταση του εξώστη από τις δύο πλευρές του ανοίγματος. Με άλλα λόγια η τιμή 0 υποδεικνύει ότι το πλάτος του εξώστη ισούται με αυτό του ανοίγματος.



Σχήμα 2.24: Σύγκριση της μέσης θερμοκρασίας επιφάνειας του εξωτερικού ύψους για διαφορετικά πλάτη εξώστη (Zhao et al., 2014)

Μία σύνοψη των ανωτέρω αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Συμπεράσματα για την επίδραση του πλάτους του εξώστη στη ΦΕΑ

A/A	Παραπομπή	Σχόλια / Συμπεράσματα
1	Morgado et al. (2013)	Οι θερμοκρασίες πάνω από τον εξώστη θα είναι αρκετά χαμηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία το πλάτος του εξώστη ισούται με το πλάτος του ανοίγματος και πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει καθόλου εξώστης
2	Zhao et al. (2014)	Όσο αυξάνεται το πλάτος του ανοίγματος οι μέσες θερμοκρασίες της πρόσοψης πάνω από τον εξώστη μειώνονται
3	Nilsson et al. (2018)	Όταν ο εξώστης βρίσκεται σε κάποιο ύψος από το ανώφλι, ο πλατύτερος εξώστης οδηγεί σε πολύ χαμηλότερες τιμές της αδιαβατικής θερμοκρασίας επιφάνειας από τον στενότερο. Όταν ο εξώστης βρίσκεται στο ύψος του ανωφλίου, ο στενότερος εξώστης οδηγεί σε λίγο χαμηλότερες τιμές της αδιαβατικής θερμοκρασίας επιφάνειας από τον πλατύτερο.

2.2.4 Επίδραση του τύπου του εξώστη στην εξερχόμενη φλόγα

Ορισμένες επιστημονικές έρευνες επισημαίνουν τη σπουδαιότητα και άλλων παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός εξώστη, εκτός από το βάθος, το πλάτος και το ύψος του από το ανώφλι του ανοίγματος. Οι Mammoser and Battaglia (2003) διεξήγαγαν υπολογιστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το κτιριακό μοντέλο των Suzuki et al. (2000). Στόχος τους ήταν η διερεύνηση της επίδρασης όχι μόνο του βάθους του εξώστη στη συμπεριφορά της φωτιάς αλλά και του τύπου του μπαλκονιού γενικότερα. Για το λόγο αυτό μελέτησαν τρεις διαφορετικούς τύπους μπαλκονιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25.



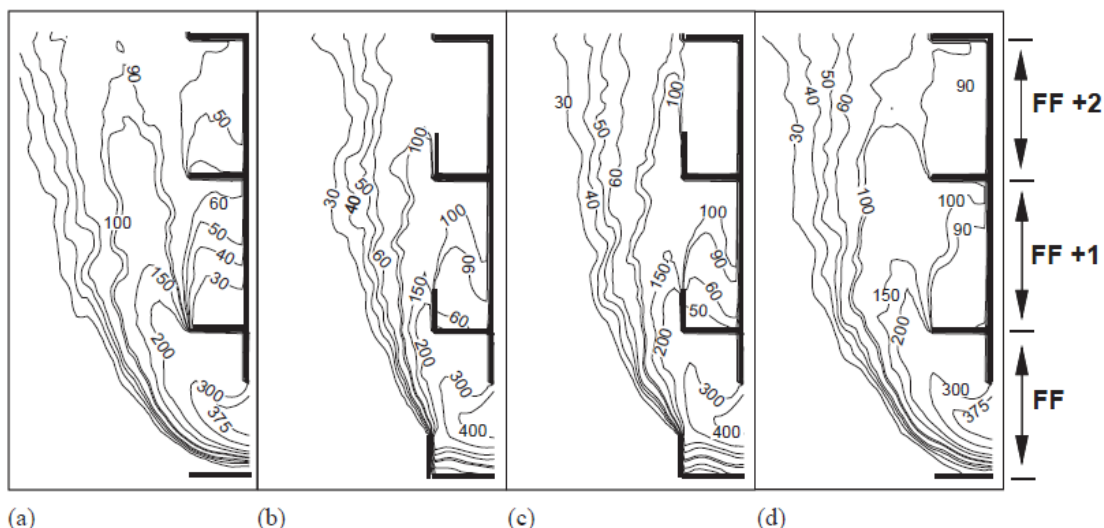
Σχήμα 2.25 Τύποι μπαλκονιών από αριστερά προς τα δεξιά: (a) Τύπος I, (b) Τύπος II, (c) Τύπος III, (d) Τύπος IV (Mammoser and Battaglia, 2003)

Ο Πίνακας 2.5 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου εξώστη.

Πίνακας 2.5: Συμπεράσματα για την επίδραση του πλάτους του εξώστη στη ΦΕΑ

Τύπος	Δομικό υλικό	Κιγκλίδωμα	Διαχωριστικός τοίχος	Σχήμα 2.24
I	Χάλυβας	Ανοικτό	Ανοικτό	a
II	Σκυρόδεμα/Τούβλο	Συμπαγές	Συμπαγές	b
III	Χάλυβας/Τούβλο	Συμπαγές	Ανοικτό	c
IV	Χάλυβας/Σκυρόδεμα	Ανοικτό	Συμπαγές	d

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.25.

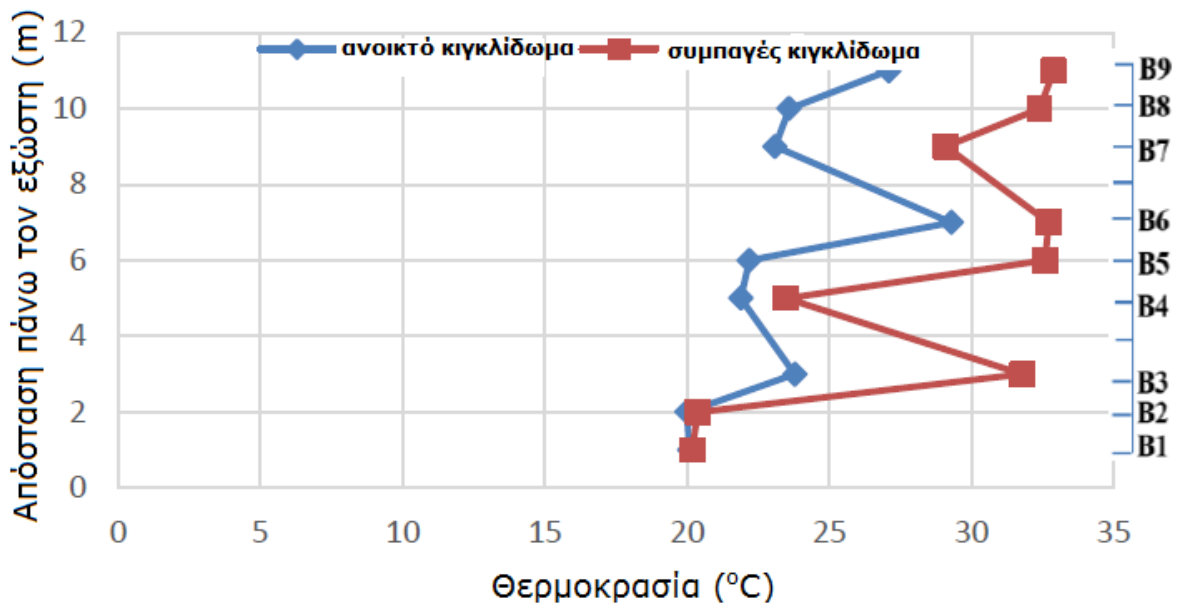


Σχήμα 2.26 Ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για φωτιάς προπανίου ισχύος 48 kW για 4 τύπους μπαλκονιού: (a) Τύπος I, (b) Τύπος II, (c) Τύπος III, (d) Τύπος IV (Mammoser and Battaglia, 2003)

Η μέση θερμοκρασία στο παράθυρο του ορόφου FF για τον τύπο μπαλκονιού I είναι εμφανώς χαμηλότερη από τους τύπους II και III, και παρόμοια με τον τύπο IV. Επομένως, οι τύποι εξώστη II και III εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος. Το συμπαγές κιγκλίδωμα περιορίζει τη ροή των καυ-

σαερίων, τα οποία συμπαρασύρονται από τη ροή του ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος συνεισφέρει στην δημιουργία συνθηκών καλύτερης ανάμειξης εντός του διαμερίσματος εντείνοντας το φαινόμενο της καύσης. Ο τύπος μπαλκονιού I επιτρέπει στο πλούμιο της φωτιάς να απομακρυνθεί από τον εξωτερικό τοίχο. Στα ύψη FF+1 και FF+2 εμφανίζονται εύρη θερμοκρασιών μεταξύ 25°C και 50°C και 30°C και 60°C αντίστοιχα. Για τους τύπους εξώστη II και III (Σχήμα 2.25 (b) και (c)), ο καπνός προσκολλάται στο συμπαγές κιγκλίδωμα. Έτσι, ο καπνός και οι φλόγες δεν απομακρύνονται από την πρόσοψη, αλλά συμπαρασύρονται και παγιδεύονται μερικώς στου ορόφους FF+1 και FF+2. Για το λόγο αυτό μετρώνται θερμοκρασίες ύψους 100°C στον όροφο FF+1. Ο εξώστης τύπου IV (Σχήμα 2.25 (d)), με συμπαγή διαχωριστικό τοίχο, εμφανίζει παρόμοιες θερμοκρασίες με αυτές των τύπων II και III, αλλά το πλούμιο των καυσαερίων απομακρύνεται από την πρόσοψη κατά παρόμοιο τρόπο με τον τύπο I. Λόγω της γεωμετρίας του τύπου IV, ο καπνός πιθανώς να προσκολλάται στο διαχωριστικό τοίχο, και από εκεί κατευθύνεται προς τα πάνω, όπως συμβαίνει και με μία καπνοδόχο. Με βάση την κίνηση των καυσαερίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26, ο τύπος εξώστη I είναι εμφανώς ο πιο αποδοτικός στη μείωση των θερμοκρασιών στους ορόφους πάνω από το πυροδιαμέρισμα (Mammoser and Battaglia, 2003).

Παρόμοια έρευνα διεξήχθη από τους Mutafi et al. (2017) στη Μαλαισία, κατά την οποία μελετήθηκε η επίδραση δύο διαφορετικών τύπων εξώστη στην κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς στο αίθριο ενός συγκροτήματος διαμερισμάτων ή ενός πολυκαταστήματος. Ο πρώτος τύπος εξώστη έφερε ανοικτό κιγκλίδωμα ενώ ο δεύτερος συμπαγές. Από το Σχήμα 2.27 είναι ξεκάθαρο ότι οι τιμές της θερμοκρασίας πάνω από τον εξώστη είναι χαμηλότερες στην περίπτωση των ανοικτών κιγκλιδωμάτων. Επίσης, επειδή το πλούμιο της φωτιάς παγιδεύεται στο συμπαγές κιγκλίδωμα, η συγκέντρωση του καπνού αυξάνεται στους επάνω ορόφους, ενέχοντας σοβαρούς κινδύνους δηλητηριασμού των ανθρώπων που ενδεχομένως να βρίσκονται εκεί. Αντίθετα η έρευνα έδειξε ότι εάν το κιγκλίδωμα είναι ανοικτό, τα ποσοστά συγκέντρωσης του καπνού είναι πολύ χαμηλότερα και δεν παρατηρείται κίνδυνος δηλητηριασμού (Mutafi et al., 2017).

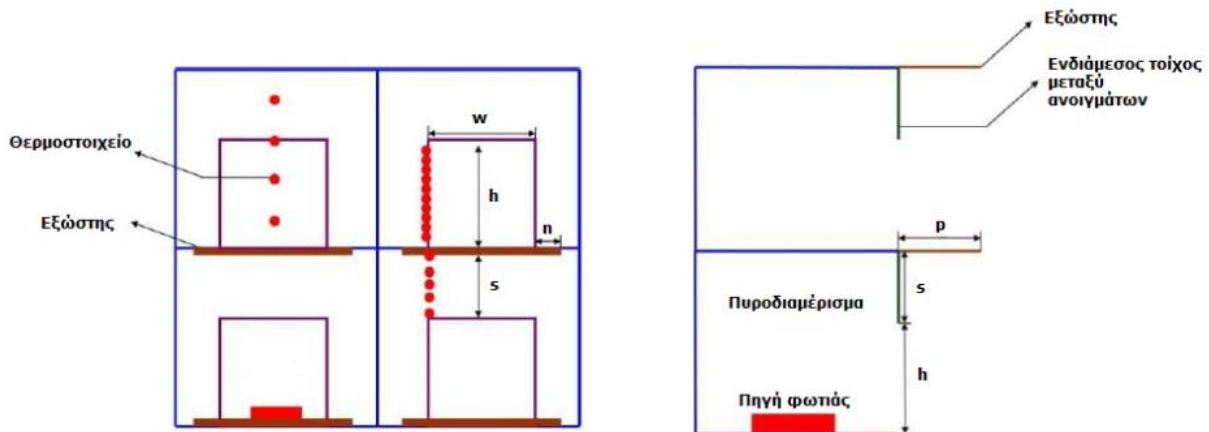


Σχήμα 2.27 Θερμοκρασία των καυσαερίων συναρτησί της απόστασης πάνω από τον εξώστη σε αίθριο, για δύο τύπους εξώστη: με ανοικτό (μπλε) και συμπαγές (κόκκινο) κιγκλίδωμα (Mutafi et al., 2017)

2.3 Επίδραση της ταχύτητας του εξωτερικού ανέμου στην εξερχόμενη φλόγα κατά την περίπτωση ύπαρξης εξώστη πάνω από το άνοιγμα

Ο εξωτερικός άνεμος αναμφίβολα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς σε πολυώροφα κτίρια μεγάλου ύψους (Zhao et al., 2014). Δύο ερευνητικές ομάδες από την Κίνα (Zhao et al., 2014, Wang et al., 2016) πραγματοποίησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις ΦΕΑ με ύπαρξη εξώστη, υπό διαφορετικές ταχύτητες εξωτερικού ανέμου.

Με βάση διαθέσιμα στατιστικά ανεμολογικά δεδομένα των τελευταίων ετών, ο Zhao επέλεξε ως χαμηλή ταχύτητα πλευρικού ανέμου σε ύψος 10 m από το έδαφος τα 3 m/s και ως υψηλή ταχύτητα πλευρικού ανέμου σε ύψος 100 m από το έδαφος τα 6 m/s, με κατεύθυνση ανέμου δυτική και στις δύο περιπτώσεις. Θέτοντας ως κρίσιμη θερμοκρασία έκθεσης του υαλοπίνακα του άνω ορόφου τους 70°C διεξήγαγε μία σειρά από υπολογιστικά πειράματα μεταβάλλοντας παραμετρικά το βάθος του εξώστη, το ύψος του ανοίγματος από άνοιγμα, το πλάτος του εξώστη και το πλάτος του ανοίγματος. Στο Σχήμα 2.28 απεικονίζεται το μοντέλο του κτιρίου που προσομοιώθηκε.



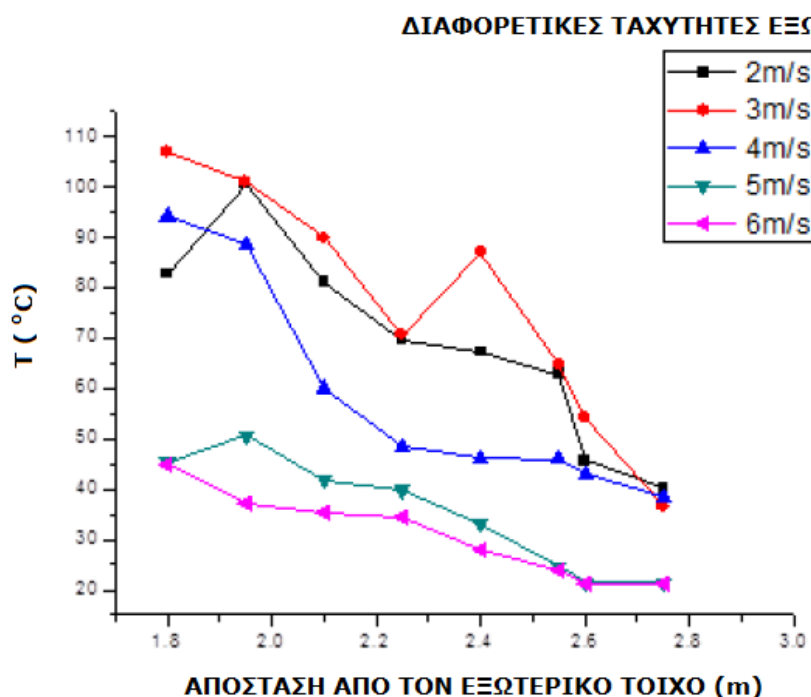
Σχήμα 2.28: Πρόσοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά) μοντέλου κτιρίου προσομοίωσης (Zhao et al., 2014)

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι υπό τη συνθήκη της χαμηλής ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (3 m/s), το πλούμιο εξαπλωνόταν διαγωνίως προς τα πάνω, απειλώντας περισσότερο τα δωμάτια πάνω από το πυροδιαμέρισμα, και ιδιαίτερα το πάνω δεξιά. Το πλάτος του μπαλκονιού και το ύψος του ενδιάμεσου τοίχου μεταξύ των ανοιγμάτων επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό στην αποτροπή της κατακόρυφης διάδοσης του πλουμίου κατά μήκος της πρόσοψης του κτιρίου με κυρίαρχο το πλάτος του εξώστη. Υπό τη συνθήκη της υψηλής ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (6 m/s), το πλούμιο εξαπλωνόταν κατά την οριζόντια διεύθυνση, απειλώντας το δωμάτιο δεξιά του πυροδιαμερίσματος στο ίδιο επίπεδο. Το πλάτος και το βάθος του εξώστη επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό στην αποτροπή της κατακόρυφης διάδοσης του πλουμίου, με κυρίαρχο το βάθος του εξώστη. Και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται πως όσο αυξάνεται το πλάτος του ανοίγματος τόσο περισσότερο υποβοηθείται η κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς.

Οι Wang et al. (2016) αρχικά πραγματοποίησαν πειράματα υπό κλίμακα 1/2 και κατόπιν προσομοίωσαν το κτίριο σε υπολογιστικό πρόγραμμα μεταβάλλοντας προοδευτικά τις ταχύτητες του εξωτερικού ανέμου, προκειμένου να διερευνήσουν την επίδρασή του στη θερμοκρασία της πρόσοψης του κτιρίου. Στο Σχήμα 2.29

απεικονίζονται οι θερμοκρασίες συναρτήσει της απόστασης από τον τοίχο για διάφορες ταχύτητες εξωτερικού ανέμου.

Είναι ενδιαφέρον ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες τόσο πάνω στην πρόσοψη όσο και σε κάποια απόσταση από αυτήν κατά την οριζόντια διεύθυνση εμφανίζονται για ταχύτητα ανέμου ίση με 3 m/s. Δεδομένου ότι ως κρίσιμη θερμοκρασία του υαλοπίνακα του άνω ορόφου έχουν επιλεγεί οι 70°C, ο εξώστης βάθους 60 cm που έχει επιλεγεί δεν μπορεί να επιτελέσει επαρκώς το ρόλο του ως φράγμα για την κατακόρυφη διάδοση του πλουμίου, καθώς η θερμοκρασία στην πρόσοψη υπερβαίνει κατά πολύ την κρίσιμη τιμή της. Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 4 m/s φαίνεται ότι το πλούμιο έχει ανοδική πορεία, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 4 m/s το πλούμιο εξαπλώνεται περισσότερο κατά την οριζόντια διεύθυνση, αυξάνοντας τον κίνδυνο διάδοσης της φωτιάς σε γειτονικά διαμερίσματα του ίδιου επιπέδου. Παρατηρείται ότι τα συμπεράσματα των δύο ερευνών συμφωνούν.



Σχήμα 2.29: Απόσταση από την πρόσοψη συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικές ταχύτητες εξωτερικού ανέμου (Wang et al., 2016)

2.4 Ομοιότητα

Είναι προφανές ότι οι φωτιές που εκδηλώνονται είτε σε κτίρια είτε στο φυσικό περιβάλλον, συμβαίνουν σε φυσική κλίμακα. Ιδανικά, τα πειράματα που διεξάγονται σε κλίμακα 1:1 δίνουν περισσότερο ακριβείς εκτιμήσεις όσον αφορά τη συμπεριφορά της φλόγας, αλλά είναι πολύ δαπανηρά, απαιτούν χρόνο και εγκυμονούν κινδύνους (Jolly and Saito, 1992). Επίσης, συχνά η συμπτωματική ύπαρξη του ανέμου, ο οποίος είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί σε πείραμα πραγματικών διαστάσεων, μπορεί να μεταβάλει τη φύση της φωτιάς και να καταστήσει ακόμα πιο περίπλοκη την πειραματική διαδικασία. Για όλους τους παραπάνω λόγους, η μελέτη των φαινομένων αυτών σε συστήματα υπό κλίμακα αποτελεί μία επιστημονική στρατηγική που εφαρμόζεται πολύ συχνά από ερευνητές σε εργαστήρια με ελεγχόμενες συνθήκες. Η χρήση της διαστατικής

ανάλυσης, η οποία οδηγεί σε σημαντικές αδιάστατες παραμέτρους, είναι μία διαδεδομένη τεχνική για τη γενίκευση των πειραματικών αποτελεσμάτων και για τη δημιουργία των “νόμων ομοιότητας” για ένα σύστημα. Η μελέτη των φαινομένων φωτιάς σε ένα εργαστήριο μπορεί επίσης να δώσει μία επαρκή εικόνα για τους μηχανισμούς και τη συμπεριφορά του συστήματος ακόμα και αν δεν εξαχθούν ακριβή ποσοτικά αποτελέσματα (Quintiere, 1989).

Παρά το γεγονός ότι οι βασικές εξισώσεις ρευστοδυναμικής έχουν αναπτυχθεί εδώ και 200 χρόνια, δεν μπορούν να επιλυθούν πλήρως ακόμα και στους ισχυρότερους υπολογιστές. Η διεξαγωγή πειραμάτων σε αεροσήραγγες επιτρέπει τη μελέτη της ροής πάνω σε πολύπλοκες επιφάνειες σε μικρότερη γεωμετρική κλίμακα διατηρώντας σταθερό τον αριθμό Reynolds Re . Ο αριθμός Re αντιστοιχεί στην αναλογία των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους:

$$Re = \frac{\rho u^2 l^2}{\mu (u/l) l^2} = \frac{\rho u l}{\mu} = \frac{u l}{\nu} \quad (2.1)$$

Όπου:

- μ : Η δυναμική συνεκτικότητα (Pa·s)
- ν : Η κινηματική συνεκτικότητα (m²/s)
- l : Η κλίμακα μήκους (m)
- u : Η ταχύτητα (m/s)
- ρ : Η πυκνότητα (kg/m³)

Παρόλο που ο αριθμός Re εξασφαλίζει την ομοιότητα ανάμεσα στο μοντέλο και το πρωτότυπο, πολλά φαινόμενα απαιτούν τη διατήρηση περισσότερων αδιάστατων αριθμών προκειμένου να διασφαλιστεί η πλήρης ομοιότητα. Η φωτιά ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. Ωστόσο, αυτό δεν αποκλείει τη χρήση μοντέλων υπό κλίμακα ή αδιάστατων συσχετίσεων για φαινόμενα φωτιάς με σκοπό τη γενίκευσή τους σε άλλες κλίμακες ή συνθήκες.

Η μελέτη υπό κλίμακα απαιτεί καλή γνώση της φυσικής, έτσι ώστε να αναγνωριστούν και να συμπεριληφθούν όλες οι κυρίαρχες μεταβλητές. Ορισμένες τεχνικές χρησιμοποιούν ιδιαίτερα τον αδιάστατο αριθμό Froude Fr , ο οποίος διατηρείται σταθερός εις βάρος του αριθμού Re , ο οποίος πλέον λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή, αρκεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε η ροή να είναι τυρβώδης. Η μοντελοποίηση με βάση τον αριθμό Fr αποδεικνύεται κατάλληλη για την προσομοίωση της ροής του καπνού και των φαινομένων φωτιάς. Ο αδιάστατος αυτός αριθμός ορίζεται ως ο λόγος της αδράνειας ροής προς το εξωτερικό πεδίο, με το δεύτερο πολλές φορές να είναι η βαρύτητα:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gl}} \quad (2.2)$$

Επιτυχημένες μοντελοποιήσεις υπό κλίμακα έχουν συζητηθεί από τους Heskestad (1973), Croce (1978), Quintiere et al. (1978) και τους Emori and Saito (1983). Η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των φαινομένων φωτιάς αναλύεται εκτενώς από τον Quintiere (2006), όπου οι ιδιότητες και άλλες σταθερές που σχηματίζουν τις αδιάστατες παραμέτρους περιγράφονται με το σύμβολο Π. Με τις αδιάστατες ομάδες (μεταβλητές) μπορούν να δημιουργηθούν προσεγγιστικές σχέσεις, με τη χρησιμοποίηση νόμων και ισολογισμών ενέργειας σύμφωνα με τη θεωρία με

στόχο τη διευκόλυνση της μοντελοποίησης της φωτιάς και των φαινομένων που τη διέπουν. Η διαδικασία της μοντελοποίησης χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις -π.χ. συστήματα πυρασφάλειας-, παρόλο που η ομοιότητα δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτική, καθώς είναι αδύνατο να διατηρηθούν σταθερές όλες οι παράμετροι των Π.

2.4.1 Δημιουργία αδιάστατων ομάδων

Για τη δημιουργία των αδιάστατων ομάδων-μεταβλητών χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις μέθοδοι.

- Η θεωρία των Π (Buckingham Pi method).
- Η μέθοδος των μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equation method).
- Η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis).

2.4.1.1 Θεωρία των Π (Buckingham Pi method)

Το θεώρημα των Π ξεκινά με ένα επιλεγμένο σύνολο μεταβλητών και παραμέτρων που σχετίζονται με μία συγκεκριμένη εφαρμογή μοντελοποίησης. Στη συνέχεια καθορίζονται οι αριθμοί των φυσικών ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο αριθμός των Π ομάδων ισούται με τον αριθμό των μεταβλητών μείον τον αριθμό των διαστάσεων. Γενικά, η ταχύτητα σε μία ροή (u) είναι συνάρτηση των x, y, l, u_∞, ρ και μ . Στο πρόβλημα αναγνωρίζονται επτά μεταβλητές: $x, y, l, u, u_\infty, \rho$ και μ . Δεδομένου ότι υπάρχουν τρεις διαστάσεις, οι M (μάζα), L (μήκος) και T (χρόνος), τρεις μεταβλητές ή παράμετροι μπορούν να απαλειφθούν δημιουργώντας τέσσερις αδιάστατες ομάδες: Π_1, Π_2, Π_3 και Π_4 .

Επιλέγονται τρεις επαναλαμβανόμενες μεταβλητές, όπως οι u_∞, l και μ και σχηματίζονται οι ομάδες Π από τις υπόλοιπες μεταβλητές. Έστω ότι $\Pi_1 = u_\infty^a, l^b, \mu^c, \rho$. Επομένως, από τη διαστατική ανάλυση η Π_1 δεν θα πρέπει να έχει καθόλου διαστάσεις. Εξισώνοντας τις δυνάμεις για κάθε διάσταση προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} M: 0 &= c + 1 & \therefore c &= -1 \\ L: 0 &= a + b - c - 3 & \therefore a + b &= 2 \\ T: 0 &= -a - b & \therefore a &= 1, b = -1 \end{aligned}$$

Υπολογίζεται ότι $\Pi_1 = u_\infty l \rho / \mu \equiv Re$, (Αριθμός Reynolds), εφόσον ισχύει ότι $\mu \sim ML^{-1}T^{-1}$. Οι υπόλοιπες ομάδες Π ευρίσκονται κατά παρόμοιο τρόπο:

$$\Pi_2 = u/u_\infty, \quad \Pi_3 = x/l \quad \text{και} \quad \Pi_4 = y/l$$

Η αδιάστατη συναρτησιακή σχέση θα είναι η εξής:

$$\frac{u}{u_\infty} = \text{function}\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, Re\right)$$

2.4.1.2 Μέθοδος των μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equation method)

Η μέθοδος αυτή ξεκινά με τη γνώση της κυρίαρχης εξίσωσης. Η κυρίαρχη εξίσωση για σταθερή διδιάστατη ροή χωρίς κλίση πίεσης είναι:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Με οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} y=0, & & u=v=0 \\ y \rightarrow \infty, & & u=u_\infty \\ x=0, & & u=u_\infty \end{aligned}$$

Η διατήρηση της μάζας προσθέτει ακόμη μία απαραίτητη εξίσωση, αλλά ουσιαστικά δίνει πληροφορίες για την y συνιστώσα της ταχύτητας. Οι αδιάστατες μεταβλητές επιλέγονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \hat{u} &= u / u_\infty, & \hat{v} &= v / v_\infty \\ \hat{x} &= x / l, & \hat{y} &= y / l \end{aligned}$$

Η αντικατάσταση στην Εξίσωση (2.3) δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$\hat{u} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} + \hat{v} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} = \left(\frac{\mu}{\rho u_\infty l} \right) \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{y}^2}$$

2.4.1.3 Διαστατική ανάλυση (dimensional analysis)

Κατά τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας όγκος ελέγχου για την προσέγγιση του ρευστού στο οριακό στρώμα και την εφαρμογή του νόμου του Νεύτωνα για τη συνεκτικότητα. Όπου μπορούν να εφαρμοστούν διαφορικές σχέσεις, χρησιμοποιείται μόνο η διαστατική ανάλυση για το σχηματισμό μίας σχέσης. Επιπλέον, δεν αναζητείται η ακριβής διαμόρφωση του όγκου ελέγχου αλλά μία προσεγγιστική, λειτουργική μορφή του.

Ισχύει για μοναδιαίο βάθος στην κατεύθυνση z :

$$\rho u^2 (x \times 1) \sim \mu \frac{u}{y} (x \times 1)$$

Και σε αδιάστατη μορφή:

$$\rho \left(\frac{u}{u_\infty} \right)^2 \left(\frac{x}{l} \right) \sim \left(\frac{\mu}{u_\infty l} \right) \left(\frac{u}{u_\infty} \right) \left(\frac{y}{l} \right) \left(\frac{x}{l} \right)$$

Όπου:

$$\frac{u}{u_\infty} \equiv \hat{u} = \text{function}(\hat{x}, \hat{y}, Re)$$

2.4.2 Αδιάστατες Ομάδες από Εξισώσεις Διατήρησης

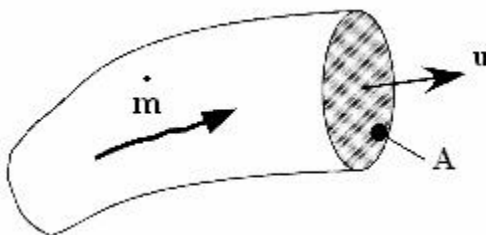
Οι αδιάστατες ομάδες που εφαρμόζονται στα φαινόμενα της φωτιάς, προέρχονται από την τρίτη προσέγγιση χρησιμοποιώντας τις διαστατές μορφές των εξισώσεων διατήρησης. Η πυκνότητα θεωρείται σταθερή, ρ_∞ , χωρίς καμία απώλεια σε γενικά πλαίσια, εκτός από τον όρο της άνωσης. Επίσης, η εξίσωση της ορμής εξετάζεται ενδελεχώς μόνο κατά την κάθετη συνιστώσα. Οι παράμετροι κανονικοποίησης για τις μεταβλητές συμβολίζονται ως $(\hat{\cdot})^*$. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κανονικοποιημένοι παράγοντες δεν αποτελούν το φυσικό ισοδύναμο της αντίστοιχης μεταβλητής, πχ x/l όπου το l είναι το γεωμετρικό μήκος. Κατά αυτόν τον τρόπο εξάγονται οι ομάδες Π και οι αδιάστατες μεταβλητές διατηρούνται, πχ $\hat{u} = u/u^*$ και $\hat{x} = x/l^*$. Αφού προκύψουν οι ομάδες $\{\Pi\}_i$ εξετάζεται η χρήση τους σε διάφορες συσχετίσεις, και η χρησιμότητά τους σε εφαρμογές μοντελοποίησης μικρής κλίμακας. Ο τρόπος προσδιορισμού διαφόρων Π έχει αναλυθεί από ερευνητές στην αντίστοιχη βιβλιογραφία (Quintiere, 2006), ενώ στην εργασία αυτή γίνεται κυρίως αναφορά στις τελικές εξισώσεις που περιγράφουν τις αδιάστατες ομάδες.

2.4.2.1 Διατήρηση της μάζας

Ο ρυθμός ροής μάζας δίνεται από την Εξίσωση (2.4) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.30.

$$\dot{m} = \rho u A \quad (2.4)$$

Έτσι, η επιφάνεια A , θα προσδιορίζεται με βάση τη μονάδα κλίμακας l , ως $A \sim l^2$ και ο όγκος ως l^3 ομοίως.



Σχήμα 2.30 Ρυθμός ροής της μάζας

2.4.2.2 Διατήρηση της ορμής

Η διατήρηση της ορμής, ή αλλιώς ο 2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα, εφαρμόζεται σε ένα σωματίδιο ή σε ένα σταθερό σύνολο σωματιδίων, που καλείται σύστημα. Η ταχύτητα ορίζεται πάντα σε σχέση με ένα σταθερό ή αδρανειακό επίπεδο αναφοράς. Ισχύει λοιπόν ότι:

$$F = \frac{d(mu)}{dt} \quad (2.5)$$

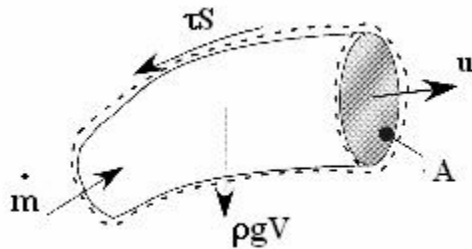
Όπου F είναι το διανυσματικό σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα και u η ταχύτητα του συστήματος. Ο 2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα, με βάση έναν ορισμένο όγκο ελέγχου (CV) και ορίζοντας ως u_x την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας κατά τον άξονα x εφαρμόζεται στην Εξίσωση 2.6:

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho u_x dV + \iint_{CS} \rho u_x n (u - w) dS \quad (2.6)$$

Περιφραστικά, η Εξίσωση (2.6) εκφράζεται ως εξής:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Άθροισμα των δυνάμεων} \\ \text{που ασκούνται στο ρευστό} \\ \text{σε όλο τον όγκο ελέγχου} \\ \text{κατά την κατεύθυνση } x \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Ρυθμό μεταβολής της} \\ \text{ορμής στον όγκο ελέγχου} \\ \text{κατά τον άξονα } x \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Καθαρός ρυθμός της} \\ \text{ορμής του ρευστού που ρέει} \\ \text{έξω από τον όγκο ελέγχου} \\ \text{κατά την κατεύθυνση } x \end{array} \right]$$

Στο Σχήμα 2.31 απεικονίζεται ο όγκος ελέγχου με τις δυνάμεις του βάρους $\rho g V$ και τις διατμητικές δυνάμεις τS που ασκούνται στο ρευστό:



Σχήμα 2.31 Διατήρηση της ορμής

Με την εισαγωγή των δυνάμεων αυτών, όπως επίσης και της πίεσης, η σχέση για τη διατήρηση της ορμής κατά τον κάθετο άξονα δίνεται από την Εξίσωση (2.7):

$$\rho V \frac{du}{dt} + \dot{m}u \sim (\rho_\infty - \rho) gV + PA + \tau S \quad (2.7)$$

Η σχέση μεταξύ των όρων της Εξίσωσης (2.7) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση παραμέτρων. Για παράδειγμα, για συνθήκη μη εξαναγκασμένης ροής δεν υπάρχει προφανής παράγοντας κλίμακας (πχ u_∞). Ωστόσο, μπορεί να καθορισθεί ένας παράγοντας κλίμακας που είναι κατάλληλος για συνθήκες φυσικής συναγωγής. Η Εξίσωση (2.8) δίνει τη συσχέτιση της ροής της ορμής με την ανωστική δύναμη:

$$\rho u^2 l^2 \sim (\rho_\infty - \rho) g l^3 \quad (2.8)$$

Από το νόμο των τέλειων αερίων υπό σταθερή πίεση προκύπτει η Εξίσωση (2.9):

$$\frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho} = \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}} \quad (2.9)$$

Επομένως, ισχύει ότι:

$$u \sim \sqrt{\frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}} gl} \sim \sqrt{gl} \quad (2.10)$$

Ένας κατάλληλος παράγοντας κανονικοποίησης για την ταχύτητα είναι ο εξής:

$$u^* = \sqrt{gl} \quad (2.11)$$

Ομοίως, εξισώνοντας τον όρο της ορμής με την άνωση προκύπτει η χρονοκλίμακα:

$$t^* \sim \frac{u^*}{g} \sim \sqrt{l/g} \quad (2.12)$$

Η πίεση και η τάση κανονικοποιούνται ως εξής:

$$\tau^* \sim P^* \sim \rho_{\infty} gl \quad (2.13)$$

Χρησιμοποιώντας το νόμο του Νεύτωνα για τη συνεκτικότητα προκύπτει η Εξίσωση (2.14):

$$\tau^* \sim \mu \frac{\partial u}{\partial x} \sim \mu \frac{u^*}{l} \quad (2.14)$$

Η εξίσωση της ροής της ορμής με τους όρους των τάσεων δίνει την Εξίσωση (2.15):

$$\rho_{\infty} u^{*2} l^2 \sim \mu \frac{u^*}{l} l^2 \quad (2.15)$$

Με βάση τις Εξισώσεις (2.1) και (2.15) εξαγεται η πρώτη αδιάστατη ομάδα Π_1 η οποία αφορά τον αριθμό Reynolds, και δίνεται από την Εξίσωση (2.16) ως εξής:

$$Re = \Pi_1 \sim \frac{\rho_{\infty} u^* l}{\mu} \sim \frac{\text{Ορμή}}{\text{Διατμητική τάση}} \quad (2.16)$$

Εναλλακτικά, η Εξίσωση (2.16) μπορεί να γραφεί με όρους αδιάστατης ταχύτητας και χρησιμοποιώντας το πρώτο μέρος της Εξίσωσης (2.10) για το u^* , δίνεται η προσεγγιστική λύση με τη μορφή της Εξίσωσης (2.17):

$$\hat{u} \sim \left[\frac{\mu}{\rho_\infty [(T - T_\infty) / T_\infty]^{1/2} \sqrt{g l}} \right]^{1/2} = \left(\frac{1}{Gr} \right)^{1/4} \quad (2.17)$$

Όπου ο Gr αναπαριστά τον αριθμό Grashof. Ο Gr είναι εναλλακτικός του Re για ροές με φυσική συναγωγή.

2.4.2.3 Εξίσωση της ενέργειας

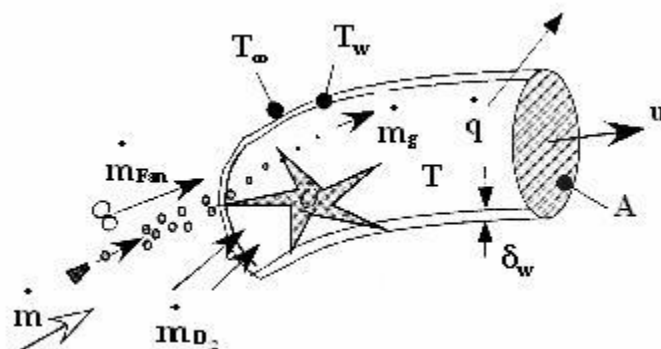
Για την εξαγωγή περισσότερων αδιάστατων ομάδων Π χρησιμοποιείται η εξίσωση ενέργειας στην οποία λαμβάνουν μέρος διαδικασίες όπως η καύση, η μεταφορά θερμότητας κ.α. Το Σχήμα 2.32 αποτελεί τη βάση των φυσικών και χημικών διεργασιών που λαμβάνονται υπόψη.

Η παροχή μάζας περιλαμβάνει καύσιμο (F), οξυγόνο (O_2), νερό (l), υδρατμούς (g) και εξαναγκασμένη ροή (fan). Η χημική ενέργεια ή η ισχύς της φωτιάς συμβολίζεται ως \dot{Q} και οι απώλειες θερμότητας ως \dot{q} . Μία γενική έκφραση της διατήρησης της ενέργειας μέσα σε έναν όγκο ελέγχου δίνεται στην Εξίσωση (2.18):

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \left[\left(\sum_{i=1}^N \rho_i \int_{25^\circ C}^T c_{pi} dT \right) - P \right] dV + \iint_{CS} \left(\sum_{i=1}^N \rho_i \int_{25^\circ C}^T c_{pi} dt \right) (u + V_i - w) \cdot ndV = \\ & = - \iint_{CS} \dot{q}'' \cdot ndS + \Delta h_c \iiint_{CV} \dot{m}_F''' D dV - \dot{W}_s - \iint_{CS} Pw \cdot ndS \end{aligned} \quad (2.18)$$

Όπου:

- u : Η ταχύτητα του μίγματος (m/s)
- w : Η ταχύτητα στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου (m/s)
- V_i : Οι ταχύτητες διάχυσης (m/s)
- \dot{q}'' : Η θερμοροή ανά μονάδα εμβαδού (W/m^2)
- \dot{m}_F''' : Παροχή μάζας του καυσίμου που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου ($kg/s \cdot m^3$)
- Δh_c : Η θερμότητα καύσης (J/kg)
- \dot{W}_s : Το αξονικό έργο και το έργο λόγω διάτμησης (W)
- c_{pi} : Η ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg·K)



Σχήμα 2.32 Μεταφορά ενέργειας

Περιγραφικά, η Εξίσωση 2.18 εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \text{Ρυθμό μεταβολής για} \\ \text{την εσωτερική ενέργεια του} \\ \text{μείγματος του όγκου ελέγχου} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Καθαρό ρυθμό της} \\ \text{ενθαλπικής φορής λόγω} \\ \text{της κύριας φορής και της ροής} \\ \text{διάχυσης από τον όγκο ελέγχου} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \text{Καθαρός ρυθμός} \\ \text{της θερμοτήτασ που} \\ \text{προστίθεται στον} \\ \text{όγκο ελέγχου} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Ρυθμός της χημικής} \\ \text{ενέργειας που} \\ \text{απελευθερώνεται} \\ \text{στον όγκο ελέγχου} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Καθαρός ρυθμός αξονικού} \\ \text{και διατμητικού έργου} \\ \text{που δαπανάται από το} \\ \text{ρευστό στον όγκο ελέγχου} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Ρυθμός έργου} \\ \text{πίεσης λόγω} \\ \text{του κινούμενου} \\ \text{όγκου ελέγχου} \end{bmatrix}$$

Μία σειρά από απλουστεύσεις καθιστούν την Εξίσωση (2.18) πιο πρακτική και εύχρηστη στις διάφορες εφαρμογές. Για σταθερή τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για όλα τα συστατικά, ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, για τέλειο αέριο και για ομοιόμορφες ροές j στην επιφάνεια ελέγχου με σταθερές ιδιότητες, προκύπτει η Εξίσωση (2.19):

$$c_p \frac{d}{dt}(mT) - V \frac{dP}{dt} + \sum_{j, net, out} \dot{m}_j c_p T_j = \dot{m}_{F, reacted} \Delta h_c + \dot{Q} - \dot{W}_{shaft} \quad (2.19)$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας πολλαπλασιαζόμενη με το γινόμενο $c_p T$ δίνει:

$$c_p T \frac{dm}{dt} + \sum_{j, net, out} \dot{m}_j c_p T = 0 \quad (2.20)$$

Αφαιρώντας την Εξίσωση (2.20) από την Εξίσωση (2.19) προκύπτει τελικά η Εξίσωση (2.21):

$$c_p m \frac{dT}{dt} - V \frac{dP}{dt} + \sum_{j, net, out} \dot{m}_j c_p (T - T_j) = \dot{m}_{F, reacted} \Delta h_c + \dot{Q} - \dot{W}_{shaft} \quad (2.21)$$

Η T θεωρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία στον όγκο ελέγχου. Η ανάπτυξη των κύριων εξισώσεων που διέπουν τα μοντέλα ζώνης σε φαινόμενα φωτιάς εντός διαμερισμάτων, βασίζονται στις προαναφερθείσες παραδοχές - προσεγγίσεις. Με βάση την Εξίσωση 2.21, για την κανονικοποίηση των παραμέτρων χρησιμοποιείται η Εξίσωση 2.22:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} + \dot{m} c_p (T - T_\infty) \sim \dot{Q} - \dot{q} - \dot{m}_w h_{fg} \quad (2.22)$$

Ο τελευταίος όρος αντιστοιχεί στο ρυθμό ενέργειας που απαιτείται για την εξάτμιση των σταγονιδίων νερού. Συσχετίζοντας τον όρο της ενέργειας (ρυθμός ενθαλπίας) με τη θερμική ισχύ, προκύπτει η δεύτερη ομάδα Π, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη με το σύμβολο Q^* , ή αλλιώς αριθμός Zukoski:

$$Q_l^* \equiv \Pi_2 = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g l}^{5/2}} \sim \frac{\text{Θερμική ισχύς}}{\text{Ρυθμός ροής ενθαλπίας}} \quad (2.23)$$

Όπου το Q_l^* βασίζεται στην κλίμακα μήκους l .

2.4.2.4 Απώλειες θερμότητας

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις απώλειες θερμότητας συμβάλλουν στη δημιουργία περισσότερων ομάδων Π. Πρώτα λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός απωλειών θερμότητας δια ακτινοβολίας διαμέσου μία επιφάνειας ροής A του όγκου ελέγχου που περιβάλλει το αέριο μείγμα του Σχήματος 2.31.

$$\dot{q}_o = A\sigma \left[\varepsilon(T^4 - T_\infty^4) + (1 - \varepsilon)(T_w^4 - T_\infty^4) \right] \quad (2.24)$$

Όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής του αερίου και σ η σταθερά Stefan Boltzmann. Τα τοιχώματα θεωρούνται ως μέλαν σώμα. Ο συντελεστής εκπομπής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\varepsilon \sim 1 - e^{-\kappa l} \quad (2.25)$$

Το κ είναι ο συντελεστής απορρόφησης και έτσι προκύπτει η ομάδα Π_3 :

$$\Pi_3 = \kappa l \sim \frac{\text{Ακτινοβολία που εκλύεται}}{\text{Ακτινοβολία μέλανος σώματος}} \quad (2.26)$$

Η ομάδα αυτή είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε φαινόμενα φωτιάς και καπνού υπό κλίμακα και μπορεί να είναι προβληματική. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μία εναλλακτική εμπειρική αδιάστατη ομάδα για την απώλεια ακτινοβολίας προς το περιβάλλον, που χρησιμοποιείται στις ελεύθερες φωτιές και περιγράφεται στην Εξίσωση 2.27:

$$X_r = \Pi_4 = \frac{\dot{q}_o}{\dot{Q}_o} \quad (2.27)$$

Η μεταφορά θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων ή άλλων στερεών επιφανειών πάχους δ_w μέσω αγωγής ισούται με το άθροισμα των απωλειών θερμότητας δια ακτινοβολίας και συναγωγής:

$$\dot{q}_w = \dot{q}_k = \dot{q}_r + \dot{q}_c \quad (2.28)$$

Η συναλλαγή ακτινοβολίας για τα τοιχώματα του μέλανος σώματος εκφράζονται ως:

$$\dot{q}_r \sim \varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)S \quad (2.29)$$

Και η συναγωγή ως:

$$\dot{q}_c \sim h_c S(T - T_w) \quad (2.30)$$

Όπου S είναι το εμβαδό της επιφάνειας του τοιχώματος. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h_c , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$h_c \sim \frac{k}{l} Re^n Pr^m \quad (2.31)$$

Η απώλεια διά ακτινοβολίας γράφεται ως:

$$\dot{q}_k \sim \frac{k_w S(T - T_\infty)}{\delta} \quad (2.32)$$

Όπου ισχύει ότι $\delta \sim \sqrt{(k/\rho c)_w t}$ για ένα θερμικά παχύ τοίχωμα, ενώ $\delta = \delta_w$ για ένα θερμικά λεπτό τοίχωμα.

Με βάση τις Εξισώσεις (2.28) έως (2.32) μπορούν να δημιουργηθούν ομάδες Π. Έτσι η ομάδα για την αγωγή περιγράφεται από την Εξίσωση (2.33):

$$Q_k^* \equiv \Pi_5 = \frac{k_w T_\infty l^2 / \sqrt{(k/\rho c)_w t^*}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gl}^{5/2}} \sim \frac{\text{Αγωγή διαμέσου τοιχώματος}}{\text{Ρυθμός ροής ενθαλπίας}} \quad (2.33)$$

Αντικαθιστώντας το t^* κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (2.12), προκύπτει ότι:

$$Q_k^* \equiv \Pi_5 = \frac{(k\rho c)_w^{1/2}}{\rho_\infty c_p l^{3/4} g^{1/4}} \quad (2.34)$$

Ομοίως, για τη συναγωγή και την ακτινοβολία δημιουργούνται οι Εξισώσεις (2.35) και (2.36):

$$Q_c^* \equiv \Pi_6 = \frac{h_c}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}} \sim \frac{\text{Συναγωγή}}{\text{Ροή της ενθαλπίας}} \quad (2.35)$$

$$Q_r^* \equiv \Pi_7 = \frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}} \sim \frac{\text{Ακτινοβολία}}{\text{Ροή της ενθαλπίας}} \quad (2.36)$$

Επιπρόσθετα, για ένα τοίχωμα πεπερασμένου πάχους δ_w πρέπει να εισαχθεί η ομάδα Π_8 :

$$\Pi_8 = \frac{\delta_w}{\delta} = \left(\frac{\rho c}{k}\right)_w^{1/2} \left(\frac{g}{l}\right)^{1/4} \delta_w = \frac{\text{Πάχος}}{\text{Θερμικό μήκος}} \quad (2.37)$$

2.4.2.5 Παροχές μάζας

Εκτός από τον αριθμούς Zukoski για την ενέργεια, υπάρχει ο αντίστοιχος αριθμός που αφορά τις παροχές μάζας σε φαινόμενα όπως αυτό που καταδεικνύεται στο Σχήμα 2.31.

$$m_{Fan}^* \equiv \Pi_9 = \frac{\dot{m}_{Fan}}{\rho_\infty \sqrt{gl}^{5/2}} \sim \frac{\text{Ροή ανεμιστήρα}}{\text{Ανωστική Ροή}} \quad (2.38)$$

Άλλος ένας όρος παροχής μάζας θα μπορούσε προκύψει λόγω εξάτμισης, πχ εάν υπάρχει ψύξη του νερού από κάποιον καταιονητήρα. Έτσι, προκύπτει η Εξίσωση (2.39):

$$m_F^* \equiv \Pi_{10} = \frac{\dot{m}_F}{\rho_\infty \sqrt{gl}^{5/2}} \quad (2.39)$$

Όπου το m_F^* εξαρτάται από του αριθμούς Gr, Re, Pr, B και άλλους παράγοντες που συμμετέχουν στην ακτινοβολία της φλόγας. Οι ομάδες Π συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6:

Πίνακας 2.6: Αδιάστατες μεταβλητές και ομοιότητα στη φωτιά

Μεταβλητή/Ομάδα	Αδιαστατοποίηση	Ομοιότητα/Σχόλιο
Εξαρτημένες		
Ταχύτητα, u	$\hat{u} = \frac{u}{\sqrt{gl}}$	$u \sim l^{1/2}$
Θερμοκρασία, T	$\hat{T} = \frac{T}{T_\infty}$	$T \sim l^0$
Πίεση, P	$\hat{P} = \frac{P}{\rho_\infty gl}$	$P \sim l$
Συγκέντρωση	$\frac{Y_i}{Y_{i,\infty}}$	$Y_i \sim l^0$
Ρυθμός καύσης ανά εμβαδόν, \dot{m}_F''	$\frac{\dot{m}_F'' l}{\mu}$	$\dot{m}_F'' \sim \frac{h_c l}{\mu c_p} = \frac{Nu}{Pr}$
Ανεξάρτητες		
Συντεταγμένες x, y, z	x_i / l	$x_i \sim l$
Χρόνος, t	$\frac{t}{\sqrt{l/g}}$	$t \sim l^{1/2}$
Ομάδες Π_i		
$\Pi_1 \left(\frac{\text{Αδράνεια}}{\text{Συνεκτικότητα}} \right), Re$	$Re = \frac{\rho_\infty \sqrt{gl}^{3/2}}{\mu}$	Συνήθως αγνοείται
$\Pi_2 \left(\frac{\text{Ισχύς της φωτιάς}}{\text{Ρυθμόφενθαλπίας}} \right), Q^*$	$\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gl}^{5/2}}$	Σημαντική κατά την καύση
$\Pi_3 \left(\frac{\text{Έκλυση ακτινοβολίας}}{\text{Ιδανική έκλυση}} \right)$	kl	$k \sim l^{-1}$, η ακτινοβολία του αερίου είναι σημαντική
$\Pi_4 \left(\frac{\text{Απώλεια ακτινοβολίας}}{\text{Ισχύς φωτιάς}} \right), X_r$	$X_r = \frac{\dot{q}_r}{\dot{Q}_r}$	$X_r \sim l^0$, σημαντική για την ελεύθερη καύση
$\Pi_5 \left(\frac{\text{Αγωγή}}{\text{Ενθαλπία}} \right), Q_k^*$	$\frac{(k\rho c)^{1/2}}{\rho_\infty c_p g^{1/4} l^{3/4}}$	$k_w \sim \rho_w \sim l^{3/4}$, σημαντική για την αγωγή
$\Pi_6 \left(\frac{\text{Συναγωγή}}{\text{Ενθαλπία}} \right), Q_c^*$	$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}}$	$h_c \sim l^{1/2}$, σημαντική για τη συναγωγή

Μεταβλητή/Ομάδα	Αδιαστατοποίηση	Ομοιότητα/Σχόλιο
$\Pi_7 \left(\frac{\text{Ακτινοβολία}}{\text{Ενθαλπία}} \right), Q_r^*$	$\frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty c_p \sqrt{gl}}$	$T_\infty \sim l^{1/6}$, ασύμβατη με τις υπόλοιπες
$\Pi_8 \left(\frac{\text{Πάχος}}{\text{Θερμικόμήκος}} \right)$	$\frac{\delta_w}{\delta} = \left(\frac{\rho c}{k} \right)_w^{1/2} \left(\frac{g}{l} \right)^{1/4} \delta_w$	$\delta_w \sim l^{1/4}$, πάχος ορίων
$\Pi_9 \left(\frac{\text{Ροή ανεμιστήρα}}{\text{Ανωστική ροή}} \right), m_{Fan}^*$	$\frac{\dot{m}_{Fan}}{\rho_\infty \sqrt{gl}^{5/2}}$	$\dot{m}_{Fan} \sim l^{5/2}$, εξαναγκασμένες ροές
$\Pi_{10} \left(\frac{\text{Ροή καυσίμου}}{\text{Ανωστική ροή}} \right), m_F^*$	$\frac{\dot{m}_F}{\rho_\infty \sqrt{gl}^{5/2}}$	Η παροχή μάζας καυσίμου εξαρτάται από Re, Gr, B κ.α.

2.5 Δοκιμές φωτιάς σε διαμέρισμα μικρής / μεγάλης κλίμακας με εξώστη

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2, από το 1960 έως σήμερα έχει διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός ερευνών προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ΦΕΑ με την προσθήκη εξώστη και η συνεισφορά του τελευταίου στην προστασία του κτιρίου έναντι της κατακόρυφης διάδοσης του πλουμίου. Ορισμένες πειραματικές διατάξεις κατασκευάστηκαν σε πραγματική κλίμακα, αυξάνοντας αναμφίβολα το κόστος και το χρόνο της εκτέλεσης των δοκιμών. Για το λόγο αυτό, ορισμένοι ερευνητές ακολουθώντας τους νόμους της ομοιότητας που αναλύθηκαν στην Ενότητα 2.4, εκτέλεσαν πειράματα μικρής ή/και μεσαίας κλίμακας τα οποία επικύρωσαν με υπολογιστικές προσομοιώσεις, ενώ άλλοι περιορίστηκαν μόνο στις υπο-λογιστικές προσομοιώσεις με χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων.

Στην παρούσα Ενότητα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα βασικά στοιχεία των πειραματικών διατάξεων που εξετάστηκαν. Οι Πίνακες 2.7 και 2.8 αφορούν τις δοκιμές φωτιάς σε διαμέρισμα μικρής και μεσαίας κλίμακας (Yokoi, 1960, Suzuki et al. 2000, Ohmiya et al., 2001, Mammoser and Battaglia, 2003, Cao and Guo, 2003, Yamaguchi and Tanaka, 2005, Smartz, 2006, Zhao et al., 2014, Fu et al., 2015, Wang et al., 2015, An et al., 2017, Lu et al., 2017, Nilsson et al., 2018). Οι Πίνακες 2.9 και 2.10 αφορούν τις δοκιμές φωτιάς σε διαμέρισμα μεγάλης κλίμακας (Yokoi, 1960, Oleszkiewicz, 1991, Xing et al., 2013, Zhao et al., 2014, Morgado et al., 2015, Mutafi et al., 2017).

Πίνακας 2.7: Βασικά στοιχεία για δοκιμές φωτιάς μικρής/μεσαίας κλίμακας (1)

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
1	Yokoi, 1960	400x400x200	92x200 240x140 320x100	$\frac{P \times h_L}{20 \times 0, 40 \times 0, 60 \times 0, 80 \times 0, 100 \times 0}$	N/A*
2	Suzuki et al., 2000	Κλίμακα 1/7 930x575x375	600x270	$\frac{P \times w_b}{100 \times 2970, 150 \times 2970, 200 \times 2970, 250 \times 2970}$	3430x2970
3		<u>Μικρή κλίμακα</u> 500x500x500	<u>Μικρή κλίμακα</u> 200x100	<u>Μικρή κλίμακα</u> 100x600x20x0	<u>Μικρή κλίμακα</u>

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
	Ohmiya et al., 2001	<u>Μεσαία κλίμακα</u> 1500x1500x1500	200x200 100x200	150x600x20x0 200x600x20x0 250x600x20x0 300x600x20x0 400x600x20x0 100x600x20x100 150x600x20x100 200x600x20x100 250x600x20x100 300x600x20x100 400x600x20x100 100x600x20x200 150x600x20x200 200x600x20x200 250x600x20x200 300x600x20x200 400x600x20x200 100x600x20x300 150x600x20x300 200x600x20x300 250x600x20x300 300x600x20x300 400x600x20x300 100x600x20x400 150x600x20x400 200x600x20x400 250x600x20x400 300x600x20x400 400x600x20x400 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 300x1800x25x0 600x1800x25x0 900x1800x25x0 1200x1800x25x0 300x1800x25x300 600x1800x25x300 900x1800x25x300 1200x1800x25x300 300x1800x25x600 600x1800x25x600 900x1800x25x600 1200x1800x25x600	519x1208 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 1556x3625
	Ohmiya et al., 2001	<u>Μικρή κλίμακα</u> 500x500x500 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 1500x1500x1500	<u>Μικρή κλίμακα</u> 200x100 200x200 100x200 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 600x300 600x600 300x600	150x600x20x300 200x600x20x300 250x600x20x300 300x600x20x300 400x600x20x300 100x600x20x400 150x600x20x400 200x600x20x400 250x600x20x400 300x600x20x400 400x600x20x400 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 300x1800x25x0 600x1800x25x0 900x1800x25x0 1200x1800x25x0 300x1800x25x300 600x1800x25x300 900x1800x25x300 1200x1800x25x300 300x1800x25x600 600x1800x25x600 900x1800x25x600 1200x1800x25x600	<u>Μικρή κλίμακα</u> 519x1208 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 1556x3625
4	Cao & Guo, 2003	Κλίμακα 1/2 1500x1500x1200	800x600	$\frac{P \times w_b \times h_L}{0 \times 1500 \times 0}$ 200x1500x0	1500x2400

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
				300x1500x0 0x1500x300 200x1500x300 300x1500x300	
5	Mammoser & Battaglia, 2003	Κλίμακα 1/7 930x575x375	600x270	$P \times w_b$ 100x2970 150x2970 200x2970 250x2970	3430x2970
6	Yamaguchi & Tanaka, 2005	<u>Μικρή κλίμακα</u> 500x500x500 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 1500x1500x1500	<u>Μικρή κλίμακα**</u> 1)100x200(A,B,C) 2)200x200(A,B,C) 3)200x100(A,B,C) <u>Μεσαία κλίμακα*</u> 1)300x600(A,B,C) 2)600x600(A,B,C) 3)600x300(A,B,C)	$P \times w_b \times h_L$ <u>Μικρή κλίμακα</u> <u>Άνοιγμα 1</u> A:0x0x0 B:100x100x100 C: 100x500x100 <u>Άνοιγμα 2</u> A:0x0x0 B:100x200x100 C: 100x500x100 <u>Άνοιγμα 3</u> A:0x0x0 B:50x200x50 C: 50x600x50 <u>Μεσαία κλίμακα</u> <u>Άνοιγμα 1</u> A:0x0x0 B:300x300x300 C: 300x1500x300 <u>Άνοιγμα 2</u> A:0x0x0 B:300x600x300 C: 300x1500x300 <u>Άνοιγμα 3</u> A:0x0x0 B:150x600x150 C: 150x600x150	<u>Μικρή κλίμακα</u> 300x600 <u>Μεσαία κλίμακα</u> 900x1800
7	Smardz, 2006	Κλίμακα ISO 1/3 1200x840x820	<u>Πειράματα 1-4 (χωρίς εξώστη)</u> 270x500 <u>Πειράματα 5 & 6 (με εξώστη)</u> 270x550	350x560x12.5x140	980 x 1380
8	Zhao et al., 2014	Κλίμακα 1/7 930x570x400	600x270	$P \times w_b \times h_L$ 0 x 600 x 166 100 x 600 x 166	930x1308

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
				100 x 700 x 166 100 x 800 x 166 100 x 800 x 166 150 x 930 x 166 150 x 600 x 166 150 x 700 x 166 150 x 800 x 166 150 x 900 x 166 150 x 930 x 166 200 x 600 x 166 200 x 700 x 166 200 x 800 x 166 200 x 900 x 166 200 x 930 x 166	
9	Fu et al., 2015	Κλίμακα 1/2 3300x2000x1300	780x910	$p \times w_b \times h_L$ 100x1800x0 200x1800x0 300x1800x0 400x1800x0 600x1800x0 800x1800x0 1000x1800x0 100x1800x130 200x1800x130 300x1800x130 400x1800x130 600x1800x130 800x1800x130 1000x1800x130 100x1800x260 200x1800x260 300x1800x260 400x1800x260 600x1800x260 800x1800x260 1000x1800x260 100x1800x390 200x1800x390 300x1800x390 400x1800x390 600x1800x390 800x1800x390 1000x1800x390	4780x4500

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
10	Wang et al., 2016	Κλίμακα 1/2 3300x2300x1500	1200x1500	$P \times w_b \times h_L$ 0x1200x500 200x1200x500 400x1200x500 600x1200x500 800x1200x500	4720x4500
11	An et al., 2017	N/A	N/A	$P \times w_b \times t_h$ 40x300x40 60x300x40 80x300x40 100x300x40 120x300x40	Το δείγμα XPS 100x900 Όλη η πρόσοψη 500x1100
12	Lu et al., 2017	400x400x400	200x200 150x150 100x200 200x100	$P \times w_b \times h_L$ 400x1000x0 400x1000x100 400x1000x200 400x1000x300 400x1000x400	1000x2200

* Το N/A σημαίνει ότι το στοιχείο δεν είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Not Available)

**Τα Α,Β,С αναφέρονται σε τρία διαφορετικά σενάρια, όπου Α:καθόλου εξώστης, Β:στενός εξώστης, С:πλατύς εξώστης

Πίνακας 2.8: Βασικά στοιχεία για δοκιμές φωτιάς μικρής/μεσαίας κλίμακας (2)

A/A	Παραπομπή	Πείραμα	Υπολογ. Προσομ.	Υλικό τοίχου	Καύσιμο	Πηγή καυσίμου (mm)	Ισχύς Φωτιάς (kW)
1	Yokoi, 1960	Ναι	Όχι	Φύλλα χάλυβα	Αλκοόλη	N/A	N/A
2	Suzuki et al., 2000	Ναι	Όχι	N/A	Υγραέριο (LP)	Τρεις τετράγωνοι καυστήρες πλευράς 300mm	32,48, 72 και 95 kW
3	Ohmiya et al., 2001	Ναι	Όχι	Περλίτης	Αέριο Μεθάνιο	Μικρή κλίμακα 100x100 mm Μεσαία κλίμακα 300x300 mm	Μικρή κλίμακα 1.8, 5.2 και 2.6 kW Μεσαία κλίμακα 28.7, 81.3, 40.6 kW
4	Cao & Guo, 2003	Όχι	Ναι	N/A	N/A	N/A	N/A

A/A	Παραπομπή	Πείραμα	Υπολογ. Προσομ.	Υλικό τοίχου	Καύσιμο	Πηγή καυσίμου (mm)	Ισχύς Φωτιάς (kW)
5	Mammoser & Battaglia , 2003	Όχι	Ναι	N/A	Προπάνιο	Τρεις τετράγωνοι καυστήρες πλευράς 300mm	48 kW
6	Yamaguchi & Tanaka, 2005	Ναι	Όχι	N/A	Μεθανόλη	Κυκλικοί καυστήρες με διάμετρο: <u>Μικρή κλίμακα**</u> A:100 mm B:150 mm C:200 mm <u>Μεσαία κλίμακα**</u> A:300 mm B:400 mm C:600 mm	<u>Μικρή κλίμακα</u> A:5.6 kW B:12.7 kW C:26.6 kW <u>Μεσαία κλίμακα</u> A:5.6 kW B:12.7 kW C:26.6 kW
7	Smardz, 2006	Ναι	Ναι	LD Fiberfrax Duraboard 25mm με επένδυση MDF 10mm	<u>Πειράματα 1-4 χωρίς εξώστη</u> Πετρέλαιο Diesel <u>Πειράματα 5 & 6 με εξώστη</u> Αιθανόλη	<u>Πειράματα 1-4 χωρίς εξώστη</u> 200 x 200 mm <u>Πειράματα 5 & 6 με εξώστη</u> 250 x 250 mm	<u>Πειράματα 1-6</u> 1) 86 kW 2) 86 kW 3) 61 kW 4) 79 kW 5) 49 kW 6) 40 kW
8	Zhao et al., 2014	Όχι	Ναι	N/A	N/A	N/A	48 kW
9	Fu et al., 2015	Όχι	Ναι	N/A	N/A	N/A	1000 kW
10	Wang et al., 2016	Ναι	Ναι	<u>Τοίχος:</u> Τούβλο και σκυρόδεμα <u>Εξώστες:</u> Χάλυβας	Μεθανόλη	800x800x800 mm σε απόσταση 200mm από το παράθυρο	<u>Πείραμα:</u> Από 1500 kW έως 6000 kW <u>Προσομοίωση:</u> 350 kW
11	An et al., 2017	Ναι	Όχι	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Lu et al., 2017	Ναι	Όχι	Πλάκες από κεραμικές ίνες	LPG	200x200 mm	39.2, 44.1, 49.0, 53.9, και 58.8 kW

* Το N/A σημαίνει ότι το στοιχείο δεν είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Not Available)

**Τα Α,Β,С αναφέρονται σε τρία διαφορετικά σενάρια, όπου Α:καθόλου εξώστης, Β:στενός εξώστης, С:πλατύς εξώστης

Στον Πίνακα 2.8 παρατηρείται ότι με εξαίρεση την έρευνα των An et al. (2017) που είναι πειραματική, όλες οι υπόλοιπες οι οποίες δεν δίνουν επαρκή στοιχεία για το είδος και την πηγή του καυσίμου και τα δομικά υλικά του διαμερίσματος είναι υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Πίνακας 2.9: Βασικά στοιχεία για δοκιμές φωτιάς μεγάλης κλίμακας (1)

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
1	Yokoi, 1960	5000x2500x1670	3000x1000	740x5000x50x0	5000x4100
2	Oleszkiewicz, 1991	6000x4500x2750	2600x1370	300x3200x13x0 600x3200x13x0 1000x3200x13x0	5000x6000
3	Morgado et al., 2013	5300x2000x2100	1200x900	550x1200x170x500 550x3200x170x500	5300x5200
4	Xing et al., 2013	4000x4000x4000	1200x3200 1600x3000 2000x2800 2400x2600 2800x2400 2000x3200 2400x3000 2800x2800 1200x2600 1600x2400 2800x3200 1200x3000 1600x2800 2000x2600 2400x2400 1600x3200 2000x3000 2400x2800 2800x2600 1200x2400 2400x3200 2800x3000 1200x2800 1600x2600 2000x2400	$\frac{P \times h_L}{}$ 400x800 400x1000 400x1200 400x1400 400x1600 600x800 600x1000 600x1200 600x1400 600x1600 800x800 800x1000 800x1200 800x1400 800x1600 1000x 800 1000x1000 1000x1200 1000x1400 1000x1600 1200x800 1200 x1000 1200x1200 1200x1400 1200x1600	4000x 12000
5	Zhao et al., 2014	4000x4000x4000	1200x3200 1600x3000 2000x2800 2400x2600 2800x2400 2000x3200 2400x3000 2800x2800 1200x2600 1600x2400 2800x3200 1200x3000 1600x2800 2000x2600	$\frac{P \times w_b \times h_L}{}$ 400x1200x800 400x1800x1000 400x2400x1200 400x3000x1400 400x3600x1600 600x2200x800 600x2800x1000 600x3400x1200 600x2000x1400 600x1600x1600 800x3200x800 800x1800x1000 800x2400x1200	8000x8000

A/A	Παραπομπή	Διαστάσεις διαμερίσματος (mm) ($W_1 \times W_2 \times H$)	Διαστάσεις ανοίγματος (mm) ($w_t \times h_o$)	Διαστάσεις Εξώστη (mm) ($P \times w_b \times t_h \times h_L$)	Διαστάσεις Πρόσοψης (mm) ($W_{Fac} \times H_{Fac}$)
			2400x2400 1600x3200 2000x3000 2400x2800 2800x2600 1200x2400 2400x3200 2800x3000 1200x2800 1600x2600 2000x2400	800x2000x1400 800x2600x1600 1000x2200x800 1000x2800x1000 1000x2400x1200 1000x3200x1400 1000x1400x1600 1200x3200x800 1200x2800x1000 1200x1400x1200 1200x2000x1400 1200x2600x1600	
6	Mutafi et al., 2017	10000x10000x5000	1) 10000x5000 2) 8000x5000 3) 6000x5000 4) 6000x5000 5) 4000x5000 6) 2000x5000	$P \times w_b$ 1) 5000x20000 2) 3000x20000 3) 3000x20000 4) 2000x20000 5) 1500x20000 6) 1500x20000	10000x25000
7	Nilsson , 2016/ Nilsson et al., 2018	4500x4500x2500	<u>Πόρτα</u> 800x2000 <u>Παράθυρο</u> 1200x1200	<u>Πόρτα</u> 600x800x200x0 600x1600x200x0 600x800x200x350 600x1600x200x350 <u>Παράθυρο</u> 600x1200x200x0 600x2000x200x0 600x1200x200x350 600x2000x200x350	4500x5100

Πίνακας 2.10: Βασικά στοιχεία για δοκιμές φωτιάς μεγάλης κλίμακας (2)

A/A	Παραπομπή	Πείραμα	Υπολογ. Προσομ.	Υλικό τοίχου	Καύσιμο	Πηγή καυσίμου (mm)	Ισχύς Φωτιάς (kW)
1	Yokoï, 1960	Ναι	Όχι	<u>Τοίχοι:</u> Μονόλιθος <u>Εξώστης:</u> Ενισχυμένο σκυρόδεμα	Ξύλο	Στοιβα ξύλων μάζας 500kg	1817.9 kW
2	Oleszkiewicz 1991	Ναι	Όχι	Μαρινίτης	Προπάνιο	4 γραμμικοί καυστήρες διάχυσης μήκους 3800 mm	5750 kW 6900 kW

A/A	Παραπομπή	Πείραμα	Υπολογ. Προσομ.	Υλικό τοίχου	Καύσιμο	Πηγή καυσίμου (mm)	Ισχύς Φωτιάς (kW)
3	Morgado et al., 2013	Ναι	Ναι	<u>Τοίχοι - Οροφή:</u> Πάνελς από γυψοσανίδα <u>Δάπεδο:</u> Πυρίμαχα πλακάκια	Ξύλο	3 στοίβες από ξύλο 1000x50x55	4151 kW
4	Xing et al., 2013	Όχι	Ναι	N/A*	Φυσικό αέριο (κυρίως μεθάνιο)	2000x1000x200mm	6000 kW
5	Zhao et al., 2014	Όχι	Ναι	N/A	Μεθάνιο	2000x2000x1000mm χειροκίνητα ελεγχόμενος καυστήρας μεθανίου	6000 kW
6	Mutafi et al., 2017	Όχι	Ναι	N/A	N/A	N/A	1) 1581kW 2) 1581kW 3) 3160kW 4) 3160kW 5) 3160kW 6) 4740kW
7	Nilsson, 2016/ Nilsson et al., 2018	Ναι	Ναι	Σκυρόδεμα	N/A	1000x1000 mm	3100 kW 4000 kW

* Το N/A σημαίνει ότι το στοιχείο δεν είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Not Available)

2.6 Θερμιδομετρία

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι η πιο σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση του κινδύνου φωτιάς. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας καλείται θερμιδομετρητής και η μέθοδος μέτρησης ονομάζεται θερμιδομετρία. Η σπουδαιότητα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην εκτίμηση του κινδύνου για εκδήλωση πυρκαγιάς αναγνωρίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 από πολλά ερευνητικά κέντρα. Ιστορικά, οι μετρήσεις του ρυθμού έκλυσης θερμότητας από καιόμενα υλικά βασίζονταν στην αύξηση της

θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα καθώς περνούσε πάνω από το καιόμενο αντικείμενο. Επειδή το κλάσμα της θερμότητας που εκλύεται δια ακτινοβολίας διαφέρει από υλικό σε υλικό και επειδή μόνο ένα τμήμα της ακτινοβολούσας θερμότητας συνεισφέρει στην αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, υπήρχαν μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις. Η προσπάθεια υπολογισμού της θερμότητας που δεν δεσμευόταν από τον αέρα προϋπέθετε την εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων θερμότητας γύρω από την εστία, μία μέθοδος ιδιαίτερα δαπανηρή και δύσκολη. Επίσης, ήταν επιρρεπής σε μεγάλα σφάλματα μετρήσεων, ιδίως εάν το καιόμενο υλικό ήταν μεγάλου μεγέθους, όπως για παράδειγμα ένα φλεγόμενο έπιπλο εντός διαμερίσματος κατά τη διεξαγωγή πειράματος σε κλίμακα 1:1.

Στις αρχές του 1970 στο πανεπιστήμιο του Ohio, οι Smith et al. (1972) ανέπτυξαν μία από τις πρώτες πειραματικές μεθόδους υπό κλίμακα για τη μέτρηση του ΡΕΘ επίπεδων προϊόντων εκτεθειμένων σε θερμότητα δια ακτινοβολίας. Επίσης, πρότειναν διάφορες διαδικασίες εκτίμησης του κινδύνου πυρκαγιάς εντός πυροδιαμερίσματος με βάση δεδομένα μικρής κλίμακας. Οι διαδικασίες αυτές κυμαίνονταν από απλούς υπολογισμούς έως ένα σχετικά περίπλοκο υπολογιστικό μοντέλο. Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε σε μία εποχή κατά την οποία οι ακριβείς μέθοδοι υπολογισμού του ΡΕΘ δεν ήταν διαθέσιμες και η υπολογιστική προσομοίωση της φωτιάς βρισκόταν ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Επίσης, ο Smith υποστήριξε μία περισσότερο πρακτική προσέγγιση βασισμένη στην κρίση του μηχανικού και όχι σε λεπτομερή επιστήμη. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς που ανέπτυξε είχαν πολλές ατέλειες και έλαβαν πληθώρα κριτικών. Ωστόσο, ο Smith χρήζει αναγνώρισης ως ένας από του πρωτοπόρους της θερμομετρίας.

Για την εκτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς εντός πυροδιαμερίσματος υπάρχει επιτακτική ανάγκη ύπαρξης δεδομένων υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, τα οποία να χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση κατάλληλων συσκευών και μεθόδων για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων. Η πρώτη από τις δύο βασικές μεθόδους εκτίμησης του κινδύνου εκδήλωσης φωτιάς αποτελεί μία πειραματική εκτίμηση σε πραγματικό μέγεθος (κλίμακα 1:1). Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει μία σειρά πειραμάτων μεγάλης κλίμακας που καλύπτουν όλα τα πιθανά σενάρια πυρκαγιάς. Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση δεδομένων μικρής κλίμακας – κατά κύριο λόγο του ΡΕΘ – σε συνδυασμό με μία διαδικασία υπολογισμών για αναγωγή σε πραγματικό μέγεθος. Η δεύτερη προσέγγιση είναι αναμφίβολα περισσότερο ευέλικτη και λιγότερο χρονοβόρα και δαπανηρή. Με τη συνεχή βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης και την ακρίβεια των μοντέλων φωτιάς η δεύτερη μέθοδος έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα.

2.6.1 Θερμιδομετρία Κατανάλωσης Οξυγόνου

Το 1917, ο Thornton έδειξε ότι κατά την τέλεια καύση ενός μεγάλου αριθμού οργανικών υγρών και αερίων, απελευθερώνεται ένα σχετικά σταθερό ποσό θερμότητας ανά μονάδα καταναλισκόμενου οξυγόνου (Thornton, 1917). Ο Hugget (1980) επιβεβαίωσε ότι αυτό ισχύει και για τα οργανικά στερεά και η σταθερά E_{O_2} λαμβάνει μία μέση τιμή ίση με 13.1 MJ/kg O_2 . Η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές και είναι ακριβής με πολύ λίγες εξαιρέσεις με απόκλιση $\pm 5\%$. Ο κανόνας του Thornton υπονοεί ότι η μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώθηκε σε ένα σύστημα καύσης είναι επαρκής ώστε να καθοριστεί η καθαρά εκλυόμενη θερμική ενέργεια. Αυτή είναι η θεμελιώδης αρχή

που διέπει τη μέθοδο μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με βάση το οξυγόνο που καταναλώθηκε στα πειράματα φωτιάς.

Η πρώτη εφαρμογή της τεχνικής της μέτρησης του καταναλισκόμενου οξυγόνου σε έρευνα γύρω από τη φωτιά πραγματοποιήθηκε από τον Parker (1977) στο πείραμα ASTM E 84 σε σήραγγα. Αργότερα, ο Sensenig (1980) την χρησιμοποίησε σε πειράματα μεσαίας κλίμακας. Η τεχνική της μέτρησης του καταναλισκόμενου οξυγόνου βελτιώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 από το NIST (National Institute of Standards and Technology), που παλαιότερα έφερε την επωνυμία NBS (National Bureau of Standards), αποτελώντας ένα σημαντικό επίτευγμα στην ακριβή μέτρηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στα πειράματα φωτιάς. Σήμερα η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως παγκοσμίως για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας.

2.6.1.1 Ο κανόνας του Thornton

Η ακριβής τιμή του E_{O_2} για ένα συγκεκριμένο καύσιμο ισούται με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου διαιρεμένης με τη μάζα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση μίας μονάδας μάζας καυσίμου. Η μάζα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση μίας μονάδας καυσίμου καθορίζεται από τη στοιχειομετρία των αντιδράσεων καύσης. Για παράδειγμα, για την στοιχειομετρική καύση του μεθανίου με το οξυγόνο ισχύει η Εξίσωση (2.40).



Η Εξίσωση (2.40) καταδεικνύει ότι για την πλήρη καύση 16.04 gr CH_4 απαιτούνται 64 gr O_2 . Άρα, η μάζα του O_2 που απαιτείται για την καύση 1 gr CH_4 είναι $r_0 = 64 / 16.04 = 3.99 \text{ gr } O_2 / \text{gr } CH_4$. Επειδή η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του μεθανίου είναι 50.04 kJ/gr, η θερμότητα που εκλύεται ανά μονάδα μάζας οξυγόνου είναι $E_{O_2} = \Delta H_{c,net} / r_0 = 50.04 / 3.99 = 12.54 \text{ kJ/gr } O_2$. Ο Πίνακας 2.11 (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016) παρουσιάζει διάφορες τιμές για το μέγεθος E_{O_2} , αλλά και για τα ποσά θερμότητας ανά μονάδα μάζας CO_2 και CO που παράγονται κατά την καύση και συμβολίζονται με E'_{O_2} και E''_{O_2} αντίστοιχα. Η σταθερά σ ονομάζεται συντελεστής ογκομετρικής διαστολής. Παρόλο που υπάρχουν μεταβολές στις διάφορες κατηγορίες, οι τιμές αυτές παραμένουν σχετικά σταθερές για καύσιμα της ίδιας κατηγορίας.

Πίνακας 2.11: Τιμές των E_{O_2} , σ , E'_{O_2} και E''_{O_2} για διαφορετικές κατηγορίες καυσίμων και πολυμερών (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016)

Κατηγορία	E_{O_2} (kJ/g O_2)	σ	E'_{O_2} (kJ/g CO_2)	E''_{O_2} (kJ/g CO)
Καύσιμα που περιέχουν C και H				
Κανονικά αλκάνια	12.7	1.079	14.6	12.9
Υποκατάστατα αλκανίων	12.6	1.076	14.6	12.8
Κυκλο-αλκάνια	12.7	1.069	13.8	11.6
Κανονικά αλκένια	13.2	1.070	14.2	12.4
Κυκλο-αλκένια	13.0	1.062	13.4	11.1
Αλκαδιένια	13.5	1.057	13.5	11.2
Κανονικά αλκίνια	13.3	1.060	14.0	12.0
Αρωματικοί υδρογονάνθρακες	13.0	1.049	12.4	9.4
Καύσιμα που περιέχουν C, H και O				

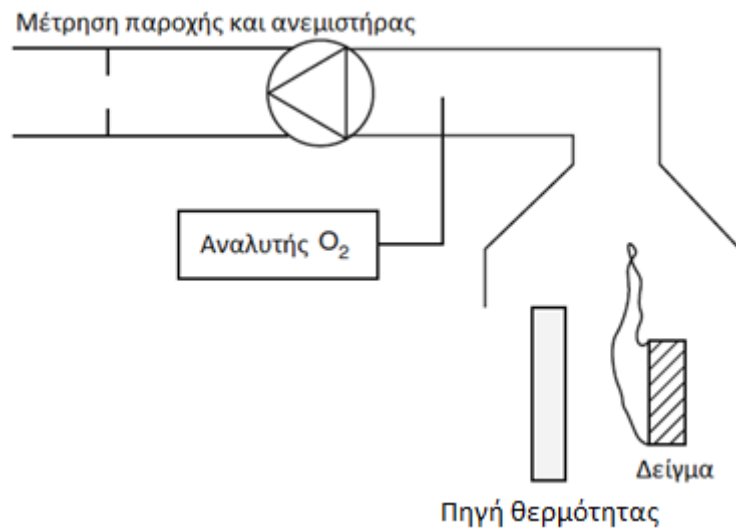
Κατηγορία	E_{O_2} (kJ/gO ₂)	a	E'_{O_2} (kJ/gCO ₂)	E''_{O_2} (kJ/gCO)
Αλκοόλες	13.3	1.104	14.5	12.8
Αλδεΐδες	14.2	1.108	13.3	10.6
Κετόνες	13.2	1.088	13.2	11.1
Οξέα	14.2	1.245	9.7	5.4
Εστέρες	13.0	1.118	12.5	9.7
Λοιπά	13.9	1.076	12.2	8.9
Καύσιμα που περιέχουν C ,H,O και S				
Καύσιμα C-H-N	11.5	1.063	15.4	14.1
Καύσιμα C-H-S	11.3	1.055	13.1	11.5
Πολυμερή υλικά				
C και H στη δομή	12.5	1.051	12.4	9.5
C,H,O και N στη δομή	12.5	1.085	10.9	7.2
C,H και Cl στη δομή	12.8	1.124	12.1	9.6
C,H και F στη δομή	11.3	1.293	9.2	–
C,H και Si στη δομή	13.7	1.083	14.8	13.3

2.6.1.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Κατανάλωσης του Οξυγόνου (Oxygen Consumption Method)

Η βασική προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση της τεχνικής του καταναλισκόμενου οξυγόνου είναι η συλλογή και καθοδήγηση των προϊόντων της καύσης διαμέσου ενός αγωγού καυσαερίων. Σε μία απόσταση κατάντη του αγωγού τέτοια ώστε να γίνεται επαρκής ανάμειξη, μετρώνται η παροχή μάζας και η σύνθεση των καυσαερίων. Στο Σχήμα 2.32 απεικονίζεται ένας θερμοδομετρητής οξυγόνου. Δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση του αέρα εισόδου, δεδομένου ότι η μέτρηση γίνεται στον αγωγό εξόδου. Επομένως, οι τυπικοί θερμοδομετρητές καταναλισκόμενου οξυγόνου είναι ανοικτοί, ώστε να αποφευχθεί εκείνο το μέρος του $\dot{Q}_{f,1}$ το οποίο ανακλάται από τα τοιχώματα του θερμοδομετρητή και φτάνει στην επιφάνεια του δείγματος. Αυτό θα συντελούσε σε μία ανεξέλεγκτη θερμορροή διά ακτινοβολίας, εκτός από αυτήν της πηγής θερμότητας.

Η πρακτική εφαρμογή της τεχνικής του καταναλισκόμενου οξυγόνου είναι έμμεση και όχι άμεση. Η εφαρμογή του κανόνα του Thornton στο σύστημα καύσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.33 οδηγεί στην Εξίσωση (2.41). Για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας ισχύει:

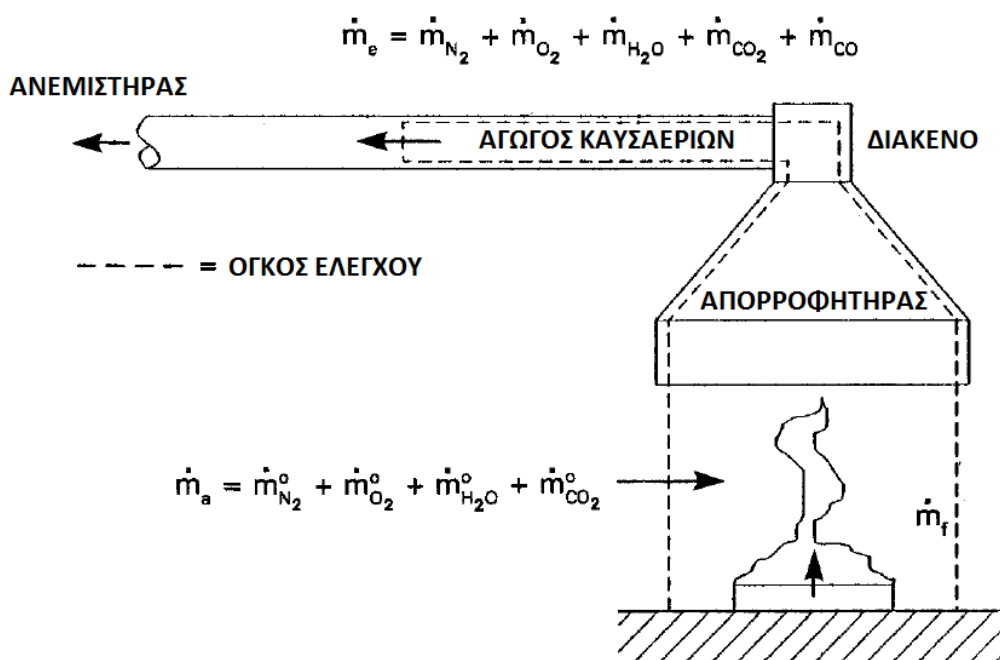
$$\dot{Q} = E_{O_2} (\dot{m}_a Y_{O_2}^a - \dot{m}_e Y_{O_2}^e) \quad (2.41)$$



Σχήμα 2.33: Θερμιδομετρητής καταναλισκόμενου οξυγόνου

Όπου:

- E_{O_2} : Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καταναλισκόμενου οξυγόνου (≈ 13.1 kJ/gr)
- $Y_{O_2}^a$: Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στον αέρα καύσης (0.232gr/gr ξ. αέρα)
- $Y_{O_2}^e$: Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στα προϊόντα της καύσης (gr/gr)



Σχήμα 2.34: Παροχές μάζας συστατικών κατά τη θερμιδομετρία του καταναλισκόμενου οξυγόνου

Υπάρχουν τρία προβλήματα κατά την εφαρμογή της Εξίσωσης (2.41). Πρώτον, οι αναλυτές οξυγόνου μετρούν γραμμομοριακά κλάσματα (σε moles) και όχι τα κλάσματα μάζας του οξυγόνου στο δείγμα των απαερίων. Τα γραμμομοριακά κλάσματα μετατρέπονται σε κλάσματα μάζας πολλαπλασιάζοντας το γραμμομοριακό κλάσμα με το λόγο της μοριακής μάζας του οξυγόνου προς τη μοριακή μάζα

του δείγματος των απαερίων. Συνήθως η τελευταία είναι περίπου ίση με τη μοριακή μάζα του αέρα ($\approx 29 \text{ gr/mol}$). Δεύτερον, η υγρασία αφαιρείται από το δείγμα πριν τη διέλευσή του από τον παραμαγνητικό αναλυτή, έτσι ώστε το γραμμομοριακό κλάσμα να μετράται επί ξηρού. Τρίτον, τα παροχόμετρα μετρούν παροχές όγκου και όχι παροχές μάζας. Η ογκομετρική παροχή στον αγωγό εξόδου, υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, είναι συνήθως ελάχιστα διαφορετική από την παροχή εισόδου του αέρα λόγω της διαστολής των καυσαερίων μετά την καύση.

Οι Parker(1982) και Janssens (1991) έλυσαν τα προβλήματα αυτά και ανέπτυξαν εξισώσεις για τον υπολογισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με τη μέθοδο του καταναλισκόμενου οξυγόνου για ποικίλες εφαρμογές. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν συνάρτηση της ανάλυσης των καυσαερίων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μέτρηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ωστόσο, η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης και άλλων αερίων.

Μέτρηση μόνο του O_2

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αφαιρεθούν όλοι οι υδρατμοί (από ένα ψυγείο και έναν απορροφητή υγρασίας) και το CO_2 (από ένα χημικό απορροφητή) από το ρεύμα των καυσαερίων πριν ληφθεί η μέτρηση του O_2 . Αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι τα καυσαέρια αποτελούνται μόνο από O_2 και N_2 . Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.42).

$$\dot{Q} = E_{O_2} \frac{\varphi}{1 + \varphi(a - 1)} \dot{m}_g \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a - X_{CO_2}^a) X_{O_2}^{A^a} \quad (2.42)$$

Και

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{A^a} + X_{O_2}^{A^e}}{(1 - X_{O_2}^{A^e}) X_{O_2}^{A^a}} \quad (2.43)$$

Όπου:

- φ : Παράγοντας κατανάλωσης οξυγόνου (κλάσμα της ποσότητας του εισερχόμενου αέρα για το οποίο καταναλώνεται πλήρως το οξυγόνο)
- a : Συντελεστής ογκομετρικής μεταβολής
- \dot{m}_g : Παροχή μάζας των καυσαερίων στον αγωγό εξόδου (gr/s)
- M_{O_2} : Μοριακή μάζα του οξυγόνου (32kg/kmol)
- M_a : Μοριακή μάζα του αέρα καύσης (29kg/kmol ξηρού αέρα)
- $X_{H_2O}^a$: Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα υδρατμών στον αέρα καύσης
- $X_{CO_2}^a$: Πραγματικό γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης
- $X_{O_2}^{A^a}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στον αέρα καύσης
- $X_{O_2}^{A^e}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα οξυγόνου στα καυσαέρια

Όταν η σύνθεση του καυσίμου δεν είναι γνωστή, χρησιμοποιείται μία μέση τιμή για το συντελεστή ογκομετρικής μεταβολής. Πλήρης καύση του άνθρακα σε ξηρό περιβάλλον δίνει $a=1$. Εάν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, τότε $a=1.21$. Επο-

μένως, μία συνήθης τιμή για τη μεταβλητή αυτή είναι $a=1.105$. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για τα καύσιμα του Πίνακα 2.11 είναι 1.093 ± 0.066 . Το $X_{H_2O}^a$ μπορεί να μετρηθεί μέσω της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας στο εργαστήριο σύμφωνα με την Εξίσωση (2.44). Τυπικά κυμαίνεται σε 1-2% σε ένα εργαστήριο με ελεγχόμενη θερμοκρασία.

$$X_{H_2O}^a = \frac{RH}{100} \frac{p_s(T_a)}{p_a} \quad (2.44)$$

Όπου:

- RH : Σχετική υγρασία του αέρα (%)
- $p_s(T_a)$: Τάση ατμών του νερού σε θερμοκρασία T_a (Pa)
- T_a : Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος (K)
-

Το $X_{CO_2}^a$ είναι περίπου 400 ppm σε ξηρό αέρα. Σημειώνεται ότι τα σύμβολα για το γραμμομοριακό κλάσμα του οξυγόνου που μετράται στον αέρα καύσης πριν από το πείραμα και στα καυσαέρια φέρουν έναν εκθέτη A . Αυτό συμβαίνει για να γίνει ένας διαχωρισμός ανάμεσα στις πραγματικές και τις μετρούμενες γραμμομοριακές συστάσεις του οξυγόνου, καθώς οι δεύτερες αναφέρονται σε δείγμα ξηρού απαερίου.

Η Εξίσωση (2.44) αναμένεται να είναι ακριβής με μέσο σφάλμα $\pm 10\%$ εάν υποθεθεί ότι η καύση είναι τέλεια, για παράδειγμα εάν όλος ο άνθρακας μετατραπεί σε CO_2 . Το σφάλμα μπορεί να είναι μεγαλύτερο αν παραχθούν μετρήσιμες ποσότητες CO και αιθάλης ή αν τα προϊόντα της καύσης περιέχουν συστατικά εκτός των H_2O και CO_2 σε σημαντικές ποσότητες, όπως για παράδειγμα HCl. Το σφάλμα εν μέρει οφείλεται στην αβεβαιότητα των μεταβλητών E_{O_2} και a . Εάν είναι διαθέσιμες οι ακριβείς τιμές τους, η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί πολύ με την χρησιμοποίηση αυτών αντί για τις γενικές τιμές 13.1 kJ/gr και 1.105 αντίστοιχα.

Μέτρηση των O_2 , CO_2

Στην περίπτωση αυτή δεσμεύονται μόνο οι υδρατμοί του καυσαερίου προτού το δείγμα καυσαερίου φτάσει στον αναλυτή. Σε πολλές περιπτώσεις η ποσότητα του CO είναι αμελητέα. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.45):

$$\dot{Q} = E_{O_2} \frac{\varphi}{1 + \varphi(a - 1)} \dot{m}_g \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{Aa} \quad (2.45)$$

Και

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{Aa} (1 - X_{CO_2}^{Ae}) - X_{O_2}^{Ae} (1 - X_{CO_2}^{Aa})}{(1 - X_{O_2}^{Ae} - X_{CO_2}^{Ae}) X_{O_2}^{Aa}} \quad (2.46)$$

Όπου:

- $X_{CO_2}^{Aa}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα καύσης
- $X_{CO_2}^{Ae}$: Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια

Μέτρηση των O_2 , CO_2 και CO

Γενικά, με την προσθήκη του CO_2 δεν βελτιώνεται πάρα πολύ η ακρίβεια της μέτρησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Εάν σημαντικό μέρος του άνθρακα στο καύσιμο μετατραπεί σε CO αντί για CO_2 , οι εξισώσεις μπορούν να διορθωθούν λαμβάνοντας υπόψη και την ατελή καύση. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.47):

$$\dot{Q} = \left[E_{O_2} \varphi - (E_{CO} - E_{O_2}) \frac{1 - \varphi}{2} \frac{X_{CO}^{Ae}}{X_{O_2}^{Ae}} \right] \frac{\dot{m}_g}{1 + \varphi(a - 1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{Aa} \quad (2.47)$$

Και:

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^{Aa} (1 - X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae}) - X_{O_2}^{Ae} (1 - X_{CO_2}^{Aa})}{(1 - X_{O_2}^{Ae} - X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae}) X_{O_2}^{Aa}} \quad (2.48)$$

Όπου:

- E_{CO} : Θερμότητα που εκλύεται ανά μάζα καταναλισκόμενου οξυγόνου για το CO (17.6 MJ/g)
- X_{CO}^{Ae} : Μετρούμενο γραμμομοριακό κλάσμα μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια

3. ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Οι υποαεριζόμενες συνθήκες που επικρατούν εντός του πυροδιαμερίσματος εξαναγκάζουν τη φωτιά να εξέλθει του ανοίγματος, δημιουργώντας ΦΕΑ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα χωρίς εξώση πάνω από το άνοιγμα ενώ στη συνέχεια προστέθηκε οριζόντια προεξοχή. Όπως είναι αναμενόμενο, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξερχόμενης φλόγας και κατ' επέκταση οι εξισώσεις που τα διέπουν, διαφέρουν κατά περίπτωση. Οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων συγκρίνονται με τις εμπειρικές συσχετίσεις της βιβλιογραφίας, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο συμφωνούν μεταξύ τους.

3.1 Σχέσεις προσδιορισμού ύψους εξερχόμενης φλόγας.

Βάση για πολλές μελέτες σχεδιασμού πυροπροστασίας κατά την κατασκευή νέων κτιρίων αποτελεί ο Ευρωκώδικας. Σύμφωνα με την παράγραφο Β.4.1 του Παραρτήματος Β (Annex Β), το ύψος της φλόγας εξερχόμενης από άνοιγμα χωρίς εξώση περιγράφεται από την Εξίσωση (3.1):

$$L_L = \max \left\{ 0; h_{eq} \left[2.37 \left(\frac{\dot{Q}}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right] \right\} \quad (3.1)$$

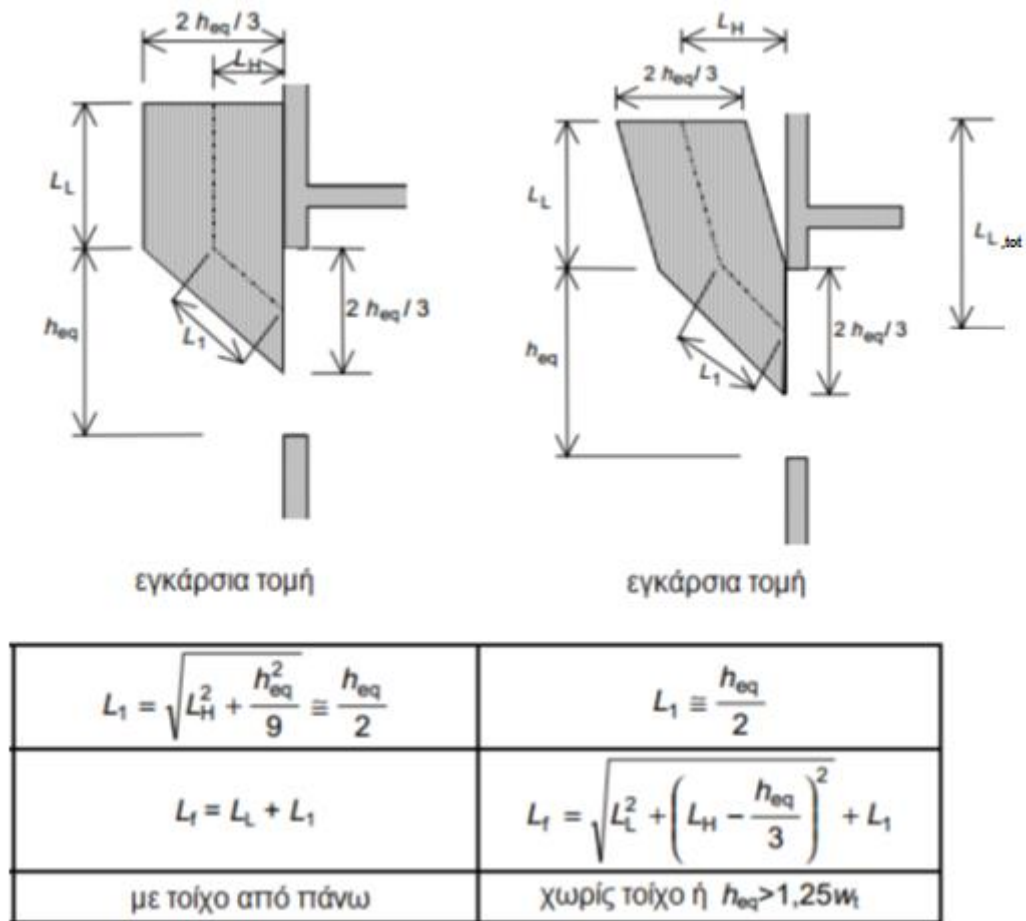
Όπου:

- g : Η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
- \dot{Q} : Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (kW)
- A_v : Συνολικό εμβαδόν όλων των κατακόρυφων ανοιγμάτων των τοίχων (m^2)
- h_{eq} : Σταθμισμένος μέσος των υψών των κατακόρυφων ανοιγμάτων όλων των τοίχων (m)
- ρ_g : Πυκνότητα του καυσαερίου στο εσωτερικό του διαμερίσματος (kg/m^3)

Για τυπική τιμή πυκνότητας καυσαερίου $\rho_g=0.45 \text{ kg/m}^3$ και για $g=9.81 \text{ m/s}^2$ η Εξίσωση (3.1) απλοποιείται ως εξής:

$$L_L = 1.9 \left(\frac{\dot{Q}}{w_t} \right)^{2/3} - h_{eq} \quad (3.2)$$

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας που εξέρχεται από άνοιγμα. Αριστερά απεικονίζεται η περίπτωση της γεωμετρίας του παραθύρου και δεξιά η περίπτωση της γεωμετρίας της πόρτας, κατά την οποία ισχύει η ανισότητα $h_{eq} > 1.25w_t$.



Σχήμα 3.1 Σχήμα φλόγας εξερχόμενης από άνοιγμα για την περίπτωση γεωμετρίας παραθύρου (αριστερά) και γεωμετρίας πόρτας (δεξιά)

Για την περίπτωση κατά την οποία υπάρχει εξώστης ο οποίος τοποθετείται στο επίπεδο του ανωφλίου του ανοίγματος και καταλαμβάνει όλο το πλάτος του, η Εξίσωση (3.1) τροποποιείται και διαιρείται σε δύο κλάδους ανάλογα με τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εάν $h_{eq} \leq 1.25w_t$,

$$L_L = \max \left\{ 0; h_{eq} \left[2.37 \left(\frac{\dot{Q}}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right] - P(1 + \sqrt{2}) \right\} \quad (3.3)$$

- Εάν $h_{eq} > 1.25w_t$,

$$L_L = \max \left\{ 0; h_{eq} \left[2.37 \left(\frac{\dot{Q}}{A_V \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right] - P \right\} \quad (3.4)$$

3.2 Σχέσεις προσδιορισμού μήκους της εξερχόμενης φλόγας κατά μήκος του άξονα του πλουμίου

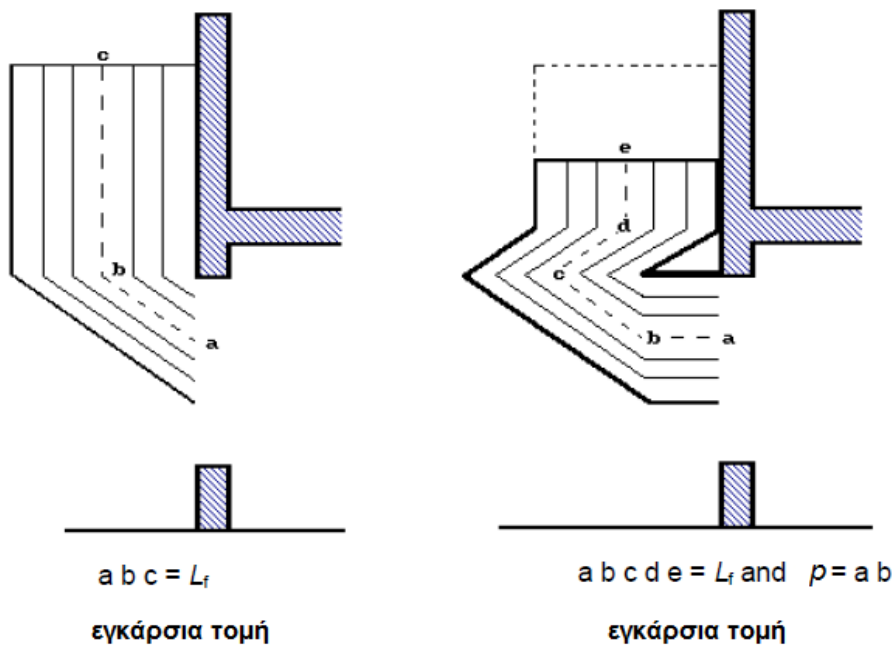
Σύμφωνα με την παράγραφο Β.4.1 του Παραρτήματος Β (Annex Β) του Ευρωκώδικα, το μήκος της φλόγας κατά μήκος του άξονα του πλουμίου δίνεται από τις Εξισώσεις (3.5) και (3.6):

- Εάν $h_{eq} \leq 1.25 w_t$ ή υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα,

$$L_f = L_L + h_{eq} / 2 \quad (3.5)$$

- Εάν $h_{eq} > 1.25 w_t$, ή δεν υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα,

$$L_f = (L_L^2 + (L_H - h_{eq} / 3)^2)^{1/2} + h_{eq} / 2 \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.2 Σχήμα φλόγας εξερχόμενης από άνοιγμα για την περίπτωση ανοίγματος χωρίς εξώστη (αριστερά) και με εξώστη (δεξιά)

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η γεωμετρία φλόγας εξερχόμενης από άνοιγμα χωρίς εξώστη (αριστερά) και η αντίστοιχή της στην περίπτωση που υπάρχει εξώστης (δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας της φλόγας αποτελείται από τα ευθύγραμμα τμήματα ab και bc ενώ στη δεύτερη από τα ab, bc, cd, και de, καταδεικνύοντας εμφανώς την εκτροπή της τροχιάς της φλόγας, όπου το ευθύγραμμο τμήμα ab αντιστοιχεί στην προέκταση (βάθος) του εξώστη P. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι μετά την υπερκέραση του εξώστη, η φλόγα προσκολλάται και πάλι στο τοίχωμα.

3.3 Σχέσεις προσδιορισμού προέκτασης εξερχόμενης φλόγας.

Εάν υπάρχει εξώστης ή άλλου είδους οριζόντια προεξοχή και είναι τοποθετημένη στο επίπεδο του ανωφλίου του ανοίγματος καθόλο το πλάτος του, η οριζόντια προέκταση της εξερχόμενης φλόγας ($P=projection$) υπολογίζεται κατά περίπτωση από τις Εξισώσεις (3.7) έως (3.10), όπως περιγράφεται στον Ευρωκώδικα.

– Στην περίπτωση που υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα:

- Εάν $h_{eq} \leq 1.25w_t$,

$$L_H = h_{eq} / 3 + P \quad (3.7)$$

- Εάν $h_{eq} > 1.25w_t$ και η απόσταση από οποιοδήποτε άλλο άνοιγμα $> 4w_t$

$$L_H = 0.3h_{eq}(h_{eq} / w_t)^{0.54} + P \quad (3.8)$$

- Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση

$$L_H = 0.454h_{eq}(h_{eq} / 2w_t)^{0.54} + P \quad (3.9)$$

– Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τοίχος πάνω από το άνοιγμα:

$$L_H = 0.6h_{eq}(L_L / h_{eq})^{1/3} + P \quad (3.10)$$

Παρατηρείται ότι κατά την περίπτωση ύπαρξης εξώστη, το ύψος της φλόγας μειώνεται κατά P , ενώ η οριζόντια προέκτασή της αυξάνεται κατά P σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει εξώστης.

3.4 Σχέσεις προσδιορισμού πλάτους εξερχόμενης φλόγας.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, το πλάτος της εξερχόμενης φλόγας ισούται με το πλάτος του ανοίγματος για την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει εξώστης. Επειδή δεν υπάρχει διαφοροποίηση για την περίπτωση κατά την οποία υπάρχει κάποια οριζόντια προεξοχή, θεωρείται ότι ισχύει η ίδια συνθήκη (Εξίσωση 3.11):

$$w_f = w_t \quad (3.11)$$

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Με στόχο την πειραματική διερεύνηση των ροϊκών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ΦΕΑ, έγινε χρήση πειραματικής διάταξης διαμερίσματος-πρόσοψης μικρής κλίμακας σύμφωνα με τη γεωμετρία του διαμερίσματος ISO 9705 (1993). Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διαμερίσματος, η πηγή της φωτιάς, οι μετρητικές διατάξεις και το σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Στην τελευταία ενότητα περιγράφεται η διαδικασία εκτίμησης των πειραματικών σφαλμάτων.

4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Για την πραγματοποίηση πειραμάτων που αφορούν στην εξάπλωση φωτιάς σε κλειστό χώρο, έχει αναπτυχθεί μια πρότυπη γεωμετρία διαμερίσματος, πλήρους κλίμακας, η οποία προσομοιώνει φωτιές σε εσωτερικό χώρο με ένα άνοιγμα (τύπου πόρτας), προκειμένου να αξιολογηθεί και να μελετηθεί η εξάπλωση μιας πυρκαγιάς σε σχέση με τα προϊόντα και τα υλικά των γύρω επιφανειών. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται στο πρότυπο ISO 9705 (1993).

Σε πολλά πειράματα μεγάλης και μεσαίας κλίμακας χρησιμοποιούνται διαστάσεις δωματίου (Lock et al., 2008, Bryner et al., 1994) με βάση το πρότυπο δωμάτιο του ISO 9705. Οι διαστάσεις ενός τυπικού δωματίου, σύμφωνα με το ISO9705, είναι 3.66m (μήκος) x 2.44m (πλάτος) x 2.44m (ύψος). Για άνοιγμα θεωρείται πόρτα, πλάτους 0.8 m και ύψους 2 m. Είναι εύλογο να παρατηρηθεί πως η διάσταση του ύψους στην περίπτωση του πρότυπου δωματίου είναι ίδια με το πλάτος του δωματίου.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πραγματοποίησή τους έγινε σε γεωμετρία δωματίου υπό κλίμακα, με διαστάσεις συμβατές με τις αντίστοιχες του ISO 9705, με στόχο την όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση ενός τυπικού δωματίου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε δωμάτιο υπό κλίμακα $\frac{1}{4}$ ως προς το πρότυπο δωμάτιο που ορίζεται στο ISO 9705. Το διαμέρισμα έχει εσωτερικές διαστάσεις 900mm (μήκος) x 600mm (πλάτος) x 600mm (ύψος), και άνοιγμα 200mm (πλάτος) x 500mm (ύψος), το οποίο αντιστοιχεί σε πόρτα. Στη συνέχεια προστέθηκε πρόσοψη (façade) στην εξωτερική πλευρά του νοτίου τοίχου όπου βρίσκεται το άνοιγμα. Οι διαστάσεις της κατασκευής συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση αυτών.

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις δωματίου και ανοιγμάτων

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
Δωμάτιο (εσωτερικές διαστάσεις)	900	600	600
Άνοιγμα – Πόρτα	-	200	500
Πρόσοψη	-	658	2100

4.1.1 Σκελετός

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το σκελετό της κατασκευής είναι χάλυβας διατομής 40mm x 40mm x 4mm (πάχος). Η επιλογή του χάλυβα ως δομικό υλικό έγινε ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή του σκελετού στις υψηλές θερμο-κρασίες οι οποίες αναμενόταν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, χωρίς την εμφάνιση ρωγμών και αστοχιών που θα έθεταν σε κίνδυνο ολόκληρη την κατασκευή.

Ο σκελετός αποτελείται από δύο τμήματα: το βασικό σκελετό του δωματίου και ένα κάλυμμα (καπάκι), τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1. Το κάλυμμα εφάπτεται πλήρως με τον βασικό σκελετό και η απόσπασή του από αυτόν διευκολύνει την τοποθέτηση των τοιχωμάτων, την προσβασιμότητα σε δύσκολα σημεία και τη μεταφορά του εφόσον κριθεί απαραίτητη. Επάνω στο κάλυμμα στερεώνεται η πρόσοψη του δωματίου.

Οι διαστάσεις του βασικού σκελετού και του καλύμματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις των τμημάτων του σκελετού της κατασκευής

	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Πάχος (mm)
Βασικός σκελετός	958	658	654	4
Κάλυμμα σκελετού	958	658	1000	4



Σχήμα 4.1: Ο βασικός σκελετός (αριστερά) και το κάλυμμα του σκελετού (δεξιά)

Για την καλύτερη στήριξη και ευθυγράμμιση ολόκληρης της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν στην κάτω πλευρά του, τέσσερα στηρίγματα (ένα σε κάθε γωνία), ρυθμιζόμενου ύψους. Τελικά, το δωμάτιο τοποθετήθηκε -με τα στηρίγματα αυτά- σε ύψος 19.6cm από το δάπεδο του εργαστηρίου.

Ολοκληρωμένη η διάταξη του μεταλλικού σκελετού απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ο χαλύβδινος σκελετός της κατασκευής

4.1.2 Τοιχώματα

Για τα πλαϊνά τοιχώματα, την οροφή και το δάπεδο του διαμερίσματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις πυράντοχης γυψοσανίδας πάχους 12.5mm η καθεμιά, εσωτερικά του σκελετού. Η τοποθέτηση τους έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν εκτεθειμένα μέρη του σκελετού από την εσωτερική πλευρά του δωματίου. Η έκθεση του σκελετού στο εσωτερικό της κατασκευής θα είχε αρνητικό αντίκτυπο στις μετρήσεις, επηρεάζοντας σημαντικά την ακτινοβολία εντός του δωματίου. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν πρώτα οι γυψοσανίδες του δαπέδου και στη συνέχεια αυτές των πλαϊνών τοιχωμάτων με «συρταρωτό» τρόπο. Τέλος, οι γυψοσανίδες της οροφής βιδώθηκαν στην κάτω πλευρά του καλύμματος, ώστε οι ακμές τους να εφάπτονται στις εσωτερικές πλευρές των πλαϊνών γυψοσανίδων. Με το βίδωμα αυτό, αποφεύγεται το ενδεχόμενο κατάρρευσής τους λόγω του βάρους τους. Τα βιδώματα αυτά έγιναν πάνω σε τρεις λάμες, πλάτους 40 mm και πάχους 4 mm, οι οποίες συγκολλήθηκαν κατά μήκος του καλύμματος. Σε κάθε περίπτωση το άνοιγμα της διάταξης έγινε στο νότιο τοίχο του δωματίου.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των γυψοσανίδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.3: Διαστάσεις των γυψοσανίδων της κατασκευής

Γυψοσανίδες	Δαπέδου	Ανατολικής – Δυτικής (x4)	Νότιας- Βόρειας (x4)	Οροφής (x2)
Διαστάσεις (mm)	950x650	950x625	950x625	900x600

Στο Σχήματα 4.3 απεικονίζονται τα βήματα κατασκευής του διαμερίσματος και στο Σχήμα 4.4 το διαμέρισμα χωρίς οροφή σε δύο όψεις.



Σχήμα 4.3: Τα βήματα κατασκευής του υπό κλίμακα δωματίου



Σχήμα 4.4: Το δωμάτιο σε τρισδιάστατη (αριστερά) και οπίσθια (δεξιά) όψη πριν την τοποθέτηση της οροφής

4.1.3 Γεωμετρία ανοίγματος

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μόνο η γεωμετρία της πόρτας, οι διαστάσεις της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Γενικά, όταν ένα διαμέρισμα διαθέτει εξώστη (μπαλκόνι) ικανοποιητικού βάθους, σχεδόν πάντα η πρόσβαση σε αυτόν γίνεται διαμέσου πόρτας. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το

άνοιγμα είναι παράθυρο, συνήθως η οριζόντια προεκβολή έχει μικρό βάθος και εγκαθίσταται μόνο για λόγους πυροπροστασίας.

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις των γυψοσανίδων της κατασκευής

Άνοιγμα	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
Πόρτα	200	500

4.1.4 Πρόσοψη

Στο δωμάτιο προστέθηκε πρόσοψη από μονή πυράντοχη γυψοσανίδα πάχους 12.5mm, με διαστάσεις 658 mm (πλάτος) x 2100 mm (ύψος), η οποία τοποθετήθηκε εξωτερικά της πλευράς του ανοίγματος (νότιας πλευράς). Προκειμένου να διευκολυνθεί η εκτίμηση της γεωμετρίας της φλόγας μέσω της επεξεργασίας εικόνας και η μέτρηση των αποστάσεων επί της πρόσοψης, χαράχθηκε με τη βοήθεια οργάνου laser πλέγμα με τετραγωνίδια πλευράς 100 mm. Επίσης, δεδομένου ότι ο εξώστης ανήκει στον όροφο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το πυροδιαμέρισμα, σχεδιάστηκε με μαύρο χρώμα το πλαίσιο της πόρτας του άνω ορόφου. Έτσι, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μπορούσε να αποδοθεί πιο παραστατικά η κατακόρυφη διάδοση της ΦΕΑ και κατέστη δυνατή μια πρώτη ποιοτική εκτίμηση της επίδρασης του εξώστη στη θερμική καταπόνηση που δέχεται ο άνω όροφος. Η πρώτη σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε δεν περιελάμβανε εξώστη, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως βάση σύγκρισης για τα επόμενα πειράματα με εξώστη που ακολούθησαν.

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη σε πλάγια όψη, καθώς και το πλέγμα και το πλαίσιο που χαράχθηκαν επί της πρόσοψης με χρήση laser.



Σχήμα 4.5: Πλάγια όψη της κατασκευής (αριστερά), χάραξη πλέγματος και πλαισίου της πόρτας του άνω ορόφου με τη χρήση laser (κέντρο) και εμπρόσθια όψη της κατασκευής (δεξιά)

4.1.5 Εξώστης

Στην εγκατάσταση προσαρμόστηκαν εναλλακτικά, εξώστες βάθους 100, 200, 300 και 400 mm από πυράντοχο υλικό, πάχους 20 mm. Για τη στήριξή τους χρησιμοποιήθηκαν δύο χαλύβδινες ορθές γωνίες οι οποίες βιδώθηκαν κατά την κατακόρυφη διεύθυνση επάνω στο μεταλλικό σκελετό εκατέρωθεν της πρόσοψης. Οι εξώστες με τη σειρά τους βιδώθηκαν επάνω στην οριζόντια πλευρά των γωνιών, σχηματίζοντας την επιθυμητή γωνία 90° με το επίπεδο της πρόσοψης. Δόθηκε προσοχή ώστε οι γωνίες να βρίσκονται πάνω από τους εξώστες, ώστε η μεταλλική τους επιφάνεια να μην έρχεται σε επαφή με τη φλόγα επηρεάζοντας τις μετρήσεις και την ακτινοβολία. Επίσης, το σύστημα αυτό επέτρεπε την καθ' ύψος μετατόπιση των εξωστών, καθώς οι κοχλίες που συγκρατούσαν τις γωνίες μπορούσαν εύκολα να βιδωθούν στο επιθυμητό ύψος. Εξετάστηκαν δύο ύψη εξώστη, μετρούμενα από την κάτω ακμή της πόρτας: $Z=600$ mm και $Z=500$ mm. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ο εξώστης βάθους 200 mm πριν την τοποθέτησή του, και η εγκατάσταση σε πλάγια και εμπρόσθια όψη μετά την τοποθέτηση του εξώστη και των μεταλλικών γωνιών.

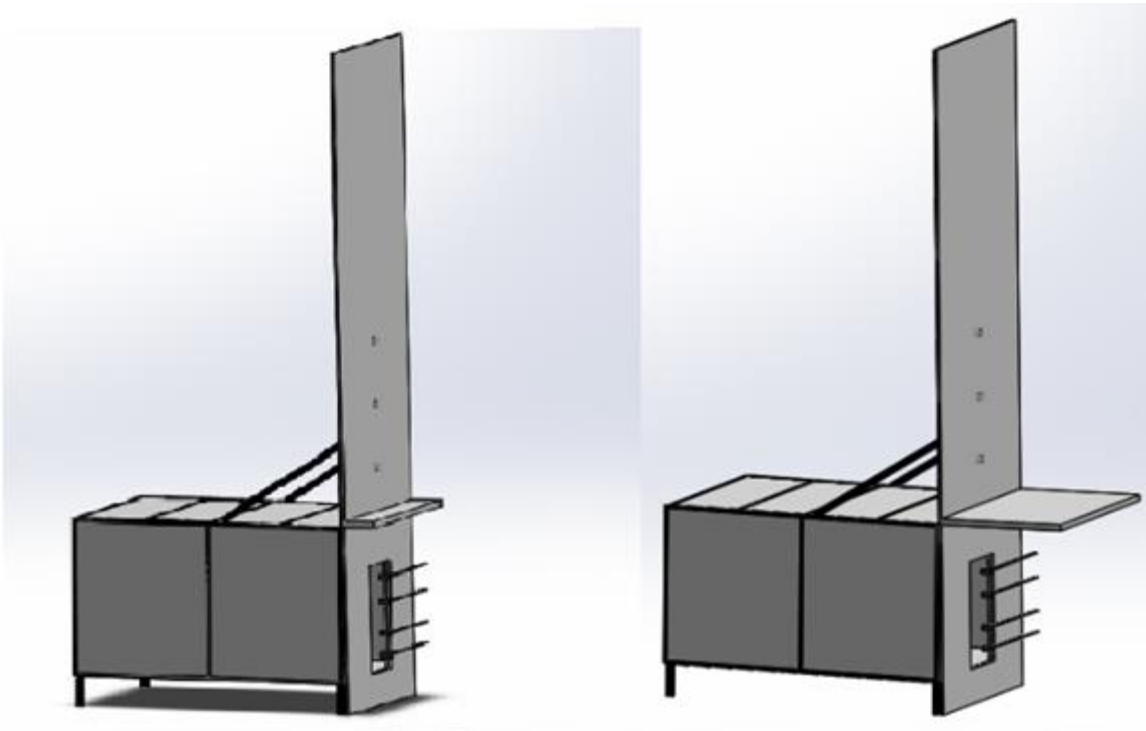


Σχήμα 4.6: Εξώστης βάθους 200mm (αριστερά), πλάγια όψη της κατασκευής με εξώστη βάθους 200mm (κέντρο) και εμπρόσθια όψη της κατασκευής με εξώστη βάθους 200mm (δεξιά)

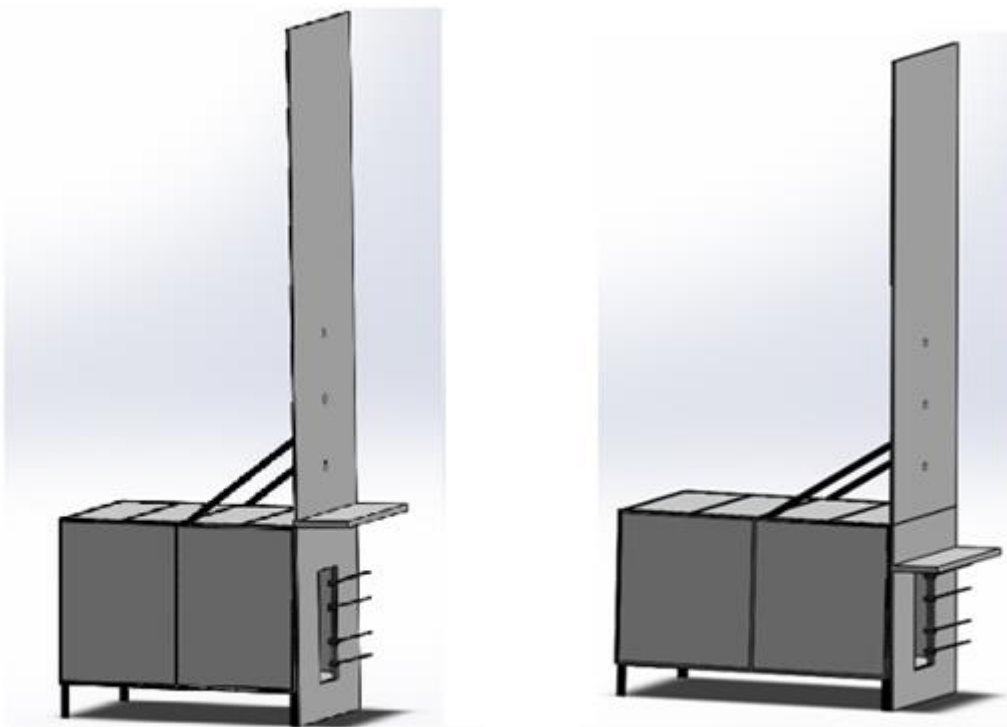


Σχήμα 4.7: Πρόσοψη διαμερίσματος με εξώστη βάθους 200mm σε ύψος $Z=600$ mm (αριστερά) σε ύψος $Z=500$ mm (δεξιά)

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η πρόσοψη της εγκατάστασης για δύο διαφορετικά ύψη εξώστη. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 απεικονίζονται σε πλάγια όψη τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 4.8: Πλάγια όψη διαμερίσματος με εξώστη βάθους 200mm σε ύψος $Z=600\text{mm}$ (αριστερά) και διαμερίσματος με εξώστη βάθους 400mm σε ύψος $Z=600\text{mm}$ (δεξιά)

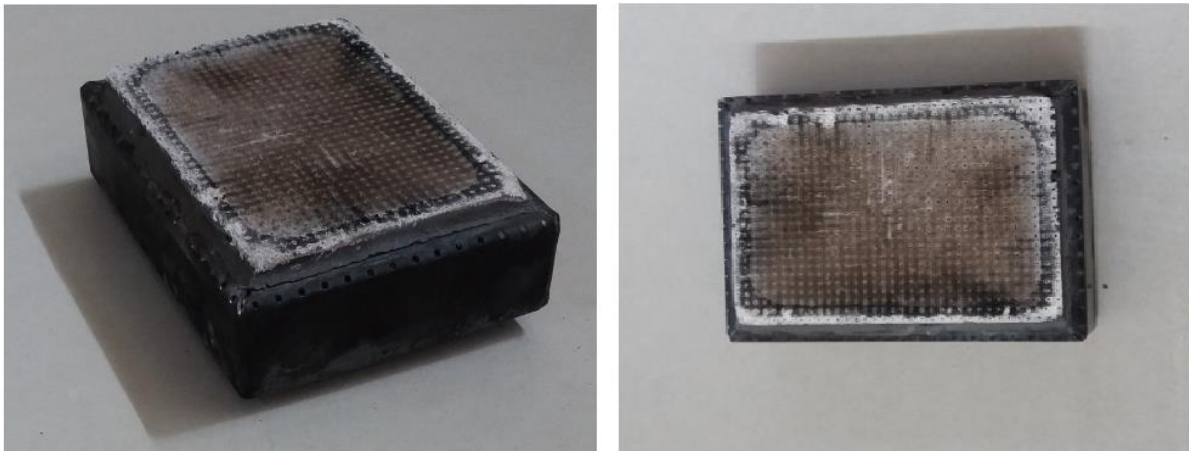


Σχήμα 4.9: Πλάγια όψη διαμερίσματος με εξώστη βάθους 200mm σε ύψος $z=600\text{mm}$ (αριστερά) και διαμερίσματος με εξώστη βάθους 200mm σε ύψος $Z=500\text{mm}$ (δεξιά)

4.2 Πηγή φωτιάς

4.2.1 Πορώδης καυστήρας

Το καύσιμο διοχετεύεται εντός του δωματίου μέσω ενός πορώδη καυστήρα τοποθετημένου στο γεωμετρικό κέντρο του δαπέδου. Ο καυστήρας διαθέτει οπές διαμέτρου 1 mm σε όλη την επιφάνεια του. Είναι κατασκευασμένος από οξείδιο του αλουμινίου κατάλληλο για το περιβάλλον μεγάλων θερμοκρασιών που εκτίθεται. Ο καυστήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο του δωματίου με τη μεγάλη διάσταση του παράλληλη στη μεγάλη πλευρά του δωματίου και την άνω επιφάνειά του σε ύψος 150 mm από το δάπεδο. Ο καυστήρας (Σχήμα 4.10) είχε συνολικό ύψος 55mm, μήκος 175mm και πλάτος 125mm.



Σχήμα 4.10: Ο χρησιμοποιούμενος πορώδης καυστήρας σε τρισδιάστατη απεικόνιση (αριστερά) και κάτοψη (δεξιά)

4.2.2 Δίκτυο παροχής καυσίμου

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το καύσιμο παρεχόταν από δύο φιάλες πεπιεσμένου μεθανίου καθαρότητας 99.95%. Στη συνέχεια διοχετευόταν σε δύο ψηφιακά παροχόμετρα που λειτουργούσαν ταυτόχρονα και ρύθμιζαν επακριβώς την επιθυμητή ογκομετρική παροχή καυσίμου. Έπειτα, οι δύο παροχές ενώνονταν σε έναν ενιαίο αγωγό, ο οποίος τελικά κατέληγε στον πορώδη καυστήρα. Δεδομένου ότι έπρεπε να δημιουργηθεί φλόγα διάχυσης, μέσα από το δίκτυο διέρρεε αποκλειστικά καύσιμο και η έναυση γινόταν χειροκίνητα με τη χρήση αναπτήρα.

4.2.3 Σύγκριση ισχύος μικρής κλίμακας με πραγματική κλίμακα

Στην Ενότητα 2.4.2 αναλύθηκε ότι με βάση τις εξισώσεις διατήρησης που διέπουν τα φαινόμενα της φωτιάς έχουν δημιουργηθεί οι αδιάστατες ομάδες Π. Οι ομάδες αυτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μοντελοποίησης μικρής κλίμακας και συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5. Μέσω αυτών γίνεται εφικτή η αναγωγή των τιμών των μεγεθών που αφορούν τη φωτιά σε διαμέρισμα από μία εγκατάσταση πραγματικών διαστάσεων σε μία γεωμετρικά όμοια μικρότερης κλίμακας. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη για τη διερεύνηση μιας πυρκαγιάς, καθώς μετράται ουσιαστικά η ισχύς της φωτιάς. Για τη μοντε-

λοποίηση τέτοιων περιπτώσεων είναι απαραίτητη η συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην περίπτωση του μοντέλου με αυτή του πρωτότυπου.

Από τις σχέσεις των Π, παρατηρείται πως για την απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του μοντέλου και του πρωτότυπου, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η αδιάστατη ομάδα Π_2 , η οποία δίνεται από την Εξίσωση (2.23).

Στην περίπτωση της μοντελοποίησης με βάση τη γεωμετρική κλίμακα, όπου το l είναι μια φυσική διάσταση του συστήματος, για τη διατήρηση της ομάδας Π_2 ισχύει η Εξίσωση (4.1) που συσχετίζει το ΡΕΘ μεταξύ μοντέλου (δείκτης m)-πρωτότυπου (δείκτης p):

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_p \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^{5/2} \quad (4.1)$$

ή διαφορετικά η Εξίσωση (4.2):

$$\dot{Q} \sim l^{5/2} \quad (4.2)$$

Όπου:

- \dot{Q}_m : η θερμική ισχύς του μοντέλου (kW)
- \dot{Q}_p : η θερμική ισχύς του πρωτότυπου (kW)
- l_m : η φυσική διάσταση του μοντέλου (m)
- l_p : η φυσική διάσταση του πρωτότυπου (m)

Στο 7^ο κεφάλαιο υπολογίζεται αναλυτικά ότι τα τρία επίπεδα θεωρητικής θερμικής ισχύος της φωτιάς που επιλέχθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων υπό κλίμακα $\frac{1}{4}$ ήταν τα εξής: 89.7 kW, 119.6 kW και 143.51kW. Στον Πίνακα 4.5 γίνεται η αναγωγή των επιπέδων ισχύος σε πυροδιαμέρισμα πραγματικών διαστάσεων, κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (4.1). Παρατηρείται ότι οι τιμές ισχύος της φωτιάς (2.8, 3.8 και 2.6 MW) που προκύπτουν για το πυροδιαμέρισμα πραγματικών διαστάσεων αντιστοιχούν στα τυπικά επίπεδα ισχύος φωτιάς που παρατηρούνται σε φωτιές σε κτίρια.

Πίνακας 4.5: Αναγωγή θερμικής ισχύος από το μοντέλο στο πρωτότυπο

Μέγεθος	Μοντέλο	Πρωτότυπο
Μήκος (mm)	900	3600
Πλάτος (mm)	600	2400
Ύψος (mm)	600	2400
Θερμική ισχύς (kW)	89.70	2870.40
	119.60	3827.20
	143.51	4592.32

Στις περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται η περίπτωση πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας, η οποία αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μελέτη των χαρακτηριστικών μιας πυρκαγιάς. Βασική επιδίωξη είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε όμοια σημεία κατά την ανάλυση σε γεωμετρικά όμοια συστήματα. Με τον όρο όμοια σημεία αναφέρονται τα σημεία που η αναλογία του χώρου και του χρόνου (ως αδιάστατες μεταβλητές) μένει ίδια. Δη-

λαδή στο μοντέλο και στο πρωτότυπο οι διαστάσεις ενός όμοιου σημείου ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$) ακολουθούν την αναλογία της κλίμακας που έχει επιλεγεί, ενώ για το χρόνο μοιώς ισχύει η Εξίσωση (4.3):

$$\hat{t} \sim t\sqrt{g/l} \tag{4.3}$$

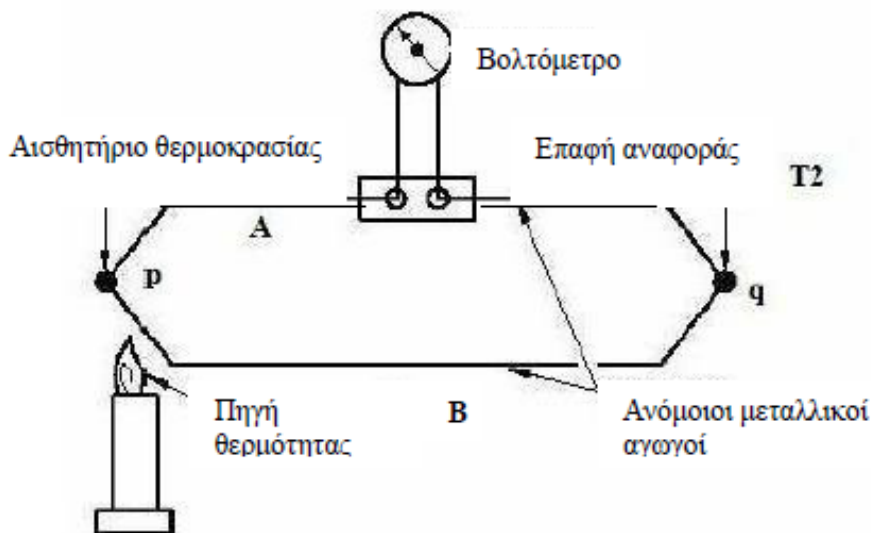
Από την Εξίσωση της ενέργειας (2.22) αν όλες οι απώλειες θερμότητας θεωρηθούν ανάλογες του $l^{5/2}$, τότε για τη θερμοκρασία ισχύει $T \sim l^0$. Αυτό υποδεικνύει πως η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διαστάσεις της κλίμακας και δεν επηρεάζεται από αυτή.

4.3 Μετρητικές διατάξεις

Για τη μέτρηση των θερμικών και ροϊκών χαρακτηριστικών της φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία, μετρητές ροής θερμότητας, δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας και σωλήνες Pitot. Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν από ψηφιακά παροχόμετρα ακριβείας και οι συγκεντρώσεις των προϊόντων της καύσης μετρούνταν από αναλυτή καυσαερίων. Ο τρόπος σύνδεσής τους και τα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.1 Θερμοστοιχεία

Τα θερμοστοιχεία αποτελούν τη βασική μετρητική συσκευή για τη μέτρηση θερμοκρασίας. Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο Σίμπεκ (Seebeck effect) ή αλλιώς θερμοηλεκτρισμός. Κατά το φαινόμενο αυτό, η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού του θερμοστοιχείου προκαλεί την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο άκρων του (Σχήμα 4.11).

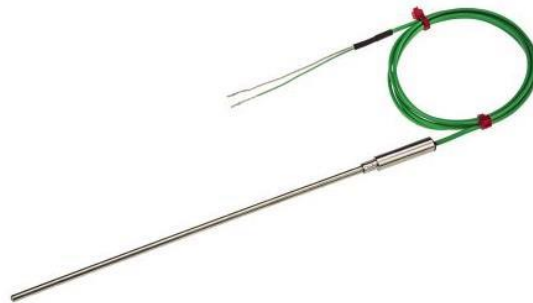


Σχήμα 4.11: Η αρχή λειτουργίας του θερμοστοιχείου

Ένα θερμοστοιχείο αποτελείται από δύο μεταλλικούς αγωγούς κατασκευασμένους από διαφορετικά μέταλλα, οι οποίοι στις άκρες τους έρχονται σε επαφή. Η μια από τις δύο επαφές των δύο υλικών διατηρείται σε μία γνωστή θερμοκρασία αναφοράς (0°C), ενώ η άλλη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας εξωτερικής θερμο-

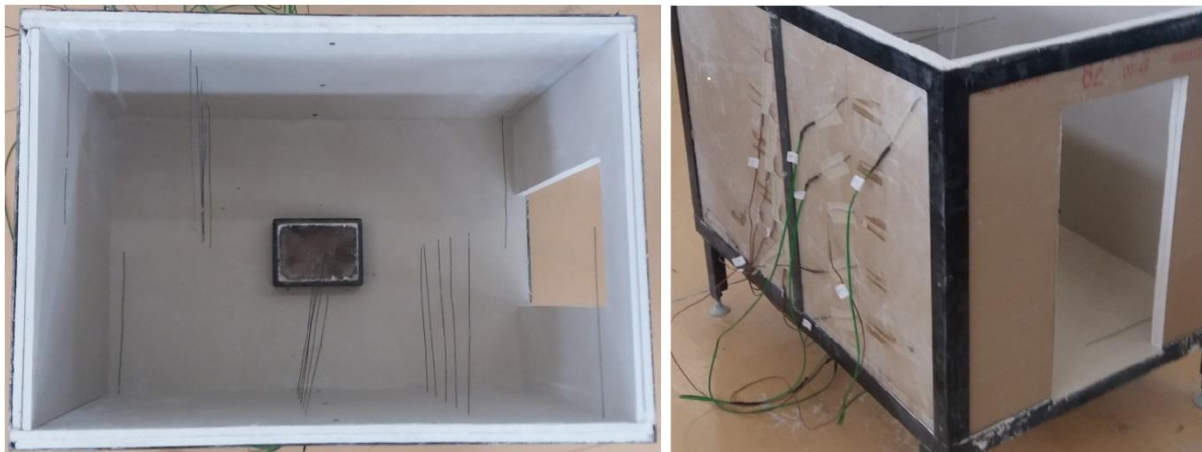
κρασίας. Μόλις τα μέταλλα αυτά θερμανθούν, παρατηρείται κίνηση των ηλεκτρονίων της θερμής περιοχής προς την ψυχρή περιοχή των μετάλλων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης (διαφορά δυναμικού) στα άκρα τους. Το μέγεθος της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης εξαρτάται από τη διαφορά της θερμοκρασίας του σημείου επαφής, το οποίο χρησιμοποιείται ως αισθητήριο θερμοκρασίας (measuring junction), με άλλο σημείο του κυκλώματος. Για τη διατήρηση της επαφής αναφοράς (reference junction) στη σταθερή θερμοκρασία των 0°C χρησιμοποιούνται διάφορες ηλεκτρονικές και φυσικές μέθοδοι (Kasap, 2004).

Υπάρχουν πολλά θερμοστοιχεία, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους και η επιλογή τους σε κάθε περίπτωση διαφέρει ανάλογα το εύρος θερμοκρασιών που μετράται και την ευαισθησία. Διάφοροι τύποι είναι οι K, J, N, E, B, R, S κ.α. Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται ένα θερμοστοιχείο τύπου K, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.



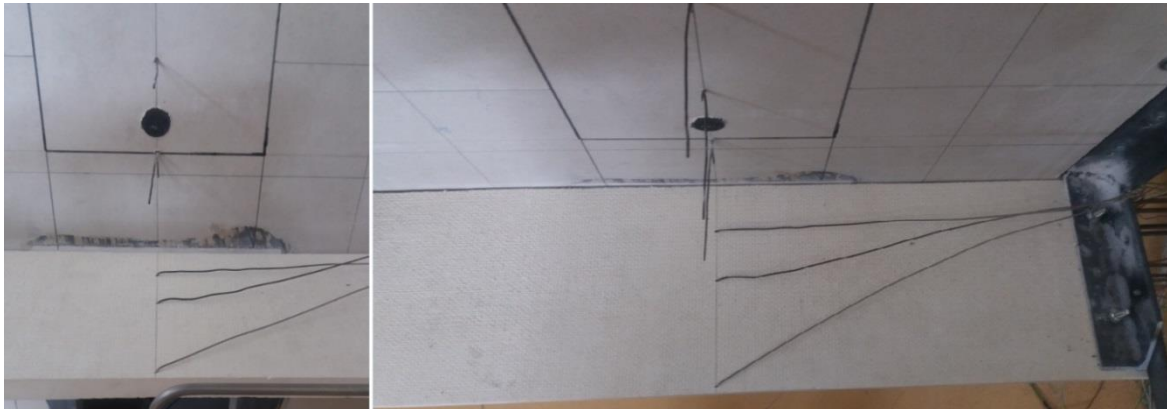
Σχήμα 4.12: Θερμοστοιχείο τύπου K

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο εσωτερικό της κατασκευής ήταν μήκους 150 mm, και τοποθετήθηκαν στη δυτική και ανατολική πλευρά του δωματίου σε διάφορα μήκη και ύψη (Σχήμα 4.13, αριστερά). Η στερέωσή τους έγινε πάνω στη γυψοσανίδα με χαρτοταινία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 στα δεξιά. Οι ακριβείς συντεταγμένες των θερμοστοιχείων αναφέρονται στο 6^ο κεφάλαιο. Στην πρόσοψη, χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία των 450mm καθώς και των 150mm. Τα θερμοστοιχεία τρυπήθηκαν διαμπερώς στη γυψοσανίδα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη επάνω στην κεντρική γραμμή της.



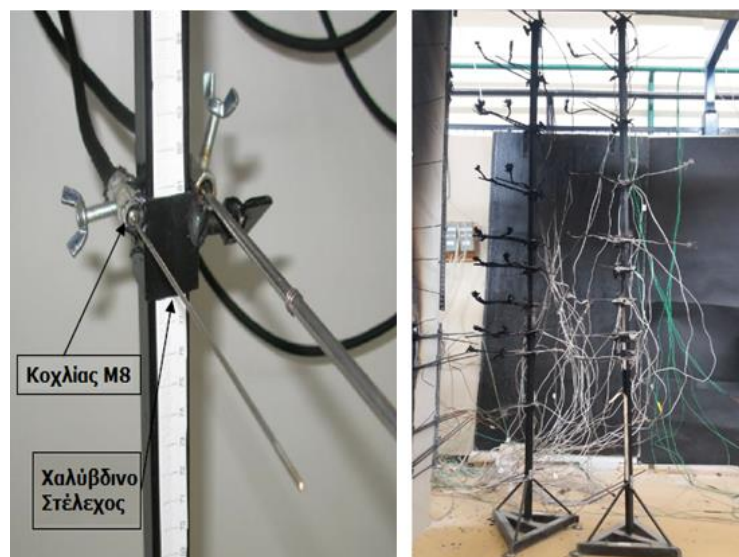
Σχήμα 4.13: Διάταξη θερμοστοιχείων μέσα στο δωμάτιο (αριστερά) και η χαρτοταινία εξωτερική όψη αυτού (δεξιά)

Το πόσο εξείχαν από την επιφάνεια της πρόσοψης καθοριζόταν από τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Σε ορισμένα ύψη τοποθετήθηκαν έως και τέσσερα διαφορετικά θερμοστοιχεία. Τα δύο από αυτά μετρούσαν τη θερμοκρασία του πλουμίου σε δύο διαφορετικές θέσεις κατά τον άξονα x και τα άλλα δύο μετρούσαν τη θερμοκρασία του τοιχώματος στην εκτεθειμένη και τη μη εκτεθειμένη πλευρά. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέτρηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος, ήταν ζωτικής σημασίας να μην τρυπηθεί διαμπερώς η γυψοσανίδα, αλλά η οπή να φτάνει μέχρι το επιθυμητό πάχος. Επίσης, θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν και στο τοίχωμα του εξώστη σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του άξονα x . Στο Σχήμα 4.14 φαίνονται θερμοστοιχεία πάνω στην πρόσοψη καθώς και κατά μήκος του εξώστη.



Σχήμα 4.14: Διάταξη θερμοστοιχείων που προεξέχουν από την πρόσοψη και θερμοστοιχείων και που μετρούν τη θερμοκρασία του κάτω τοιχώματος του εξώστη χωρίς να εξείχουν.

Ένας μεγάλος αριθμός θερμοστοιχείων (βλ Κεφάλαιο 6) εγκαταστάθηκε πάνω σε δύο μεγάλους χαλύβδινους στύλους ύψους 1.8 m πάνω στους οποίους χαλύβδινα στελέχη πλευράς 4x4 cm και ύψους 3 cm, συσφίχτηκαν στα επιθυμητά ύψη. Πάνω στα δαχτυλίδια συγκολλήθηκαν κοχλίες M8 μήκους 30mm, μέσα από τους οποίους περάστηκαν τα θερμοστοιχεία. Με τον τρόπο αυτό η στήριξη των θερμοστοιχείων σε οποιοδήποτε ύψος γινόταν με απλή μετακίνηση του στελέχους επάνω στον κάθε στύλο. Οι στύλοι μαζί με τα στελέχη και τα θερμοστοιχεία ονομάστηκαν «δέντρα θερμοστοιχείων» και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.15 (δεξιά).



Σχήμα 4.15: Χαλύβδινο στέλεχος με δύο κοχλίες M8 μέσω των οποίων διέρχονται τα θερμοστοιχεία (αριστερά) και τα δύο δέντρα των θερμοστοιχείων (δεξιά)

4.3.2 Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας

Μαζί με τη μέτρηση της θερμοκρασίας, η μέτρηση της ταχύτητας της ροής σε ένα πείραμα φωτιάς είναι μία από τις πιο βασικές μεθόδους για να κατανοηθεί η συμπεριφορά της καθώς επίσης και να χαρακτηριστεί το περιβάλλον της φλόγας. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι, όπως οι LDV (Laser Doppler Velocimeter), PIV (Particle Image Velocimetry, για την ποσοτικοποίηση του πεδίου ροής. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες δοκιμές φωτιάς οι προηγούμενες μέθοδοι είναι δύσκολο να εφαρμοστούν, λόγω των μη σταθερών χαρακτηριστικών και του «σκληρού» περιβάλλοντος της φωτιάς, συμπεριλαμβανομένων και των προϊόντων της καύσης, των σωματιδίων αιθάλης και των μεγάλων μεταβολών της θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, η ανεμομετρία θερμού νήματος είναι υπερβολικά ευαίσθητη σε χαμηλές ροές και είναι εξαιρετικά εύθραυστη σε καπνώδη. Για τους λόγους αυτούς, ο κλασικός μετρητής ταχύτητας διαφορικής πίεσης είναι συνηθισμένος σε τέτοιες δοκιμές, καθώς προσφέρει ευκολία στη χρήση, στιβαρότητα και καταλληλότητα για δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Ο πλέον διαδεδομένος μετρητής ταχύτητας διαφορικής πίεσης είναι ο σωλήνας Pitot, ωστόσο παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην κατεύθυνση της ροής, όπως επίσης και υψηλό κίνδυνο απόφραξης των οπών μέτρησης λόγω της ροής των καυσαερίων. Για το λόγο αυτό, σε πολλές δοκιμές φωτιάς χρησιμοποιείται ο σωλήνας Pitot με χρήση γεωμετρίας διπλής κατεύθυνσης (bi-directional probe), ο οποίος τοποθετείται ακριβώς στο άνοιγμα του διαμερίσματος. Το πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι ότι δε χρειάζεται να είναι εκ των προτέρων γνωστή η κατεύθυνση της ροής. Ο ανιχνευτής (probe) είναι σε θέση να μετράει την ταχύτητα και προς τις δύο κατευθύνσεις (Kim and Kim, 2013). Ο προσδιορισμός της στατικής ταχύτητας απαιτεί τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στα δύο άκρα του ανιχνευτή.

Ο μετρητής (Σχήμα 4.16) αποτελείται από ένα βραχύ τμήμα σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα ($L/D=2$) με ένα διάφραγμα στο κέντρο και δύο οπές που διανοίγονται εκατέρωθεν του διαφράγματος και κοντά σε αυτό. Ο άξονας του σωλήνα ευθυγραμμίζεται με τη ροή, η ανάντη οπή ανιχνεύει την πίεση ανακοπής και η κατάντη οπή ανιχνεύει μία πίεση ελάχιστα μικρότερη από την στατική. Οι μικροί σωλήνες που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τα σήματα της πίεσης χρησιμεύουν επίσης ως βάση στήριξης του μετρητή (McCaffrey and Heskestad, 1976). Ο προσδιορισμός της τοπικής ταχύτητας με τη χρήση ενός δικατευθυντικού μετρητή δίνεται από την Εξίσωση (4.4):

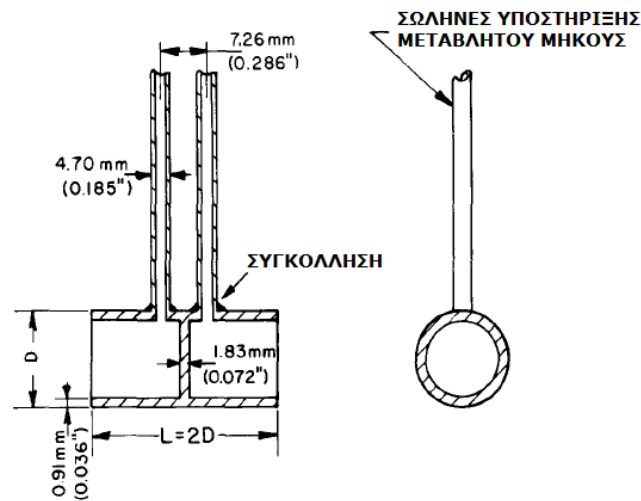
$$u = \frac{1}{k_p} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (4.4)$$

Όπου:

- u : η ταχύτητα (m/s)
- k_p : η σταθερά του ανιχνευτή
- Δp : η διαφορά πίεσης (Pa)
- ρ : η πυκνότητα (kg/m^3), η οποία υπολογίζεται από την Εξίσωση (4.5) που αντιστοιχεί στην καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{1.013 \cdot 10^5}{287.1T} = \frac{352.8}{T} \quad (4.5)$$

Όπου η πίεση είναι η ατμοσφαιρική, η παγκόσμια σταθερά αντιστοιχεί στον ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα και η θερμοκρασία μετριέται σε Κ.



Σχήμα 4.16: Τομή δικατευθυντικού μετρητή ταχύτητας

Για έναν ιδανικό σωλήνα Pitot συνήθως η σταθερά k_p ισούται με τη μονάδα, αλλά για έναν δικατευθυντικό μετρητή εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως τον αριθμό Reynolds, το σχήμα του μετρητή και την κατεύθυνση που τοποθετείται. Οι McCaffrey και Heskestad πραγματοποίησαν προσαρμογή της πολυωνυμικής καμπύλης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για ροές με μικρούς αριθμούς Reynolds ($40 < Re < 1200$) με ποσοστό αβεβαιότητας 5% και βρήκαν ότι η ασυμπτωτική τιμή της σταθεράς k_p για μεγάλους Re ήταν 1.08.

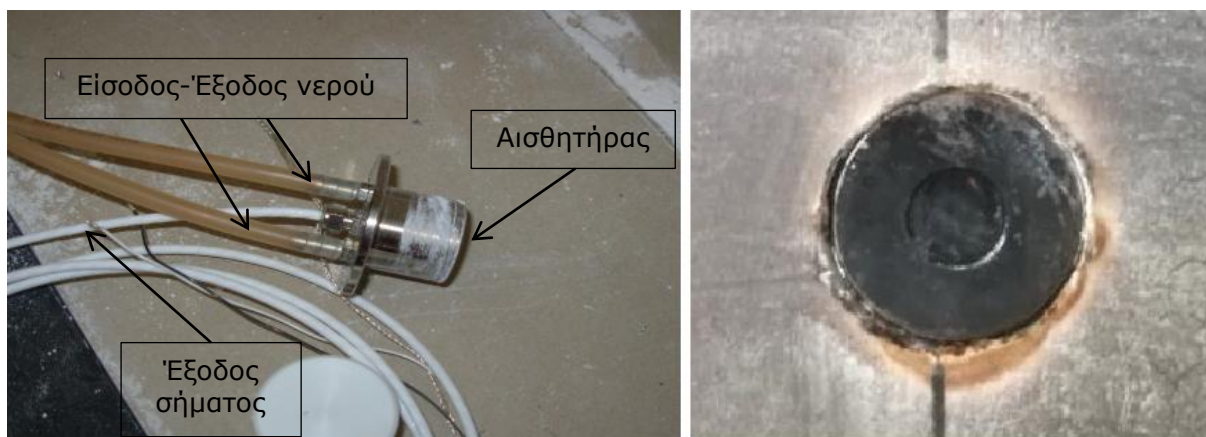
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο οι δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας εγκαταστάθηκαν σε τέσσερις θέσεις στο άνοιγμα του διαμερίσματος ($Z = 50, 150, 250$ και 350 mm), όπου παρατηρείται κίνηση των αερίων σε δύο κατευθύνσεις, κάτι που στις μετρούμενες τιμές της ταχύτητας αποτυπώνεται με το θετικό ή το αρνητικό πρόσημο κατά περίπτωση (Σχήμα 4.17). Κάθε μετρητής ταχύτητας συνδέθηκε με ένα ψηφιακό μικρομανόμετρο τύπου OMEGA PX277 προκειμένου να μετρηθεί η δυναμική πίεση στα άκρα του.



Σχήμα 4.17: Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας στο άνοιγμα του δωματίου

4.3.3 Μετρητές ροής θερμότητας

Ένας μετρητής ροής θερμότητας είναι μια μετρητική συσκευή με την οποία δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της ροής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το περιβάλλον στο σημείο που είναι τοποθετημένη η συσκευή, ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες, το οπτικό πεδίο ενός τέτοιου μετρητή είναι 180°. Για τη μελέτη της ροής θερμότητας της φωτιάς στις πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε ένας υδρόψυκτος μετρητής ροής θερμότητας (water-cooled heat flux sensor) τύπου Schmidt-Boelter, ο οποίος είναι κατασκευασμένος για μετρήσεις σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Τοποθετήθηκαν τρεις μετρητές στη μεσοκάθετο της πρόσοψης, σε ύψη 650, 850 και 1050 mm από το δάπεδο του δωματίου. Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται στα αριστερά ολόκληρο το μετρητικό όργανο σε πλάγια όψη και στα δεξιά η εμπρόσθια όψη του όταν είναι τοποθετημένο πάνω στην πρόσοψη.



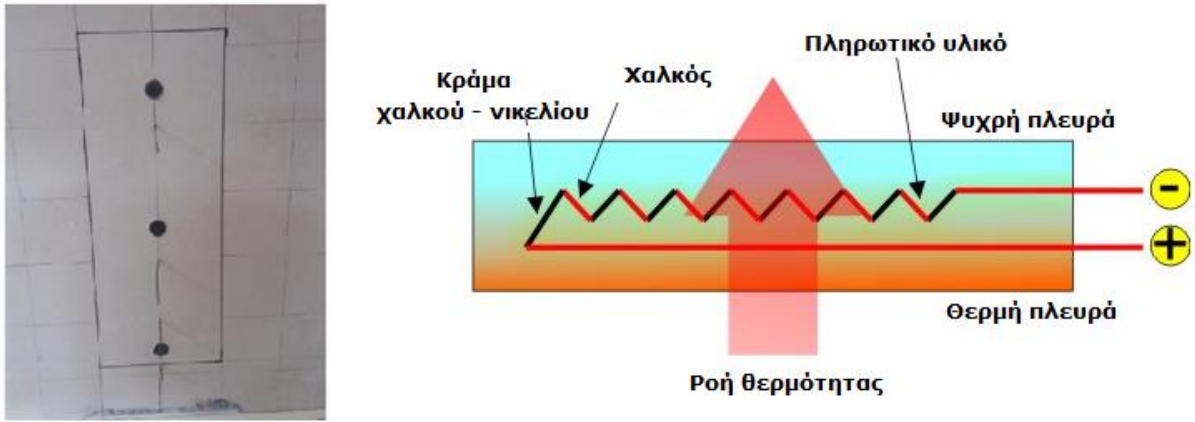
Σχήμα 4.18: Ο μετρητής ροής θερμότητας σε πλάγια όψη (αριστερά) και σε εμπρόσθια όψη (δεξιά)

Στο Σχήμα 4.19 αριστερά απεικονίζονται οι τρεις μετρητές ροής θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη και τοποθετήθηκαν επί της πρόσοψης εντός του πλαισίου της "θεωρητικής" πόρτας του άνω ορόφου. Ο αισθητήρας αποτελείται από μια θερμοστήλη, η οποία ουσιαστικά είναι θερμοστοιχεία τοποθετημένα σε σειρά. Η αρχή λειτουργίας της θερμοστήλης βασίζεται στη μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός λεπτού στρώματος (film). Το στρώμα αυτό εσωκλείεται μεταξύ των δύο ενώσεων (junctions) των θερμοστοιχείων, τα οποία έρχονται σε επαφή είτε με τη θερμή είτε με την ψυχρή τους επιφάνεια με ένα αντικείμενο (Σχήμα 4.19 δεξιά). Καθώς η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσου της ένωσης του κάθε θερμοστοιχείου και διεισδύει στο λεπτό στρώμα, η κίνηση εξαναγκάζει το θερμοστοιχείο να παράξει τάση, η οποία είναι ανάλογη του ποσού θερμότητας που διείσδυσε στο λεπτό στρώμα. Επομένως, η ροή θερμότητας είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς, διαιρεμένης με τη θερμική αγωγιμότητα του αισθητήρα, ενώ το σήμα το οποίο παράγει ο μετρητής είναι σε W/m^2 .

Η θερμική αγωγιμότητα του αισθητήρα είναι μια σταθερά η οποία υπολογίζεται με πειραματικές μεθόδους στο εργαστήριο παρασκευής της συσκευής και επισυνάπτεται με τη συσκευή κατά την παραγγελία της. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι κατασκευασμένος ώστε να μετράει ροή θερμότητας έως $200 kW/m^2$.

Όπως αναφέρθηκε, ο μετρητής που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδρόψυκτος, οπότε σε συνθήκες εφαρμογές μελέτης φωτιάς απαιτείται η σύνδεσή του με παροχή νερού 3 bar. Ο αισθητήρας διαμέτρου 25.4 mm (που χρησιμοποιήθηκε) χρειάζεται παροχή

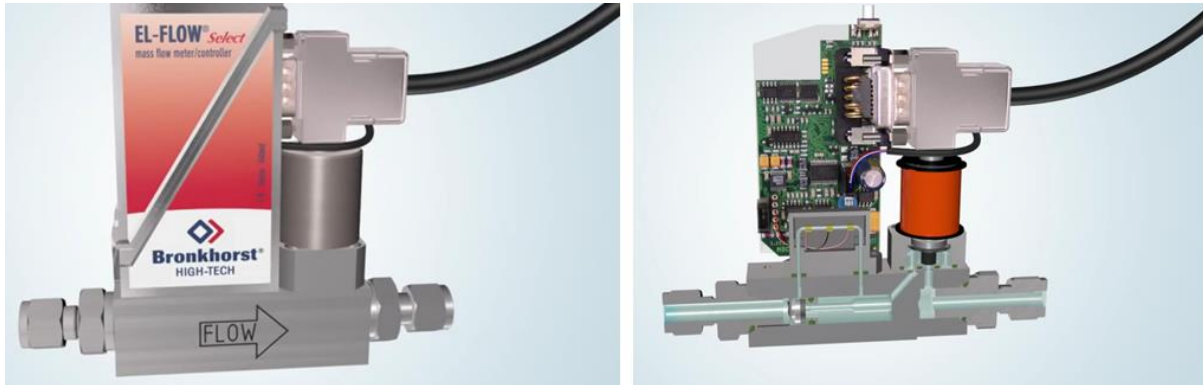
νερού 30 l/hr ώστε να απομακρύνεται η θερμότητα που παράγεται. Για το λόγο αυτό η σύνδεσή και ο έλεγχός του γίνονται με παροχόμετρο συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο ύδρευσης.



Σχήμα 4.19: Οι τρεις μετρητές ροής θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη (αριστερά) και τα χαρακτηριστικά ενός μετρητή ροής θερμότητας (δεξιά)

4.3.4 Ψηφιακά παροχόμετρα

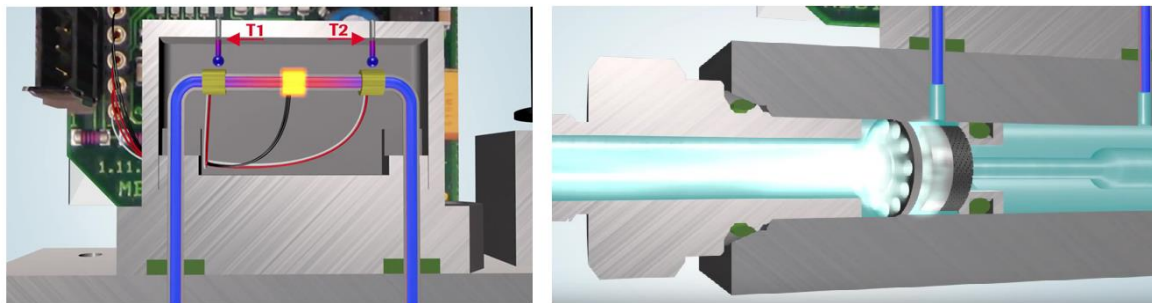
Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η ογκομετρική παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν από δύο ψηφιακά θερμικά παροχόμετρα Bronkhorst EL-FLOW select (Σχήμα 4.20 αριστερά), τα οποία ήταν συνδεδεμένα σειριακά με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 4.20: Το θερμικό παροχόμετρο Bronkhorst EL-FLOW select (αριστερά) και η τομή του (δεξιά)

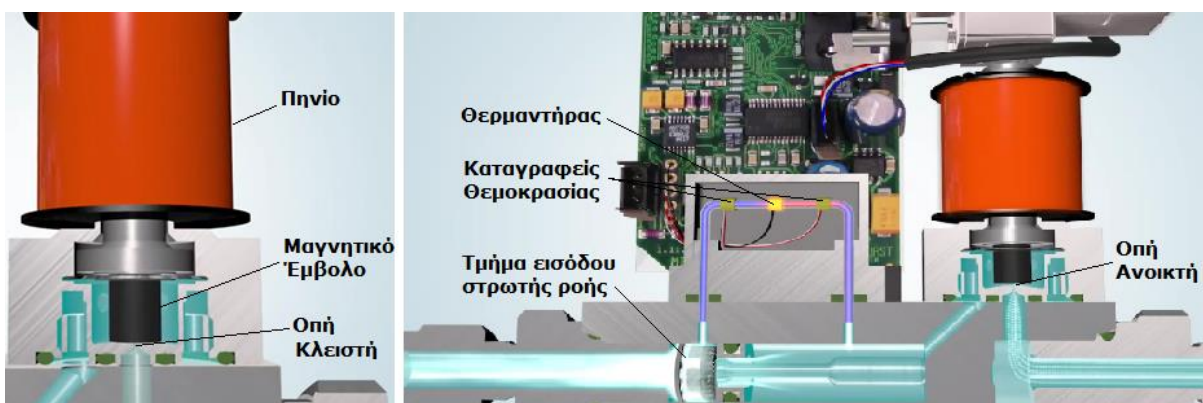
Το μετρητικό σύστημα του οργάνου αποτελείται από ένα τμήμα εισόδου της στρωτής ροής σε συνδυασμό με έναν θερμικό αισθητήρα της παροχής μάζας (Σχήμα 4.22 δεξιά). Όταν το όργανο συνδεθεί, προεπιλέγεται μία διαφορά πίεσης. Το κυρίως σώμα και ο αισθητήρας γεμίζουν με αέριο. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα λεπτό τριχοειδή σωλήνα, προσαρμοσμένο με ένα θερμαντικό στοιχείο και δύο καταγραφείς θερμοκρασίας. Ο θερμαντήρας θερμαίνει το σωλήνα και από τη στιγμή που δεν υπάρχει ροή, οι δύο αισθητήρες θερμοκρασίας θερμαίνονται ομοιόμορφα δίνοντας μηδενική μετρούμενη τιμή (Σχήμα 4.21 αριστερά). Το σήμα αυτό προωθείται στον μικροεπεξεργαστή και στη συνέχεια το όργανο δέχεται μία επιθυμητή τιμή από τον υπολογιστή μέσω σειριακής σύνδεσης. Η επιθυμητή αυτή τιμή συγκρίνεται με τη μετρούμενη τιμή. Εάν η επιθυμητή τιμή είναι υψηλότερη της μετρούμενης, τότε ο ελεγκτής PID ενεργοποιεί τη ρυθμιστική βαλβίδα του οργάνου επιτρέποντας τη ροή να ξεκινήσει. Το ηλεκτρομαγνητικό πηνίο ασκεί

δύναμη επάνω στη βάση του μαγνητικού εμβόλου. Η δύναμη αυτή βρίσκεται σε ισορροπία με το γραμμικό ελατήριο που υπό φυσιολογικές συνθήκες διατηρεί τη ρυθμιστική βαλβίδα κλειστή. Όταν το έμβολο απομακρυνθεί από την οπή, η ροή του αερίου αρχίζει. Το αέριο ρέει διαμέσου του τμήματος εισόδου της στρωτής ροής (Σχήμα 4.21 δεξιά), το οποίο λειτουργεί ως μία τέλεια ελεγχόμενη αντίσταση στη ροή. Αυτό καθιστά δυνατή τη ρύθμιση του οργάνου για χρήση αζώτου και για μέτρηση οποιουδήποτε άλλου αερίου. Η αντίσταση του τμήματος εισόδου της στρωτής ροής επίσης διασφαλίζει ότι ένα μικρό μέρος της ροής τροφοδοτείται στον αισθητήρα. Ο πρώτος καταγραφέας θερμοκρασιών ψύχεται από το κρύο αέριο ενώ ο δεύτερος «βλέπει» το αέριο που έχει θερμανθεί από το θερμαντικό σώμα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, η διαφορά θερμοκρασίας αποτελεί μία άμεση μέτρηση της παροχής μάζας.



Σχήμα 4.21: Οι αισθητήρες θερμοκρασίας θερμαίνονται ομοιόμορφα όταν η ροή είναι μηδενική (αριστερά) και το τμήμα εισόδου της στρωτής ροής (δεξιά)

Το σήμα του αισθητήρα συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της παροχής μάζας στον μικροεπεξεργαστή. Το ηλεκτρικό ρεύμα του πηνίου είναι προσαρμοσμένο έτσι ώστε η απόσταση ανάμεσα στο έμβολο και την οπή να είναι ακριβώς σωστή για τη ρύθμιση της επιθυμητής ποσότητας αερίου. Το κύκλωμα ελέγχου εκτελεί τη διαδικασία αυτή μέσα σε λίγα milliseconds. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία πολύ συνεχής και σταθερή ροή αερίου. Στο Σχήμα 4.22 απεικονίζεται το σύστημα λειτουργίας του θερμικού παροχόμετρου όταν η ροή είναι μηδενική (αριστερά) και όταν υπάρχει ροή του αερίου (δεξιά).



Σχήμα 4.22: Το σύστημα λειτουργίας του θερμικού παροχόμετρου με μηδενική ροή (αριστερά) και όταν υπάρχει ροή (δεξιά)

4.3.5 Σωλήνες Pitot-Static

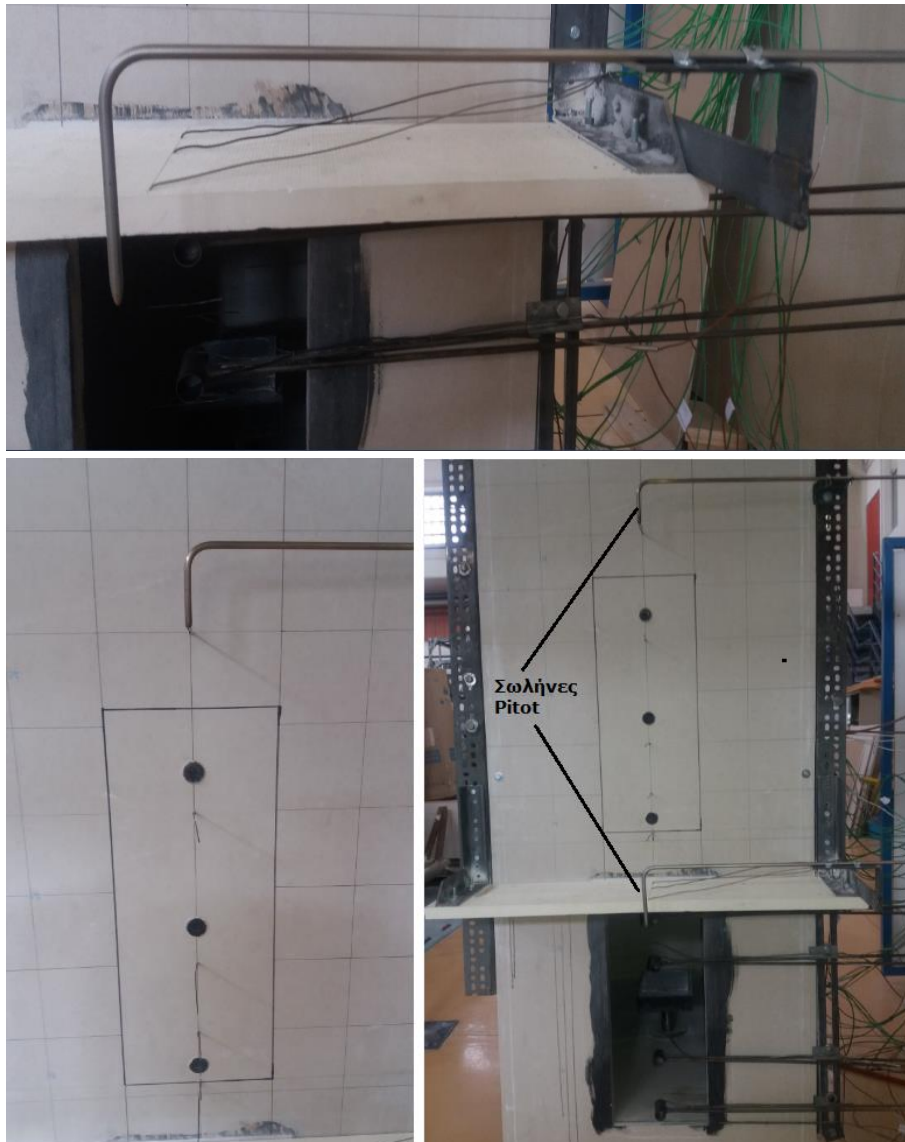
Ο σωλήνας Pitot χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Γάλλο ερευνητή Pitot το 1732 σε μετρήσεις της ταχύτητας του νερού στον ποταμό Σηκουάνα. Ο σωλήνας Pitot είναι ένας απλός σωλήνας του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό προς το ρευστό ενώ το άλλο συνδέεται με ένα μανόμετρο. Ο σωλήνας Pitot τοποθετούμενος παράλληλα προς το ρεύμα ρευστού καταγράφει την ολική του πίεση δεδομένου ότι το ρευστό στο άνοιγμά του ηρεμεί, δηλαδή εκεί ευρίσκεται το σημείο ανακοπής. Ο σωλήνας Pitot-Static (γνωστός στη βιβλιογραφία και ως σωλήνας Prandtl) αποτελείται από ένα σωλήνα Pitot, ο οποίος σε κατάλληλη απόσταση από το ανοικτό του άκρο φέρει έναν αριθμό περιφερειακών οπών. Από την εμπρόσθια οπή γίνεται η μέτρηση της ολικής πίεσης ενώ από τις περιφερειακές η μέτρηση της στατικής πίεσης (Σχήμα 4.23). Με τη βοήθεια δύο εσωτερικών σωληνίσκων που καταλήγουν σε διαφορετικό μορφοτροπέα πίεσης γίνεται η μέτρηση της διαφοράς της στατικής πίεσης από την ολική πίεση. Έτσι, μετράται η δυναμική πίεση σε μία θέση του πεδίου ροής, μέσω της οποίας προσδιορίζεται τελικά η ταχύτητα του ρευστού βάσει της Εξίσωσης (4.4), όπου η σταθερά k_p ισούται με τη μονάδα. Το ρευστό κινούμενο παράλληλα προς την επιφάνεια του σωλήνα κατ' αρχήν επιταχύνεται στην περιοχή του καμπύλου τμήματος του ρύγχους λαμβάνοντας τιμές μεγαλύτερες της u ενώ σε απόσταση μερικών διαμέτρων του σωλήνα πιο πίσω τείνει ασυμπτωτικώς στην τιμή u .



Σχήμα 4.23: Ο σωλήνας Pitot-Static

Στην πειραματική εγκατάσταση τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες Pitot σε θέσεις όπου η κατεύθυνση του πλουμίου είναι αδιαμφισβήτητη μονή (Σχήμα 4.24, κάτω δεξιά). Προκειμένου να υπολογιστεί η πυκνότητα του αερίου για κάθε μέτρηση είναι απαραίτητη η μέτρηση της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό στο ρύγχος του σωλήνα Pitot - Static που τοποθετήθηκε στην πρόσοψη της κατασκευής προστέθηκε ένα θερμοστοιχείο επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.23. Αυτό δεν χρειάστηκε να γίνει και στον δεύτερο σωλήνα Pitot - Static που τοποθετήθηκε 100 mm μακριά από την ακμή του εξώστη, διότι εκ κατασκευής περιελάμβανε ενσωματωμένο θερμοστοιχείο που εκτελούσε στιγμιαίες μετρήσεις θερμοκρασίας (Σχήμα 4.24, πάνω). Ο κάθε σωλήνας Pitot - Static συνδέθηκε με ένα ψηφιακό

μανόμετρο τύπου KIMO CP210, προκειμένου να μετράται η δυναμική πίεση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.24: Φωτογραφίες που απεικονίζουν το σωλήνα Pitot-Static που τοποθετήθηκε 100mm μακριά από την ακμή του εξώστη (πάνω), το σωλήνα Pitot-Static πλησίον της πρόσοψης (κάτω αριστερά) και την πρόσοψη της πειραματικής διάταξης με τους δύο σωλήνες Pitot (κάτω δεξιά)

4.3.6 Αναλυτής καυσαερίων

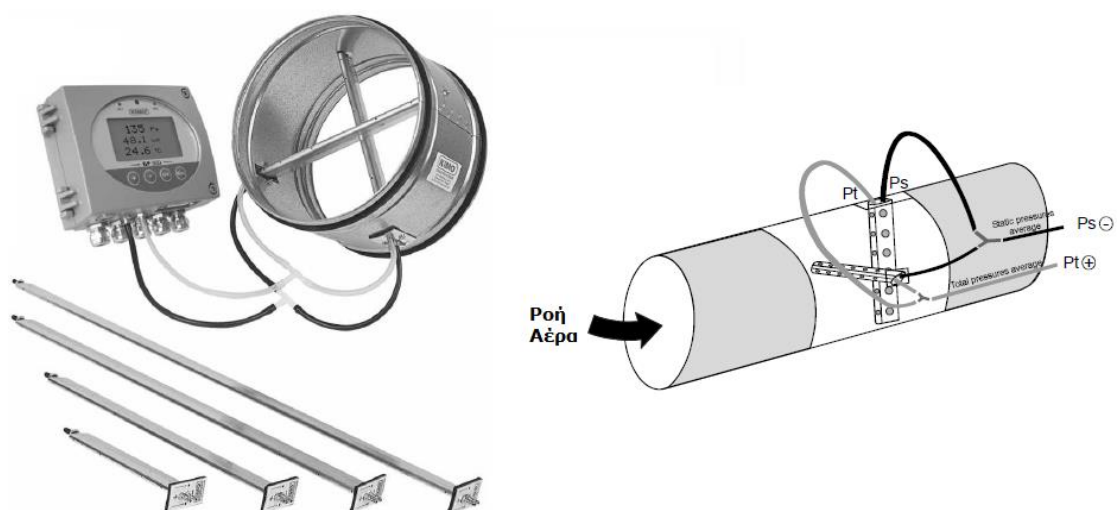
Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε αναλυτής αερίων τύπου ABB ACX Optima AO2000 Series (Σχήμα 4.25, αριστερά), με τον οποίο μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα. Το ακροφύσιο του αναλυτή (Σχήμα 4.25, δεξιά) τοποθετήθηκε στον αγωγό απαγωγής των καυσαερίων μετά τον απορροφητήρα, ώστε να γίνεται κάθε 5 sec η καταγραφή των συγκεντρώσεων από το εξωτερικό πλούμιο της φωτιάς που αναρροφάται από τον ανεμιστήρα. Η σύνδεση του αναλυτή καυσαερίων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή έγινε μέσω δικτύου (IP address), ενώ η λειτουργία του ξεκινούσε περίπου 3 ώρες πριν την έναρξη κάθε πειράματος.



Σχήμα 4.25: Ο αναλυτής καυσαερίων ABB ACX (αριστερά) και το ακροφύσιό του (δεξιά)

4.3.7 Μετρητής παροχής καυσαερίων

Για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής καυσαερίων τα οποία αναρροφώνται από τον ανεμιστήρα και οδηγούνται μέσω του αγωγού εξόδου στο εξωτερικό περιβάλλον, εγκαταστάθηκε εντός του αγωγού διαμέτρου 200 mm, το μετρητικό όργανο KIMO DEBIMO. Αποτελείται από δύο πτερύγια τα οποία διασταυρώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μεταξύ τους γωνία 90° και τα άκρα τους συνδέονται με ψηφιακό μανόμετρο (Σχήμα 4.26, αριστερά). Κάθε πτερύγιο φέρει οπές, για τη μέτρηση της στατικής και της ολικής πίεσης σε πολλά σημεία εντός του αγωγού. Λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται εντός του αγωγού, το προφίλ ταχυτήτων του διερχόμενου καυσαερίου δεν είναι ομοιόμορφο. Υψηλότερες ταχύτητες εμφανίζονται στο κέντρο του αγωγού και χαμηλότερες κοντά στα τοιχώματα. Έτσι, σε κάθε οπή των πτερυγίων οι πιέσεις λαμβάνουν διαφορετικές τιμές για την ίδια χρονική στιγμή. Το DEBIMO, αφού συλλέξει όλες τις τιμές πιέσεων, υπολογίζει αυτόματα το μέσο όρο αυτών (averaging) και δίνει ανά πάσα στιγμή μία μέση τιμή της δυναμικής πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.26 (δεξιά).



Σχήμα 4.26: Ο μετρητής παροχής καυσαερίων KIMO DEBIMO blades (αριστερά) και η αρχή λειτουργίας του (δεξιά)

Στη συνέχεια, μέσω της δυναμικής πίεσης υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των καυσαερίων εντός του αγωγού (Εξίσωση 4.4) και γνωρίζοντας τη διατομή του υπολογίζεται τελικά η ογκομετρική παροχή του μέσω της Εξίσωσης (4.6)

$$\dot{V} = u \cdot A_{duct} \quad (4.6)$$

4.3.8 Οπτικές κάμερες

Για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ΦΕΑ χρησιμοποιήθηκαν δύο οπτικές κάμερες για τη λήψη video κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, μία Sony a3000 με ταχύτητα λήψης 25fps και ανάλυση 1440x1080, η οποία εστίαζε στην πλάγια όψη της εγκατάστασης και μία κάμερα Nikon D3200 με ταχύτητα λήψης 25fps και ανάλυση 1920x1080, που εστίαζε στην πρόσοψη της εγκατάστασης. Με την πλάγια λήψη κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του ύψους και της προέκτασης της ΦΕΑ, ενώ με την εμπρόσθια λήψη υπολογίστηκε το πλάτος της ΦΕΑ. Στο Σχήμα 4.27 απεικονίζονται οι δύο κάμερες.



Σχήμα 4.27: Φωτογραφίες της κάμερας Sony a3000 (αριστερά) και της Nikon D3200 (δεξιά)

4.4 Σύστημα συλλογής δεδομένων

Για την καταγραφή και αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων από τις μετρητικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν δύο *συστήματα συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Systems)*. Οι συσκευές αυτές δέχονται ως είσοδο την τάση που δημιουργείται στις συσκευές μέτρησης και παρέχουν ως αποτέλεσμα, ψηφιακά, τη μέτρηση στις επιθυμητές μονάδες. Τα θερμοστοιχεία παράγουν σήμα τάσης, το οποίο επιλέχθηκε να μετατρέπεται σε θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), ενώ ο μετρητής ροής θερμότητας παράγει σήμα τάσης το οποίο μετατρέπεται σε θερμοροή (kW/m^2).

Το ένα σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι σύστημα συλλογής δεδομένων *NI cDAQ-9172*, το οποίο είναι της National Instruments και φαίνεται στο Σχήμα 4.27 (αριστερά). Στο σύστημα αυτό είναι συνδεδεμένη μια κάρτα με 18 κανάλια (channels) για την είσοδο σημάτων (signals) από συσκευές μέτρησης όπως θερμοστοιχεία, δिकाτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας κ.α. Στο σύστημα αυτό υπάρχει δυνατότητα να συνδεθούν μέχρι οκτώ κάρτες. Το σύστημα της National Instruments συνδέθηκε μέσω θύρας USB με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και

χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχο λογισμικό της εταιρείας για τον έλεγχο, τη δημιουργία, τη διαχείριση και φυσικά, τη δυνατότητα ορισμού βασικών παραμέτρων των καναλιών που χρησιμοποιούνται (όπως το εύρος μέτρησης, οι μονάδες μέτρησης κ.α).



Σχήμα 4.28: Φωτογραφίες των συστημάτων συλλογής δεδομένων NI cDAQ 9172 (αριστερά) και Agilent 34972A (δεξιά).

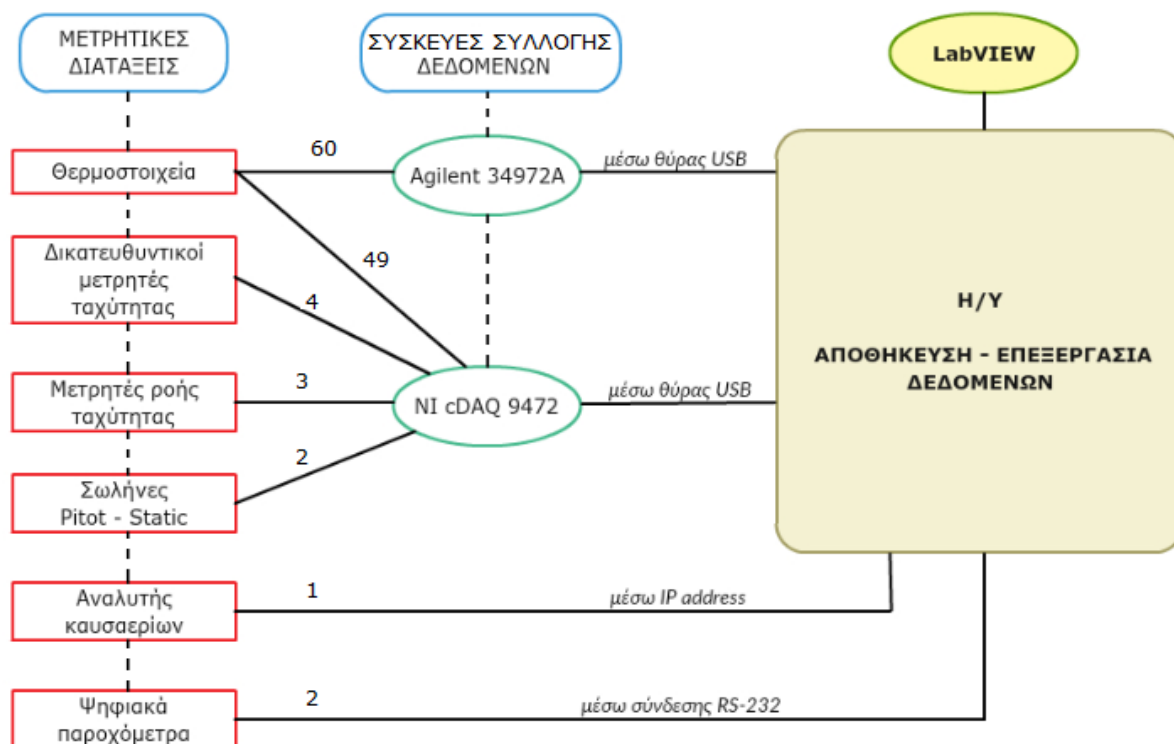
Το δεύτερο σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι το *Agilent 34972A* της εταιρείας Agilent Technologies όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28 (δεξιά). Σε αυτό εφαρμόζονται μέχρι τρεις κάρτες, οι οποίες δέχονται σήμα (signal) για καθένα από τα 20 κανάλια (channels) τα οποία διαθέτουν. Στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις κάρτες, με το σύνολο των 60 καναλιών τους να συμπληρώνονται από θερμοστοιχεία. Από την εταιρεία δίνεται το απαραίτητο λογισμικό για τη διαχείριση και τον ορισμό βασικών παραμέτρων των καναλιών (όπως το εύρος μέτρησης, οι μονάδες μέτρησης κ.α), ενώ η σύνδεση του Agilent με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή έγινε μέσω θύρας USB. Παρόλα αυτά δημιουργήθηκε υπορουτίνα ώστε και τα δύο συστήματα να είναι διαχειρίσιμα από ένα κοινό πρόγραμμα σε περιβάλλον λογισμικού LabVIEW.

Ο χρόνος δειγματοληψίας των τιμών από τα δύο συστήματα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρία δευτερόλεπτα (3 s). Το Agilent 34972A εκτελεί σειριακή σάρωση όλων των καναλιών του. Στην περίπτωση των πειραμάτων και τα 60 κανάλια ήταν κατειλημμένα, όποτε ο χρόνος που χρειάζεται για να τα σαρώσει είναι περίπου 2.9 s. Για το λόγο αυτό ο χρόνος δειγματοληψίας στρογγυλοποιείται στα 3 s ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για τη συλλογή δεδομένων από όλα τα συνδεδεμένα κανάλια και να μη χάνονται μετρήσεις.

4.4.1 Λογισμικό LabVIEW

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής του εργαστηρίου είχε ως λειτουργικό σύστημα τα Microsoft Windows 10. Για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση των τιμών από τις κάρτες συλλογής δεδομένων των δυο συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW. Στο Σχήμα 4.29 δίνεται μια σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης όλων των μετρητικών διατάξεων.

Το πρόγραμμα LabVIEW είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού στο οποίο χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού G, η οποία είναι γλώσσα γραφικού σχεδιασμού. Έτσι, με το LabVIEW, δημιουργείται πρόγραμμα το οποίο έχει τη μορφή δομικών διαγραμμάτων.



Σχήμα 4.29: Απεικόνιση μετρητικών διατάξεων και σύνδεσή τους μέσω LabVIEW με τον Η/Υ

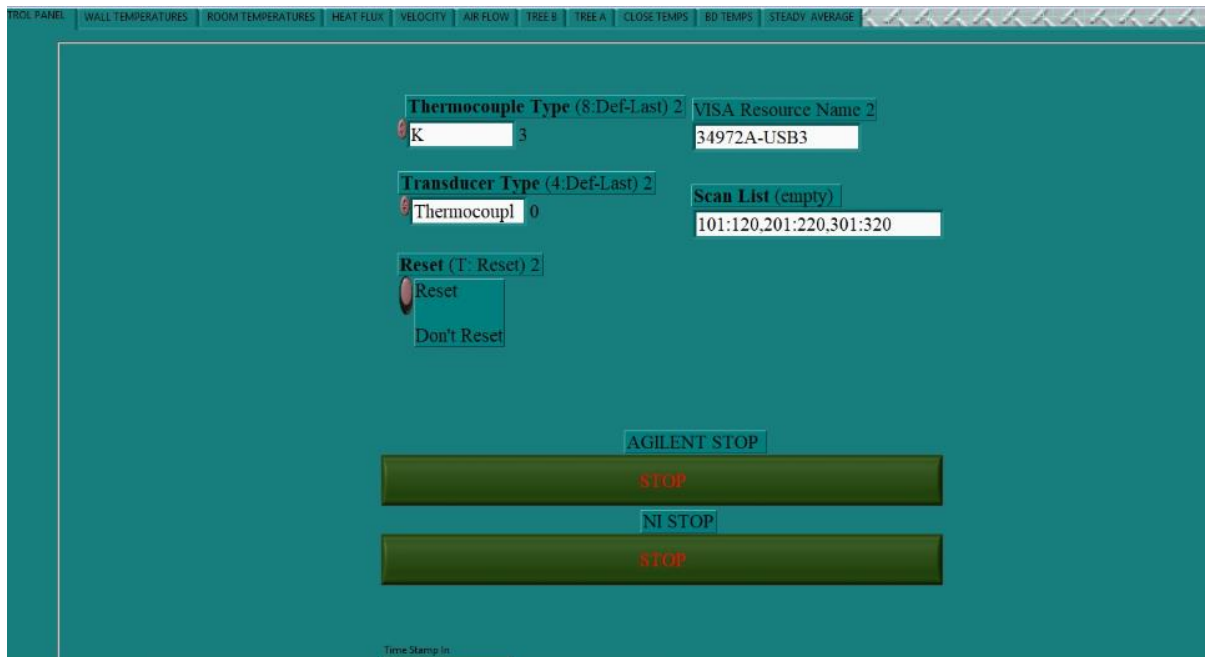
Το LabVIEW περιέχει βιβλιοθήκες με υπορουτίνες για πολλά είδη συστημάτων συλλογής δεδομένων, όπως τα NI cDAQ-9172 και Agilent 34972A. Οι βιβλιοθήκες αυτές περιέχουν εργαλεία και υπορουτίνες για συλλογή δεδομένων, επεξεργασία, αποθήκευση, αλλά και μεθοδολογίες παρουσίασης σε πραγματικό χρόνο (real time).

Βασικό στοιχείο ενός προγράμματος LabVIEW είναι τα VIs (virtual instruments), τα οποία εκτελούνται από τον πίνακα ελέγχου (front panel) και από το διάγραμμα ροής δεδομένων (block diagram) (Σχήματα 4.30 - 4.32). Μέσω αυτών, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το πρόγραμμα και τις λειτουργίες του. Μέσω του πίνακα ελέγχου ο χρήστης μπορεί να αλλάξει λειτουργίες και να έχει οπτικοποίηση των δεδομένων του, ενώ το διάγραμμα ροής δεδομένων αποτελεί την απεικόνιση του προγράμματος προς εκτέλεση. Και στα δύο VIs ο χρήστης μπορεί να επέμβει και οποιαδήποτε αλλαγή εφαρμόσει στο ένα ή εμφανιστεί αυτόματα και στο άλλο VI.

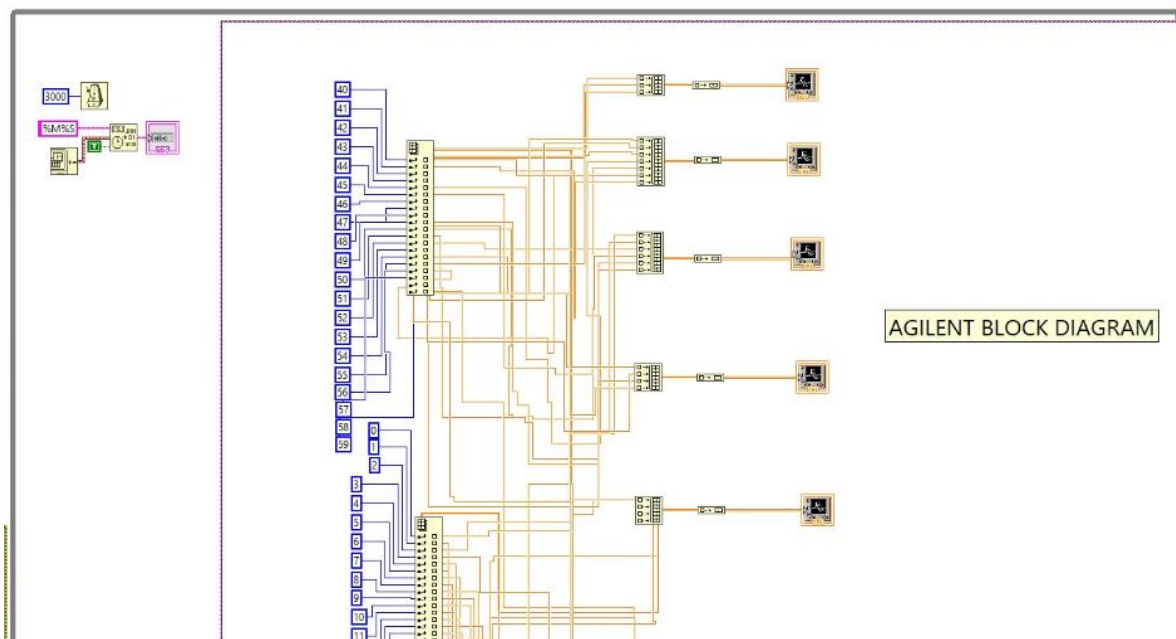
Για τη δημιουργία ενός δομικού διαγράμματος χρησιμοποιούνται κάποια βασικά εργαλεία τα οποία περιέχονται στο πρόγραμμα και θα αναλυθούν παρακάτω.

Υπάρχει μία πληθώρα αριθμητικών ή μαθηματικών συναρτήσεων (functions), οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση από το χρήστη ανάλογα με τις απαιτήσεις του προγράμματος. Επίσης, υπάρχουν τα εργαλεία ελέγχου (controls), τα οποία αποτελούν δεδομένα εισόδου και οι δείκτες (indicators) που αντιστοιχούν σε δεδομένα εξόδου. Αυτά μπορεί να έχουν αριθμητική τιμή (ακέραιος, πραγματικός), TRUE ή FALSE, ενώ μπορεί να έχουν χαρακτήρες μορφής ASCII για απεικόνιση κειμένων. Κατά τη δημιουργία των δομικών στοιχείων ενός διαγράμματος δίνεται επίσης η δυνατότητα να τοποθετηθούν διακόπτες (switches), ροοστάτες (knobs), λαμπτήρες (LEDs), μετρητές (gauges), κομβία (buttons), τα οποία δύνανται να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια «τρέξιματος» του

προγράμματος, επηρεάζοντας τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη, τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 4.30: Ο πίνακας ελέγχου στο πρόγραμμα LabVIEW

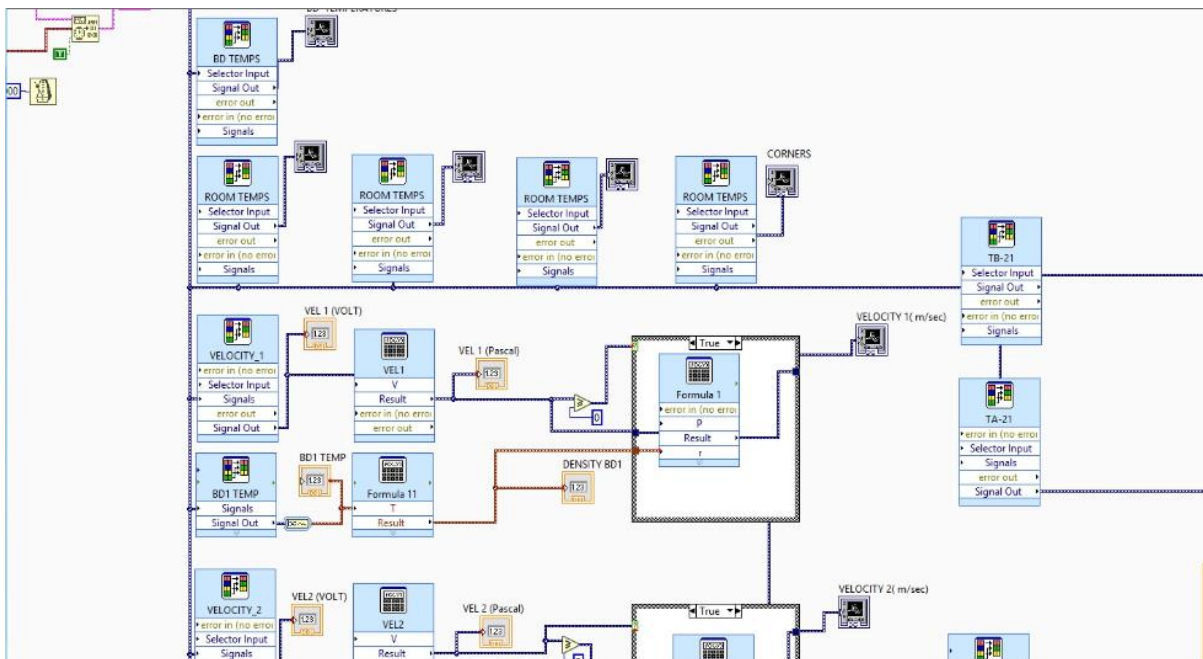


Σχήμα 4.31: Τμήμα του δομικού διαγράμματος του Agilent 34972A στο πρόγραμμα LabVIEW

Επίσης, σημαντικό χαρακτήρα έχουν οι επαναληπτικοί βρόγχοι (loops) και οι σήραγγες δομής (structure tunnels). Με επαναληπτικό βρόγχο εκτελείται επανειλημμένα κάποιο μέρος του προγράμματος ή ολόκληρο το πρόγραμμα όσο η συνθήκη εκτέλεσης έχει την τιμή TRUE, ενώ μόλις πάρει την τιμή FALSE η εκτέλεση σταματάει. Οι πιο συνηθισμένοι βρόγχοι του LabVIEW, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι οι βρόγχοι for και while. Ο βρόγχος for επιλέγεται συνήθως όταν ο χρήστης γνωρίζει τον αριθμό των επιθυμητών

επαναλήψεων του προγράμματος ενώ ο βρόγχος while επιλέγεται όταν δεν είναι δυνατός ο προκαθορισμός των επαναλήψεων του προγράμματος και ο τερματισμός του καθορίζεται από κάποια συνθήκη παύσης (stop condition). Επίσης, μπορεί να προστεθεί μέσα στο βρόγχο ένα χρονόμετρο (timer) το οποίο μπορεί να ρυθμίσει το χρόνο που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων, επιτρέποντας στον επεξεργαστή να μην εργάζεται «πυρετωδώς» κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Η σήραγγα δομής επιτρέπει στο χρήστη τη μεταφορά δεδομένων από μια δομή σε άλλη. Με τη χρησιμοποίηση γραφημάτων (graphs) γίνεται η απεικόνιση δεδομένων ίδιου τύπου, ενώ ίδιου τύπου δεδομένα περιέχουν και οι σειρές (arrays). Αντίθετα, διαφορετικού τύπου δεδομένα μπορεί να έχουν οι ομάδες (clusters).

Τέλος, μείζονος σημασίας είναι η δομή Case (Case structure), η οποία αποτελεί δομή εκτέλεσης εντολών κατά συνθήκη. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης εντολών με αυστηρή σειρά η οποία καθορίζεται από το χρήστη (χρησιμοποίηση των τιμών TRUE/FALSE). Επίσης, με τη δομή Case μπορούν να δημιουργηθούν πολλαπλά σενάρια εκτέλεσης επιλεγμένων τμημάτων του δομικού διαγράμματος, τα οποία ενεργοποιούνται από το χρήστη κατά περίπτωση.



Σχήμα 4.32: Τμήμα του δομικού διαγράμματος του NI cDAC-9172 στο πρόγραμμα LabVIEW

Για κάθε πείραμα, αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε περιβάλλον LabVIEW για τον έλεγχο, την καταγραφή και την αποθήκευση των μετρήσεων των μετρητικών διατάξεων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση προγράμματος σε κάθε πείραμα ήταν κοινή, έχοντας κάποιους βασικούς άξονες.

Αρχικά, μέσω υπορουτινών από βιβλιοθήκες του προγράμματος, γινόταν η αναγνώριση των συσκευών που ήταν συνδεδεμένες με τις θύρες USB. Έτσι αναγνωριζόταν το μέγεθος του σήματος που έστειλαν οι συσκευές απόκτησης δεδομένων.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε επαναληπτικός βρόγχος και οι εντολές που βρίσκονταν εντός αυτού πραγματοποιούνταν ανά 3 s (συχνότητα δειγματοληψίας) για τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα Agilent 34972A και ανά 1 s για τον NI

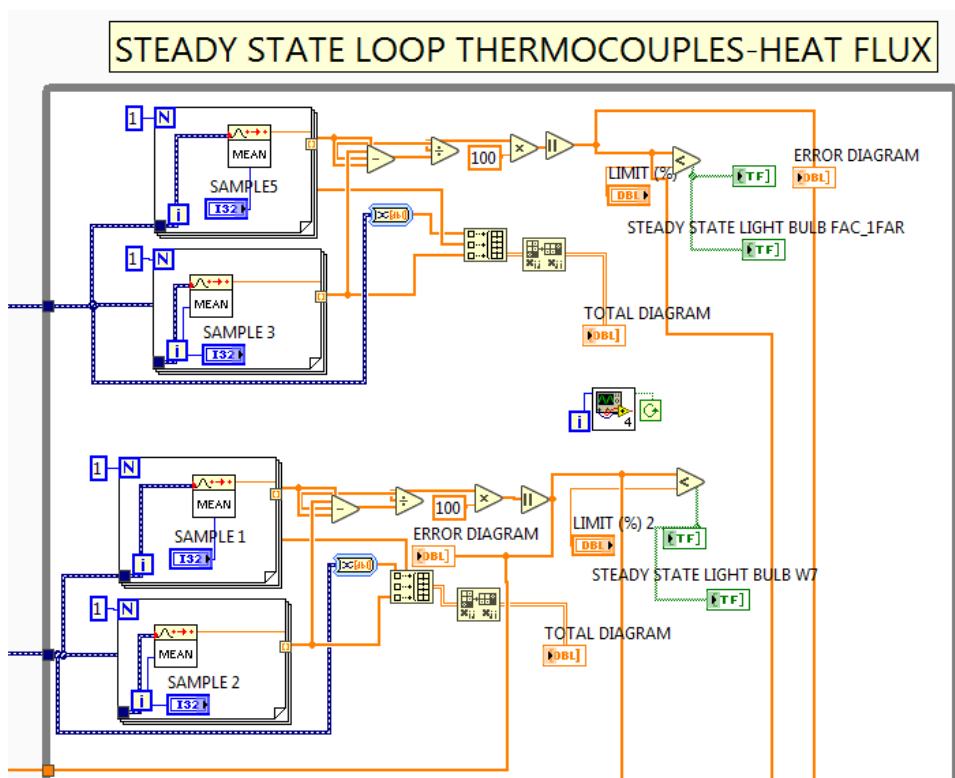
cDAC-9172. Εντός του επαναληπτικού βρόγχου πραγματοποιούνταν συλλογή σήματος μέσω των εργαλείων ελέγχου (Signal Output) από τις συσκευές που είχαν ήδη αναγνωρισθεί. Στη συνέχεια, σημαντικό βήμα αποτέλεσε ο διαχωρισμός των σημάτων από τις συσκευές για την καλύτερη διαχείριση και επεξεργασία κάθε μέτρησης. Αυτό έγινε με εισαγωγή του εργαλείου ελέγχου Signal Input, το οποίο κατηγοριοποιούσε τα σήματα σε ομάδες με οποιαδήποτε επιθυμητή σειρά. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η επεξεργασία οποιουδήποτε σήματος θεωρούνταν σημαντικό, ενώ από το σημείο εκείνο γινόταν εύκολη η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην οθόνη του Η/Υ. Έχοντας τη δυνατότητα επεξεργασίας κάθε σήματος, με τους δείκτες, απεικονίζονταν σε γραφικές παραστάσεις (graphs) οι τιμές των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Επειδή τα αποτελέσματα από τη σειριακή θύρα εμφανίζονταν σε μορφή ASCII, γινόταν μετατροπή τους σε δεκαδική μορφή μέσω αντίστοιχης ενσωματωμένης εντολής του προγράμματος. Παράλληλα, γινόταν αποθήκευση όλων των τιμών σε αρχεία μορφής .xls.

Το κάθε μετρητικό όργανο από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και συνδέθηκαν στο LabVIEW (θερμοστοιχεία, μετρητές ροής θερμότητας, δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, σωλήνες Pitot-Static), στέλνει σήμα στον υπολογιστή υπό μορφή τάσης. Οι σχέσεις αναγωγής του σήματος ηλεκτρικής τάσης, για τη διαμόρφωση της τελικής τιμής κάθε μεγέθους σε μονάδες που μπορούν να αξιοποιηθούν, φαίνονται στον Πίνακα 4.6. Οι απαιτούμενες μετατροπές πραγματοποιούνταν σε πραγματικό χρόνο μέσα στο πρόγραμμα με την εισαγωγή ειδικών δομικών στοιχείων (formulas), τα οποία επέτρεπαν την εκτέλεση αλγεβρικών πράξεων και την άμεση αντιστοίχιση των μονάδων ηλεκτρικής τάσης με τις τιμές των φυσικών μεγεθών που ερευνώνται. Κατ’ αυτόν τον τρόπο τα γραφήματα των διαφόρων μεγεθών συναρτήσεως του χρόνου μπορούσαν να παράσχουν σημαντική πληροφορία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του εκάστοτε πειράματος.

Πίνακας 4.6: Σχέσεις αναγωγής μετρούμενων μεγεθών

Μέγεθος	Μετρητικό όργανο	Αρχικά μετρούμενο μέγεθος	Αρχικές μονάδες	Σχέση αναγωγής	Τελικές μονάδες
Θερμοκρασία	Θερμοστοιχείο K	Θερμοκρασία	Volt	$T = \text{Volts} / 41 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	°C
Ταχύτητα	Δικατευθυντικός μετρητής ταχύτ.	Πίεση Θερμοκρασία	Volt	$\rho(\text{Pa}) = 2.49 \cdot \text{Volts} - 12.45$ $\rho = 352.8 / T$ $u = (1/1.08) \cdot (2p/\rho)^{1/2}$	m/s
	Σωλήνας Pitot-Static	Πίεση Θερμοκρασία	Volt	$\rho(\text{Pa}) = 10 \cdot \text{Volts}$ $\rho = 352.8 / T$ $u = (2p/\rho)^{1/2}$	m/s
Ροή Θερμότητας	Μετρητής ροής θερμότητας	Ροή θερμότητας	Volt	Volts/0.000172 Volts/0.000167 Volts/0.000141	kW/m ²
Παροχή καυσαερίων	Μετρητής παροχής καυσαερίων	Πίεση Θερμοκρασία Παροχή όγκου καυσαερίων	Volt	$\rho(\text{Pa}) = 100 \cdot \text{Volts}$ $\rho = 352.8 / T$ $V = 0.8165 \cdot (2p/\rho)^{1/2} \cdot 3600\pi \cdot r^2$	m ³ /hr

Το φαινόμενο της φωτιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα είναι έντονα μεταβατικό και γρήγορα εξελισσόμενο. Ωστόσο, για την εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων από ένα πείραμα, είναι ζωτικής σημασίας να επιτευχθούν μόνιμες συνθήκες λειτουργίας (steady state). Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να αναπτυχθεί μέσα στο πρόγραμμα LabVIEW μία μεθοδολογία προσδιορισμού των μόνιμων συνθηκών σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του εκάστοτε πειράματος (Σχήμα 4.33). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν επτά μετρητικά όργανα (πέντε θερμοστοιχεία, ένας μετρητής ροής θερμότητας και ένας δικατευθυντικός μετρητής ταχύτητας), τα οποία θεωρήθηκε ότι αντιστοιχούσαν σε αντιπροσωπευτικά μεγέθη για ολόκληρη την πειραματική εγκατάσταση.

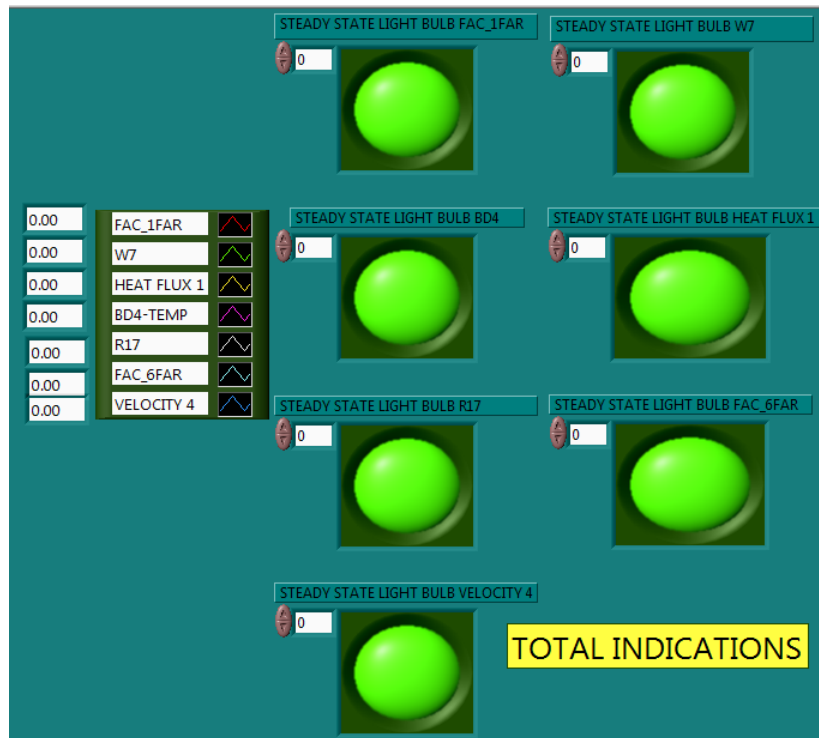


Σχήμα 4.33: Τμήμα του δομικού διαγράμματος για τον προσδιορισμό μόνιμων συνθηκών (steady state) στο πρόγραμμα LabVIEW

Η δομή της μεθοδολογίας προσδιορισμού των μόνιμων συνθηκών ήταν η ακόλουθη:

1. Υπολογισμός του κινητού μέσου όρου (moving average) του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους για δύο χρονικά διαστήματα (time samples): ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (40s) και ένα μικρότερο το οποίο αποτελούσε υποσύνολο του πρώτου (20s).
2. Σύγκριση των δύο κινητών μέσων όρων μέσω υπολογισμού του σφάλματος
3. Το όριο του αποδεκτού σφάλματος μεταξύ των δύο κινητών μέσων όρων ορίστηκε στο 2% για τα θερμοστοιχεία, στο 5% για το μετρητή ροής θερμότητας και στο 7% για το δικατευθυντικό μετρητή ταχύτητας
4. Όταν κατά τη διάρκεια του πειράματος το σφάλμα μειωνόταν κάτω από το ορισμένο άνω όριο, στον πίνακα ελέγχου άναβε μία πράσινη λυχνία (Σχήμα 4.34). Όταν και οι επτά λυχνίες ήταν αναμμένες για εύλογο χρονικό διάστημα, τότε θεωρείτο ότι είχαν επιτευχθεί μόνιμες συνθήκες.

Πέρα από την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, η μέθοδος αυτή συνέβαλε στη βελτιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης των πειραμάτων και κατ' επέκταση στην καλύτερη δυνατή εξοικονόμηση καυσίμου.



Σχήμα 4.34: Επίτευξη μόνιμων συνθηκών (steady state) κατά τη διάρκεια του πειράματος στο πρόγραμμα LabVIEW: Όλες οι λυχνίες που αντιπροσωπεύουν το σφάλμα των κινητών μέσω των όρων επτά μετρητικών οργάνων, είναι αναμμένες

4.5 Εκτίμηση πειραματικών σφαλμάτων

Ως πειραματικό σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της τιμής του μεγέθους που προέκυψε από κάποια μέτρηση από την «πραγματική» του τιμή. Η πραγματική αυτή τιμή δεν είναι σχεδόν ποτέ γνωστή, και κατά συνέπεια εκτίμηση του σφάλματος γίνεται με βάση συγκεκριμένες υποθέσεις. Υπάρχουν δύο είδη σφαλμάτων, το συστηματικό και το τυχαίο σφάλμα.

Το *συστηματικό σφάλμα* (B_T) είναι το σφάλμα που οφείλεται σε συστηματικές μεταβολές και εκτιμάται από στατιστικές μεθόδους. Τα συστηματικά σφάλματα είναι δυνατόν να οφείλονται σε κάποια από τις παρακάτω αιτίες:

- Περιορισμοί στην ακρίβεια μέτρησης του οργάνου
- Υποκειμενικό σφάλμα παρατηρητή
- Ατελής τεχνική μέτρησης (π.χ. κακή τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου μέσα σε ένα κανάλι ροής ρευστού).

Το *τυχαίο σφάλμα* (S_T) είναι το οφειλόμενο σε τυχαίες μεταβολές, ποικίλλει από μέτρηση σε μέτρηση και εκτιμάται από μη στατιστικές μεθόδους. Τα τυχαία σφάλματα είναι δυνατόν να οφείλονται σε κάποια από τις παρακάτω αιτίες:

- Διακυμάνσεις των πειραματικών συνθηκών (π.χ. λόγω χρονικής μεταβολής των τιμών των εξωτερικών μεταβλητών ή λόγω ελλιπούς ρύθμισης των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών)

- Ανεπαρκής ανάγνωση οργάνου
- Διαταραχές που επιδρούν κατά μικρά και ακανόνιστα χρονικά διαστήματα

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

Εδώ και δεκαετίες, αρκετοί μηχανικοί και στατιστικολόγοι ανέπτυξαν διάφορα μοντέλα υπολογισμού των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις των οργάνων καθένα από τα οποία παρουσίαζε συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Dieck, 1997). Συνοπτικά, παρουσιάζονται πέντε μοντέλα:

1. Η αθροιστική μέθοδος (ICRPG, 1969)

Το πρώτο μοντέλο υπολογισμού αβεβαιοτήτων προτάθηκε από το εγχειρίδιο ICRPG (ICRPG, 1969) και χαρακτηρίζεται από την Εξίσωση (4.7):

$$U_{ADD} = \pm[(B_T) + (t_{95}S_T)] \quad (4.7)$$

Όπου:

- U_{ADD} : η αθροιστική αβεβαιότητα των μετρήσεων
- B_T : το συνολικό συστηματικό σφάλμα των μετρήσεων
- S_T : το συνολικό τυχαίο σφάλμα των μετρήσεων
- t_{95} : η στοχαστική μεταβλητή της κατανομής Student για διάστημα εμπιστοσύνης 95% για τους κατάλληλους βαθμούς ελευθερίας

Η μέθοδος αυτή παρέχει 99% κάλυψη. Η «κάλυψη» εδώ δεν θα πρέπει να συγχέεται με την «εμπιστοσύνη», διότι ο στατιστικός όρος (S_T), συνδυάζεται με έναν μη στατιστικό όρο (B_T).

2. Το μοντέλο RSS (Root – Sum – Square, ASME, 1985)

Το δεύτερο μοντέλο υπολογισμού της αβεβαιότητας δημοσιεύτηκε το 1985 από την ASME (American Society of Mechanical Engineers) σε ένα έγγραφο με την ονομασία PTC (Performance Test Code). Η Εξίσωση (4.8) περιγράφει το μοντέλο:

$$U_{RSS} = \pm[(B_T)^2 + (t_{95}S_T)^2]^{1/2} \quad (4.8)$$

Όπου:

- U_{RSS} : η συνολική αβεβαιότητα RSS των μετρήσεων

Και σε αυτήν την μέθοδο παρέχεται «κάλυψη» και όχι «εμπιστοσύνη».

3. Το μοντέλο ISO (International Standards Organization, 1993)

Το τρίτο μοντέλο υπολογισμού της αβεβαιότητας προτάθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) και αντιπροσωπεύεται από τη Εξίσωση (4.9):

$$U_{ISO} = \pm K \left[(U_A)^2 + (U_B)^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Όπου:

- U_{ISO} : η συνολική αβεβαιότητα ISO
- U_A : η αβεβαιότητα τύπου A
- U_B : η αβεβαιότητα τύπου B
- K : ο παράγοντας κάλυψης που χρησιμοποιείται ώστε να αποκτηθεί το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Συνήθως λαμβάνει τιμές από 2 έως 3 (2 για 95% κάλυψη/2σ και 3 για 99% κάλυψη/3σ)

Οι στοιχειώδεις αβεβαιότητες U_A και U_B υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (4.10) και (4.11), αντίστοιχα:

$$U_A = \left[\sum_{i=1}^{N_A} (U_{A_i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

$$U_B = \left[\sum_{i=1}^{N_B} (U_{B_i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

Οι αβεβαιότητες τύπου A περιέχουν δεδομένα από τα οποία υπολογίζονται τυπικές αποκλίσεις ενώ οι τύπου B όχι. Συχνά οι αβεβαιότητες τύπου B βασίζονται στην κρίση του μηχανικού.

4. Το μοντέλο 95 (ASME, 1997)

Το τέταρτο μοντέλο υπολογισμού της αβεβαιότητας διέπεται από την Εξίσωση (4.12):

$$U_{95} = \pm 2 \left[(B_T / 2)^2 + (S_T)^2 \right]^{1/2} \quad (4.12)$$

Όπου:

- U_{95} : η συνολική αβεβαιότητα για διάστημα εμπιστοσύνης 95%

Το μοντέλο αυτό είναι πολύ απλό. Προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό διάστημα εμπιστοσύνης ο συντελεστής κάλυψης K της Εξίσωσης (4.9) λαμβάνει κατευθείαν την τιμή 2. Επίσης το μοντέλο εφαρμόζεται για βαθμούς ελευθερίας ≥ 30 .

5. Το μοντέλο ASME (American Society of Mechanical Engineers, 1998)

Το πέμπτο μοντέλο υπολογισμού της αβεβαιότητας προτείνεται και εφαρμόζεται από την ASME και διέπεται από την Εξίσωση (4.13):

$$U_{ASME} = \pm t_{95} \left[(B_T / 2)^2 + (S_T)^2 \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

Όπου:

- U_{ASME} : η συνολική αβεβαιότητα ASME

Όπως στα δύο πρώτα μοντέλα έτσι και σε αυτό η στοχαστική μεταβλητή t_{95} της κατανομής Student καθορίζεται από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας. Εάν οι βαθμοί ελευθερίας είναι περισσότεροι των 30, τότε τα δύο τελευταία μοντέλα ταυτίζονται. Το t_{95} λαμβάνει την τιμή 2 και το διάστημα εμπιστοσύνης είναι 95%. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο αξιόπιστη, στιβαρή και χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς. Ορισμένα από τα *πλεονεκτήματά* της είναι:

- Εφαρμόζεται το σύστημα Root – Sum – Square στα επιμέρους στοιχειώδη σφάλματα
- Κατηγοριοποιεί τις πηγές σφαλμάτων σε τυχαίες και συστηματικές, κάτι που είναι οικείο στους μηχανικούς
- Διατηρεί την επιλεγμένη εμπιστοσύνη ακόμα και αν οι πηγές σφαλμάτων κυριαρχούνται από είτε συστηματικές είτε τυχαίες πηγές
- Επιτρέπει την εύκολη μεταβολή σε μία εναλλακτική εμπιστοσύνη απλώς αλλάζοντας την στοχαστική μεταβλητή t της κατανομής Student
- Επιτρέπει τη χρήση μη κανονικών συστηματικών σφαλμάτων, όπως η ομοιόμορφη κατανομή
- Μεταγενέστερες στατιστικές διεργασίες μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε αυτές τις αβεβαιότητες, καθώς τα συστηματικά και τυχαία στοιχειώδη σφάλματα θεωρούνται ως τυπικές απόκλισης της μέσης τιμής
- Επιτρέπει την ταξινόμηση σε ομάδες τύπου A και τύπου B εάν αυτό είναι επιθυμητό
- Υπό προϋποθέσεις έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με το μοντέλο ISO

Το μοναδικό *μειονέκτημα* του μοντέλου είναι το εξής:

- Το μοντέλο U_{ASME} απαιτεί την υπόθεση ότι για εμπιστοσύνη 95% τα συστηματικά σφάλματα ακολουθούν κανονική/γκαουσιανή κατανομή

Λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων, το μοντέλο ASME υιοθετείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Σε όλες τις μεθόδους που περιγράφηκαν ανωτέρω, η συνολική συστηματική αβεβαιότητα B_T και η συνολική τυχαία αβεβαιότητα S_T υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (4.14) και (4.15):

$$B_T = [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots]^{1/2} \quad (4.14)$$

$$S_T = [S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots]^{1/2} \quad (4.15)$$

Όπου οι B_1, B_2, B_3 και S_1, S_2, S_3 είναι ξεχωριστές πηγές σφαλμάτων.

Προκειμένου να αποδοθεί το συνολικό ή σύνθετο σφάλμα της μέτρησης κάθε μεγέθους, πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα το μέγιστο πιθανό τυχαίο σφάλμα της μέτρησης (S_T), καθώς και το συστηματικό σφάλμα (B_T). Μετά από κατάλληλη

στατιστική ανάλυση, το συνολικό σφάλμα της μέτρησης, προσδιορίζεται με χρήση της Εξίσωσης (4.13).

Δεδομένου ότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών παρουσίαζαν διακυμάνσεις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του τυχαίου σφάλματος μέσω της Εξίσωσης (4.16).

$$S_1 = S_T = 2\sigma_x \quad (4.16)$$

Όπου η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής (σ_x) προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.17). Επιλέγεται το εύρος $2\sigma_x$ διότι αντιστοιχεί στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% που έχει επιλεγεί για την ανάλυση σφαλμάτων.

$$\sigma_x = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.17)$$

Όπου η τυπική απόκλιση (s) προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης (4.18).

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.18)$$

Όπου:

- x_i : η κάθε τιμή
- \bar{x} : η μέση τιμή του δείγματος
- N : το μέγεθος του δείγματος

4.5.1 Θερμοστοιχεία

Η μετρούμενη θερμοκρασία από τα θερμοστοιχεία είναι διαφορετική από την πραγματική λόγω των μετρητικών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν (Nakos, 2004). Στα πειράματα φωτιάς που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, όπου χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία τύπου K για τη μέτρηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του δωματίου, οι παράγοντες που δημιουργούν τα συστηματικά σφάλματα είναι η ατελής βαθμονόμηση του οργάνου, η επικάλυψη αισθάλης στο αισθητήριο, σφάλματα που οφείλονται στα καλώδια και στις προεκτάσεις αυτών, σφάλματα από τη σύνδεση των καλωδίων με τα συστήματα συλλογής δεδομένων, η θερμική αδράνεια του θερμοστοιχείου, καθώς και η ακτινοβολία. Τα τυχαία σφάλματα των θερμοστοιχείων θεωρούνται αμελητέα (Nakos, 2004).

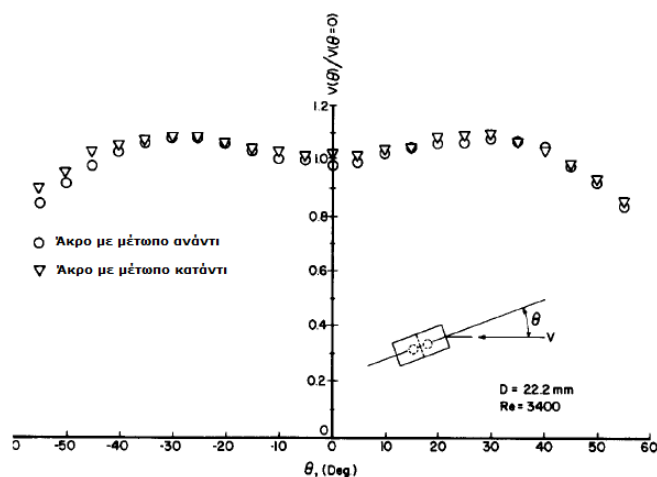
Τα θερμοστοιχεία τύπου K, με τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έχουν συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης που ανέρχεται στους $\pm 2.2^\circ\text{C}$, ή $\pm 0.75\%$ (όποια τιμή είναι μεγαλύτερη από τις δύο) για μετρήσεις θερμοκρασίας άνω των 0°C και για διάστημα εμπιστοσύνης 3σ (99.7%). Μία ακόμα πηγή συστηματικού σφάλματος που ελήφθη υπόψη είναι οι απώλειες σύνδεσης του θερμοστοιχείου στην υποδοχή. Βάσει της βιβλιογραφίας (Nakos, 2004), το σφάλμα αυτό ανέρχεται στους $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Για τη μείωση ενδεχόμενου λάθους κατά τη βαθμονόμηση των θερμοστοιχείων χρησιμοποιήθηκαν καινούρια καλώδια και

προεκτάσεις, ώστε να μην έχουν φθαρεί από προηγούμενη χρήση. Ωστόσο, θεωρούνται ως η τρίτη πηγή συστηματικού σφάλματος, το οποίο λαμβάνει την τιμή $\pm 2.2^\circ\text{C}$ ανεξαρτήτως της μετρούμενης τιμής (Nakos, 2004).

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση (4.14), η αβεβαιότητα λόγω συστηματικών σφαλμάτων αναγράφεται στον Πίνακα 4.5.

4.5.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας

Όπως προαναφέρθηκε, στην πειραματική εγκατάσταση τοποθετήθηκαν τέσσερις δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας και δύο σωλήνες Pitot-Static. Η αβεβαιότητα στις μετρήσεις ενός δικατευθυντικού μετατροπέα μπορεί να επηρεαστεί από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα του ανιχνευτή και την διεύθυνση της ροής. Η έρευνα των McCaffrey και Heskestad (1976) έδειξε ότι για μεταβολή της γωνίας περίπου 50° το σφάλμα στις μετρήσεις είναι μόλις $\pm 10\%$ (Σχήμα 4.35).

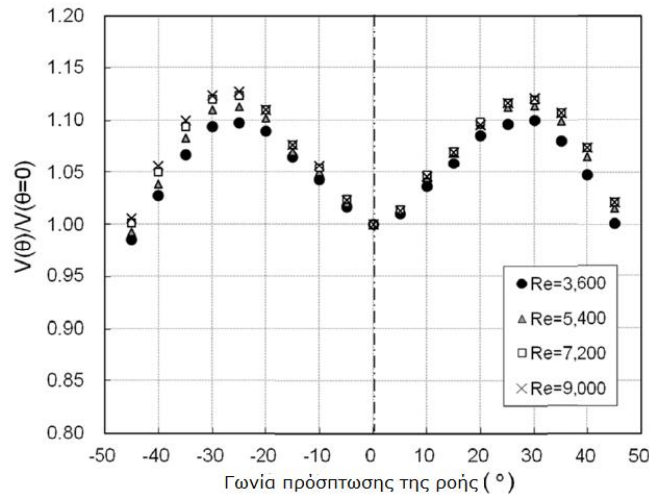


Σχήμα 4.35: Ευαισθησία του δικατευθυντικού μετρητή ταχύτητας στη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της ροής (McCaffrey και Heskestad, 1976)

Ωστόσο, οι Liu et al. (1990) ανέφεραν ότι το σχετικό σφάλμα για γωνία πρόσπτωσης της ροής στις 30° έλαβε μέση τιμή ίση με $\pm 15\%$ και μέγιστη τιμή ίση με $\pm 18\%$ για ροή με χαμηλό αριθμό Reynolds ($100 < Re < 1200$).

Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της μέτρησης της ταχύτητας από έναν δικατευθυντικό μετρητή, η αβεβαιότητα της μέτρησης θα πρέπει να ποσοτικοποιηθεί για διάφορες συνθήκες ροής, όπως το εύρος του αριθμού Reynolds, η γωνία πρόσπτωσης της ροής στο ακροφύσιο, η διακύμανση της θερμοκρασίας κλπ. Σε αντίθεση με την εκτενή εφαρμογή τους σε πειράματα φωτιάς, έχει εκπονηθεί περιορισμένη έρευνα για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των μετρητικών αυτών οργάνων για διάφορες συνθήκες με στόχο την βελτιστοποίησή τους.

Η πιο πρόσφατη έρευνα των Kim and Kim (2013), η οποία περιελάμβανε και υπολογιστική προσομοίωση του ακροφυσίου, έδειξε ότι για $Re=3400$ τα αποτελέσματα συμφωνούσαν με τους McCaffrey και Heskestad. Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζεται η ευαισθησία του οργάνου συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για διάφορες τιμές του Reynolds. Για γωνίες $25\sim 30^\circ$ η μέγιστη τιμή του σχετικού σφάλματος ήταν $\pm 13\%$.



Σχήμα 4.36: Ευαισθησία του δικατευθυντικού μετρητή ταχύτητας στη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της ροής για διάφορους αριθμούς Reynolds (Kim and Kim, 2013)

Τελικά, για τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο θεωρήθηκε ότι τόσο στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας όσο και στους σωλήνες Pitot – Static το συστηματικό σφάλμα λόγω γωνίας πρόσπτωσης είναι ίσο με $\pm 10\%$.

Ως δεύτερη πηγή συστηματικού σφάλματος θεωρούνται τα ψηφιακά όργανα μέτρησης πίεσης. Κάθε δικατευθυντικός μετρητής ταχύτητας συνδέθηκε με έναν αισθητήρα πίεσης PX277, ο οποίος έχει σφάλμα ακριβείας $\pm 1\%$ επί της μέγιστης τιμής του οργάνου, η οποία είναι τα 10 Pa. Κάθε σωλήνας Pitot – Static συνδέθηκε με ένα ψηφιακό μανόμετρο KIMO CP211, το οποίο εισάγει σφάλμα ανάγνωσης ίσο με $\pm 0.5\%$.

Η ταχύτητα υπολογίζεται έμμεσα βάσει της Εξίσωσης (4.4) και οι πηγές σφαλμάτων αφορούν τα μεγέθη της πίεσης και της πυκνότητας και κατ' επέκταση της θερμοκρασίας. Το συνολικό σφάλμα της ταχύτητας προκύπτει ως συνάρτηση των σφαλμάτων των επιμέρους μεγεθών και δίνεται από την Εξίσωση (4.19).

$$U_u = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial T} \cdot U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial p} \cdot U_p \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.19)$$

Όπου:

- U_u : η συνολική αβεβαιότητα της ταχύτητας
- U_T : η συνολική αβεβαιότητα του θερμοστοιχείου στη θέση του δικατευθυντικού μετατροπέα / Σωλήνα Pitot – Static
- U_p : η συνολική αβεβαιότητα του μετρητή διαφορικής πίεσης του δικατευθυντικού μετατροπέα / Σωλήνα Pitot – Static

4.5.3 Μετρητές ροής θερμότητας

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες ροής θερμότητας τύπου SBG01 υπόκεινται σε σφάλματα που οφείλονται στις ιδιότητες των οργάνων, τη βαθμονόμησή τους, στη μη – γραμμικότητα, τη συναγωγή και την εξισορρόπηση της ακτινοβολίας. Το αρχικό σφάλμα βαθμονόμησης είναι $\pm 3\%$.

Κατά τη μέτρηση, ο αισθητήρας θεωρείται ότι δημιουργεί τάση η οποία είναι γραμμική ως προς τη ροή θερμότητας, κάτι το οποίο δεν είναι αληθές. Η απόκλιση αυτή από την ιδανική συμπεριφορά, αποτυπώνεται στο σφάλμα μη - γραμμικότητας. Το σφάλμα ισούται με το $\pm 2\%$ επί της μέγιστης τιμής, που αντιστοιχεί σε $\pm 4 \text{ kW/m}^2$, αφού η μέγιστη τιμή της θερμοροής των μετρητών ήταν 200 kW/m^2 .

Τέλος, επειδή η βαθμονόμηση γίνεται βάσει ακτινοβολίας, η μέτρηση ενός μετρητή ροής θερμότητας αφορά την εξισορρόπηση ακτινοβολίας, κατά την οποία η ροή θερμότητας όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα (σε kW/m^2) είναι η διαφορά της ροής θερμότητας που προσπίπτει μείον τη ροή θερμότητας που εκπέμπεται (σε kW/m^2 επίσης). Και οι δύο αυτές ροές θερμότητας είναι ανάλογες της σταθεράς Boltzmann, με τη δεύτερη να είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του αισθητήρα και την πρώτη ανάλογη της θερμοκρασίας της πηγής της ακτινοβολίας. Η ροή που εκπέμπεται στους 20°C είναι 0.420 kW/m^2 , οπότε κατά τη βαθμονόμηση, όπου οι θερμοκρασίες είναι άνω των 800°C , η συνεισφορά αυτή θεωρείται αμελητέα.

4.5.4 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου

Τα ψηφιακά παροχόμετρα Bronkhorst EL-FLOW εμφανίζουν συστηματικό σφάλμα βαθμονόμησης $\pm 0.5\%$ λόγω ανάγνωσης ($R_d - \text{Reading}$) και $\pm 0.1\%$ πλήρους κλίμακας ($FS - \text{Full Scale}$). Το σφάλμα λόγω ανάγνωσης αντιστοιχεί σε ένα σταθερό ποσοστό της πραγματικής ροής. Το σφάλμα πλήρους κλίμακας αντιστοιχεί σε μία σταθερά τιμή ανεξάρτητα από το ποια είναι η τιμή της ροής εντός του εύρους του οργάνου. Η μέγιστη ροή καυσίμου που διέρχεται από το κάθε παροχόμετρο του εργαστηρίου είναι 120 ln/min . Επομένως το συστηματικό σφάλμα πλήρους κλίμακας είναι $\pm 0.12 \text{ ln/min}$ και ισχύει για κάθε τιμή της ροής. Αυτό σημαίνει ότι για μικρότερη ροή το ποσοστό του σφάλματος αυξάνεται. Συγκεκριμένα, για το πρώτο επίπεδο ροής, που αντιστοιχεί σε 75 ln/min για κάθε παροχόμετρο, το σφάλμα πλήρους κλίμακας είναι $\pm 0.16\%$. Για το δεύτερο επίπεδο ροής (100 ln/min για κάθε παροχόμετρο) το αντίστοιχο σφάλμα ισούται με $\pm 0.12\%$ και για το τρίτο (120 ln/min για κάθε παροχόμετρο) είναι $\pm 0.1\%$.

Τα σφάλματα λόγω ανάγνωσης είναι 0.375 , 0.5 και 0.6 ln/min για τις τρεις προαναφερθείσες ροές, γεγονός που δείχνει ότι αυξάνεται όσο αυξάνεται η ροή του καυσίμου. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές της συνολικής αβεβαιότητας **ανά παροχόμετρο**. Επειδή όμως στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο παροχόμετρα με ίσες παροχές μάζας ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος της φωτιάς, η συνολική αβεβαιότητα που προκύπτει κατά τις μετρήσεις θα πρέπει να διπλασιαστεί. Επομένως:

- Για παροχή όγκου 150 ln/min , η συνολική αβεβαιότητα είναι $\pm 0.79 \text{ ln/min}$
- Για παροχή όγκου 200 ln/min , η συνολική αβεβαιότητα είναι $\pm 1.03 \text{ ln/min}$
- Για παροχή όγκου 240 ln/min , η συνολική αβεβαιότητα είναι $\pm 1.22 \text{ ln/min}$

4.5.5 Ψηφιακά παροχόμετρα καυσαερίων

Προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή καυσαερίων χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός μετρητής διαφορικής πίεσης KIMO DEBIMO και ένα θερμοστοιχείο K εντός του αγωγού καυσαερίων στη θέση όπου ήταν εγκατεστημένο το ψηφιακό μανόμετρο. Κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (4.6) γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητος ο υπο-

λογισμός της ταχύτητας των καυσαερίων. Αυτό σημαίνει ότι και πάλι εισάγονται τα συνολικά σφάλματα του θερμοστοιχείου και του ψηφιακού μετρητή πίεσης στον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος της παροχής καυσαερίων, το οποίο δίνεται από την Εξίσωση (4.20).

$$U_{\dot{V}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial T} \cdot U_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}}{\partial p} \cdot U_p \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

- $U_{\dot{V}}$: η συνολική αβεβαιότητα της παροχής καυσαερίων
- U_T : η συνολική αβεβαιότητα του θερμοστοιχείου στη θέση του μετρητή διαφορικής πίεσης
- U_p : η συνολική αβεβαιότητα του μετρητή διαφορικής πίεσης

Οι συνιστώσες των αβεβαιοτήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Σύνοψη συνιστωσών αβεβαιοτήτων των μετρήσεων

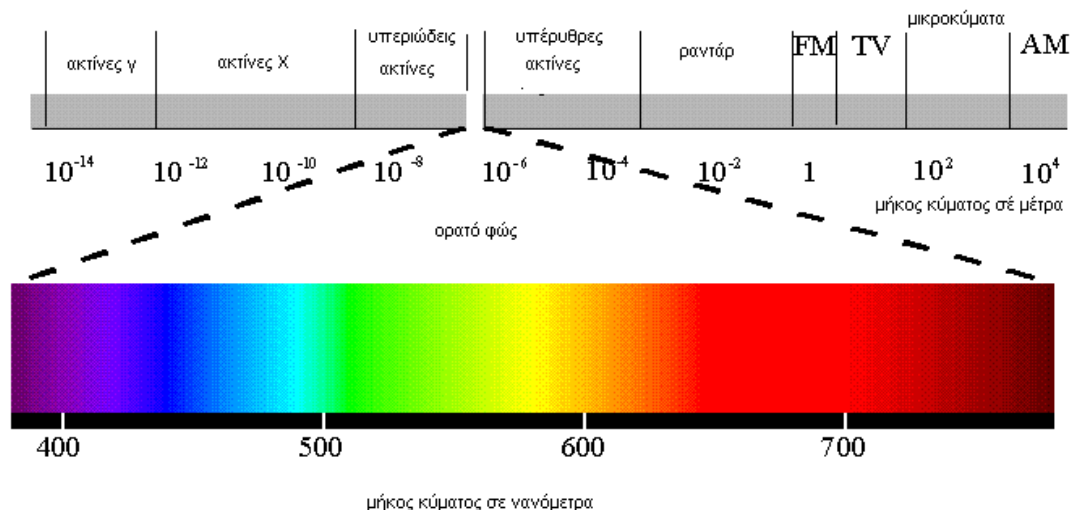
Αισθητήρας	Πηγή αβεβαιότητας	Συστηματική	Τυχαία	Συνολική αβεβαιότητα
Θερμοκρασία	Βαθμονόμηση Σύνδεση Καλώδια	±2.2°C ή ±0.75% ±0.5°C ±2.2°C	Εξίσωση (4.13)	Εξίσωση (4.13)
Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας	Γωνία πρόσπτωσης Ψηφιακό Μανόμετρο	±10% ±1% μέγιστης πίεσης	Εξίσωση (4.13)	Εξίσωση (4.19)
Σωλήνες Pitot - Static	Γωνία πρόσπτωσης Ψηφιακό Μανόμετρο	±10% ±0.5% της πίεσης	Εξίσωση (4.13)	Εξίσωση (4.19)
Ροή θερμότητας	Βαθμονόμηση Μη ευθυγράμμιση	±3% ±4 kW/m ²	Εξίσωση (4.13)	Εξίσωση (4.13)
Ψηφιακά παροχόμετρα καυσίμου	Ανάγνωσης Πλήρους κλίμακας	±0.5% της ροής ±0.1% της μέγιστης ροής	Εξίσωση (4.13)	1) ±0.394 ln/min 2) ±0.514 ln/min 3) ±0.612 ln/min*
Ψηφιακά παροχόμετρα καυσαερίων	Ψηφιακό μανόμετρο	±5% της πίεσης	Εξίσωση (4.13)	Εξίσωση (4.20)

* Οι αριθμοί 1-3 αντιστοιχούν στη συνολική αβεβαιότητα για το κάθε επίπεδο παροχής που επιλέχθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων: 75, 100 και 120 ln/min για κάθε παροχόμετρο

5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΟΡΙΩΝ ΦΛΟΓΑΣ

Το ανθρώπινο οπτικό σύστημα μπορεί να διακρίνει εκατοντάδες χιλιάδες διαφορετικές αποχρώσεις και χρωματικές εντάσεις. Σε μία εικόνα περιέχεται μία μεγάλη ποσότητα πληροφορίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απλοποίηση της ανάλυσης της εικόνας, π.χ. αναγνώριση και απομόνωση ενός συγκεκριμένου αντικειμένου με βάση το χρώμα του.

Το ορατό φάσμα των χρωμάτων αντιστοιχεί σε εύρος μήκους κύματος από 400 έως 700 nm, αποτελώντας ένα μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Η ορατή ακτινοβολία ως ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Ο κορεσμός (saturation), καθορίζεται από την καθαρότητα της διέγερσης και εξαρτάται από την ποσότητα του λευκού φωτός που αναμιγνύεται με την απόχρωση. Μία καθαρή απόχρωση είναι ολοκληρωτικά διεγερμένη όταν π.χ. δεν αναμιγνύεται καθόλου με λευκό φως. Η απόχρωση και ο κορεσμός αποτελούν μαζί την ποιότητα του χρώματος (chromaticity), που δεν εξαρτάται από το φωτισμό. Τέλος, η ένταση (intensity) καθορίζεται από την αντικειμενική ποσότητα του φωτός, με περισσότερο φως να αντιστοιχεί σε πιο έντονα χρώματα.

Το αχρωματικό φως δεν έχει χρώμα – το μόνο του χαρακτηριστικό είναι η ποσότητα ή η ένταση. Το επίπεδο του γκριζου είναι ένα μέτρο έντασης. Η ένταση καθορίζεται από την ενέργεια, και είναι προφανώς μία φυσική ποσότητα. Από την άλλη, η λάμψη ή η φωτεινότητα (luminance) καθορίζεται από την αντίληψη του χρώματος.

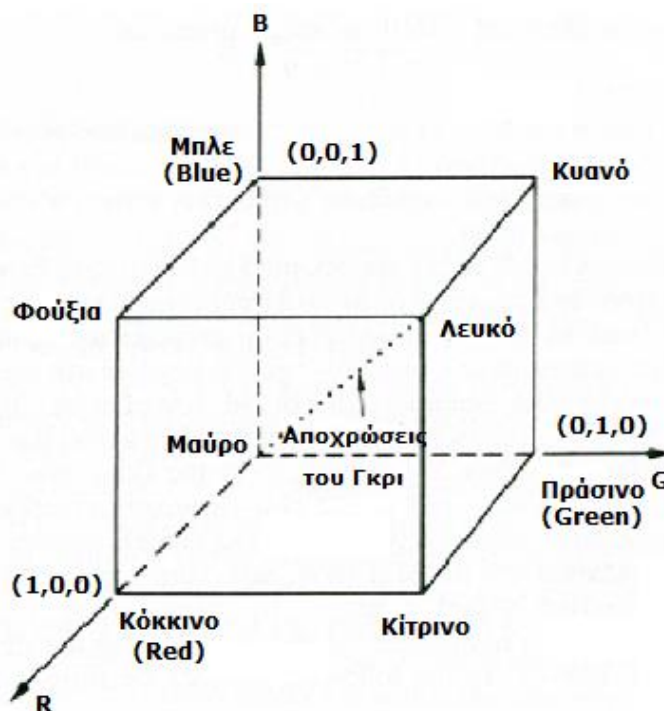
Το χρώμα εξαρτάται κυρίως από τις ανακλαστικές ιδιότητες ενός αντικειμένου. Γίνονται αντιληπτές οι ακτίνες που αντανακλώνται ενώ άλλες απορροφώνται. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το χρώμα της πηγής του φωτός, καθώς και η φύση του ανθρώπινου συστήματος όρασης. Για παράδειγμα, ένα αντικείμενο που ανακλά και κόκκινο και πράσινο, θα φανεί πράσινο όταν υπάρχει πράσινο αλλά όχι κόκκινο φως που το φωτίζει, και αντίθετα θα φανεί κόκκινο με την απουσία πράσινου φωτός. Σε καθαρό λευκό φως, θα φανεί κίτρινο (κόκκινο + πράσινο).

5.1 Χρωματικά μοντέλα

Τα χρωματικά μοντέλα παρέχουν ένα βασικό τρόπο να απομονώνεται ένα συγκεκριμένο χρώμα, ορίζοντας ένα 3D σύστημα συντεταγμένων, και ένα υποσύνολο που περιέχει όλα τα κατασκευάσιμα χρώματα μέσα στο συγκεκριμένο μοντέλο. Κάθε χρώμα που μπορεί να αναγνωριστεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό σημείο μέσα στο υποσύνολο που ορίζει. Κάθε χρωματικό μοντέλο είναι προσανατολισμένο είτε προς ένα συγκεκριμένο μοντέλο (RGB, CMY, YIQ) ή εφαρμογές επεξεργασίας εικόνας (HSI).

5.1.1 Το Μοντέλο RGB

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το οποίο είναι και το βασικότερο, η εικόνα αποτελείται από τρία ανεξάρτητα επίπεδα, το καθένα σε ένα από τα βασικά χρώματα: Κόκκινο (R), πράσινο (G) και μπλε (B). Ο προσδιορισμός ενός συγκεκριμένου χρώματος γίνεται με τον προσδιορισμό της ποσότητας του κάθε βασικού χρώματος. Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει τη γεωμετρία του RGB χρωματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό των χρωμάτων χρησιμοποιώντας σύστημα Καρτεσιανών συντεταγμένων. Το φάσμα της κλίμακας του γκρι, όπως τα χρώματα που φτιάχνονται από ίσες ποσότητες του κάθε βασικού χρώματος, βρίσκεται πάνω στη γραμμή που ενώνει τη μαύρη και την άσπρη κορυφή.



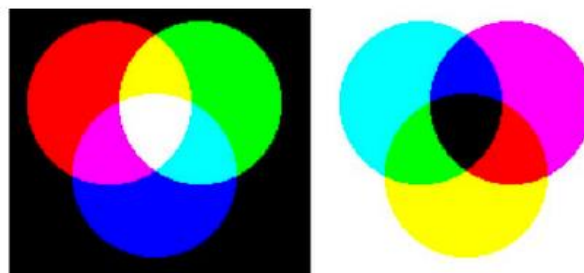
Σχήμα 5.2: Ο κύβος RGB

Αυτό είναι ένα προσθετικό μοντέλο, αφού τα παρόντα χρώματα στο φως ενώνονται για να σχηματίσουν νέα χρώματα και είναι κατάλληλα για την μίξη χρωματιστού φωτός. Για παράδειγμα το Σχήμα 5.3 δείχνει στα αριστερά την προσθετική μίξη του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε χρώματος για τη δημιουργία τριών δευτερευόντων χρωμάτων κίτρινο (κόκκινο + πράσινο), θαλασσί (μπλε + πράσινο), μωβ (κόκκινο + μπλε) και λευκό (κόκκινο + πράσινο + μπλε). Το

μοντέλο RGB χρησιμοποιείται σε χρωματιστές οθόνες και στις περισσότερες βιντεοκάμερες.

5.1.2 Το Μοντέλο CMY

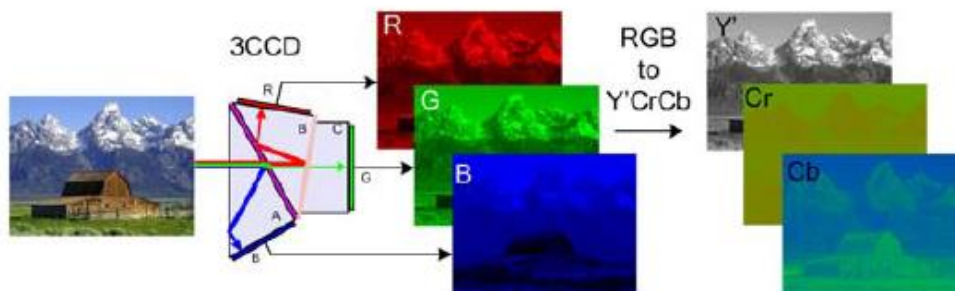
Το CMY (cyan – magenta – yellow, ελλ. γαλάζιο – μωβ – κίτρινο) μοντέλο είναι ένα αφαιρετικό μοντέλο κατάλληλο για απορρόφηση χρωμάτων, για παράδειγμα εξαιτίας των χρωστικών ουσιών στις βαφές. Ενώ στο μοντέλο RGB τίθεται το ερώτημα του τι προστίθεται στο μαύρο για να παραχθεί ένα συγκεκριμένο χρώμα, στο CMY μοντέλο τίθεται το ερώτημα του τι αφαιρείται από το λευκό. Σε αυτήν την περίπτωση τα βασικά χρώματα είναι το θαλασσί, το μωβ και το κίτρινο και αντίστοιχα το κόκκινο, πράσινο και μπλε είναι δευτερεύοντα. Στο Σχήμα 5.3 γίνεται μία συγκριτική απεικόνιση των μοντέλων RGB (αριστερά) καθ CMY (δεξιά).



Σχήμα 5.3: Προσθετικό μοντέλο RGB (αριστερά) και αφαιρετικό μοντέλο CMY (δεξιά)

5.1.3 Το Μοντέλο $YCbCr$ ή $Y'CbCr$

Το μοντέλο $YCbCr$ ή $Y'CbCr$ είναι ουσιαστικά μια οικογένεια μοντέλων που χρησιμοποιούνται σαν μέρος της κατηγορίας της έγχρωμης εικόνας στα βίντεο και την ψηφιακή φωτογραφία. Το στοιχείο Y αποτελεί τη φωτεινότητα (luminance) ενώ το Y' αποτελεί το στοιχείο luma (στα ελληνικά ένα είδος φωτεινότητας αλλά δεν πρέπει να συγχέεται με τον όρο luminance διότι πρακτικά η διαφορά έγκειται στο ότι το στο πρώτο η ένταση του φωτός είναι μη γραμμικά κρυπτογραφημένη με βάση διόρθωση γάμμα μιας αρχικής RGB), και τα C_b και C_r είναι η μπλε και κόκκινη διάσταση της ποιότητας του χρώματος (chroma/chrominance). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν έχει υψηλή ποιότητα, δεν περιέχει σκιές λευκού και γκρι φωτός. Το μοντέλο αυτό δεν είναι ένα βασικό αλλά είναι ουσιαστικά κρυπτογράφηση RGB πληροφορίας. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται σχηματικά η μετατροπή των επιπέδων RGB μιας εικόνας σε επίπεδα $YCbCr$.



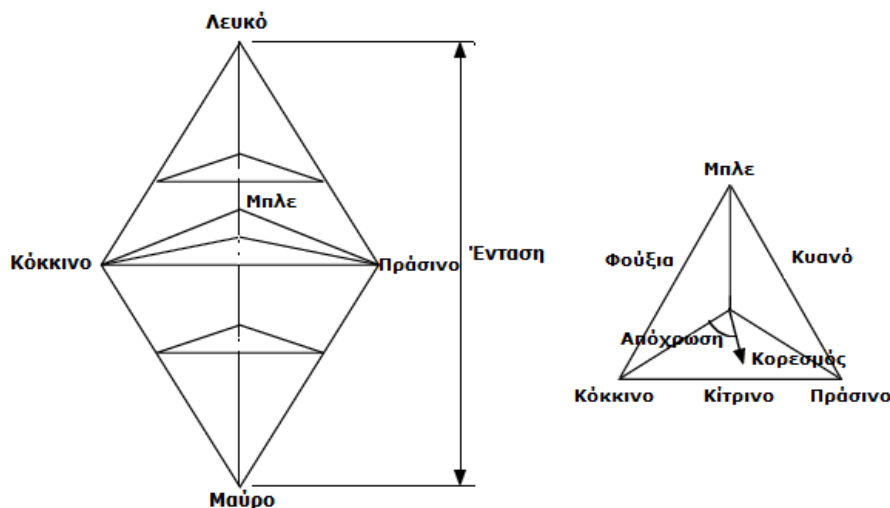
Σχήμα 5.4: Σχηματικός τρόπος μετατροπής του RGB σε $YCbCr$.

Τα $YCbCr$ και $Y'CbCr$ είναι μια πρακτική προσέγγιση στην επεξεργασία του χρώματος και την αντιληπτική ομοιομορφία, όπου τα βασικά χρώματα που αντιστοιχούν στο

κόκκινο, το πράσινο και το μπλε υφίστανται επεξεργασία και μετατρέπονται σε χρήσιμη πληροφορία. Κάνοντας αυτό, η επακόλουθη επεξεργασία εικόνας/βίντεο, η μετατροπή και αποθήκευση μπορούν να πραγματοποιήσουν διαδικασίες και να εντοπίσουν λάθη με πολλούς τρόπους. Το $YCbCr$ χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος της φωτεινότητας που μπορεί να αποθηκευτεί με μεγάλη ανάλυση ή να μεταφερθεί με εξαιρετικά μεγάλο φάσμα συχνότητας (high bandwidth), και των δύο συστατικών της ποιότητας χρώματος που μπορούν να μετατραπούν σε μικρότερες συχνότητες, να δημιουργηθούν από αυτά μικρότερα δείγματα, να συμπιεστούν ή διαφορετικά να υποστούν ξεχωριστή επεξεργασία για μεγαλύτερη ευστάθεια του συστήματος.

5.1.4 Το Μοντέλο HSI

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το χρώμα μπορεί να προσδιοριστεί από τρεις ποσότητες, την απόχρωση, τον κορεσμό και την ένταση. Αυτό είναι το HSI μοντέλο, και ολόκληρο το διάστημα των χρωμάτων που μπορεί να προσδιοριστεί με αυτόν τον τρόπο απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Το μοντέλο HIS

Το μοντέλο HSI, απεικονίζοντας το HSI συμπαγές στα αριστερά, και το HSI τρίγωνο στα δεξιά, το οποίο δημιουργήθηκε παίρνοντας μια οριζόντια τομή κατά μήκος του συμπαγούς μοντέλου σε μια συγκεκριμένη ένταση. Η απόχρωση υπολογίζεται από το κόκκινο και ο κορεσμός από την απόσταση από τον άξονα. Τα χρώματα στην επιφάνεια του στερεού είναι τελείως κορεσμένα, όπως τα καθαρά χρώματα και το φάσμα της κλίμακας του γκρι είναι πάνω στον άξονα του στερεού. Για αυτά τα χρώματα, η απόχρωση είναι ακαθόριστη. Η μετατροπή μεταξύ του μοντέλου RGB και του HSI είναι αρκετά πολύπλοκη. Η ένταση δίνεται από την Εξίσωση (5.1):

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (5.1)$$

Όπου οι ποσότητες R,G,B είναι οι ποσότητες του κόκκινου, πράσινου και μπλε ομαλοποιημένες στο εύρος τιμών [0,1]. Η ένταση είναι λοιπόν απλά ο μέσος όρος αυτών των τιμών. Ο κορεσμός δίνεται από την Εξίσωση (5.2):

$$S = \frac{\min(R, G, B)}{I} = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B) \quad (5.2)$$

όπου ο όρος $\min(R, G, B)$ απλά δείχνει την ποσότητα της παρουσίας λευκού χρώματος. Αν κάποιο από τα R, G, B είναι μηδέν, τότε δεν υπάρχει καθόλου λευκό αλλά μόνο καθαρό χρώμα.

Η απόχρωση H υπολογίζεται από την Εξίσωση (5.3).

$$H = \begin{cases} \theta & \text{αν } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{αν } B > G \end{cases} \quad (5.3)$$

Όπου η γωνία θ δίνεται από την Εξίσωση (5.4).

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right\} \quad (5.4)$$

5.2 Μεθοδολογίες οπτικής ανίχνευσης φλόγας

Η επεξεργασία σημάτων, εικόνων και βίντεο πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές ασφαλείας έναντι πυρκαγιάς. Είναι δυνατή η χρήση καμερών ορατού ή/και υπέρυθρου φάσματος για ειδικές περιπτώσεις επιτήρησης και πυρανίχνευσης. Προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ορισμένων «έξυπνων» τεχνικών επεξεργασίας σημάτων για την ανίχνευση και την ανάλυση της συμπεριφοράς της ανεξέλεγκτης φωτιάς (Cetin et al., 2016).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, οι βελτιώσεις στην υπολογιστική ισχύ και το ελαττούμενο κόστος των αισθητήρων εικόνας κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη τεχνικών ανίχνευσης φωτιάς βασισμένες σε βίντεο για εφαρμογές που απαιτούν καταγραφή σε πραγματικό χρόνο. Οι αλγόριθμοι που διατίθενται στη βιβλιογραφία αφορούν ως επί το πλείστον κάμερες ορατού φάσματος, καθώς οι τελευταίες κοστίζουν πολύ λιγότερο από τις κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Το πρώτο βήμα για την ανίχνευση της φλόγας μέσω βίντεο είναι η εφαρμογή κάποιου αφαιρετικού αλγορίθμου ο οποίος εξάγει τις εν κινήσει περιοχές στο βίντεο. Έπειτα, οι ανιχνευμένες περιοχές αναλύονται προσωρινά ώστε να ταξινομηθούν με βάση το τρεμοπαίξιμό τους (flickering). Τα μοντέλα του Markov μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναγνωριστεί εάν τα διαλείποντα χαρακτηριστικά ανήκουν σε φλόγες. Σε επόμενη φάση ακολουθεί χωρική ανάλυση ώστε να ελεγχθούν τυχόν ανωμαλίες που συμβαίνουν κατά την ανίχνευση της φωτιάς.

Μία άλλη μέθοδος περιλαμβάνει την εξαγωγή χαρακτηριστικών από τις εν κινήσει περιοχές και την χρήση ταξινομητών οι οποίοι εκπαιδεύονται εκτός σύνδεσης (offline) με βίντεο φωτιάς και πηγές λανθασμένου συναγερμού (false alarm sources). Είναι επίσης δυνατή η χρήση διαδραστικών αλγορίθμων οι οποίοι αναβαθμίζονται κατά τη διάρκεια της σύνδεσης (online) ώστε να ταξινομήσουν τις περιοχές της φωτιάς. Το σημαντικότερο πρόβλημα με την πυρανίχνευση με χρήση καμερών ορατού φάσματος είναι η πυροδότηση λανθασμένων συναγερμών. Οι εν κινήσει περιοχές με χρωματισμούς όμοιους με της φωτιάς είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν από την ίδια τη φωτιά. Γενικά, οι αλγόριθμοι ανίχνευσης της φωτιάς

αναπτύσσονται για στατικές κάμερες. Όταν χρησιμοποιούνται κινούμενες κάμερες, γίνεται πολύ δυσκολότερο να εντοπιστούν τα διαλείποντα χαρακτηριστικά της φωτιάς. Μία ακόμα εφαρμογή της πυρανίχνευσης με ανάλυση βίντεο είναι η ανίχνευση καπνού ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης κατά την πρώιμη ανάπτυξη πυρκαγιάς στο φυσικό περιβάλλον. Σε δασώδεις εκτάσεις συνήθως χρησιμοποιούνται κάμερες PTZ (Pan – Tilt – Zoom) οι οποίες σαρώνουν προκαθορισμένες θέσεις με συγκεκριμένη σειρά και πραγματοποιούν μεγέθυνση με τηλεχειρισμό. Οι κάμερες αυτές μπορούν να καταγράψουν μεγαλύτερες αποστάσεις από τις συνήθεις κάμερες ορατού φάσματος. Σε εφαρμογές πυρανίχνευσης σε φυσικό περιβάλλον, ο καπνός γίνεται ορατός πριν από τις φλόγες, κάτι που καθιστά απαραίτητη την έγκαιρη ανίχνευσή του σε αυτά τα συστήματα.

Με τη μείωση του κόστους των υπέρυθρων αισθητήρων, κατέστη δυνατή η χρήση καμερών υπέρυθρης ακτινοβολίας βραχέων και μακρών κυμάτων για την ανίχνευση της φωτιάς. Από τη στιγμή που οι υπέρυθρες (θερμικές) κάμερες σχηματίζουν εικόνες των οποίων η ένταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία των αντικειμένων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματικά εργαλεία μείωσης των λανθασμένων συναγεργμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι θερμοκρασίες της φλόγας είναι υψηλότερες από αυτές του γύρω περιβάλλοντος και οι υπέρυθρες κάμερες μπορούν να αναγνωρίσουν τις διακοπόμενες φλόγες με επιτυχία. Αρχικά, οι αλγόριθμοι ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας επεξεργάζονταν κοντινές υπέρυθρες εικόνες (Near Infrared Images – NIR) ώστε να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη της φλόγας. Πιο πρόσφατες έρευνες άρχισαν να χρησιμοποιούν θερμικές κάμερες βραχέων κυμάτων (Short Wave Infrared – SWIR) και μακρών κυμάτων (Long Wave Infrared – LWIR).

Οι συμβατικοί αισθητήρες περιορίζονται γενικά σε εσωτερική χρήση και δεν βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλους ανοικτούς χώρους όπως σε εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια, δάση κ.α. Είναι απαραίτητο να βρίσκονται κοντά στη φωτιά και οι περισσότεροι από αυτούς δεν δύνανται να παράσχουν επιπρόσθετες πληροφορίες για την θέση και τις διαστάσεις της φωτιάς. Η ανίχνευση της φωτιάς μέσω βίντεο (VDF) μπορεί να αναγνωρίσει την ύπαρξη της φωτιάς σε μεγάλους και ανοικτούς χώρους, διότι οι κάμερες μπορούν να παρακολουθούν "όγκους". Επομένως, αποφεύγεται η καθυστέρηση που παρατηρείται στους συμβατικούς σημειακούς αισθητήρες λόγω του χρόνου που απαιτείται για τη μεταφορά των σωματιδίων του άνθρακα από την εστία στον αισθητήρα. Από τη στιγμή που ανιχνευθεί η φωτιά ή ο καπνός, ο συναγεργμός ενεργοποιείται αμέσως.

Οι σύγχρονοι διαθέσιμοι αλγόριθμοι κατά κύριο λόγο εστιάζουν στην ανίχνευση και ανάλυση του καπνού και της φλόγας σε διαδοχικές εικόνες του βίντεο. Ο λόγος για τον οποίο η ανίχνευση του καπνού είναι πολύ σημαντική είναι ότι εξαπλώνεται γρηγορότερα από τη φωτιά και βρίσκεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο οπτικό πεδίο των καμερών. Η πλειοψηφία των σύγχρονων τεχνικών πυρανίχνευσης εστιάζει στο χρώμα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την περιοδική συμπεριφορά του καπνού και της φωτιάς. Ωστόσο, λόγω της μεταβλητότητας που παρουσιάζεται στο σχήμα, την κίνηση, τη διαύγεια, τα χρώματα και το μοτίβο της φωτιάς και του καπνού, πολλές από τις υπάρχουσες προσεγγίσεις ανίχνευσης φλόγας μέσω βίντεο είναι ευάλωτες σε λανθασμένους συναγεργμούς. Με τη σύγχρονη τεχνολογία, είναι αδύνατη η λειτουργία ενός παντελώς αξιόπιστου συστήματος ανίχνευσης φλόγας χωρίς ανθρώπινο χειριστή. Παρόλα αυτά, οι κάμερες αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών, όπως πιθανή παρουσία ανθρώπων κατά την έναυση της φωτιάς, το μέγεθος της φωτιάς, την ανάπτυξη της φωτιάς, την κατεύθυνση του καπνού κ.α.

Τα συστήματα ανίχνευσης φωτιάς μέσω βίντεο (VDF) μπορούν να ταξινομηθούν σε υποκατηγορίες ανάλογα με:

- Το φασματικό εύρος της κάμερας που χρησιμοποιείται
- Τον σκοπό ανίχνευσης (φωτιά ή καπνό)
- Την εμβέλεια του συστήματος

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τεχνικές πυρανίχνευσης από διάφορες ερευνητικές ομάδες (Cetin et. al, 2016).

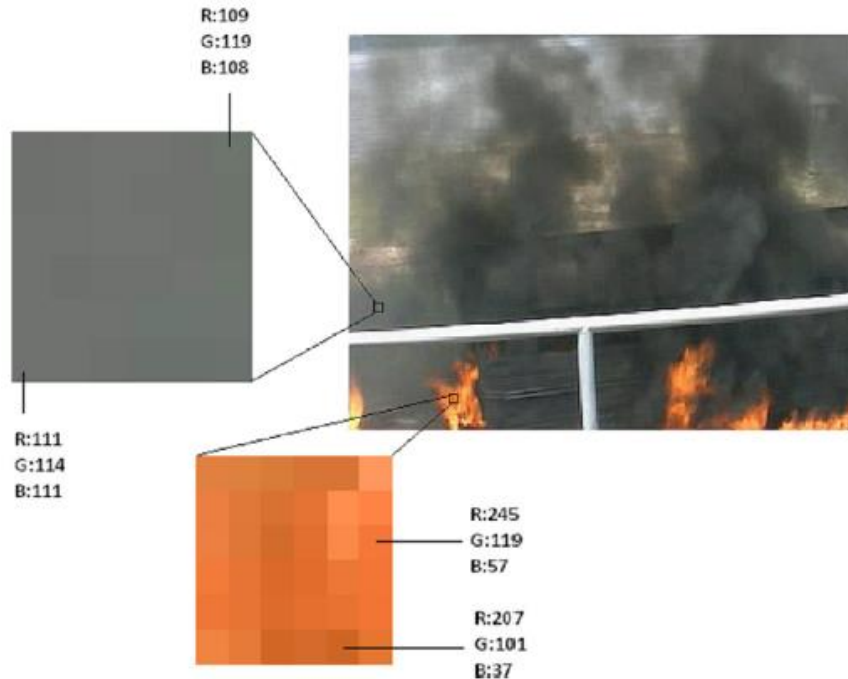
Πίνακας 5.1: Τεχνικές πυρανίχνευσης από διάφορες ερευνητικές ομάδες (Cetin et. al, 2016)

Παραπομπή	Ανίχνευση χρώματος	Ανίχνευση κίνησης	Ανάλυση κυματομορφών	Ανάλυση χωρικών διαφορών	Δυναμική ανάλυση μοτίβου	Ανίχνευση φωτιάς	Ανίχνευση καπνού
Philips et al., 2002	RGB		X	X		X	
Gomez-Rodriguez et al., 2003		X	X				X
Chen et al., 2004	RGB/HSI	X				X	X
Liu et al., 2004	HSV					X	
Marbach et al., 2006	YUV		X			X	
Toreyin et al., 2006	RGB	X	X	X		X	
Toreyin et al., 2006	YUV	X	X				X
Celik et al., 2007	RGB/YCbCr					X	X
Xu and Xu, 2007		X	X			X	X
Celik et al., 2007	RGB	X				X	
Xiong et al., 2007		X	X				X
Lee and Han, 2007	RGB	X				X	X
Calderara et al., 2008	RGB	X	X				X
Piccinini et al., 2008	RGB	X	X				X
Yuan, 2008	RGB	X					X
Borges et al., 2008	RGB						X
Qi and Ebert, 2008	RGB/HSV		X	X		X	

Παραπομπή	Ανίχνευση χρώματος	Ανίχνευση κίνησης	Ανάλυση κυματομορφών	Ανάλυση χωρικών διαφορών	Δυναμική ανάλυση μοτίβου	Ανίχνευση φωτιάς	Ανίχνευση καπνού
Yasmin, 2009	RGB/HSI	X					X
Gubbi et al., 2009		X					X
Chen et al., 2010	RGB/HSI	X	X			X	
Gunay et al., 2010	RGB/HSI	X	X	X		X	
Kolesov et al., 2010					X	X	X
Gonzalez-Gonzalez et al., 2010			X				X
Borges et al., 2010	RGB			X		X	
Van Hamme, 2010	HSV				X	X	
Celic, 2010	CIE L*a*b*	X				X	
Yuan, 2011					X		X
Rossi et al., 2011	YUV/RGB					X	

5.2.1 Ανίχνευση χρώματος

Η ανίχνευση χρώματος ήταν μία από τις πρώτες τεχνικές που εφαρμόστηκαν στα συστήματα αναγνώρισης της φωτιάς μέσω κάμερας. Η πλειοψηφία των προσεγγίσεων που είναι βασισμένες στα χρώματα κάνουν χρήση του χρωματικού μοντέλου RGB, ορισμένες φορές σε συνδυασμό με τα μοντέλα HSI/HSV. Ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται το μοντέλο RGB είναι ότι σχεδόν όλες οι κάμερες ορατού φάσματος διαθέτουν αισθητήρες που καταγράφουν τα βίντεο σε μορφή RGB. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι τιμές των RGB των pixels της φωτιάς ανήκουν κυρίως στο εύρος του κόκκινου-κίτρινου χρώματος ακολουθούν τον κανόνα $R > G > B$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Αντίστοιχα, για pixels καπνού, οι τιμές των R,G,B είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Πιο περίπλοκα συστήματα περιλαμβάνουν τεχνικές που βασίζονται σε κανόνες όπως τα Γκαουσιανά ομαλοποιημένα χρωματικά ιστογράμματα (Phillips et al.,2002), στατιστικώς παραγόμενα χρωματικά μοντέλα (Celik et al.,2007) και συναρτήσεις ανάμειξης (Calderara et al.,2008). Είναι προφανές ότι το χρώμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο του για να ανιχνεύσει μία φωτιά λόγω της μεταβλητότητας στην απόχρωση, την ένταση, το φωτισμό και το φόντο. Παρόλα αυτά, οι χρωματικές πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος ενός πιο σύνθετου συστήματος.



Σχήμα 5.6: Ανίχνευση χρώματος: Τα pixels του καπνού (αριστερά) έχουν τιμές R,G,B πολύ κοντά η μία στην άλλη. Τα pixels της φωτιάς (κάτω) υπακούν στον χρωματικό κανόνα $R > G > B$ (Celik et al., 2016)

Για παράδειγμα, στην ανίχνευση του καπνού χρησιμοποιείται η μείωση της ποιότητας του χρώματος (chrominance). Αντίθετα, οι τιμές της φωτεινότητας (luminance) των περιοχών καπνού θα πρέπει να είναι υψηλές για τις περισσότερες περιπτώσεις.

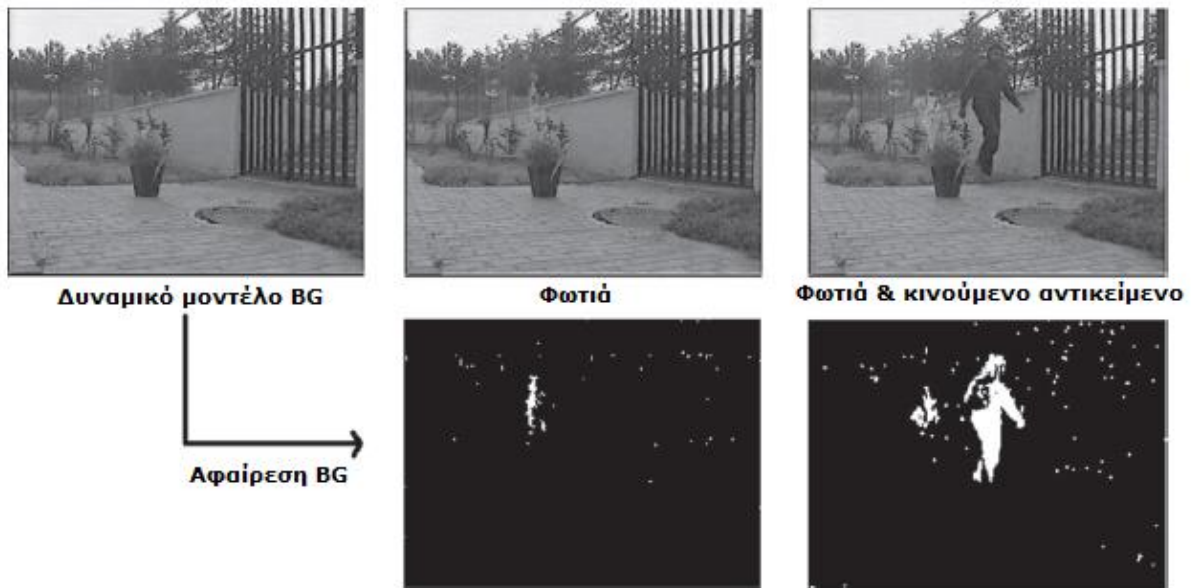
5.2.2 Ανίχνευση κινούμενου αντικειμένου

Η ανίχνευση κινούμενου αντικειμένου επίσης χρησιμοποιείται ευρέως στην πυρανίχνευση με χρήση καμερών, καθώς οι φλόγες και ο καπνός είναι κινούμενα αντικείμενα. Για να καθοριστεί αν η κίνηση οφείλεται στον καπνό ή σε κάποιο συνηθισμένο αντικείμενο, είναι απαραίτητο να διενεργηθεί περαιτέρω ανάλυση.

Γνωστοί αλγόριθμοι για την ανίχνευση κινούμενου αντικειμένου είναι οι αφαιρετικές μέθοδοι του φόντου (BG) (Xu et al., 2007, Piccinini et al., 2008), χρονικής διαφοράς (TD) (Lee et al., 2007) και οπτική ανάλυση της ροής (Gomez-Rodriguez et al., 2003). Όλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τμήμα του συστήματος ανίχνευσης μέσω βίντεο.

Στις αφαιρετικές μεθόδους του φόντου (background subtraction methods), θεωρείται ότι η κάμερα είναι στατική. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται ένα παράδειγμα ανίχνευσης κίνησης βασισμένο στην αφαίρεση φόντου, όπου χρησιμοποιείται το δυναμικό μοντέλο φόντου (dynamic background model) που προτάθηκε από τους Collins et al. (1999).

Σε πολλά από τα αρχικά άρθρα που αφορούσαν την πυρανίχνευση μέσω βίντεο, τα κινούμενα αντικείμενα με τα χρώματα της φωτιάς ταξινομούσαν ως φωτιά, κάτι που οδηγούσε σε λανθασμένους συναγερμούς, διότι τα φύλλα που πέφτουν κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου ή άλλα παρεμφερή αντικείμενα λανθασμένα θεωρούνταν ως φωτιά. Προκειμένου να σχεδιαστούν πιο ακριβή συστήματα πυρανίχνευσης, είναι απαραίτητο να γίνει περαιτέρω ανάλυση της κίνησης σε ένα βίντεο.



Σχήμα 5.7: Ανίχνευση κινούμενου αντικειμένου: Αφαίρεση φόντου χρησιμοποιώντας δυναμικό μοντέλο φόντου (dynamic background model), (Celik et al., 2016).

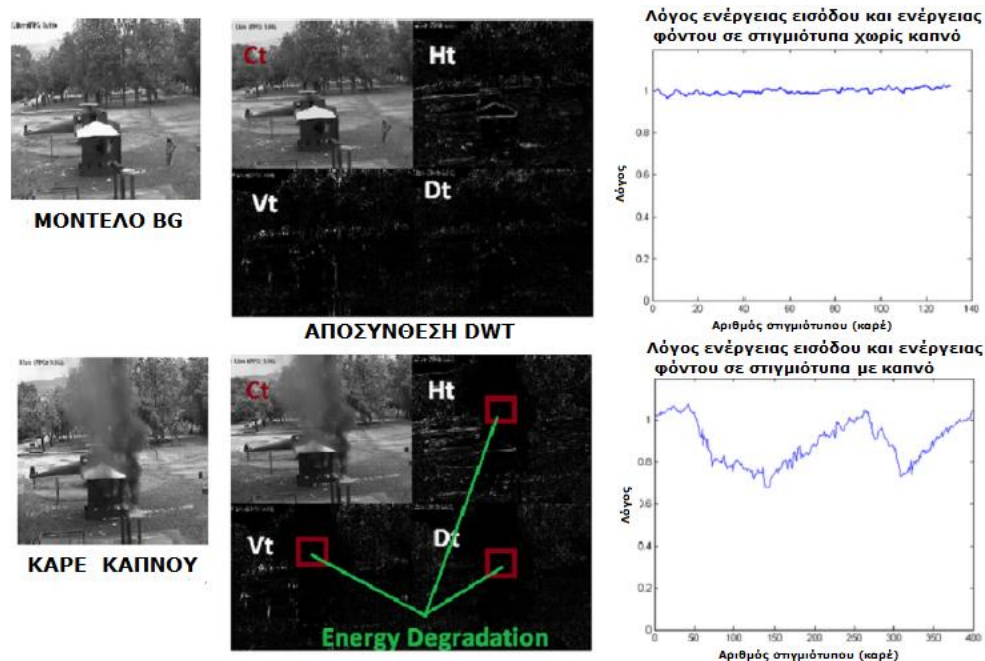
5.2.3 Ανάλυση κίνησης με τη χρήση μετασχηματισμών Fourier και κυματομορφών

Όπως είναι γνωστό, οι φλόγες σε ανεξέλεγκτες φωτιές είναι διαλείπουσες. Γι' αυτό, η ανίχνευση των διαλείψεων της φλόγας σε ένα βίντεο (Chen et al., 2010, Gunay et al., 2010) και η ανάλυση του κυματοειδούς σήματος της ενέργειας (Calderara et al., 2008, Piccinini et al., 2008, Gonzalez-Gonzalez et al., 2010) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον διάκριση ενός απλού αντικειμένου από τη φωτιά. Οι μέθοδοι αυτές εστιάζουν στην προσωρινή συμπεριφορά της φωτιάς και του καπνού. Κατά συνέπεια, pixels στα χρώματα της φωτιάς εμφανίζονται και εξαφανίζονται στην άκρη της φωτιάς. Στην έρευνα των Xu et al. (2007) προκύπτει πειραματικά ότι η συχνότητα των διαλείψεων των τυρβωδών φλογών είναι περίπου 10 Hz και δεν επηρεάζεται γενικώς από την καύσιμη ύλη και τον καυστήρα. Κατά συνέπεια η ανάλυση των συχνοτήτων προβάλλεται ως ένας καλός τρόπος διαφοροποίησης της φλόγας από άλλα κινούμενα αντικείμενα. Ωστόσο, μία ανεξέλεγκτη φωτιά στα πρώιμα στάδια της εμφανίζει μία μετάβαση στο χάος εξαιτίας του γεγονότος ότι η διαδικασία της καύσης περιλαμβάνει μη γραμμικές αστάθειες οι οποίες οδηγούν σε μετάβαση στη χαοτική συμπεριφορά μέσω των διαλείψεων. Έτσι, οι τυρβώδεις φλόγες μπορούν να χαρακτηριστούν ως χαοτική δραστηριότητα με συχνότητες ευρείας ζώνης (wide-band frequencies). Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό να παρατηρηθεί μία μοναδική συχνότητα διαλείψεων στο ορατό φάσμα λόγω μίας μη ελεγχόμενης φωτιάς. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε από ανεξάρτητους ερευνητές που εργάζονται πάνω στην πυρανίχνευση μέσω βίντεο και προτάθηκαν διάφορες μέθοδοι (Toreyin et al., 2006, Yang et al., 2006, Chen et al., 2010). Παρομοίως, δεν είναι δυνατή η εύρεση συγκεκριμένης συχνότητας διαλείψεων σε καπνό, αλλά παρατηρείται ξεκάθαρα μία ελικοειδής συμπεριφορά στις ανεξέλεγκτες φωτιές, η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο. Για το λόγο αυτό, η ανίχνευση του καπνού μέσω διακοπτόμενης εμφάνισης δεν φαίνεται να αποτελεί ιδιαίτερα αξιόπιστη τεχνική, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τμήμα ενός πολυπαραγοντικού αλγορίθμου ο οποίος συνδυάζει ποικίλα οπτικά στοιχεία για την ανίχνευση του καπνού.

Η χρονική συμπεριφορά του καπνού μπορεί να αξιοποιηθεί από την ανάλυση των κυματομορφών της ενέργειας. Καθώς ο καπνός σταδιακά αμβλύνει τα περιγράμματα της εικόνας, οι Toreyin et al. (2006) βρήκαν ότι η μεταβολή της ενέργειας ανάμεσα στο φόντο και την τρέχουσα εικόνα αποτελεί στοιχείο για την παρουσία καπνού. Προκειμένου να ανιχνευθεί η ελάττωση της ενέργειας στα περιγράμματα της εικόνας, χρησιμοποιείται η Διακριτή Μετατροπή Κυματομορφής (Discrete Wavelet Transform – DWT). Η DWT είναι μία μέθοδος αποσύνθεσης σήματος πολλαπλών αναλύσεων που επιτυγχάνεται με τη συνέλιξη της εικόνας έντασης με τις τράπεζες φίλτρων. Μία τυπική τράπεζα φίλτρων παράγει τέσσερις κυματοειδείς υποεικόνες: Μία εικόνα χαμηλότερων συχνοτήτων σε σχέση με την πρωτότυπη C_t , και την οριζόντια, κάθετη και διαγώνια εικόνα υψηλών συχνοτήτων με σύμβολα H_t , V_t και D_t αντίστοιχα. Η ενέργεια υψηλής ζώνης από τις υποεικόνες H_t , V_t και D_t εκτιμάται διαιρώντας την εικόνα σε τμήματα b_k αυθαίρετου μεγέθους ως εξής:

$$E(I_t, b_k) = \sum_{i,j \in b_k} H_t^2(i, j) + V_t^2(i, j) + D_t^2(i, j) \quad (5.5)$$

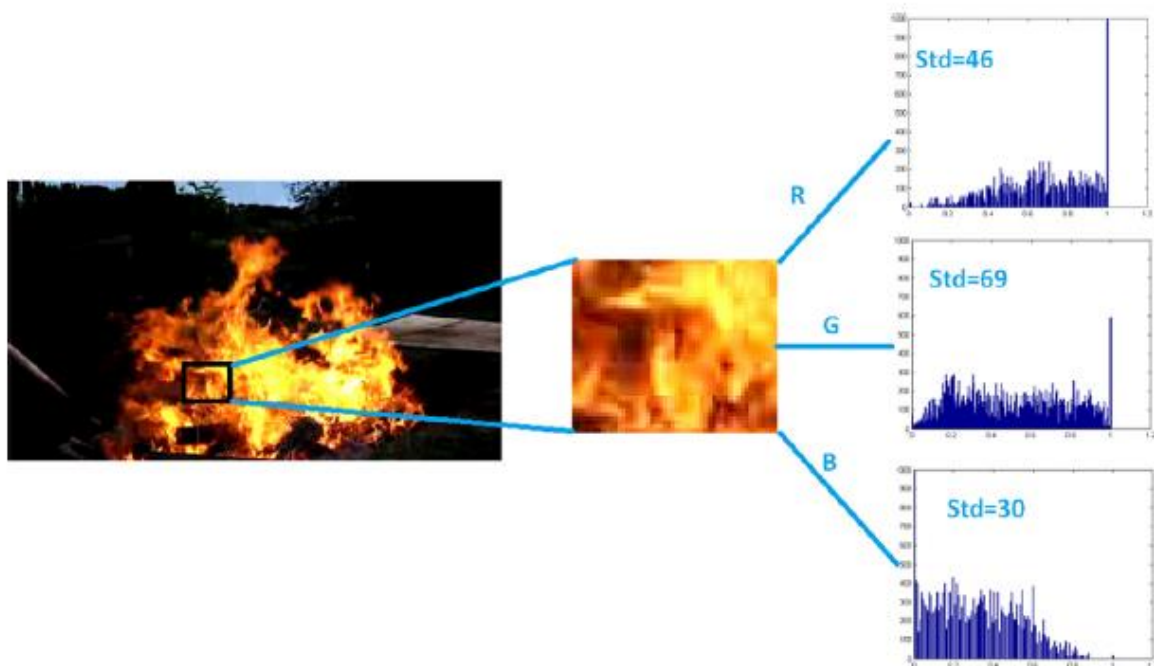
Από τη στιγμή που η συνεισφορά των περιγραμμάτων είναι πιο σημαντική στις κυματοειδείς εικόνες υψηλής ζώνης σε σύγκριση με τις επίπεδες περιοχές της εικόνας, είναι δυνατό να ανιχνευθεί ο καπνός με τη μείωση του $E(I_t, b_k)$. Καθώς η τιμή της ενέργειας ενός συγκεκριμένου τμήματος ποικίλλει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, η χρονική ανάλυση (temporal analysis) του λόγου μεταξύ της τρέχουσας ενέργειας του κυματοειδούς στιγμιότυπου (frame) εισόδου και της ενέργειας της κυματοειδούς εικόνας του φόντου χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του καπνού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8:



Σχήμα 5.8: Ανίχνευση καπνού με χρήση βίντεο και μεθόδου DWT: Όταν υπάρχει καπνός ο λόγος ανάμεσα στην ενέργεια του κυματοειδούς στιγμιότυπου εισόδου και την ενέργεια του φόντου μειώνεται και δείχνει υψηλό βαθμό αταξίας (Celik et al., 2016).

5.2.4 Χρωματική μεταβολή και ανάλυση των χωρικών κυματομορφών

Οι φλόγες μιας ανεξέλεγκτης φωτιάς διαθέτουν μεταβαλλόμενα χρώματα μέσα σε μία μικρή περιοχή. Η ανάλυση των χωρικών διαφορών του χρώματος εστιάζει σε αυτό το χαρακτηριστικό (Qi et al., 2009, Borges et al., 2010). Χρησιμοποιώντας φίλτρα ζωνών, ανάλυση μεταβολών/ιστογραμμάτων ή ανάλυση χωρικών κυματομορφών, αναλύονται οι χωρικές χρωματικές μεταβολές στις τιμές των pixels ώστε να διαχωριστούν τα συνήθη αντικείμενα που φέρουν τα χρώματα της φωτιάς από την πραγματική ανεξέλεγκτη φωτιά. Στο Σχήμα 5.9 εξηγείται περαιτέρω η ιδέα της ανάλυσης των χωρικών διαφορών του χρώματος με προσέγγιση μέσω ιστογραμμάτων, η οποία εστιάζει στην τυπική απόκλιση της ζώνης του πράσινου χρώματος. Οι Qi και Ebert παρατήρησαν ότι αυτή η χρωματική ζώνη είναι η καταλληλότερη για την αναγνώριση της χωρική χρωματικής μεταβολής των φλογών της φωτιάς. Αυτό μπορεί να φανεί παραστατικά από την ανάλυση των ιστογραμμάτων. Οι τιμές του πράσινου χρώματος στα pixels μεταβάλλονται περισσότερο από τις αντίστοιχες του κόκκινου και μπλε χρώματος. Εάν η τυπική απόκλιση της πράσινης χρωματικής ζώνης υπερβεί την τιμή $t_s = 50$ (Borges et al., 2010) σε ένα τυπικό έγχρωμο βίντεο η περιοχή χαρακτηρίζεται ως υποψήφια περιοχή φλόγας. Αντίθετα, για ανίχνευση καπνού πειράματα έδειξαν ότι τέτοιου είδους τεχνικές δεν ενδείκνυνται πάντα, καθώς οι περιοχές καπνού συχνά δεν εμφανίζουν τόσο υψηλή χωρική χρωματική μεταβολή όσο οι περιοχές φλόγας. Επιπλέον, κινούμενα αντικείμενα με χρώματα παρόμοια με αυτά του καπνού διαχωρίζονται δύσκολα από τον πραγματικό καπνό και οδηγούν σε λανθασμένους συναγερμούς. Γενικά, ο καπνός σε μία ανεξέλεγκτη φωτιά είναι γκρι και αυτό μειώνει τη χρωματική μεταβολή στο φόντο.



Σχήμα 5.9: Χωρική ανάλυση διαφορών: στην περίπτωση της φλόγας, η τυπική απόκλιση σ_G της πράσινης χρωματικής ζώνης της περιοχής φλόγας υπερβαίνει την τιμή $t_s = 50$ (Borges et al., 2010, Celik et al., 2016).

5.2.5 Δυναμική ανάλυση υφής και μοτίβου

Μία δυναμική υφή ή μοτίβο σε ένα βίντεο, όπως για παράδειγμα ο καπνός, οι φλόγες, το νερό και τα φύλλα στον άνεμο, μπορούν να οριστούν ως μία υφή με

κίνηση, π.χ. ένα χωρικό και χρονικά μεταβαλλόμενο οπτικό μοτίβο που σχηματίζει μια αλληλουχία εικόνων ή τμήμα μιας αλληλουχίας εικόνων με μια ορισμένη χρονική στασιμότητα. Αν και οι δυναμικές υφές είναι εύκολα παρατηρούμενες από το ανθρώπινο μάτι, είναι δύσκολο να διακριθούν με τη χρήση τεχνητής όρασης μέσω υπολογιστή, καθώς η χωρική θέση και η έκταση των δυναμικών υφών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο και μπορεί κατά περιόδους να είναι μερικώς διαφανείς. Ορισμένες μέθοδοι δυναμικής υφής και ανάλυσης μοτίβων σε ένα βίντεο σχετίζονται στενά με την ανάλυση χωρικών διαφορών. Πρόσφατα, αυτές οι τεχνικές έχουν επίσης εφαρμοστεί στο πρόβλημα ανίχνευσης φλόγας και καπνού. Σήμερα, μία πληθώρα μεθόδων συμπεριλαμβανομένων των γεωμετρικών, των στατιστικών τεχνικών, των τεχνικών που βασίζονται σε μοντέλα ή την κίνηση σωμάτων, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της δυναμικής υφής.

Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζονται παραδείγματα ανίχνευσης δυναμικών υφών, χρησιμοποιώντας video clips από την δυναμική υφή DynTex και τις βάσεις δεδομένων Bilkent. Περιγράμματα δυναμικών περιοχών υφής (π.χ. πυρκαγιά, νερό και ατμός) φαίνονται σε αυτό το σχήμα. Οι δυναμικές περιοχές του βίντεο φαίνεται να είναι πολύ καλά κατατεταγμένες. Ωστόσο, λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους, αυτές οι γενικές τεχνικές δεν χρησιμοποιούνται στους πρακτικούς αλγόριθμους ανίχνευσης πυρκαγιάς, οι οποίοι πρέπει να λειτουργούν σε υπολογιστές χαμηλού κόστους, FPGA ή ψηφιακούς επεξεργαστές σημάτων. Εάν οι μελλοντικές εξελίξεις στους υπολογιστές και τους επιταχυντές γραφικών μπορέσουν να μειώσουν το υπολογιστικό κόστος, τότε θα κατασταθεί δυνατό τα δυναμικά συστήματα ανίχνευσης υφής να ενσωματωθούν στα υπάρχοντα συστήματα πυρανίχνευσης μέσω βιντεοκάμερας (VDF) για την επίτευξη πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.10: Ανίχνευση δυναμικής υφής: απεικονίζονται περιγράμματα ανιχνευμένων περιοχών δυναμικών υφών (Αποτελέσματα από DynTEX και βάσεις δεδομένων Bilkent), (Celik et al., 2016).

Συνήθη κινούμενα αντικείμενα σε ένα βίντεο, όπως άνθρωποι που περπατούν, έχουν αρκετά σταθερά ή σχεδόν περιοδικά όρια με την πάροδο του χρόνου. Αντιθέτως, οι περιοχές ανεξέλεγκτης φλόγας και καπνού εμφανίζουν χαοτικά περιγράμματα ορίων. Επομένως, η ανάλυση των διαταραχών των ορίων περιγράμματος ενός κινούμενου αντικείμενου είναι χρήσιμη για την ανίχνευση πυρκαγιάς. Μερικά παραδείγματα μετρήσεων που συχνά πραγματοποιούνται είναι η τυχαιότητα του μεγέθους του εμβαδού, η τραχύτητα των ορίων και η διαταραχή του εμβαδού των ορίων. Παρόλο που αυτές οι μετρήσεις διαφέρουν στο ορισμό, το αποτέλεσμα καθεμίας από αυτές είναι σχεδόν το ίδιο. Στον ανιχνευτή καπνού που αναπτύχθηκε από τους Verstock et al. (2011), χρησιμοποιείται η ανάλυση της διαταραχής της τραχύτητας του εμβαδού των ορίων (Boundary Area Roughness –BAR), η οποία προσδιορίζεται από τη συσχέτιση της περιμέτρου της περιοχής με την τετραγωνική ρίζα του εμβαδού της (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11: Τραχύτητα του εμβαδού των ορίων για διαδοχικές περιοχές φλόγας (Celik et al., 2016).

Σχετική με την ανάλυση των διαταραχών είναι επίσης η ανάπτυξη του καπνού και των περιοχών φλογών κατά τα πρώιμα στάδια της φωτιάς. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν το ρυθμό ανάπτυξης σε μία περιοχή ενδιαφέροντος ως χαρακτηριστική παράμετρο πυρανίχνευσης. Ωστόσο, συγκρινόμενη με τις μετρήσεις διαταραχών, η ανάλυση της ανάπτυξης είναι λιγότερο αποδοτική στην ανίχνευση του καπνού, ιδίως σε εξωτερικές φωτιές μεγάλης έκτασης. Αυτό οφείλεται στο ότι η περιοχή του καπνού συνήθως αναπτύσσεται με πολύ αργούς ρυθμούς σε αυτού του είδους τις φωτιές όταν παρατηρούνται από μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, ένα κινούμενο αντικείμενο μπορεί να πλησιάσει την κάμερα.

5.3 Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών εξερχόμενης φλόγας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο κύριος στόχος της επεξεργασίας εικόνας ήταν ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ΦΕΑ (ύψος, προέκταση και πλάτος). Χρησιμοποιήθηκαν δύο οπτικές κάμερες ρυθμού λήψης 25 fps (Nikon D3200 και Sony a3000), οι οποίες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη απόσταση από την εμπρόσθια και την πλάγια όψη της εγκατάστασης αντίστοιχα (Σχήμα 5.12).

Σε αντίθεση με τις έρευνες που σχετίζονται με την πυρανίχνευση σε ανοικτούς χώρους μεγάλης έκτασης (δάση, εμπορικά κέντρα κλπ), τα πειράματα φωτιάς της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν σε κλειστό χώρο εντός του εργαστηρίου υπό ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού και φωτισμού. Συγκεκριμένα, επειδή η αίθουσα επέτρεπε την είσοδο μεγάλης ποσότητας φωτός κατά τις πρωινές ώρες, δημιουργήθηκαν τεχνητές συνθήκες φωτισμού σκιάζοντας την περιοχή γύρω από την εγκατάσταση με την τοποθέτηση πάνελ και μαύρων πλευρικών επιφανειών (Σχήμα 5.12 δεξιά). Επίσης, ρυθμίστηκε η φωτεινότητα των καμερών κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα βίντεο να καταγράφονται σκοτεινότερα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγχυσης της φλόγας με ένα φωτεινό αντικείμενο που βρισκόταν στο χώρο. Λόγω της έντονης ακτινοβολίας, κάποια τμήματα μεταλλικών αντικειμένων όπως τα στελέχη συγκράτησης των θερμοστοιχείων και οι μεταλλικοί στύλοι αναγνωρίστηκαν αναπόφευκτα ως φωτιά (Σχήμα 5.15). Από τα χρωματικά μοντέλα που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 5.1, χρησιμοποιήθηκε το ευρέως

διαδεδομένο μοντέλο RGB και από τις μεθοδολογίες αναγνώρισης των ορίων της φλόγας που αναπτύχθηκαν στην Ενότητα 5.2 εφαρμόστηκε η τεχνική πυρανίχνευσης μέσω της ανάλυσης των χρωμάτων.



Σχήμα 5.12: Εμπρόσθια λήψη της εγκατάστασης από την κάμερα Nikon D3200 (αριστερά) και πλάγια λήψη της εγκατάστασης από την κάμερα Sony α3000 (δεξιά)

Στόχος ήταν η απομόνωση των pixels της φωτιάς και στη συνέχεια η περαιτέρω επεξεργασία τους μέσω λογισμικού MATLAB, το οποίο αναλύεται στην Παράγραφο 5.3.1. Συνοπτικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται ως εξής:

1. Με τη χρήση των δύο οπτικών καμερών ρυθμού λήψης 25 fps, κατεγράφησαν τα πειράματα από δύο διαφορετικές θέσεις, την εμπρόσθια (πρόσοψη) και την πλάγια όψη.
2. Στη συνέχεια για κάθε επίπεδο ισχύος της εκάστοτε δοκιμής απομονώθηκαν τα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια των οποίων επικρατούσαν μόνιμες συνθήκες (steady state). Τα χρονικά διαστήματα των μόνιμων συνθηκών επιλέχθηκαν βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.4.1.
3. Κάθε επιμέρους βίντεο μόνιμων συνθηκών διαιρέθηκε σε στιγμιότυπα (frames). Κατά μέσο όρο το κάθε βίντεο μόνιμων συνθηκών διαρκούσε περίπου 3 λεπτά με αποτέλεσμα τη λήψη περίπου 4500 στιγμιότυπων.
4. Ο αλγόριθμος MATLAB επεξεργαζόταν τα επιλεγμένα στιγμιότυπα σύμφωνα με κατάλληλα χρωματικά κριτήρια, αναγνωρίζοντας την ύπαρξη ή μη της φλόγας σε κάθε τμήμα της εικόνας (pixel).
5. Η ανωτέρω διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή μίας εικόνας, η οποία αποτελούσε τη σύνθεση όλων των στιγμιότυπων και επέτρεπε τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής της πιθανότητας ύπαρξης φλόγας (flame intermittency).

5.3.1 Λογισμικό MATLAB

Η MATLAB είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για διαχείριση πινάκων. Αφού οι εικόνες είναι ουσιαστικά αριθμητικοί πίνακες, πολλοί αλγόριθμοι όρασης είναι φυσικά εφαρμόσιμοι στη MATLAB. Στην πραγματικότητα, η MATLAB είναι μια γλώσσα μεταγλωττιστής, η οποία κάνει τη διαδικασία δημιουργίας προγραμμάτων

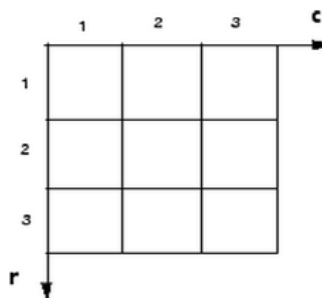
πολύ εύκολη και περιλαμβάνει αναλυτικά εργαλεία για την παρουσίαση πινάκων και εξισώσεων, εκτυπώνοντας τα σε διαφορετικές μορφές, ανιχνεύοντας και απομονώνοντας σφάλματα και δημιουργώντας γραφικές διασυνδέσεις χρηστών.

Η MATLAB είναι το πλέον εύχρηστο εργαλείο για την απεικόνιση και επεξεργασία των εικόνων. Η εικόνα ($M \times N$) pixels απεικονίζεται στη MATLAB με έναν διδιάστατο πίνακα $M \times N$ στοιχείων. Λόγω της κβάντισης των επιπέδων του γκρι σε L επίπεδα, κάθε στοιχείο $f(x,y)$ θα περιορίζεται στο διάστημα $0 \leq f(x,y) \leq L-1$. Η τιμή 0 αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα, ενώ η τιμή $L-1$ στο άσπρο χρώμα. Τυπικά, απαιτούνται $M \cdot N \cdot k$ bits για την αποθήκευση της δεδομένης εικόνας. Συνήθως $k=8$, οπότε $0 \leq f(x,y) \leq 255$.

Η MATLAB, μεταξύ των άλλων έχει τη δυνατότητα κατάτμησης της εικόνας, η οποία περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της σε μικρότερα τμήματα ή την απομόνωση κάποιων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της (αναζήτηση κύκλων, γραμμών και άλλων σχημάτων σε μία εικόνα). Σημαντική ιδιότητά της είναι επίσης η αντιστοίχιση των pixels της εικόνας με άλλα συστήματα διαστάσεων.

5.3.1.1 Δείκτες των pixels

Συχνά, η πιο βολική μέθοδος για την έκφραση της θέσης σε μια εικόνα είναι η χρήση των δεικτών των pixels. Η εικόνα ουσιαστικά αντιμετωπίζεται σαν ένα σετ από διακριτά στοιχεία, από πάνω προς τα κάτω και από τα αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Δείκτες των pixels

Για τους δείκτες αυτούς, ο αριθμός της σειράς αυξάνει προς τα κάτω ενώ ο αριθμός της στήλης προς τα δεξιά. Οι δείκτες των pixels είναι ακέραιοι αριθμοί, και έχουν εύρος από 1 μέχρι τον αριθμό που υποδηλώνει τον αριθμό των σειρών/στηλών. Υπάρχει 1 προς 1 αντιστοίχιση μεταξύ των δεικτών των pixels και των δεικτών της MATLAB για τις δύο πρώτες διαστάσεις του πίνακα στη MATLAB. Για παράδειγμα, τα δεδομένα για το pixel στην έκτη σειρά και τέταρτη στήλη είναι αποθηκευμένα στο στοιχείο του πίνακα (6,4). Χρησιμοποιείται πολύ απλή γραφή MATLAB την απεικόνιση των στοιχείων διαφορετικών pixels. Με βάση αυτή τη λογική, ο κώδικας MATLAB `RGB(3,10,:)` επιστρέφει τις τιμές RGB του pixel στην τέταρτη σειρά, δέκατη στήλη της εικόνας RGB. Η αντιστοίχιση μεταξύ των δεικτών των pixels και των δεικτών της MATLAB κάνει την αντιστοίχιση μεταξύ του πίνακα των δεδομένων και του τρόπου απεικόνισης μιας εικόνας εύκολη στην κατανόηση.

5.3.1.2 Φυσικές συντεταγμένες

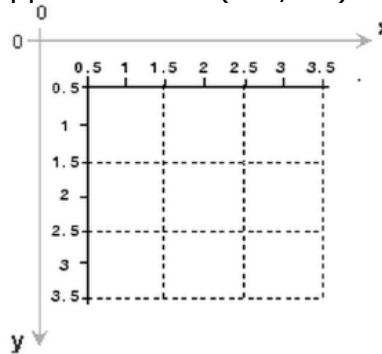
Κατά σύμβαση, η MATLAB χρησιμοποιεί ένα χωρικό σύστημα συντεταγμένων που αντιστοιχεί στους δείκτες των pixels της εικόνας. Αυτό ονομάζεται σύστημα φυσι-

κών συντεταγμένων (Σχήμα 5.14). Είναι αξιοσημείωτο ότι το y μεγαλώνει προς τα κάτω καθώς ο προσανατολισμός είναι συναφής με τον τρόπο με τον οποίον η ψηφιακή εικόνα διαβάζεται συνήθως.

5.3.1.3 Σύστημα Φυσικών συντεταγμένων

Οι φυσικές συντεταγμένες (x,y) του κέντρου του κάθε pixel είναι ίδια με τους δείκτες στήλης/σειράς του ίδιου pixel. Για παράδειγμα, το κέντρο του pixel στη σειρά 2 και στήλη 3 έχει χωρικές συντεταγμένες $x=3.0$ και $y=2.0$. Αυτή η αντιστοιχία απλοποιεί πολλές λειτουργίες της MATLAB. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η σειρά της συγκεκριμενοποίησης των συντεταγμένων $(3.0,2.0)$ είναι ανεστραμμένη στις φυσικές συντεταγμένες σε σχέση με τους δείκτες του pixel $(2,3)$. Αρκετές διεργασίες στη MATLAB γίνονται καταρχήν με τις χωρικές συντεταγμένες αντί των δεικτών των pixels, αλλά όσο χρησιμοποιείται το προεπιλεγμένο χωρικό σύστημα συντεταγμένων (φυσικές συντεταγμένες) μπορούν να προσδιοριστούν θέσεις με βάση τη τοποθέτησή τους σε στήλες (x) και σειρές (y). Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.14.

Μελετώντας το σύστημα φυσικών συντεταγμένων, είναι προφανές ότι η πάνω αριστερά γωνία της εικόνας βρίσκεται στο $(0.5,0.5)$ και όχι στο $(0,0)$.



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση χωρικών συντεταγμένων

Επίσης παρατηρείται ότι το πάνω δεξιό άκρο της εικόνας ανήκει στο pixel $(3.0,1.0)$ και το κάτω δεξιό άκρο της εικόνας στο pixel $(3.0,3.0)$. Το κέντρο του πάνω αριστερά pixel είναι $(1.0,1.0)$ και το κέντρο του κάτω αριστερά pixel είναι το $(1.0,3.0)$. όλες οι συντεταγμένες των κέντρων των pixels έχουν ακέραιες τιμές.

5.3.2 Επιλογή κριτηρίων αναγνώρισης ορίων φλόγας

Στον αλγόριθμο MATLAB ορίστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια αναγνώρισης των ορίων της φλόγας, τα οποία αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία (Celik et al., 2007, Celik et al., 2009)

1. $R(m,n) > R_{mean}$ και $G(m,n) > G_{mean}$, $B(m,n) > B_{mean}$

2. $R_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R(m,n)$

3. $G_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k G(m,n)$

4. $B_{mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k B(m,n)$

5. $R(m,n) > G(m,n)$ και $G(m,n) > B(m,n)$

Όπου τα $R(m,n)$, $G(m,n)$ και $B(m,n)$ είναι οι κόκκινες (Red), πράσινες (Green) και μπλε (Blue) τιμές των χρωμάτων για ένα pixel που έχει συντεταγμένες m,n . Η μεταβλητή k αναπαριστά το σύνολο των pixels σε μία εικόνα και τα R_{mean} , G_{mean} , B_{mean} είναι ο μέσος όρος των αντίστοιχων χρωματικών συνιστωσών των pixels.

Δεδομένης της ρύθμισης της φωτεινότητας τόσο του χώρου όσο και των καμερών, τα κριτήρια που τέθηκαν στον κώδικα ήταν επαρκή ώστε να αναγνωριστούν τα όρια της φλόγας σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Τα κύρια κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πρώτα τέσσερα, ενώ το πέμπτο επιτελούσε δευτερεύοντα ρόλο και χρησιμοποιήθηκε σε ιδιαίτερες συνθήκες φωτισμού.

Στο Σχήμα 5.15 επάνω απεικονίζονται τρία διαδοχικά στιγμιότυπα της φωτιάς σε πλάγια όψη και κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου. Αρχικά στον αλγόριθμο εισήχθη μόνο το πρώτο στιγμιότυπο η αναπαράσταση του οποίου αντιστοιχεί στο κάτω αριστερά σχήμα. Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία των δύο πρώτων στιγμιότυπων και λαμβάνεται η σύνθεσή τους (κεντρικό σχήμα). Τέλος εισάγονται και τα τρία στιγμιότυπα λαμβάνοντας το δεξί σχήμα ως σύνθεσή τους.

Ο αριστερός κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο ύψος της φλόγας ενώ ο οριζόντιος στην οριζόντια προέκτασή της. Ο χρωματικός κατακόρυφος άξονας που απεικονίζεται στα δεξιά του κάθε σχήματος αναπαριστά την πιθανότητα ύπαρξης της φλόγας και οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 1. Βάσει του συνήθους κανόνα της βιβλιογραφίας (Zukoski et al., 1981), θεωρείται ότι υπάρχει φλόγα για πιθανότητα =50%. Δεδομένου ότι και στο Σχήμα 5.15 κάτω αριστερά απεικονίζεται μόνο ένα στιγμιότυπο είναι αναμενόμενο ότι η πιθανότητα εμφάνισης φωτιάς ισούται παντού με τη μονάδα. Όταν όμως γίνεται σύνθεση περισσότερων από ένα στιγμιότυπων (Σχήμα 5.15 κάτω κέντρο και δεξιά), δημιουργούνται και άλλοι χρωματισμοί, καθώς η πιθανότητα εμφάνισης της φλόγας δεν είναι πλέον παντού η ίδια. Το κύριο σώμα της φωτιάς που είναι κοινό παραμένει με έντονο κίτρινο χρώμα (100% πιθανότητα), ενώ οι περιοχές της φωτιάς που διαφέρουν στα τρία στιγμιότυπα αποκτούν διαφορετικούς χρωματισμούς αναλόγως της εκάστοτε πιθανότητας.

Στο Σχήμα 5.16 επάνω απεικονίζονται τρία διαδοχικά στιγμιότυπα της φωτιάς που κατεγράφησαν από την εμπρόσθια όψη και κάτω παρουσιάζεται από αριστερά προς τα δεξιά η επεξεργασία του 1^{ου} στιγμιότυπου, στη συνέχεια η σύνθεση του 1^{ου} με το 2^ο και τέλος η σύνθεση και των τριών στιγμιότυπων σε μία εικόνα. Το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί σε πιθανότητα ύπαρξης φωτιάς ίση με 100%, το πράσινο σε πιθανότητα ίση με 50% και το μπλε σε πιθανότητα ίση με 33.33%.

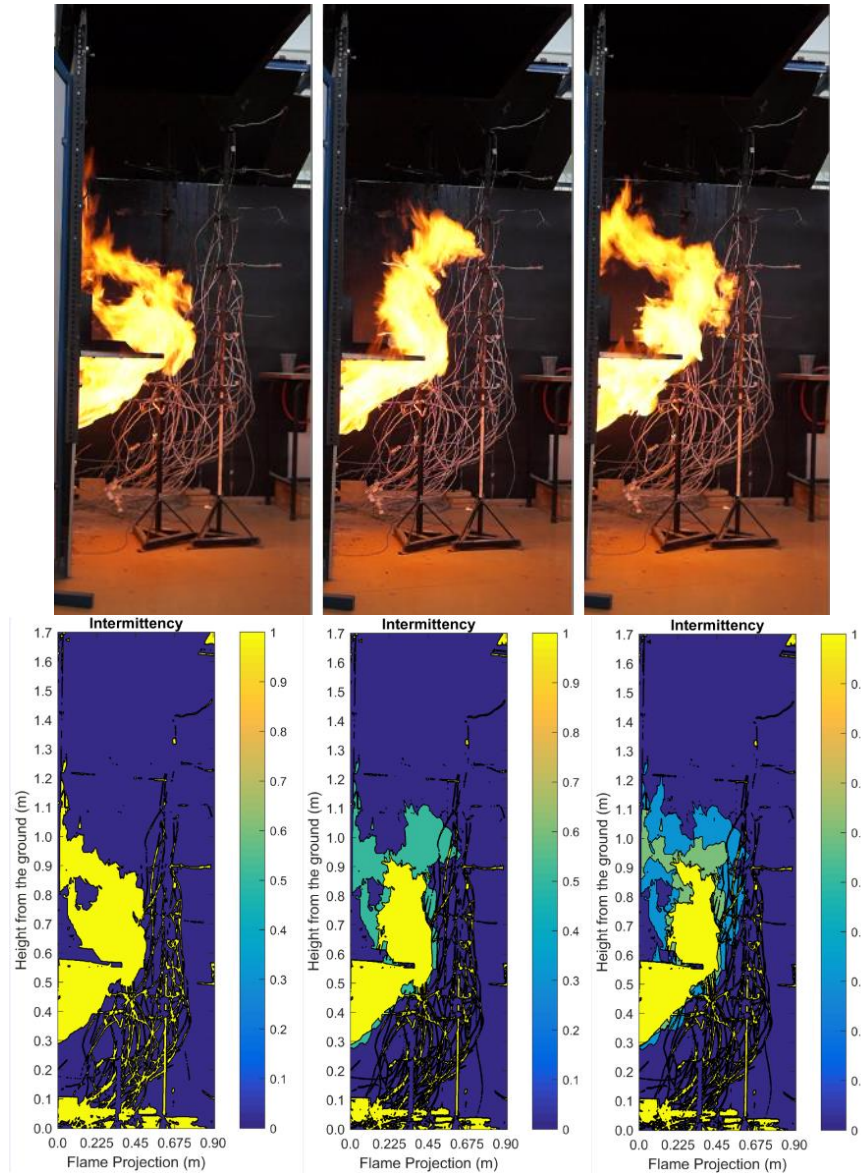
5.3.3 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας

Με στόχο την ανίχνευση του περιγράμματος της φλόγας στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε αλγόριθμος MATLAB, ο οποίος τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα στα επιθυμητά πειραματικά δεδομένα. Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα βήματα που περιγράφονται αναλυτικά από κάτω:

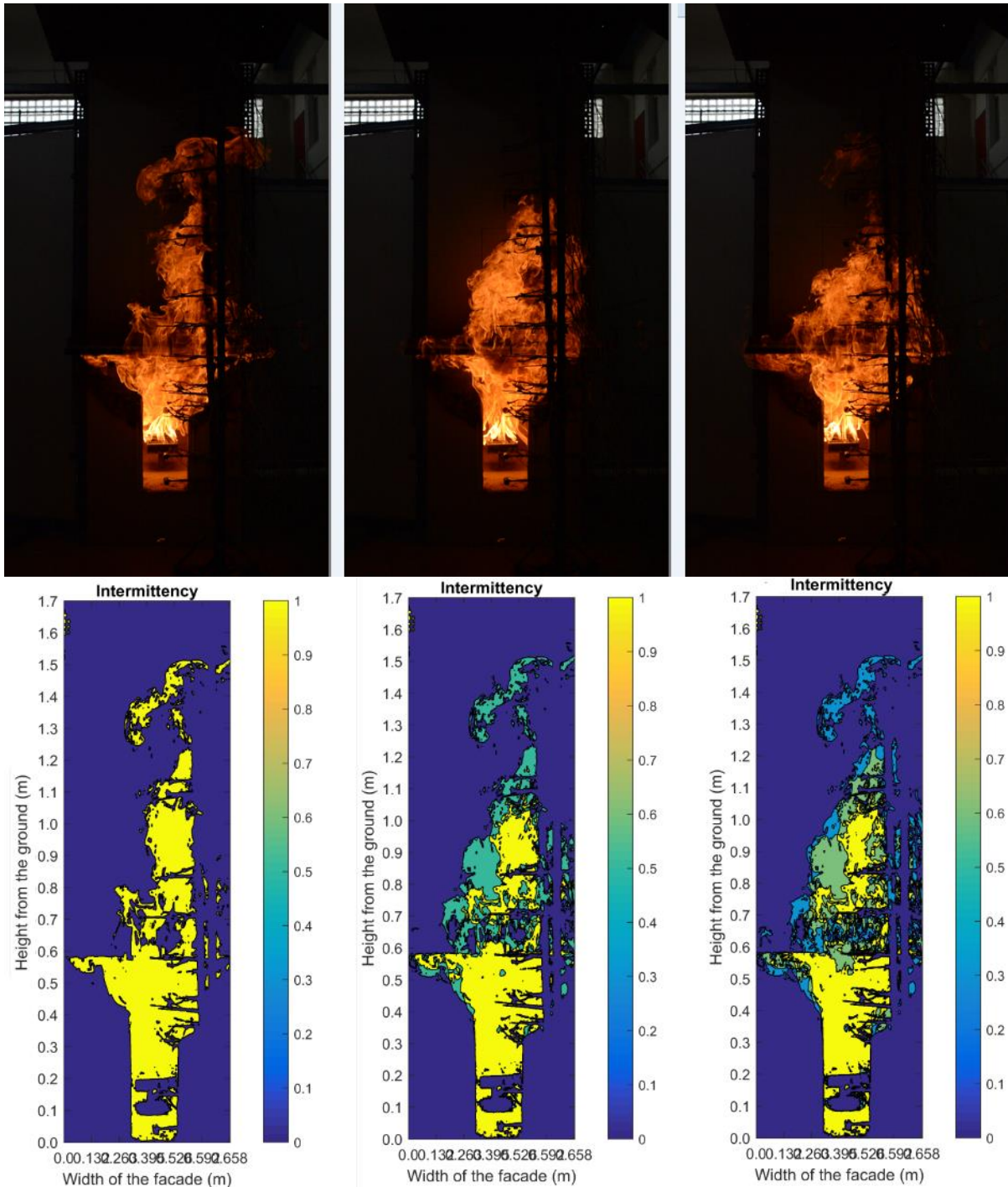
1. Εισαγωγή των στιγμιότυπων στη MATLAB από τον ορισμένο φάκελο.
2. Ορισμός της αντιστοιχίας των pixels κάθε εικόνας με τις πραγματικές διαστάσεις που τους αναλογούν.
3. Περικοπή μιας συγκεκριμένης εικόνας η οποία χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο για την περικοπή όλων των φωτογραφιών του εκάστοτε βίντεο προκειμένου να εστιαστεί το φαινόμενο της φωτιάς. Κύριοι στόχοι ήταν η

μείωση του υπολογιστικού κόστους και η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σύγχυσης με άλλα χρώματα του περιβάλλοντος που μοιάζουν με τα χρώματα της φωτιάς, όπως π.χ. ένα φωτεινό παράθυρο.

4. Εφαρμογή των κριτηρίων αναγνώρισης των ορίων της φωτιάς που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 5.3.2.
5. Εξαγωγή αρχείου με τις συντεταγμένες των pixels και της πιθανότητας εμφάνισης της φωτιάς υπό μορφή πίνακα για περαιτέρω επεξεργασία.



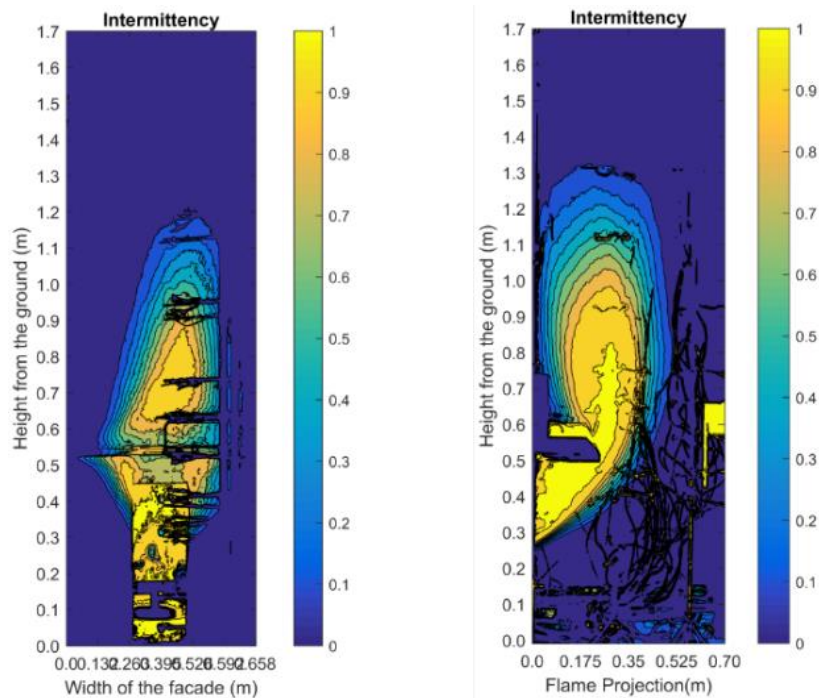
Σχήμα 5.15: Επάνω απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά τρία διαδοχικά στιγμιότυπα της φωτιάς από πλάγια όψη. Κάτω αριστερά παρουσιάζεται η απεικόνιση των ορίων της φλόγας για το 1^ο στιγμιότυπο, στο κέντρο παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύνθεσης του 1^{ου} στιγμιότυπου με το 2^ο και δεξιά η σύνθεση και των τριών στιγμιότυπων.



Σχήμα 5.16: Επάνω απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά τρία διαδοχικά στιγμιότυπα της φωτιάς από την εμπρόσθια όψη. Κάτω αριστερά παρουσιάζεται η απεικόνιση των ορίων της φλόγας για το 1^ο στιγμιότυπο, στο κέντρο παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύνθεσης του 1^{ου} στιγμιότυπου με το 2^ο και δεξιά η σύνθεση και των τριών στιγμιότυπων.

Ο κώδικας αναγνωρίζει ως pixels φωτιάς αυτά που πληρούν τους παραπάνω κανόνες και αποθηκεύει στον αντίστοιχο μηδενικό πίνακα που προϋπάρχει στην θέση τους τον αριθμό 1. Αλλιώς αν κατά τον κώδικα δεν υπάρχει φωτιά, παραμένει ο αριθμός 0. Στη συνέχεια σχεδιάζει τη φωτιά με βάση τα δεδομένα του πίνακα, προσαρμόζοντας την εικόνα σε πραγματικές διαστάσεις και δημιουργεί διάγραμμα με το μέσο και μέγιστο ύψος της φλόγας. Υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης φλόγας (Intermittency).

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνας (image processing) ενός ολόκληρου βίντεο μονίμων συνθηκών εμπρόσθιας και πλάγιας όψης αντίστοιχα. Δεδομένου ότι και στα δύο Σχήματα παρατηρούνται ισοπιθανοτικές καμπύλες, είναι εφικτό να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ΦΕΑ. Οι μαύρες σκιάσεις που φαίνονται μέσα (Σχήμα 5.17 αριστερά) και δεξιά της φωτιάς (Σχήμα 5.17 δεξιά) αντιστοιχούν στα στελέχη συγκράτησης των θερμοστοιχείων και στα καλώδιά τους.



Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνας για εμπρόσθια λήψη της εγκατάστασης (αριστερά) και πλάγια λήψη της εγκατάστασης (δεξιά)

6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΩΤΙΑΣ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., κατά τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο του 2018. Συνολικά διεξήχθησαν 18 δοκιμές φωτιάς κατά το διάστημα αυτό. Οι παράμετροι οι οποίες μεταβάλλονταν ήταν, η ισχύς της φωτιάς (Q90, Q120 και Q144), το βάθος του εξώστη (P100, P200, P300, P400) και το ύψος του εξώστη από το άνοιγμα (Z500 και Z600). Το πλάτος του εξώστη καθώς και το ύψος καυστήρα παρέμειναν σταθερά. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα ήταν μεθάνιο (CH₄), καθαρότητας 99.95%. Η διάταξη των θερμοστοιχείων εξωτερικά του δωματίου άλλαζε, ενώ οι θέσεις των μετρητών ροής θερμότητας και των δικατευθυντικών μετρητών ταχύτητας παρέμειναν σταθερές σε όλες τις δοκιμές. Ο ένας σωλήνας Pitot-Static είχε σταθερή θέση επί της πρόσοψης, ενώ ο δεύτερος απείχε από την ακμή του εξώστη 100 mm. Δεδομένου ότι το βάθος του εξώστη μεταβαλλόταν κατά την οριζόντια διεύθυνση, ήταν μεταβλητή και η θέση του ακροφυσίου. Τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος που διεξήχθη και θα αναλυθεί στη συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Βασικά χαρακτηριστικά των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν

A/A	Ονομασία πειράματος	Βάθος εξώστη (mm)	Ύψος εξώστη (mm)	Θεωρητική Ισχύς (kW)	Πραγματική Ισχύς (kW)
1	Q90-P0	Χωρίς εξώστη	Χωρίς εξώστη	89.70	74.68
2	Q120-P0	Χωρίς εξώστη	Χωρίς εξώστη	119.60	90.22
3	Q144-P0	Χωρίς εξώστη	Χωρίς εξώστη	143.51	101.62
4	Q90-P100-Z600	100	600	89.70	70.00
5	Q120-P100-Z600	100	600	119.60	84.30
6	Q144-P100-Z600	100	600	143.51	94.12
7	Q90-P200-Z600	200	600	89.70	75.21
8	Q120-P200-Z600	200	600	119.60	86.61
9	Q144-P200-Z600	200	600	143.51	102.66
10	Q90-P300-Z600	300	600	89.70	69.32
11	Q120-P300-Z600	300	600	119.60	82.72
12	Q144-P300-Z600	300	600	143.51	83.67
13	Q90-P400-Z600	400	600	89.70	58.07
14	Q120-P400-Z600	400	600	119.60	72.08
15	Q144-P400-Z600	400	600	143.51	84.70
16	Q90-P200-Z500	200	500	89.70	74.73
17	Q120-P200-Z500	200	500	119.60	93.42
18	Q144-P200-Z500	200	500	143.51	102.29

6.1 Παραμετρικές μελέτες

Κατά τη διάρκεια εξέλιξης μιας φωτιάς λαμβάνουν χώρα πολλά φαινόμενα. Προκειμένου να μελετηθούν πλήρως τα φαινόμενα αυτά και να διαπιστωθεί πώς μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά τους, έγινε επανάληψη των δοκιμών φωτιάς, αλλάζοντας κάθε φορά μία από τις μεταβλητές που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Έτσι, στα πειράματα μελετήθηκε η επίδραση των αλλαγών της ισχύος του καυστήρα, της προέκτασης (βάθους) του εξώστη και του ύψους του εξώστη.

6.1.1 Ισχύς καυστήρα

Μελετήθηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος του καυστήρα. Η θεωρητική ισχύς του καυστήρα, όπως φαίνεται και στην Εξίσωση (6.1), είναι το γινόμενο της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου επί την παροχή μάζας αυτού. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα ήταν το μεθάνιο, οπότε η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ήταν σταθερή και ίση με 50040 kJ/kg. Η παράμετρος τελικά που μεταβαλλόταν και άλλαζε την ισχύ της φωτιάς ήταν η ογκομετρική παροχή καυσίμου (150, 200 και 240 l_v/min).

$$\dot{Q} = \dot{m}_B \cdot H_u \quad (6.1)$$

Σε κάθε πείραμα εφαρμόστηκε η μέθοδος της θερμιδομετρίας οξυγόνου (oxygen calorimetry), προκειμένου να υπολογιστεί η πραγματική ισχύς της φωτιάς κατά περίπτωση και να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης της καύσης. Ενδεικτικά οι τιμές των πραγματικών ισχύων φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Η μέθοδος υπολογισμού τους περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 7.9.

6.1.2 Προέκταση εξώστη

Μελετήθηκαν παραμετρικά τέσσερα μήκη προέκτασης εξώστη: 100 mm, 200 mm, 300 mm και 400 mm καθώς και η περίπτωση απουσίας εξώστη. Το ύψος του εξώστη, το πλάτος του εξώστη, η θέση του καυστήρα και οι διαστάσεις του ανοίγματος παρέμειναν σταθερά. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά κατασκευής τόσο των τοιχωμάτων όσο και του εξώστη.

6.1.3 Ύψος εξώστη

Για την περίπτωση του εξώστη προέκτασης 200 mm, διερευνήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια του ύψους στο οποίο τοποθετήθηκε. Στο 1^ο σενάριο ο εξώστης βρισκόταν σε ύψος Z=600 mm και στο 2^ο σενάριο βρισκόταν σε ύψος Z=500mm, το οποίο αντιστοιχεί στο ύψος του ανωφλίου του ανοίγματος. Το πλάτος του εξώστη, η θέση του καυστήρα και οι διαστάσεις του ανοίγματος παρέμειναν σταθερά. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά κατασκευής τόσο των τοιχωμάτων όσο και του εξώστη.

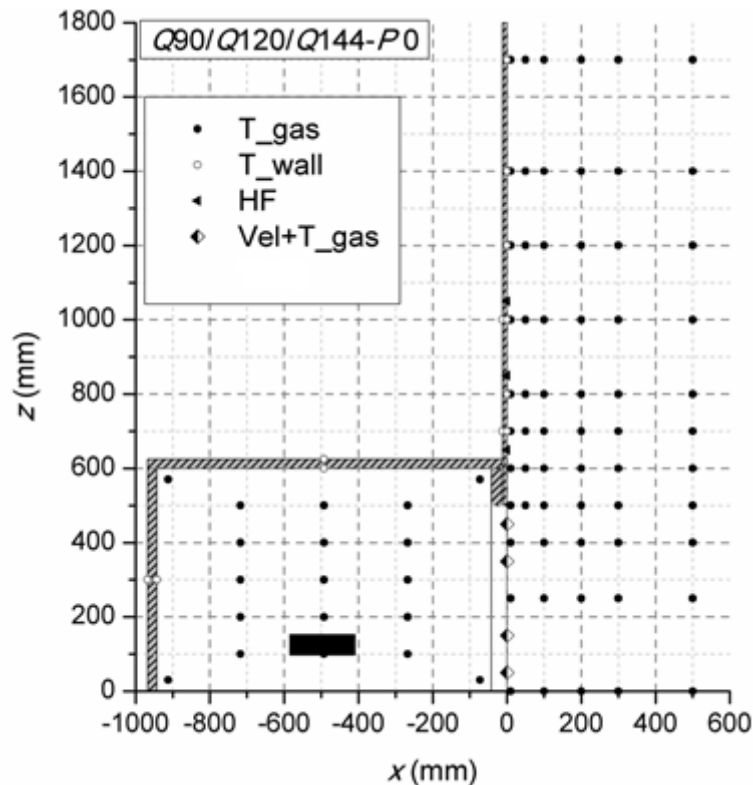
6.2 Διάταξη μετρητικών συσκευών

Η τοποθέτηση των μετρητικών συσκευών στην πειραματική διάταξη έγινε σε θέσεις που ήταν άξιες μελέτης ώστε ληφθούν σημαντικές πληροφορίες για τη

συμπεριφορά της ΦΕΑ με παρουσία και χωρίς την παρουσία εξώστη. Η ακριβής θέση των οργάνων αλλά και ο αριθμός τους μεταβαλλόταν κατά περίπτωση και καθοριζόταν κατόπιν θεωρητικής μελέτης και υπολογιστικών προσομοιώσεων.

6.2.1 Δοκιμές Q90-P0, Q120-P0 και Q144-P0

Κατά τη δοκιμή αυτή δεν τοποθετήθηκε καθόλου εξώστης. Χρησιμοποιήθηκαν 99 θερμοστοιχεία, 4 δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και ένας σωλήνας Pitot - Static (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για τις περιπτώσεις μελέτης χωρίς εξώστη

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 99 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος
- 14 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10mm και 50mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 50 mm κατά τον άξονα x
- 22 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Α» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 100 mm και 200 mm κατά τον άξονα x
- 22 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Β» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 300 mm και 500 mm κατά τον άξονα x
- 12 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) και τα υπόλοιπα 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z

- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους

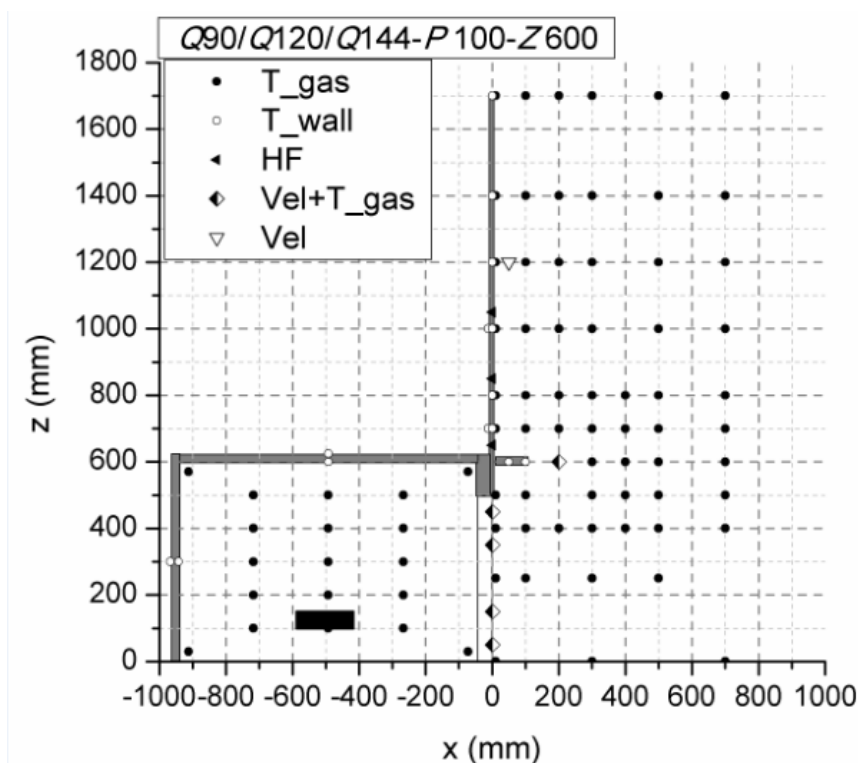
Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

Σωλήνας Pitot – Static: Τοποθετήθηκε ένας σωλήνας στη θέση $(x,z)=(50,1200)$

6.2.2 Δοκιμές Q90-P100-Z600, Q120-P100-Z600 και Q144-P100-Z600

Κατά τη δοκιμή αυτή τοποθετήθηκε εξώστης βάθους 100 mm, σε ύψος 600 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 104 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και 2 σωλήνες Pitot – Static (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για εξώστη βάθους 100 mm σε ύψος 600 mm

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 104 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος
- 14 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 100 mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z οριζόντιες αποστάσεις x
- 25 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Α» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 200 mm 300 mm και 400 mm κατά τον άξονα x

- 20 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Β» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 300 mm και 500 mm κατά τον άξονα x
- 14 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) , 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και 2 στο τοίχωμα του εξώστη στην εκτεθειμένη κάτω επιφάνειά του.
- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους
- 2 τοποθετήθηκαν στο ρύγχος των σωλήνων Pitot – Static. Το ένα προστέθηκε επιπλέον ενώ το άλλο ήταν ενσωματωμένο στο ακροφύσιο εκ κατασκευής.

Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

Σωλήνες Pitot – Static: Τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες στις θέσεις $(x,z)=(50,1200)$ και $(x,z)=(200,600)$

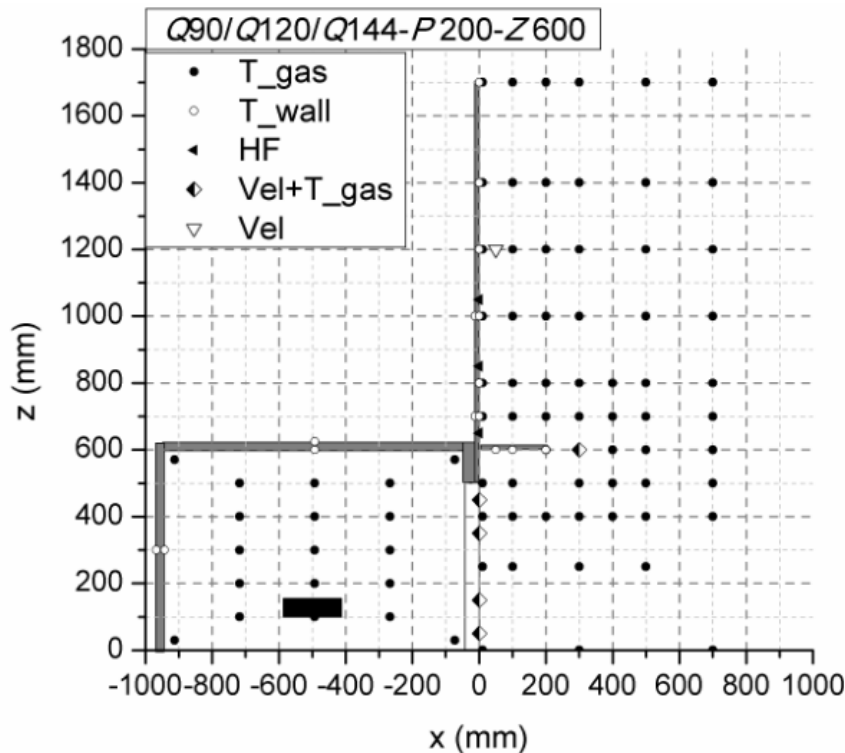
6.2.3 Δοκιμές Q90-P200-Z600, Q120-P200-Z600 και Q144-P200-Z600

Κατά τη δοκιμή αυτή τοποθετήθηκε εξώστης βάθους 200 mm, σε ύψος 600 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 104 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και 2 σωλήνες Pitot – Static (Σχήμα 6.3).

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 104 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος
- 14 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 100 mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z οριζόντιες αποστάσεις x
- 23 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Α» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 200 mm 300 mm και 400 mm κατά τον άξονα x
- 21 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Β» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 500 mm και 700 mm κατά τον άξονα x
- 15 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) , 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και 3 στο τοίχωμα του εξώστη στην κάτω εκτεθειμένη επιφάνειά του
- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους

- 2 τοποθετήθηκαν στο ρύγχος των σωλήνων Pitot – Static. Το ένα προστέθηκε επιπλέον ενώ το άλλο ήταν ενσωματωμένο στο ακροφύσιο εκ κατασκευής.



Σχήμα 6.3 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για εξώστη βάθους 200 mm σε ύψος 600 mm

Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

Σωλήνες Pitot – Static: Τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες στις θέσεις $(x,z)=(50,1200)$ και $(x,z)=(300,600)$.

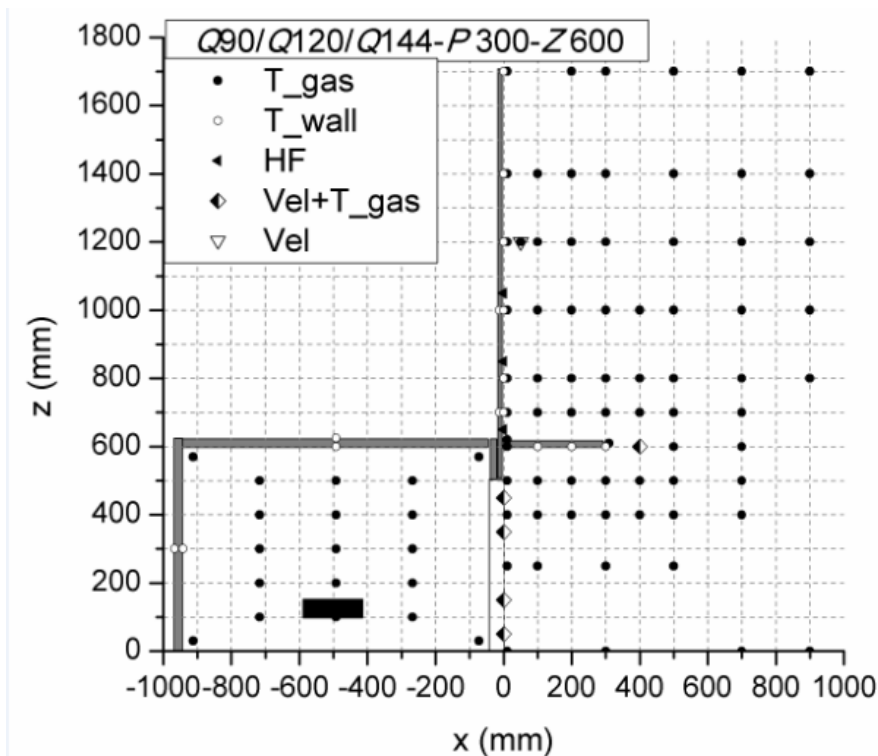
6.2.4 Δοκιμές Q90-P300-Z600, Q120-P300-Z600 και Q144-P300-Z600

Κατά τη δοκιμή αυτή τοποθετήθηκε εξώστης βάθους 300 mm, σε ύψος 600 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 109 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και 2 σωλήνες Pitot – Static (Σχήμα 6.4).

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 109 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος
- 13 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 100 mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z οριζόντιες αποστάσεις x

- 23 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο A» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 200 mm 300 mm και 400 mm κατά τον άξονα x
- 24 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο B» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 500 mm, 700 mm και 900 mm κατά τον άξονα x
- 16 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) , 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και 4 στο τοίχωμα του εξώστη στην εκτεθειμένη επιφάνεια
- 3 τοποθετήθηκαν πολύ κοντά στο τοίχωμα του εξώστη, μετρώντας τη θερμοκρασία του πλουμίου στην ακμή του και στο σημείο της ένωσης του με την πρόσοψη εκατέρωθεν των επιφανειών του
- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους
- 1 ήταν ενσωματωμένο στο ακροφύσιο Pitot – Static



Σχήμα 6.4 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm

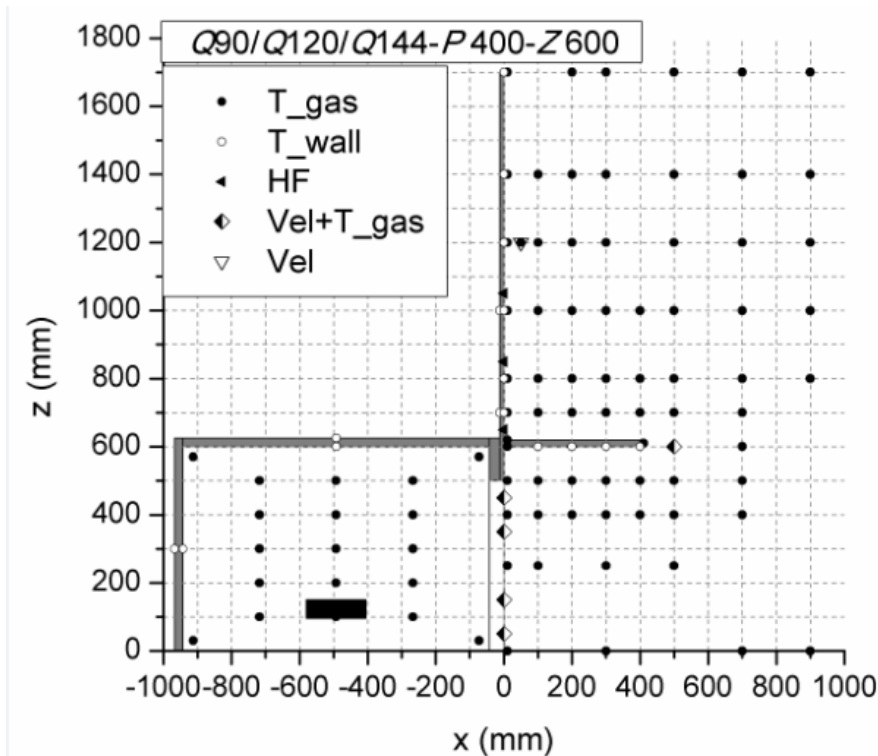
Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

Σωλήνες Pitot – Static: Τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες στις θέσεις $(x,z)=(50,1200)$ και $(x,z)=(400,600)$

6.2.5 Δοκιμές Q90-P400-Z600, Q120-P400-Z600 και Q144-P400-Z600

Κατά τη δοκιμή αυτή τοποθετήθηκε εξώστης βάθους 400 mm, σε ύψος 600 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 109 θερμοστοιχεία, 4 δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και 2 σωλήνες Pitot – Static (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για εξώστη βάθους 400 mm σε ύψος 600 mm

Δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

Σωλήνες Pitot – Static: Τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες στις θέσεις $(x,z)=(50,1200)$ και $(x,z)=(500,600)$.

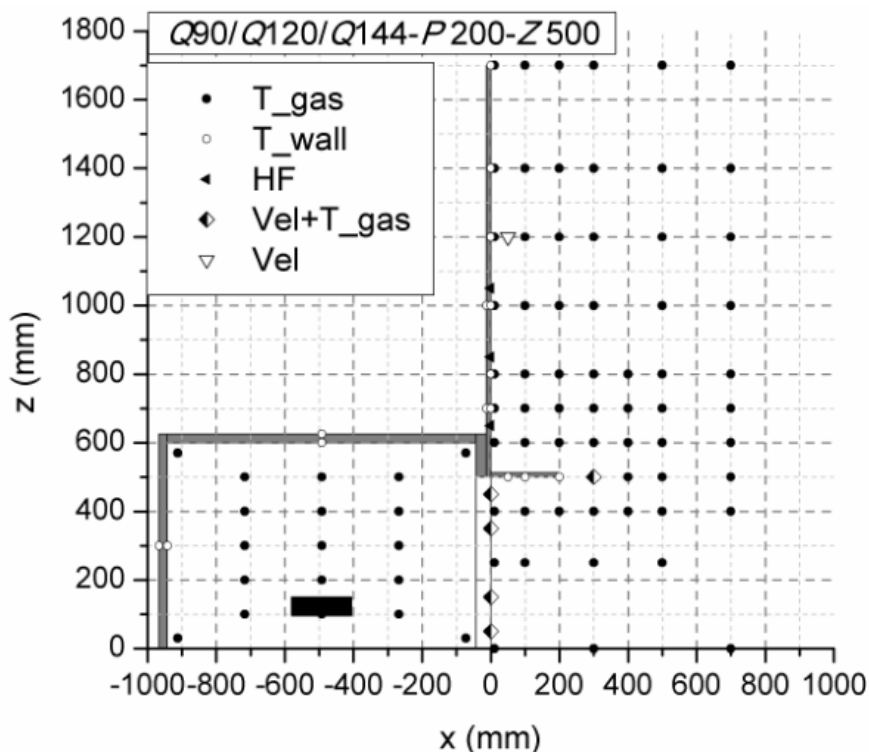
6.2.6 Δοκιμές Q90-P200-Z500, Q120-P200-Z500 και Q144-P200-Z500

Κατά τη δοκιμή αυτή τοποθετήθηκε εξώστης βάθους 200 mm σε ύψος 600 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 104 θερμοστοιχεία, 4 δικάτευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 3 μετρητές ροής θερμότητας και 2 σωλήνες Pitot – Static (Σχήμα 6.6).

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 109 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος

- 13 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 100 mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z οριζόντιες αποστάσεις x
- 23 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Α» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 200 mm 300 mm και 400 mm κατά τον άξονα x
- 24 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Β» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 500 mm, 700 mm και 900 mm κατά τον άξονα x
- 16 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) , 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και 4 στο τοίχωμα του εξώστη στην εκτεθειμένη επιφάνεια
- 3 τοποθετήθηκαν πολύ κοντά στο τοίχωμα του εξώστη, μετρώντας τη θερμοκρασία του πλουμίου στην ακμή του και στο σημείο της ένωσής του με την πρόσοψη εκατέρωθεν των επιφανειών του
- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους
- 1 ήταν ενσωματωμένο στο ακροφύσιο Pitot - Static



Σχήμα 6.6 Διάταξη των μετρητικών οργάνων για εξώστη βάθους 200 mm σε ύψος 500 mm

Θερμοστοιχεία: Από το σύνολο των 104 θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση:

- 19 τοποθετήθηκαν εντός του διαμερίσματος

- 14 τοποθετήθηκαν επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 10 mm και 100 mm κατά τον άξονα x
- 5 τοποθετήθηκαν στο άνοιγμα σε διάφορα ύψη z οριζόντιες αποστάσεις x
- 24 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Α» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 200 mm 300 mm και 400 mm κατά τον άξονα x
- 20 τοποθετήθηκαν στο «δέντρο Β» σε διάφορα ύψη z και σε οριζόντιες αποστάσεις 500 mm και 700 mm κατά τον άξονα x
- 15 τοποθετήθηκαν σε τοιχώματα μετρώντας θερμοκρασία εντός στερεού σώματος, εκ των οποίων τα 4 εγκαταστάθηκαν σε τοιχώματα του διαμερίσματος (2 στην οροφή και 2 στην οπίσθια πλευρά) , 8 στο τοίχωμα της πρόσοψης σε διάφορα ύψη z και 3 στο τοίχωμα του εξώστη στην εκτεθειμένη επιφάνεια
- 4 εγκαταστάθηκαν πάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας
- 1 τοποθετήθηκε εντός του αγωγού καυσαερίων μετρώντας τη θερμοκρασία τους
- 2 τοποθετήθηκαν στο ρύγχος των σωλήνων Pitot – Static. Το ένα προστέθηκε επιπλέον ενώ το άλλο ήταν ενσωματωμένο στο ακροφύσιο εκ κατασκευής.

Δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας: Τοποθετήθηκαν 4 μετρητές στην κεντρική γραμμή του ανοίγματος σε διαφορετικά ύψη και στη θέση $x=0$ mm.

Μετρητές ροής θερμότητας: Τοποθετήθηκαν 3 θερμοροόμετρα επί της κεντρικής γραμμής της πρόσοψης στις θέσεις $z=650, 850, 1050$ mm.

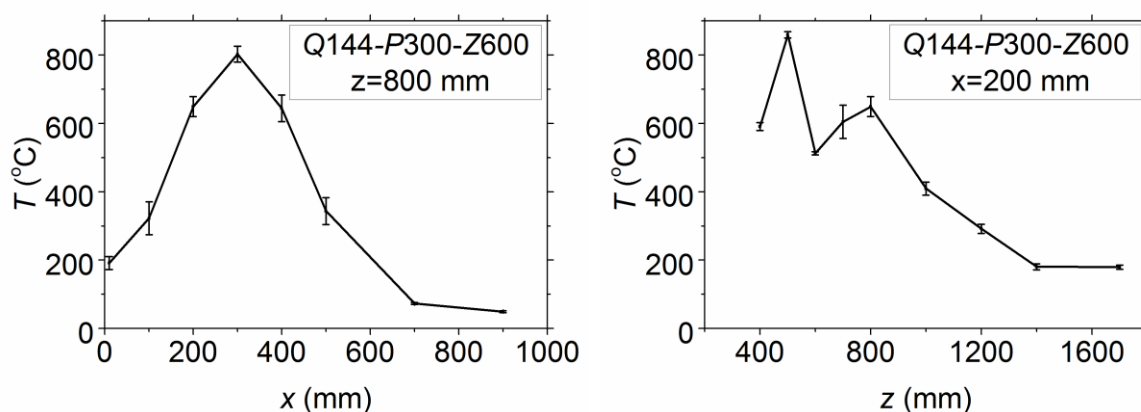
Σωλήνες Pitot – Static: Τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες στις θέσεις $(x,z)=(50,1200)$ και $(x,z)=(300,500)$.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΦΩΤΙΑΣ

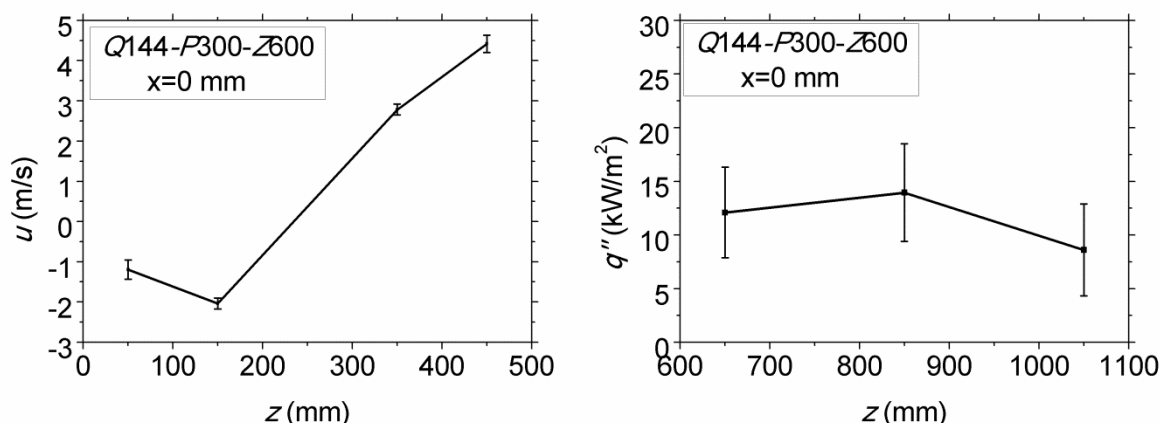
Το παρόν κεφάλαιο διαιρείται σε εννέα Ενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά πειραματικά σφάλματα για τις μετρήσεις των βασικών μεγεθών που εξετάστηκαν στην εργασία (θερμοκρασία, ταχύτητα και θερμορροή). Στις Ενότητες 7.2 έως 7.9 παρουσιάζεται και σχολιάζεται η παραμετρική επίδραση του βάθους του εξώστη, της ισχύος της φωτιάς και του ύψους του εξώστη στις θερμοκρασίες του διαμερίσματος, στις θερμοκρασίες στο άνοιγμα, στο πεδίο ταχυτήτων, στις θερμοκρασίες της εξερχόμενης φωτιάς, στη θερμορροή στην πρόσοψη, στις θερμοκρασίες του εξώστη, στις συγκεντρώσεις των παραγόμενων προϊόντων της καύσης και στο βαθμό απόδοσης της καύσης.

7.1 Πειραματικά σφάλματα

Με βάση την Ενότητα 4.5 και με χρήση των Εξισώσεων (4.13) – (4.20) έγινε ο υπολογισμός των συστηματικών, τυχαίων και ολικών σφαλμάτων όλων των μεγεθών που μετρήθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σφαλμάτων για όλες τις μετρήσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Στην παρούσα Ενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ολικά σφάλματα των θερμοκρασιών συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης x για σταθερό ύψος $z = 800$ mm (Σχήμα 7.1 αριστερά), των θερμοκρασιών συναρτήσει του κατακόρυφου ύψους z για σταθερή οριζόντια απόσταση $x = 200$ mm (Σχήμα 7.1 δεξιά), των ταχυτήτων στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z (Σχήμα 7.2 αριστερά) και της θερμορροής στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z (Σχήμα 7.2 δεξιά). Όλες οι μετρήσεις αφορούν εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm και θεωρητική ισχύ φωτιάς 144 kW.



Σχήμα 7.1: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα μετρούμενων θερμοκρασιών συναρτήσει της απόστασης x για σταθερό $z=800$ mm (αριστερά) και συναρτήσει του ύψους z για σταθερό $x=200$ mm (δεξιά), για εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm και ισχύ φωτιάς 144 kW



Σχήμα 7.2: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα μετρήσεων ταχυτήτων συναρτήσει του ύψους z για σταθερό $x=0$ mm (αριστερά) και μετρήσεων θερμοροής στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z (δεξιά), για εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm και ισχύ φωτιάς 144 kW

Τα συστηματικά, τυχαία και ολικά σφάλματα των ανωτέρω μετρούμενων μεγεθών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Συστηματικά, τυχαία και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων και θερμοροής σε ενδεικτικές θέσεις για την δοκιμή Q144-P300-Z600

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Μέση τιμή	Συστηματικό Σφάλμα	Τυχαίο Σφάλμα	Ολικό Σφάλμα	Μονάδες
FAC3NEAR	10	800	191.316	3.151	9.392	19.046	°C
FAC3FAR	100	800	322.674	3.309	24.126	48.366	°C
TA11	200	800	649.396	5.368	14.270	29.040	°C
TA12	300	800	802.702	6.429	11.224	23.350	°C
TA_21	400	800	644.215	5.332	19.343	39.053	°C
TB11	500	800	343.626	3.425	19.426	39.002	°C
TB12	700	800	73.229	3.151	0.233	3.186	°C
TA24	900	800	49.304	3.151	0.159	3.167	°C
TA3	200	400	591.182	4.975	4.964	11.104	°C
TA7	200	500	859.758	6.831	3.272	9.460	°C
OP_4	200	600	512.720	4.458	0.435	4.542	°C
TA9	200	700	604.995	5.067	24.199	48.663	°C
TA11	200	800	649.396	5.368	14.270	29.040	°C
TA13	200	1000	409.491	3.811	9.294	18.975	°C
TA15	200	1200	292.105	3.151	6.505	13.386	°C
TA17	200	1400	180.489	3.151	4.207	8.984	°C
TA19	200	1700	179.705	3.151	2.718	6.283	°C
VELOCITY_1	0	50	-1.192	0.146	0.043	0.239	m/s
VELOCITY_2	0	150	-2.038	0.220	0.039	0.134	m/s
VELOCITY_3	0	350	2.782	0.290	0.068	0.135	m/s
VELOCITY_4	0	450	4.420	0.450	0.046	0.215	m/s
HEAT FLUX1	0	650	12.090	4.016	0.649	4.221	kW/m ²
HEAT FLUX2	0	850	13.951	4.022	1.056	4.543	kW/m ²
HEAT FLUX3	0	1050	8.606	4.008	0.746	4.277	kW/m ²

Στο Σχήμα 7.1 (αριστερά) παρατηρείται ότι η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλο ολικό σφάλμα στις θέσεις $x = 100 - 500$ mm για $z = 800$ mm, ενώ στο Σχήμα 7.1 (δεξιά) μεγάλο ολικό σφάλμα εμφανίζεται στις θέσεις $z = 700, 800$ mm για σταθερό $x = 200$ mm. Εντοπίζοντας τις ανωτέρω θέσεις στον Πίνακα 7.1 παρατηρείται ότι η συνιστώσα που συμβάλλει περισσότερο στη διαμόρφωση του ολικού

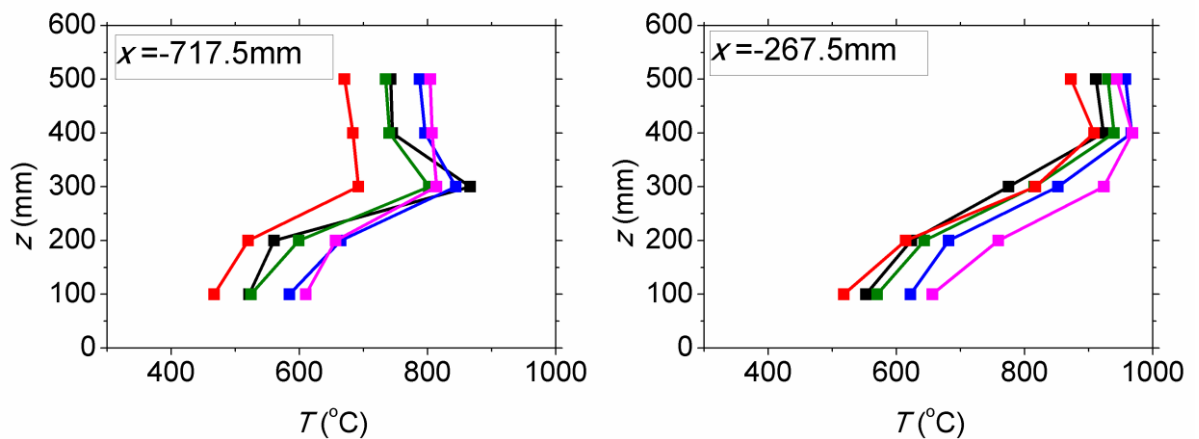
σφάλματος είναι το τυχαίο σφάλμα. Αυτό συμβαίνει διότι στα ύψη 700 mm και 800 mm η φλόγα είναι έντονα διαλείπουσα, παρουσιάζοντας μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, δεδομένου ότι η ύπαρξη του εξώστη σε ύψος 600 mm επηρεάζει έντονα τη ροή αυξάνοντας την τύρβη στις θέσεις αυτές. Το Σχήμα 7.2 (αριστερά) καταδεικνύει ότι οι ταχύτητες εμφανίζουν μέγιστο ολικό σφάλμα στα δύο άκρα του ανοίγματος ($z = 50 \text{ mm}$, $z = 350 \text{ mm}$). Στο Σχήμα 7.2 (δεξιά), η θερμοροή παρουσιάζει και στις τρεις θέσεις μεγάλο ολικό σφάλμα (περίπου $\pm 4 \text{ kW/m}^2$), το οποίο οφείλεται στο μεγάλο συστηματικό σφάλμα του μετρητικού οργάνου (βλ. Πίνακα 7.1).

7.2 Θερμοκρασίες διαμερίσματος

Η μέτρηση θερμοκρασίας έγινε σε τρεις θέσεις κατά τον διαμήκη άξονα του δωματίου και για κάθε θέση σε πέντε διαφορετικά ύψη. Συμπληρωματικά, μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες στις θέσεις $x = -72.5 \text{ mm}$ και $x = -915.5 \text{ mm}$ σε δύο ύψη ($z = 30 \text{ mm}$ και $z = 570 \text{ mm}$). (βλ. Σχήματα 4.13 και 6.1).

7.2.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος ανάλογα με το βάθος εξώστη σε δύο αποστάσεις $x = -717.5 \text{ mm}$ (αριστερά) και $x = -267.5 \text{ mm}$ (δεξιά).



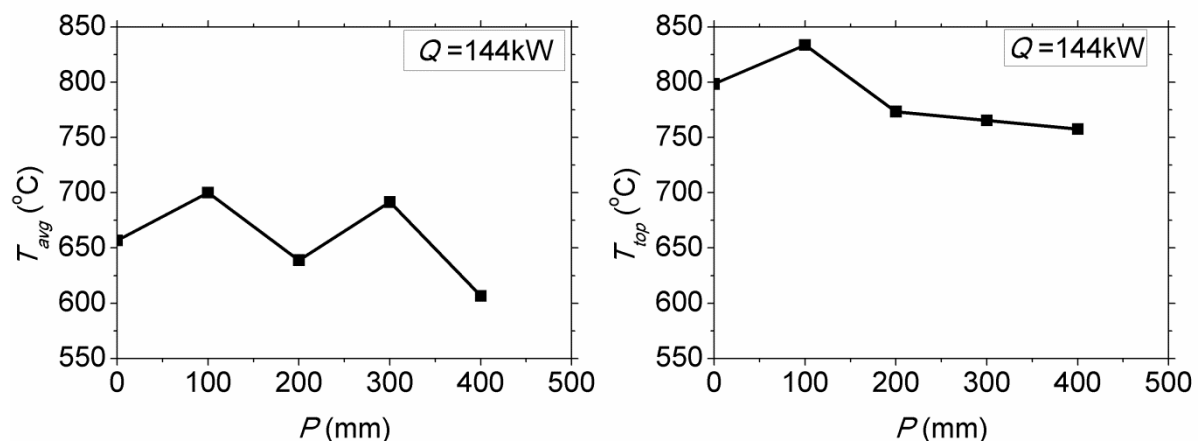
—■— Q_{144-P0} —■— $Q_{144-P100-Z600}$ —■— $Q_{144-P200-Z600}$ —■— $Q_{144-P300-Z600}$ —■— $Q_{144-P400-Z600}$

Σχήμα 7.3: Θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσει του ύψους z στη θέση $x = -717.5 \text{ mm}$ (αριστερά) και $x = -267.5 \text{ mm}$ (δεξιά) για ισχύ 144 kW για εξώστες σε ύψος 600 mm με παράμετρο το βάθος εξώστη

Στη θέση $x = -717.5 \text{ mm}$ (Σχήμα 7.3, αριστερά) οι καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Οι θερμοκρασίες αυξάνονται μέχρι το ύψος $z = 300 \text{ mm}$, όπου λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους και έπειτα μειώνονται πάλι. Για σταθερό ύψος οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται για βάθος εξώστη $P400$, ενώ για τα υπόλοιπα βάθη δεν εξάγεται σαφές συμπέρασμα. Για ύψος $z = 200 \text{ mm}$ οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται για βάθη $P100$ και $P300$, ενώ για ύψος $z = 300 \text{ mm}$ οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται για βάρη $P0$ και $P100$. Στη θέση $x = -267.5 \text{ mm}$ (Σχήμα 7.3 δεξιά) οι καμπύλες έχουν επίσης παρόμοια μορφή. Οι θερμοκρασίες αυξάνονται μέχρι το ύψος $z = 400 \text{ mm}$, όπου λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους και στη συνέχεια μειώνονται. Είναι φανερό ότι καθ'όλο το ύψος z οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται για βάθος $P300$ και οι

χαμηλότερες για βάθος $P400$. Και στα δύο διαγράμματα, η μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά που παρατηρείται από το ύψος 200 mm στο ύψος 300 mm σηματοδοτεί την ύπαρξη του ψυχρού και του θερμού τμήματος των καυσαερίων βάσει της θεώρησης διζωνικού μοντέλου. Τα ύψη $z = 100, 200$ mm ανήκουν στο ψυχρό τμήμα ενώ τα $z = 300, 400, 500$ mm στο θερμό. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, οι καθ' ύψος θερμοκρασίες είναι υψηλότερες στη θέση $x = -267.5$ mm (πλησίον του ανοίγματος) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες στη θέση $x = -717.5$ mm (μακριά από το άνοιγμα).

Στο Σχήμα 7.4 (αριστερά) απεικονίζονται οι μέσες θερμοκρασίες του πυροδιαμερίσματος συναρτήσει του βάθους εξώστη για μέγιστη ισχύ φωτιάς και στο Σχήμα 7.4 (δεξιά) οι μέσες θερμοκρασίες του άνω τμήματος του πυροδιαμερίσματος ($z \geq 400$ mm) συναρτήσει του βάθους εξώστη για μέγιστη ισχύ φωτιάς.



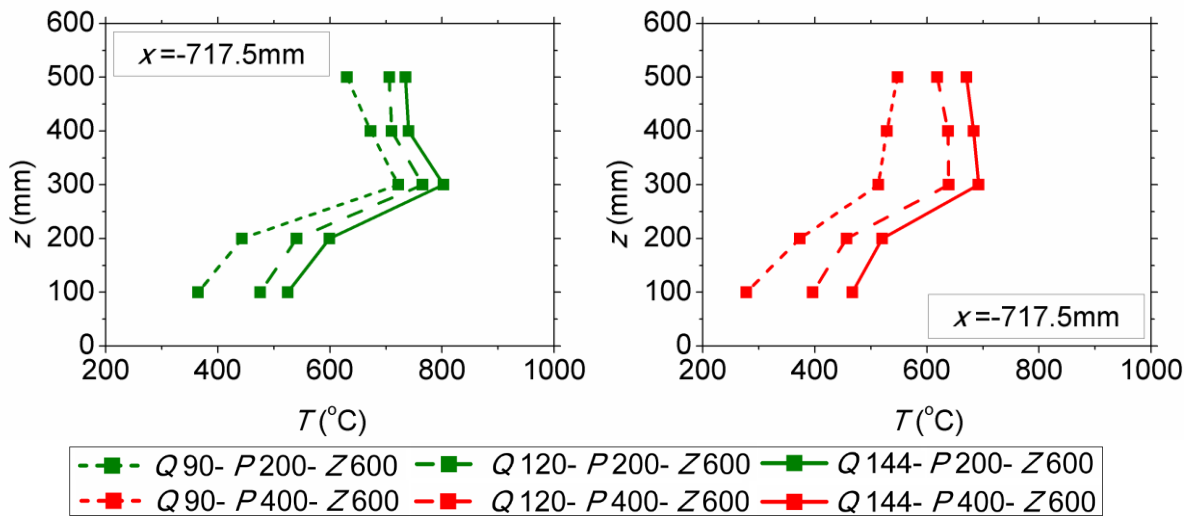
Σχήμα 7.4: Μέσες θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσει του βάθους εξώστη (αριστερά) και μέσες θερμοκρασίες άνω τμήματος διαμερίσματος συναρτήσει του βάθους εξώστη (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm και ισχύ 144 kW

Οι μέσες θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος κυμαίνονται μεταξύ 600°C και 700°C . Η μέγιστη παρατηρείται για $P100$ και η ελάχιστη για $P400$. Η καμπύλη του Σχήματος 7.4 (αριστερά) παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις συναρτήσει του βάθους του εξώστη. Σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς εξώστη, παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις $P100$ και $P300$ εμφανίζουν υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες, ενώ οι περιπτώσεις $P200$ και $P400$ χαμηλότερες. Τα αποτελέσματα έρχονται εν μέρει σε διαφωνία με την έρευνα των Suzuki et al. (2000), σύμφωνα με την οποία οι θερμοκρασίες του πυροδιαμερίσματος με εξώστη είναι υψηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς εξώστη. Στο Σχήμα 7.4 (δεξιά) παρατηρείται ότι οι μέσες θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του Σχήματος 7.4 (αριστερά), αφού αφορούν το θερμό τμήμα των καυσαερίων και κυμαίνονται από 750°C έως 830°C . Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι και σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη μέση θερμοκρασία εμφανίζεται για βάθος εξώστη $P100$, ενώ για βάθος $P200$ παρατηρείται θερμοκρασιακή πτώση 60°C . Για τα επόμενα βάθη εξώστη η θερμοκρασία ελαττώνεται γραμμικά.

7.2.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

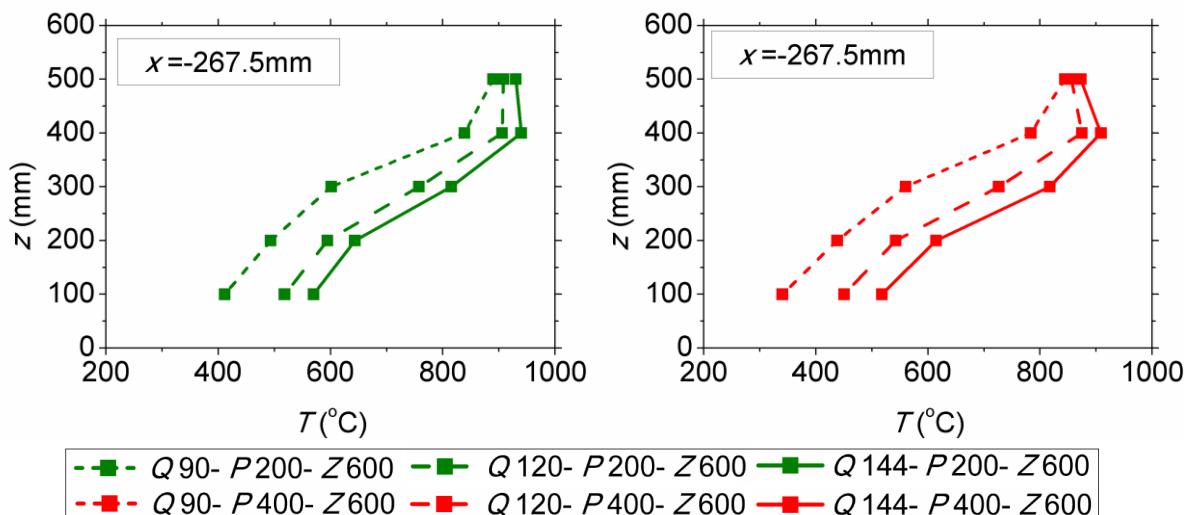
Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζεται η επίδραση της ισχύος φωτιάς στην καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας εντός του πυροδιαμερίσματος στη θέση $x = -717.5$ mm για εξώστη σε ύψος 600 mm και για βάθη εξώστη 200 mm (Σχήμα 7.5 αριστερά) και 400 mm (Σχήμα 7.5 δεξιά). Τόσο στο αριστερό όσο και στο δεξί τμήμα του Σχήματος 7.5 παρατηρείται ότι σε κάθε ύψος z η θερμοκρασία αυξάνεται εμφα-

νώς με την αύξηση της ισχύος. Είναι αξιοσημείωτο επίσης ότι για ίδια επίπεδα ισχύος και σταθερό ύψος z οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλότερες στην περίπτωση $P200$ σε σύγκριση με την περίπτωση $P400$.



Σχήμα 7.5: Θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσεως του ύψους z στη θέση $x = -717.5$ mm και για ύψος εξώστη 600 mm και βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά) με παράμετρο την ισχύ

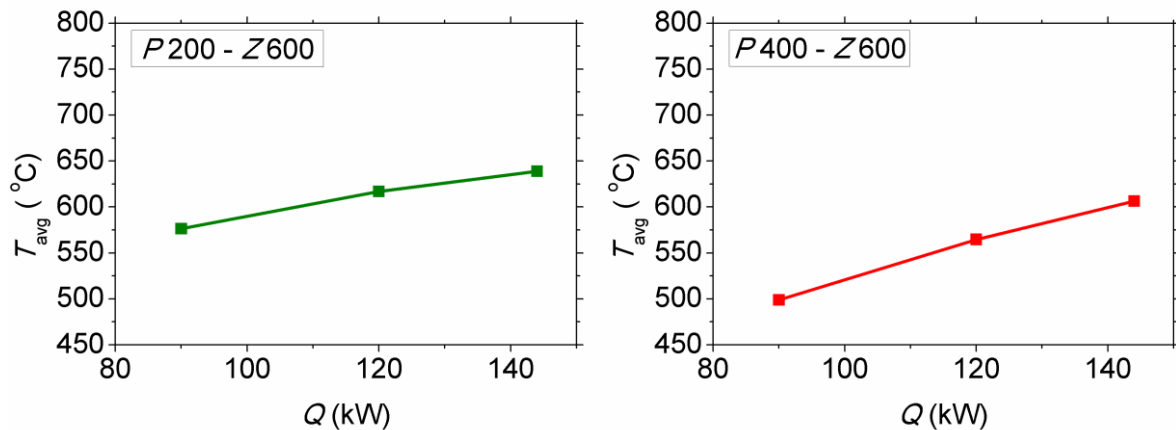
Στο Σχήμα 7.6 απεικονίζεται η επίδραση της ισχύος φωτιάς στην καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας εντός του πυροδιαμερίσματος στη θέση $x = -267.5$ mm για εξώστη σε ύψος 600 mm και σταθερά βάθη εξώστη 200 mm (Σχήμα 7.5 αριστερά) και 400 mm (Σχήμα 7.5 δεξιά). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν ταυτίζονται με αυτά του Σχήματος 7.5, με τη μόνη διαφορά ότι εδώ οι τιμές της θερμοκρασίας συγκλίνουν στο ύψος $z = 500$ mm, φαινόμενο που παρατηρείται τόσο για την περίπτωση $P200$ όσο και για την περίπτωση $P400$.



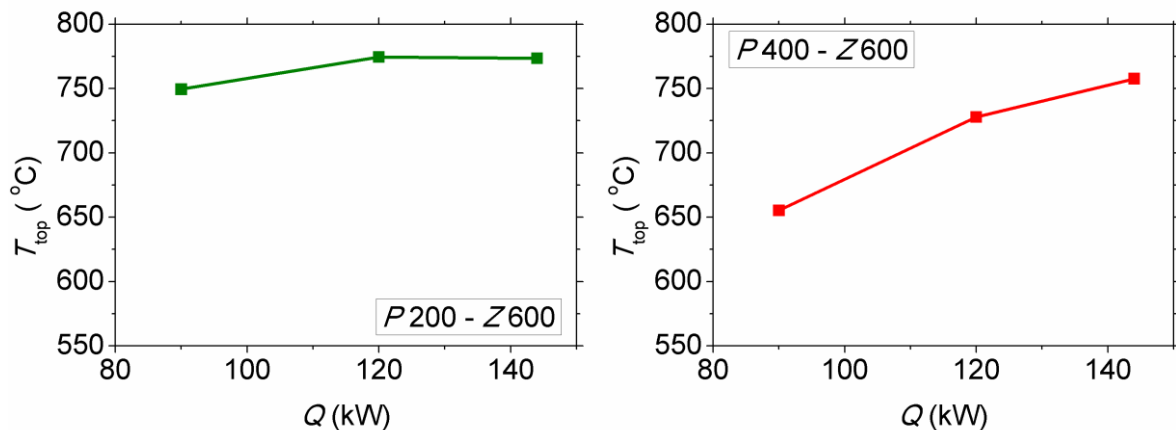
Σχήμα 7.6: Θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσεως του ύψους z στη θέση $x = -267.5$ mm και για ύψος εξώστη 600 mm και βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά) με παράμετρο την ισχύ

Στο Σχήμα 7.7 (αριστερά) απεικονίζεται η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του πυροδιαμερίσματος συναρτήσεως της ισχύος για την περίπτωση $P200-Z600$ και στο Σχήμα 7.8 (αριστερά) για την περίπτωση $P400-Z600$. Στο Σχήμα 7.8 εξετάζεται η

αντίστοιχη μεταβολή στη μέση θερμοκρασία του άνω τμήματος του πυροδιαμερίσματος.



Σχήμα 7.7: Μέσες θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσει της ισχύος (δεξιά) για ύψος εξώστη 600 mm και βάθη εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά)

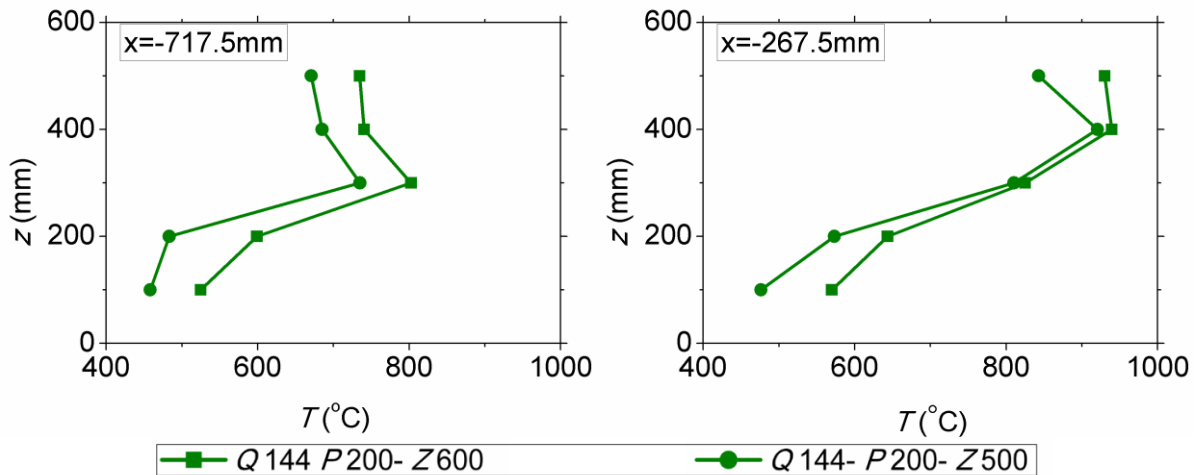


Σχήμα 7.8: Μέσες θερμοκρασίες άνω τμήματος διαμερίσματος συναρτήσει της ισχύος (δεξιά) για ύψος εξώστη 600 mm και βάθη εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά)

Στο Σχήμα 7.7 και για τα δύο βάθη εξώστη η θερμοκρασία αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της ισχύος. Είναι εμφανές ότι ο εξώστης με βάθος 200 mm εμφανίζει σαφώς υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 7.8 (αριστερά) παρατηρείται μία σταθεροποίηση της μέσης θερμοκρασίας στους 775 °C κατά το μεσαίο επίπεδο ισχύος ενώ στο Σχήμα 7.8 (δεξιά) διαπιστώνεται διαρκής άνοδος με την αύξηση της ισχύος.

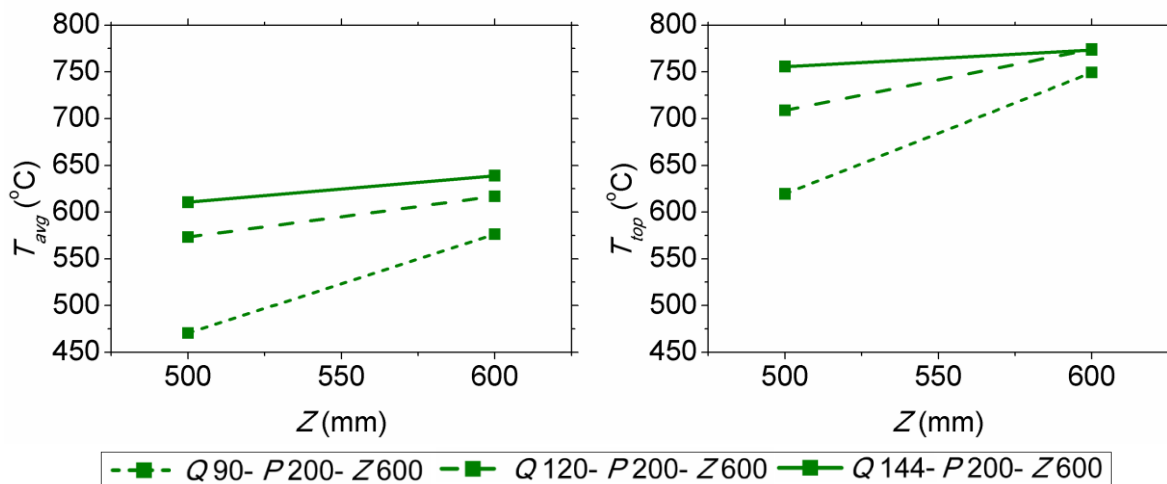
7.2.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η επίδραση της καθ ύψος θέσης του εξώστη στη μεταβολή της θερμοκρασίας εντός του πυροδιαμερίσματος. Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x = -717.5$ mm (αριστερά) και $x = -267.5$ mm (δεξιά) για τις περιπτώσεις Q144-P200-Z600 και Q144-P200-Z500. Είναι εμφανές ότι τόσο πλησίον του ανοίγματος ($x = -267.5$ mm) όσο και μακριά από αυτό ($x = -717.5$ mm) αναπτύσσονται χαμηλότερες θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος εάν ο εξώστης τοποθετηθεί χαμηλότερα.



Σχήμα 7.9: Θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x = -717.5 \text{ mm}$ (αριστερά) και $x = -267.5 \text{ mm}$ (δεξιά) για ύψη εξώστη 500 mm και 600 mm, βάθος εξώστη 200 mm και ισχύ 144 kW

Στο Σχήμα 7.10 απεικονίζονται αντίστοιχα οι μέσες θερμοκρασίες του διαμερίσματος (αριστερά) και οι μέσες θερμοκρασίες του άνω τμήματος του διαμερίσματος (δεξιά) συναρτήσεσι του ύψους εξώστη για βάθος εξώστη 200 mm με παράμετρο την ισχύ.



Σχήμα 7.10: Μέσες θερμοκρασίες διαμερίσματος συναρτήσεσι του ύψους εξώστη (αριστερά) και μέσες θερμοκρασίες άνω τμήματος διαμερίσματος συναρτήσεσι του ύψους εξώστη (δεξιά) για βάθος εξώστη 200 mm με παράμετρο την ισχύ

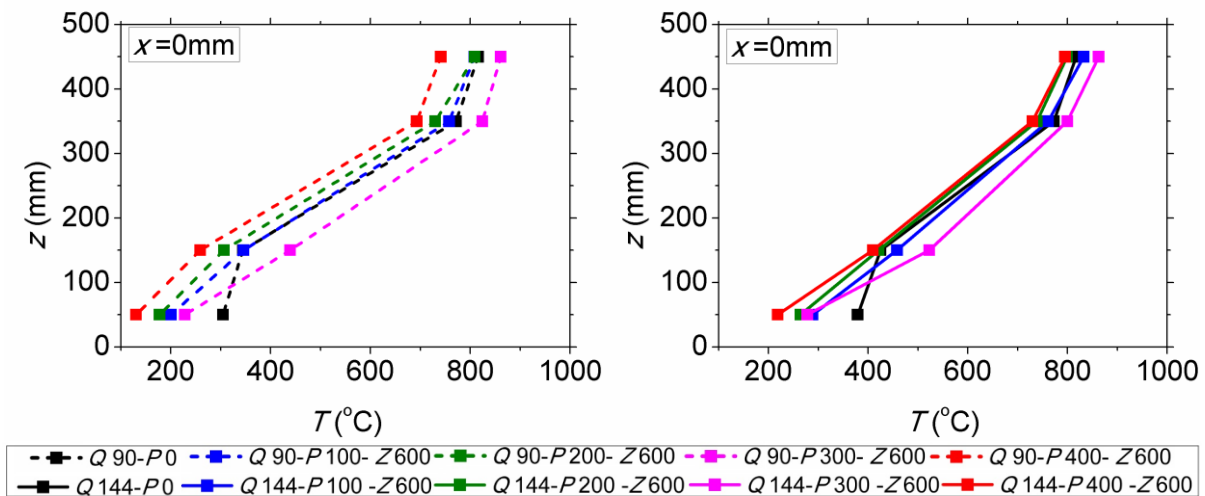
Και στις δύο περιπτώσεις του Σχήματος 7.10, η αύξηση του ύψους εξώστη προκαλεί αύξηση των μέσων θερμοκρασιών. Αυτό ισχύει και για τα τρία επίπεδα ισχύος. Οι μέσες θερμοκρασίες του εξώστη σε ύψος $Z = 500 \text{ mm}$ είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του εξώστη ίδιου βάθους που τοποθετείται σε ύψος $Z = 600 \text{ mm}$. Η διαφορά αυτή είναι εντονότερη στο χαμηλό επίπεδο ισχύος ($Q = 90 \text{ kW}$), αφού φτάνει τους 90°C τόσο στις μέσες θερμοκρασίες ολόκληρου του πυροδιαμερίσματος όσο και στις μέσες θερμοκρασίες του άνω τμήματός του. Τέλος, στο Σχήμα 7.10 (δεξιά) διαπιστώνεται ότι για την περίπτωση $P200-Z600$ οι μέσες θερμοκρασίες συγκλίνουν ανεξάρτητα από το επίπεδο ισχύος, κάτι που δεν ισχύει για την περίπτωση $P200-Z500$, όπου είναι απόλυτα διακριτές μεταξύ τους.

7.3 Θερμοκρασίες στο άνοιγμα

Η μέτρηση των θερμοκρασιών στο άνοιγμα έγινε από τέσσερα θερμοστοιχεία που ήταν προσαρμοσμένα επάνω στους δικατευθυντικούς μετρητές ταχύτητας σε ύψη $z=50, 150, 350, 450$ mm.

7.3.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.11 απεικονίζεται η μεταβολή των θερμοκρασιών στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z , για διάφορα βάθη εξώστη και καθ' ύψος θέση εξώστη $Z=600$ mm. Στο Σχήμα 7.11 (αριστερά) οι καμπύλες αντιστοιχούν σε ισχύ $Q= 90$ kW ενώ στο Σχήμα 7.11 (δεξιά) σε ισχύ $Q= 144$ kW.



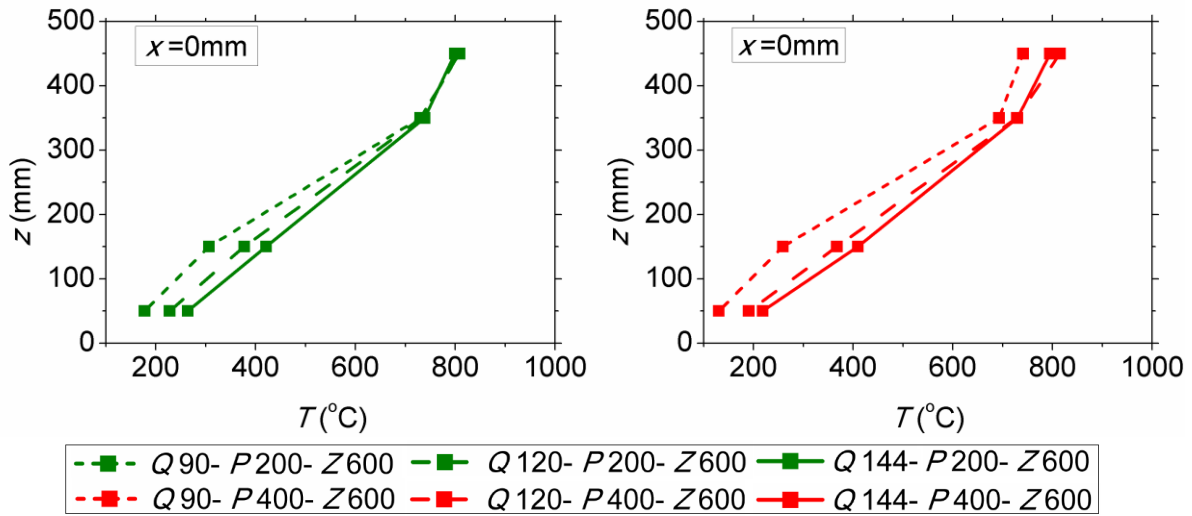
Σχήμα 7.11: Θερμοκρασίες στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z στη θέση $x=0$ mm για ισχύ 90 kW (αριστερά) και 144 kW (δεξιά), εξώστη σε ύψος 600mm με παράμετρο το βάθος εξώστη

Γενικά, οι πέντε καμπύλες κάθε διαγράμματος έχουν παρόμοια μορφή πλην της περίπτωσης χωρίς εξώστη. Η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του ύψους και οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των υψών $z = 150$ mm και $z = 350$ mm υποδηλώνουν την ύπαρξη του θερμού ρεύματος των καυσαερίων στο επάνω ήμισυ του ανοίγματος και του ψυχρού ρεύματος του εισερχόμενου αέρα στο κάτω ήμισυ του ανοίγματος. Σε ύψος $z = 50$ mm φαίνεται ότι η υψηλότερη θερμοκρασία ανήκει στην περίπτωση $P0$. Σε μεγαλύτερα ύψη, ωστόσο, οι θερμοκρασίες σχεδόν συμπίπτουν με αυτές της περίπτωσης $P100$. Είναι ενδιαφέρον ότι και για τα δύο εξεταζόμενα επίπεδα ισχύος οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στο άνοιγμα εμφανίζονται στην περίπτωση $P400-Z600$, ενώ οι υψηλότερες ανήκουν στην περίπτωση $P300-Z600$. Οι περιπτώσεις $P100-Z600$ και $P200-Z600$ παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και στην περίπτωση της μέγιστης ισχύος (Σχήμα 7.11, δεξιά) οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.

7.3.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Στο Σχήμα 7.12 απεικονίζεται η επίδραση της ισχύος στις θερμοκρασίες στο άνοιγμα για εξώστες σε ύψος 600mm και για βάθος 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά). Στο Σχήμα 7.12 (αριστερά), στα δύο χαμηλότερα ύψη οι θερμοκρασίες αυξάνονται όσο αυξάνεται το επίπεδο ισχύος, ενώ στα δύο μεγαλύτερα ύψη οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται μεταξύ τους. Στο Σχήμα 7.12 (δεξιά) στα δύο

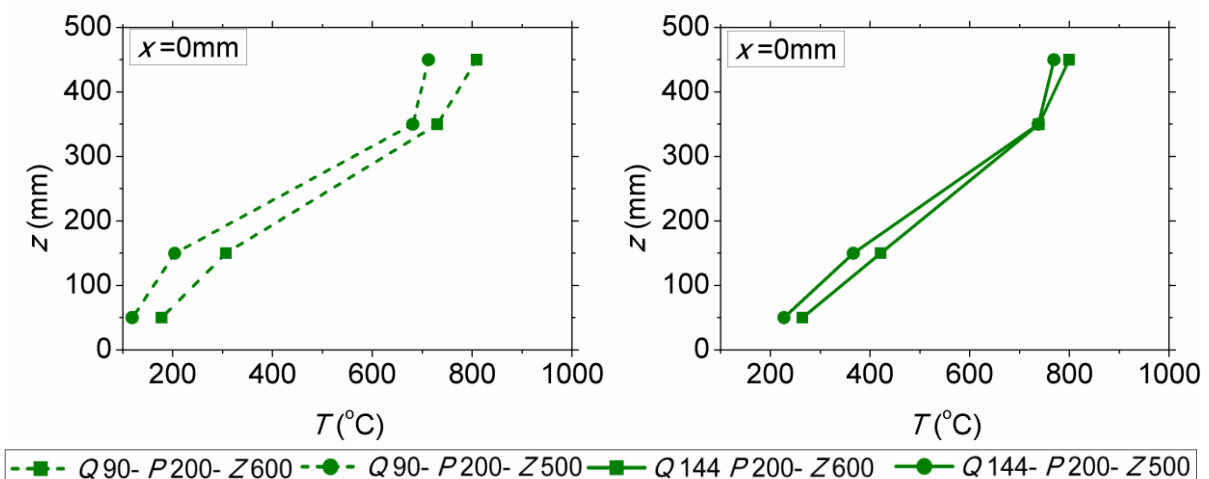
μεγαλύτερα ύψη οι θερμοκρασίες εμφανίζονται ελαφρώς χαμηλότερες για την ισχύ 90 kW.



Σχήμα 7.12: Θερμοκρασίες στο άνοιγμα συναρτήσεως του ύψους z στη θέση $x=0$ mm για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά), εξώστη σε ύψος 600 mm και παράμετρο την ισχύ

7.3.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Το Σχήμα 7.13 απεικονίζει τις θερμοκρασίες στο άνοιγμα συναρτήσεως του ύψους z συγκριτικά για δύο περιπτώσεις καθ' ύψος θέσης εξώστη με σταθερό βάθος 200 mm. Το Σχήμα 7.13 (αριστερά) αντιστοιχεί σε ισχύ 90 kW ενώ το Σχήμα 7.13 (δεξιά) σε ισχύ 144 kW. Και για τα δύο επίπεδα ισχύος εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα. Για το ίδιο ύψος z η θερμοκρασία στο άνοιγμα είναι χαμηλότερη κατά την περίπτωση $P200\text{-}Z500$ σε σύγκριση με την περίπτωση $P200\text{-}Z600$. Το μόνο ύψος στο οποίο οι δύο καμπύλες συμπίπτουν είναι στο $z = 350$ mm όταν η ισχύς είναι 144 kW (Σχήμα 7.13, δεξιά).



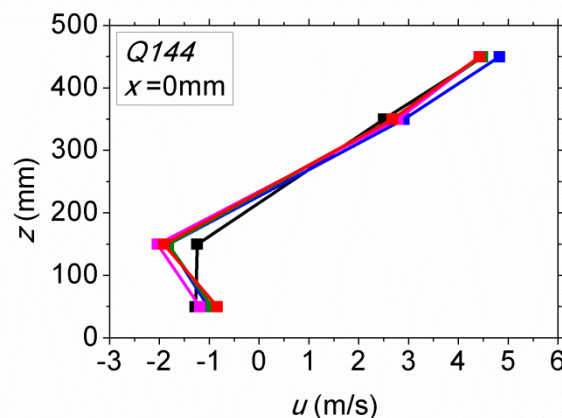
Σχήμα 7.13: Θερμοκρασίες στο άνοιγμα συναρτήσεως του ύψους z στη θέση $x=0$ mm ισχύ 90 kW (αριστερά) ισχύ 144 kW (δεξιά) με σταθερό βάθος εξώστη 200 mm και παράμετρο την καθ' ύψος θέση εξώστη

7.4 Πεδίο ταχυτήτων

Η μέτρηση των ταχυτήτων στο άνοιγμα έγινε με χρήση τεσσάρων δικάτευθυ- ντικών μετρητών ταχύτητας, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε ύψη $z = 50, 150, 350, 450$ mm. Οι ταχύτητες του εισρέοντα αέρα στο κάτω μέρος του ανοίγματος λαμβάνουν αρνητικό πρόσημο, ενώ αυτές των εξερχόμενων καυσαερίων από το άνω μέρος του ανοίγματος έχουν θετικό πρόσημο. Επίσης, με τη χρήση σωλήνων Pitot-Static μετρήθηκαν οι κατακόρυφες ταχύτητες στη θέση $(x,z)=(50,1200)$, καθώς επίσης και στη θέση $(x,z)=(P+100,Z)$, η οποία μεταβαλλόταν ανάλογα με το βάθος εξώστη.

7.4.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

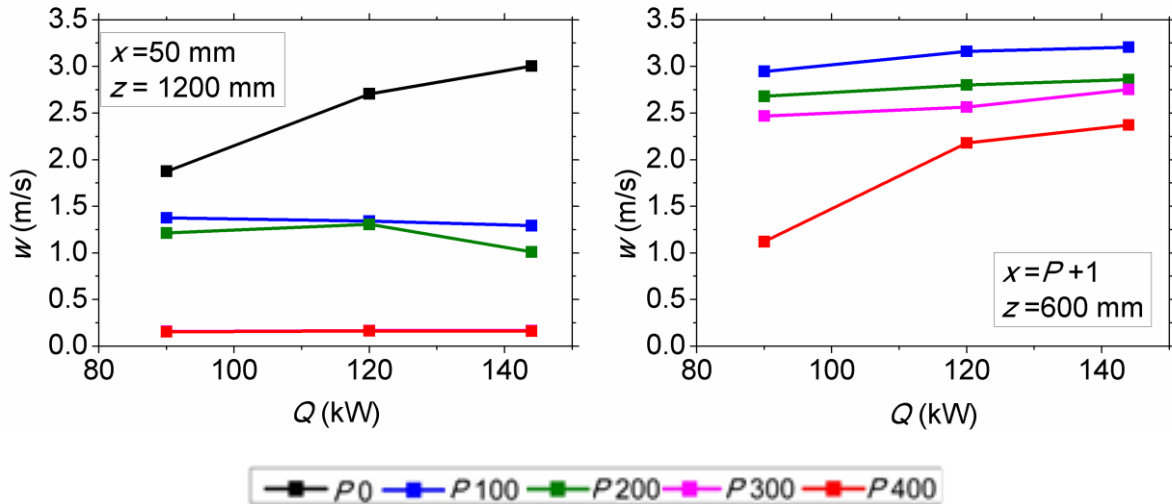
Στο Σχήμα 7.14 απεικονίζεται η επίδραση του βάθους εξώστη στην καθ' ύψος με- ταβολή της ταχύτητας στο άνοιγμα για σταθερό ύψος εξώστη ($Z=600$ mm) και ισχύ 144 kW. Οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν για όλα τα βάθη εξώστη με εξαίρεση την περίπτωση $P100$, που παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες τιμές ταχύτητας. Γενικά, για τις θέσεις $z \geq 150$ mm, η ταχύτητα αυξάνεται κατά μέτρο όσο αυξάνεται το ύψος z .



—■— Q144-P0 —■— Q144-P100-Z600 —■— Q144-P200-Z600 —■— Q144-P300-Z600 —■— Q144-P400-Z600

Σχήμα 7.14: Ταχύτητες στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z στη θέση $x=0$ mm για ισχύ 144 kW, εξώστη σε ύψος 600mm με παράμετρο το βάθος εξώστη (αριστερά) και ταχύτητες στο άνοιγμα συναρτήσει της ισχύος στη θέση $x=0$ mm με παράμετρο το βάθος του εξώστη (δεξιά)

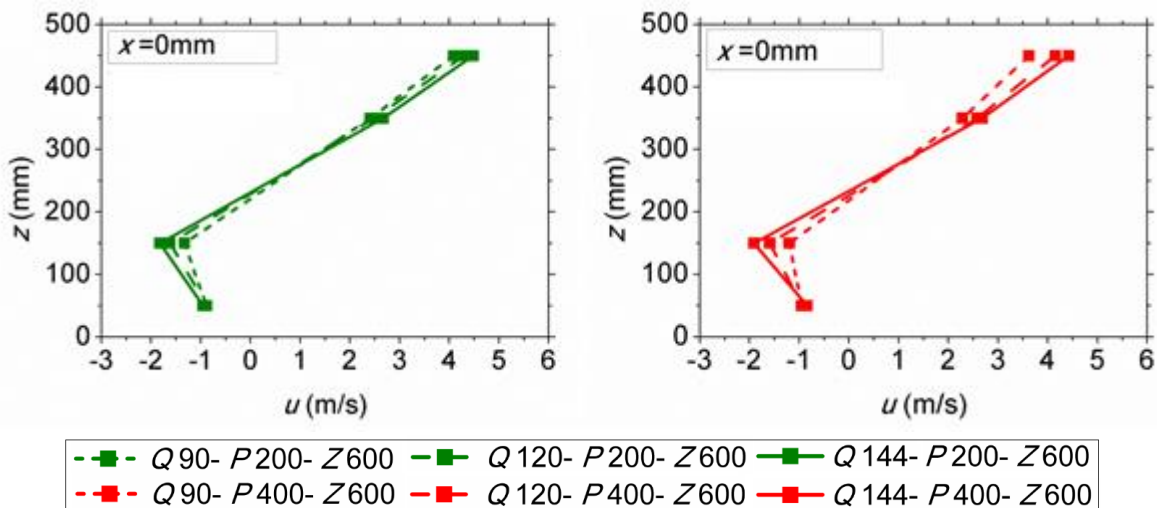
Στο Σχήμα 7.15 απεικονίζεται η ταχύτητα στη θέση $(x,z)=(50,1200)$ συναρτήσει της ισχύος (αριστερά) και στη θέση $(x,z)=(P+100,600)$ συναρτήσει της ισχύος (δεξιά) για εξώστη σε ύψος $Z=600$ mm. Από το Σχήμα 7.15 (αριστερά) είναι εμφανές ότι οι μέγιστες κατακόρυφες ταχύτητες στο σημείο $x=50$ mm και $z=1200$ mm παρουσιάζονται στην περίπτωση χωρίς εξώστη, γεγονός που είναι αναμενόμενο, διότι η ροή στην περίπτωση αυτή δεν ανακόπτεται καθόλου. Αμέσως μετά ακολουθούν διαδοχικά οι ταχύτητες για $P100, P200, P300$ και $P400$. Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις οι καμπύλες ταυτίζονται απόλυτα και οι ταχύτητες λαμβάνουν πολύ μικρές τιμές εξαιτίας της σημαντικής παρεμπόδισης της ροής που προκαλεί το μεγάλο βάθος εξώστη. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι οι ταχύτητες δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την αύξηση της ισχύος πλην της περίπτωσης απουσίας εξώστη. Στο Σχήμα 7.15 (δεξιά) παρατηρείται ότι για κάθε επίπεδο ισχύος όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη η κατακόρυφη ταχύτητα σε απόσταση 100 mm από την ακμή του μειώνεται. Επίσης, για σταθερό βάθος εξώστη αύξηση της ισχύος προκαλεί και αύξηση της ταχύτητας.



Σχήμα 7.15: Ταχύτητες στη θέση $x=50\text{ mm}$, $z=1200\text{ mm}$ (αριστερά) και στη θέση $x=P+100\text{ mm}$, $z=600\text{ mm}$ (δεξιά) συναρτήσει της ισχύος, για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm

7.4.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζεται η επίδραση της ισχύος στην καθ’ ύψος μεταβολή της ταχύτητας στο άνοιγμα για περιπτώσεις εξώστη: P200-Z600 (αριστερά) και P400-Z600 (δεξιά). Και στις δύο περιπτώσεις οι ταχύτητες αυξάνονται κατά μέτρο όσο αυξάνεται το ύψος z, ενώ για σταθερό ύψος z αύξηση της ισχύος επιφέρει αύξηση της ταχύτητας. Οι διαφορές των ταχυτήτων λόγω μεταβολής της ισχύος είναι περισσότερο εμφανείς στην περίπτωση P400-Z600.

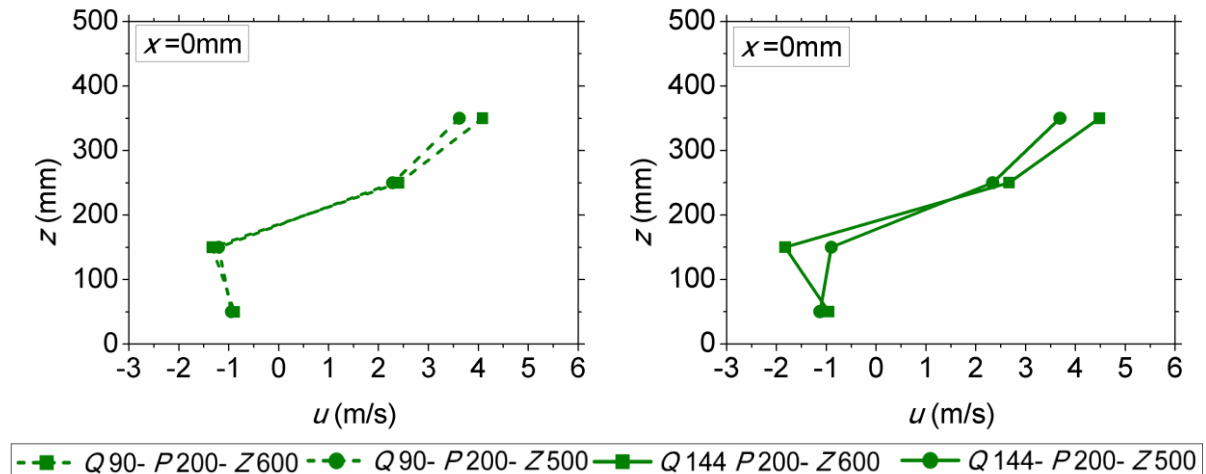


Σχήμα 7.16: Ταχύτητες στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z στη θέση $x=0\text{ mm}$ για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για σταθερό ύψος εξώστη 600mm και παράμετρο την ισχύ

7.4.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Στο Σχήμα 7.17 απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του ύψους z για εξώστες σταθερού βάθους (P200) αλλά διαφορετικής καθ’ ύψος θέσης (Z500 και Z600). Το αριστερό διάγραμμα αφορά τη μικρότερη ισχύ (Q90) ενώ το δεξί τη μεγαλύτερη ισχύ (Q144). Στο Σχήμα 7.17 (αριστερά) παρατηρείται ότι οι καμπύ-

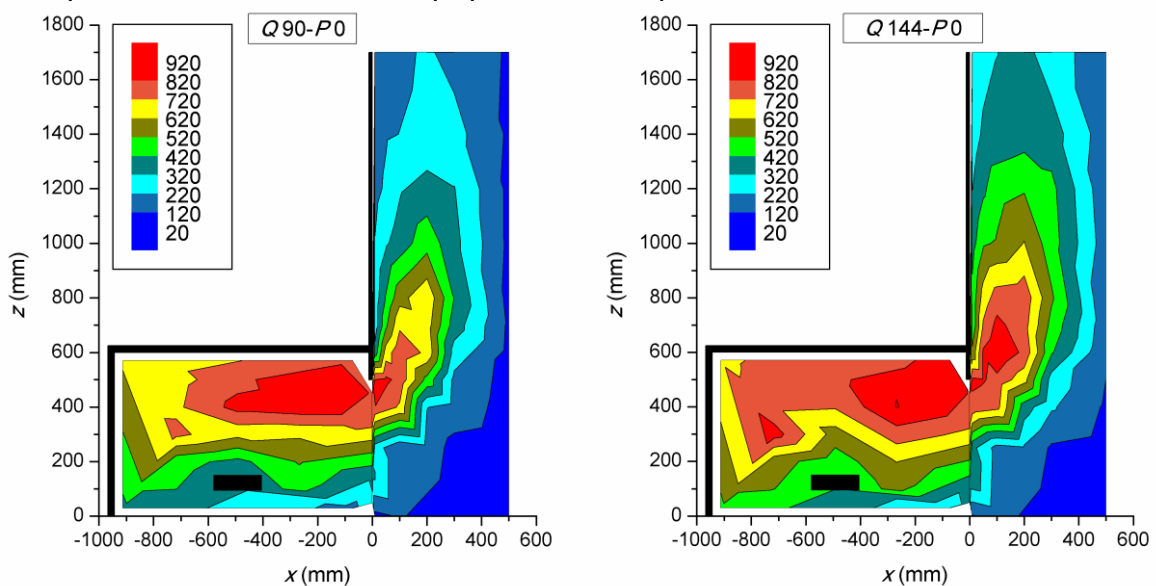
λες των ταχυτήτων σχεδόν ταυτίζονται μέχρι το ύψος $z=250$ mm, ενώ στο ύψος $z=350$ mm φαίνεται ότι η ταχύτητα για την περίπτωση του εξώστη Z600 είναι υψηλό-τερη. Στο Σχήμα 7.17 (δεξιά) είναι περισσότερο ξεκάθαρο ότι εκτός από το χαμηλότερο ύψος ($z=50$ mm) οι ταχύτητες είναι κατά μέτρο μεγαλύτερες στην περίπτωση του εξώστη με το μεγαλύτερο ύψος (Z600). Αυτό επιβεβαιώνεται από τους Fu et al. (2015), σύμφωνα με του οποίους η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας αυξάνεται όσο ο εξώστης τοποθετείται ψηλότερα.



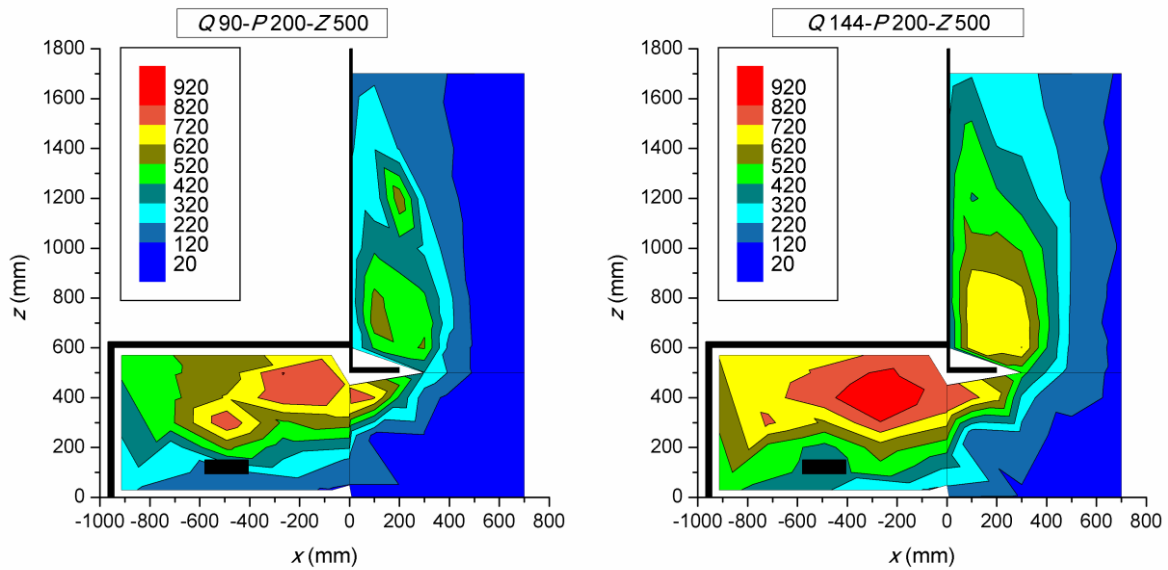
Σχήμα 7.17: Ταχύτητες στο άνοιγμα συναρτήσει του ύψους z στη θέση $x=0$ mm για βάθος εξώστη 200 mm και ισχύ 90 kW (αριστερά) και βάθος εξώστη 200 mm και ισχύ 144kW (δεξιά) με παράμετρο το ύψος εξώστη

7.5 Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς

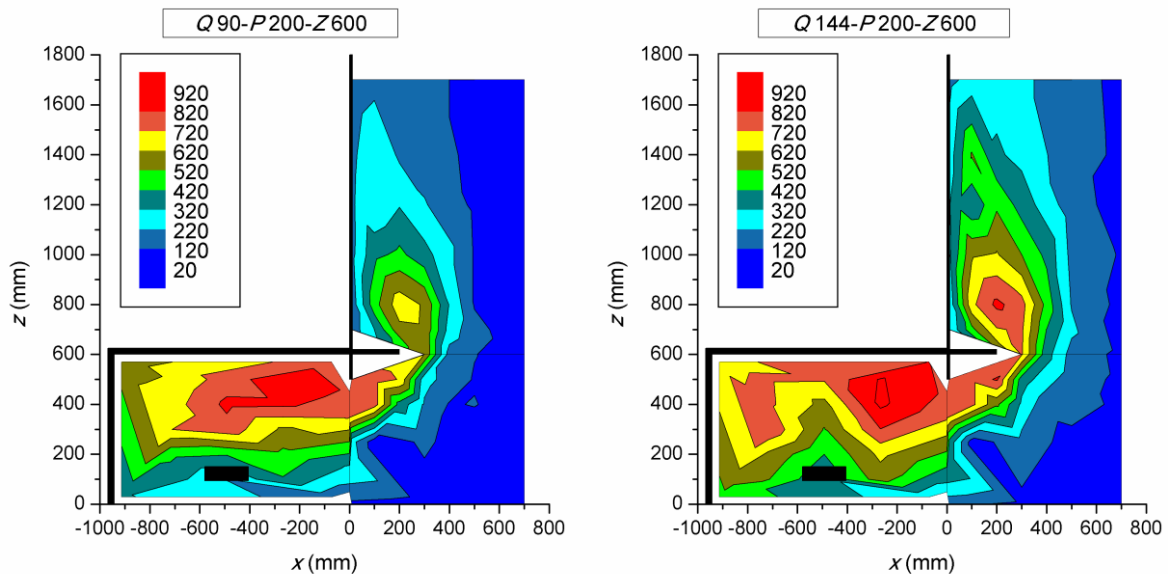
Οι θερμοκρασίες εξωτερικά του δωματίου μετρήθηκαν με τη χρήση έως και 50 θερμοστοιχείων τοποθετημένων σε 6 διαφορετικές αποστάσεις από την πρόσοψη και σε 11 διαφορετικά ύψη (βλ. Σχήμα 6.5). Στα Σχήματα 7.18-7.21 παρουσιάζονται οι κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών για μερικές ενδεικτικές περιπτώσεις. Στο Παράρτημα Β δίνονται οι κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών για το σύνολο των 18 πειραματικών δοκιμών.



Σχήμα 7.18: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P0 (αριστερά) και Q144-P0 (δεξιά)



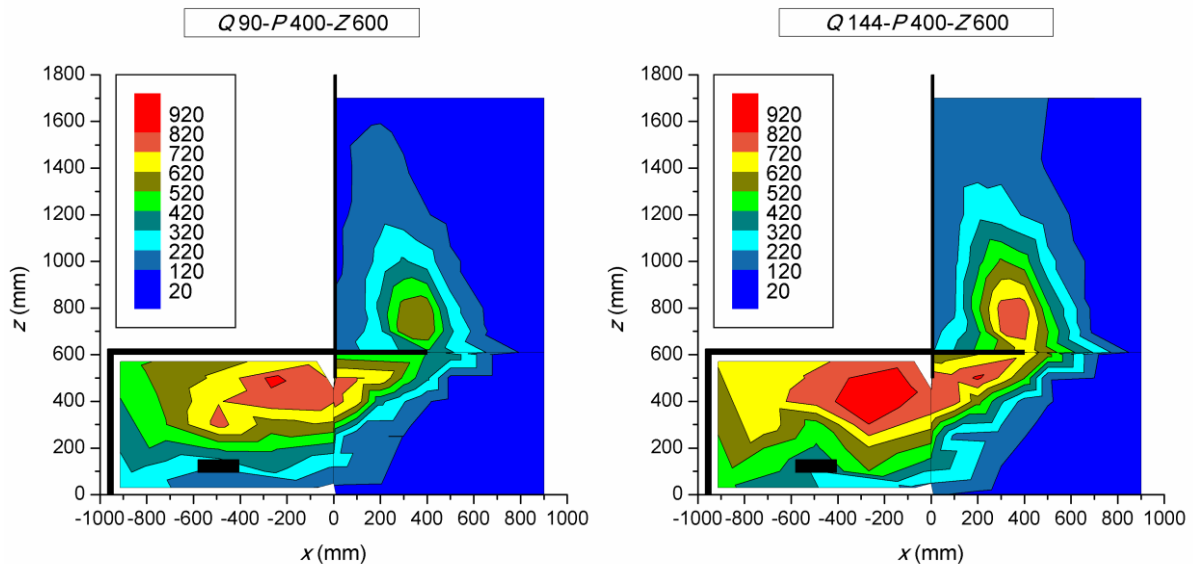
Σχήμα 7.19: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P200-Z500 (αριστερά) και Q144- P200-Z500 (δεξιά)



Σχήμα 7.20: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P200-Z600 (αριστερά) και Q144- P200-Z600 (δεξιά)

Η κάτω ακμή της “θεωρητικής” πόρτας του άνω ορόφου βρίσκεται σε ύψος 620 mm και η άνω ακμή της σε ύψος 1120 mm. Επομένως είναι ζωτικής σημασίας να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη ελάττωση της θερμοκρασίας σε κοντινές αποστάσεις από την πρόσοψη, για ύψη $z = 600, 700, 800$ και 1000 mm. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.18 και 7.19 γίνεται εμφανές ότι η προσθήκη εξώστη βάθους 200 mm ακριβώς επάνω από το άνοιγμα προκαλεί πολύ μεγάλη μείωση των θερμοκρασιών τόσο εντός του πυροδιαμερίσματος όσο και στην εξερχόμενη φλόγα. Στο Σχήμα 7.18 (δεξιά) παρατηρείται ότι εντός του πυροδιαμερίσματος και πλησίον του ανοίγματος οι θερμοκρασίες αγγίζουν τους 900°C για ισχύ 144 kW ενώ στο Σχήμα 7.19 (δεξιά), η έκταση της υπέρθερμης αυτής ζώνης περιορίζεται σημαντικά. Επίσης, οι θερμοκρασίες στην πρόσοψη για την περίπτωση Q144-P0 είναι ιδιαίτερα υψηλές, ιδιαίτερα στα ύψη $z=600-800$ mm ενώ στην περίπτωση Q144-P200-Z500 μειώνονται κατά 300°C περίπου.

Επομένως συμπεραίνεται ότι η προσθήκη του εξώστη σε ύψος 500 mm ενισχύει σημαντικά την προστασία του άνω ορόφου στα ευπαθή σημεία. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.19 και 7.20 παρατηρείται ότι στην περίπτωση που ο εξώστης είναι τοποθετημένος χαμηλά (Σχήματα 7.19) αναπτύσσονται αισθητά χαμηλότερες θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος και στο άνοιγμα. Ωστόσο, στα ευπαθή ύψη $z=700, 800$ και 1000 mm και σε αποστάσεις κοντά στην πρόσοψη φαίνεται να λειτουργεί αποδοτικότερα η τοποθέτηση του εξώστη ψηλότερα ($Z=600$ mm). Με την τοποθέτηση του εξώστη χαμηλά (βλ. Σχήμα 7.20 δεξιά) η φλόγα προσκολλάται σύντομα στην πρόσοψη αυξάνοντας τη θερμοκρασία της περί τους 450°C . Τοποθετώντας τον εξώστη ψηλότερα, η τροχιά της ΦΕΑ ανακόπτεται πιο αποτελεσματικά παρεμποδίζοντας την άμεση προσκόλλησή της στο τοίχωμα. Στο Σχήμα 7.20 (δεξιά) φαίνεται χαρακτηριστικά ότι στα ύψη $z=800-1000$ mm και σε απόσταση $x=200$ mm, η οποία θεωρείται αρκετά μακριά από την πρόσοψη, οι θερμοκρασίες είναι της τάξης των $800-900^{\circ}\text{C}$ ενώ κοντά στην πρόσοψη, στα ευπαθή σημεία οι θερμοκρασίες φτάνει περίπου τους 250°C . Επομένως, τελικά συμπεραίνεται ότι ο εξώστης που τοποθετείται σε μεγαλύτερο ύψος δρα περισσότερο αποτελεσματικά ως μέτρο πυροπροστασίας σε σύγκριση με έναν εξώστη ίδιου βάθους ο οποίος τοποθετείται ακριβώς επάνω από το άνοιγμα.



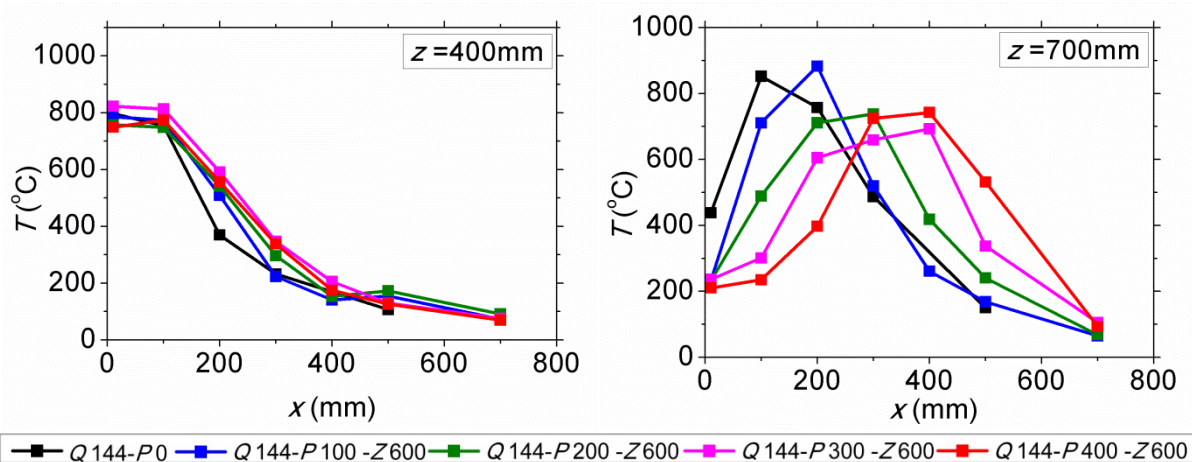
Σχήμα 7.21: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P400-Z600 (αριστερά) και Q144-P400-Z600 (δεξιά)

Στο Σχήμα 7.21 γίνεται αισθητή η επίδραση της προέκτασης εξώστη στην ελάττωση των θερμοκρασιών εντός και εκτός του πυροδιαμερίσματος. Σε σύγκριση με το Σχήμα 7.20 (δεξιά), στο Σχήμα 7.21 (δεξιά) παρατηρούνται πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες κοντά στην πρόσοψη. Στα ύψη $z=700-1000$ mm οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 100°C και 200°C ενώ οι υψηλές ισοθερμοκρασιακές ζώνες εντοπίζονται εντός του πυροδιαμερίσματος πλησίον του ανοίγματος, στο άνοιγμα και κάτω από τον εξώστη και σε ύψη $z=600-800$ mm σε οριζόντιες από στάσεις $x = 200-300$ mm, που βρίσκονται μακριά από την πρόσοψη. Με την τοποθέτηση εξώστη βάθους 400 mm ανακόπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό η ανοδική πορεία της φλόγας και η τροχιά της επηρεάζεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να παρεμποδίζεται η επανακόλλησή της στο τοίχωμα. *Συμπερασματικά, μεγαλύτερη προστασία έναντι της κάθετης διάδοσης του πλουμίου προς τον άνω όροφο*

παρέχει ο εξώστης βάθους 400 mm. Ακολουθεί ο εξώστης βάθους 200 mm και ύψους 600 mm και τελευταίος ο εξώστης βάθους 200 mm και ύψους 500 mm.

7.5.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

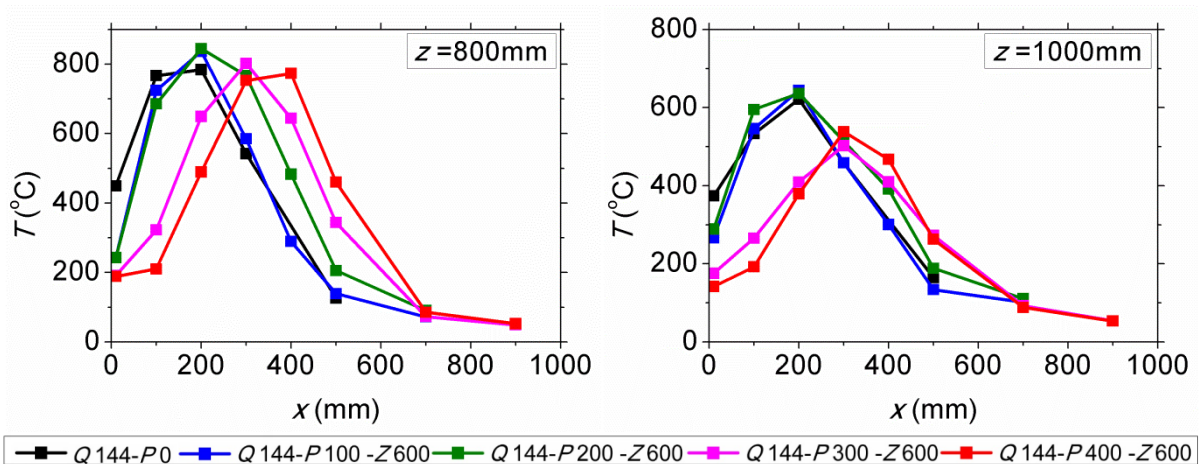
Τα Σχήματα 7.22 και 7.23 απεικονίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα x για τέσσερα διαφορετικά ύψη $z = 400, 700, 800$ και 1000 mm με παράμετρο το βάθος εξώστη. Και στις τέσσερις περιπτώσεις η καθ' ύψος θέση του εξώστη διατηρείται ίση με 600 mm, η ισχύς είναι 144 kW, ενώ μελετάται και η περίπτωση χωρίς εξώστη ($Q144-P0$).



Σχήμα 7.22: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για ύψος $z=400$ mm (αριστερά) και ύψος $z=700$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη

Στο Σχήμα 7.22 (αριστερά) παρατηρείται ότι οι καμπύλες ομοιάζουν μεταξύ τους. Ωστόσο, φαίνεται ότι μέχρι την απόσταση $x=400$ mm οι εξώστες $P300$ και $P400$ προκαλούν υψηλότερες θερμοκρασίες από τους εξώστες $P100$ και $P200$. Το ύψος $z=400$ mm αντιστοιχεί στο πάνω μέρος του ανοίγματος από όπου εξέρχεται η φλόγα. Για το λόγο αυτό, για οριζόντιες αποστάσεις κοντά στο άνοιγμα ($x=10, 100$ mm) οι θερμοκρασίες των καυσαερίων είναι ιδιαίτερα υψηλές (περίπου 800 °C), ενώ σε πιο μεμακρυσμένες θέσεις η θερμοκρασία μειώνεται ραγδαία. Γενικά, φαίνεται ότι για μεγαλύτερα βάθη εξώστη παρουσιάζονται υψηλότερες θερμοκρασίες κατά μήκος της κάτω πλευράς του, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις έρευνες των Wang et al. (2016) και Fu et al. (2016). Στο Σχήμα 7.22 (δεξιά) οι καμπύλες παρουσιάζουν διαφορετική μορφή για κάθε βάθος εξώστη. Στη θέση $(x,z)=(10,700)$, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην πρόσοψη, η περίπτωση χωρίς εξώστη παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σύγκριση με τις περιπτώσεις με εξώστη. Για τα υπόλοιπα βάθη εξώστη οι θερμοκρασίες είναι παρόμοιες. Στη θέση $(x,z)=(100,700)$, η οποία βρίσκεται κοντά στην πρόσοψη παρατηρούνται πολύ μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές ανάλογα με το βάθος εξώστη. Για την περίπτωση $Q144-P0$, η θερμοκρασία αγγίζει τους 880 °C. Όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη, η θερμοκρασία ελαττώνεται κατά πολύ. Έτσι, για την περίπτωση $Q144-P100-Z600$ είναι περίπου 710 °C, για την περίπτωση $Q144-P200-Z600$ είναι περίπου 500 °C, για την περίπτωση $Q144-P300-Z600$ είναι περίπου 250 °C και για την περίπτωση $Q144-P400-Z600$ είναι περίπου 200 °C. Είναι εμφανές ότι με την αύξηση του βάθους του εξώστη ενισχύεται η πυροπροστασία του άνω ορόφου. Στη θέση $(x,z)=(200,700)$ παρατηρείται ότι για όλα τα βάθη εξώστη η θερμοκρασία αυξάνεται, χωρίς όμως να αλλάξει η

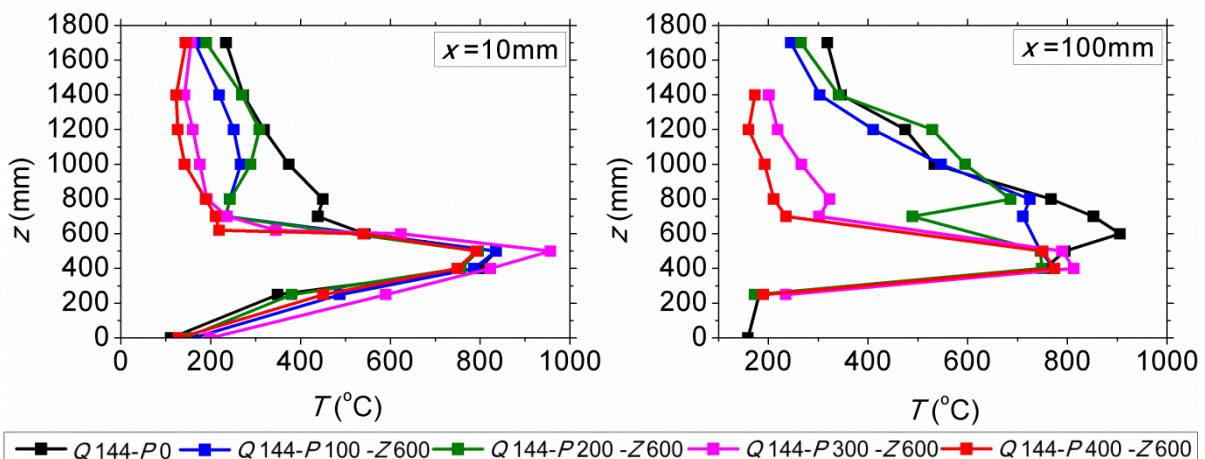
προηγούμενη κατάταξη. Ωστόσο είναι αξιοσημείωτο ότι στη θέση αυτή η θερμοκρασία για την περίπτωση Q144-P0 είναι χαμηλότερη σε σχέση με την περίπτωση Q144-P100-Z600. Αυτό συμβαίνει διότι ο μικρός εξώστης βάθους 100 mm εξοστρακίζει τη φλόγα αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία στη θέση αυτή. Όσο αυξάνεται η οριζόντια απόσταση x , οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται πλέον στις περιπτώσεις με εξώστη μεγαλύτερου βάθους, διότι το κύριο σώμα της φωτιάς ακολουθεί την οριζόντια προέκταση και έπειτα τείνει να επανακολληθεί στην πρόσοψη. Έτσι στις θέσεις $(x,z) = (500,700)$ και $(x,z) = (500, 700)$ παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη, η θερμοκρασία αυξάνεται κατά πολύ.



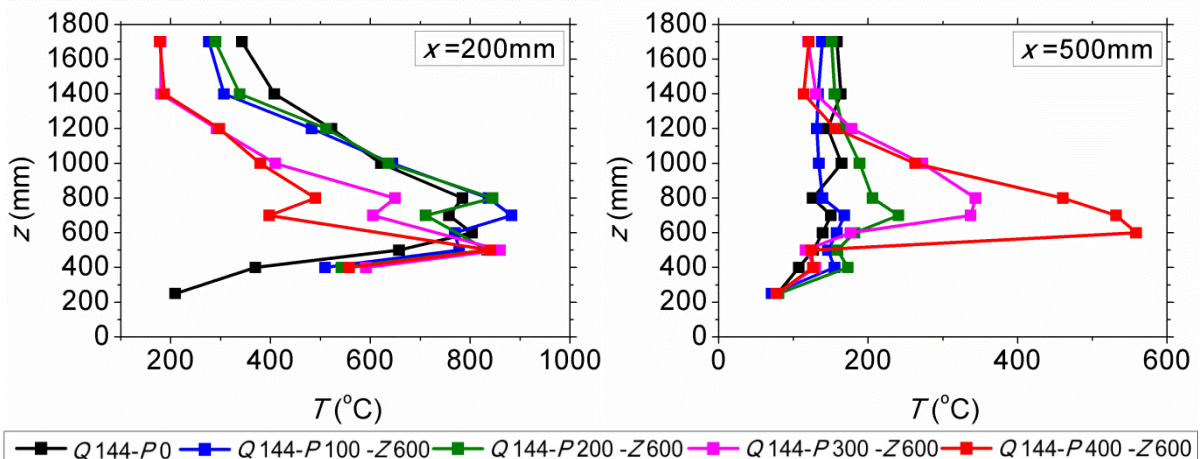
Σχήμα 7.23: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για ύψος $z=800$ mm (αριστερά) και ύψος $z=1000$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη

Στο Σχήμα 7.23 (αριστερά), το οποίο αφορά το ύψος $z=800$ mm, παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά των θερμοκρασιών με αυτή του Σχήματος 7.22 (δεξιά). Στη θέση $(x,z) = (10,800)$ η θερμοκρασία για την περίπτωση χωρίς εξώστη φτάνει τους 450°C , για τις περιπτώσεις Q144-P100-Z600 και Q144-P200-Z600 είναι περί τους 250°C και για τις περιπτώσεις Q144-P300-Z600 και Q144-P400-Z600 μειώνεται κάτω από τους 200°C . Μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές σημειώνονται και στην θέση $(x,z) = (100,800)$, καθώς για τα δύο μικρά βάθη εξώστη παρατηρούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες (720°C για P100 και 685°C για P200) ενώ για τα δύο μεγαλύτερα βάθη οι θερμοκρασίες είναι πολύ χαμηλότερες (323°C για P200 και 210°C για P400). Στη θέση $(x,z) = (200, 800)$ οι θερμοκρασίες σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνονται αλλά διατηρούν την ίδια κατάταξη ανά βάθος εξώστη με τη διαφορά ότι η θερμοκρασία για τα δύο μικρότερα βάθη εξώστη είναι υψηλότερη από την περίπτωση P0. Από τη θέση $x=500$ mm η κατάταξη των θερμοκρασιών αντιστρέφεται όπως και στην περίπτωση του Σχήματος 7.22 (δεξιά). Στο Σχήμα 7.23 (δεξιά), το οποίο αφορά το ύψος $z = 1000$ mm, παρατηρείται μία ομαδοποίηση των καμπυλών μέχρι την απόσταση $x = 200$ mm. Η μία ομάδα αποτελείται από τα βάθη εξώστη P100 και P200 και η άλλη από τα βάθη P300 και P400. Στη θέση $(x,z)=(10,1000)$ για τα μικρά βάθη η θερμοκρασία είναι λίγο κάτω από 300°C ενώ για τα μεγάλα βάθη περίπου 180°C . Στη θέση $(x,z) = (100, 1000)$ για τα μικρά βάθη εξώστη η θερμοκρασία φτάνει τους 600°C ενώ για τα μεγάλα βάθη είναι 300°C για P300 και 200°C για P300. Στη θέση $(x,z) = (200, 1000)$ για τα μικρά βάθη εξώστη η θερμοκρασία είναι υψηλότερη των 600°C ενώ για τα μεγάλα βάθη φτάνει τους 400°C . Γενικά σε αυτό το ύψος τα μικρά βάθη εξώστη εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με την περίπτωση χωρίς εξώστη. Στην

αποστάσεις μακριά από την πρόσοψη τα μεγαλύτερα βάθη εξώστη προκαλούν υψηλότερες θερμοκρασίες στο ύψος $z=1000$ mm. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη τόσο μειώνονται δραστικά οι θερμοκρασίες κοντά στην πρόσοψη και αυξάνονται μακριά από αυτήν για τα ύψη $z=700, 800$ και 1000 mm. Ο εξώστης βάθους 100 mm είναι ο λιγότερο αποτελεσματικός ενώ ο εξώστης βάθους 400 mm είναι ο περισσότερο αποτελεσματικός. Η μεγάλη διαφορά στην αποτελεσματικότητα ωστόσο παρατηρείται κατά τη μετάβαση από βάθος 200 mm σε βάθος 300 mm. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τους Yokoi (1960), Mammoser and Battaglia (2003), Cao and Guo (2003), Zhao et al. (2014), An et al. (2017), Xing et al. (2013) και Nilsson et al. (2018).



Σχήμα 7.24: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεσι του ύψους z για απόσταση $x=10$ mm (αριστερά) και $x=100$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη



Σχήμα 7.25: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεσι του ύψους z για απόσταση $x=200$ mm (αριστερά) και $x=500$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm εξώστη 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη

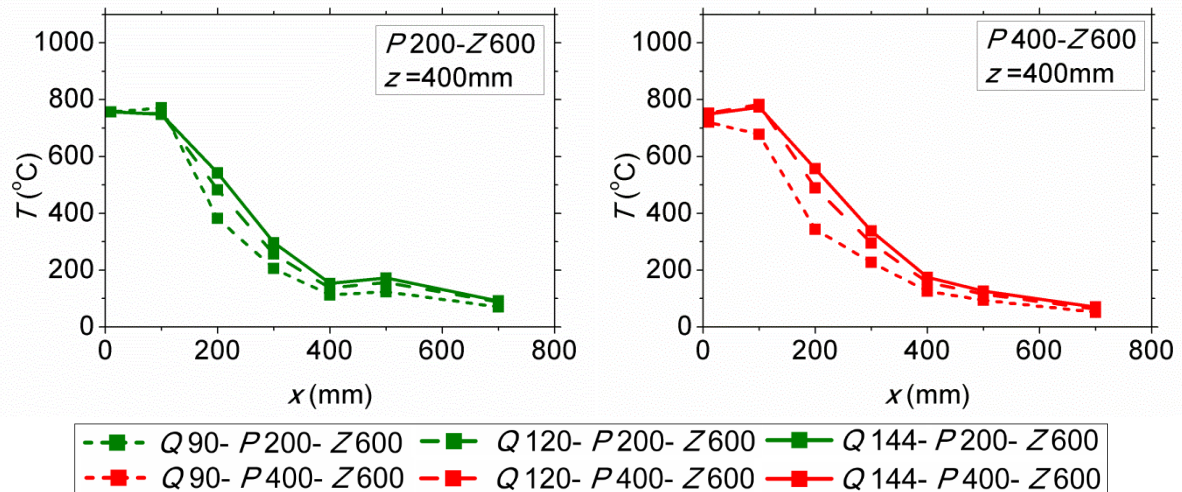
Στα Σχήματα 7.24 και 7.25 παρουσιάζονται οι καθ' ύψος μεταβολές της εξερχόμενης θερμοκρασίας για σταθερές αποστάσεις $x = 10, 100, 200$ και 500 mm. Στο Σχήμα 7.24 (αριστερά) παρατηρείται για όλα τα βάθη εξώστη αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το ύψος $z = 600$ mm, στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένος ο εξώστης. Στα ύψη πάνω από τον εξώστη $z = 700, 800, 1000$ mm παρατηρείται ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας για τους εξώστες $P300$ και $P400$ στους 200°C

και κάτω. Για το βάθος εξώστη $P100$ παρατηρείται πολύ μεγάλη πτώση θερμοκρασίας στο $z=700$ mm, η οποία αυξάνεται μέχρι το ύψος $z=1000$ mm και στη συνέχεια ξαναμειώνεται. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και ο εξώστης $P200$, ενώ για την περίπτωση απουσίας εξώστη οι θερμοκρασίες είναι οι υψηλότερες σε όλα τα ύψη $z \geq 700$ mm. Στη θέση $(x,z)=(100,400)$ του Σχήματος 7.24 (δεξιά) οι θερμοκρασίες για όλα τα βάθη εξώστη είναι ιδιαίτερα υψηλές (800°C). Σε ύψος $z=700$ mm η χαμηλότερη θερμοκρασία αντιστοιχεί σε βάθος $P400$ και αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος εξώστη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι κατά τη μετάβαση από $P200$ σε $P300$ παρατηρείται μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας κατά 200°C . Σε ύψος $z=800$ mm η θερμοκρασία για τον εξώστη $P400$ διατηρείται σχετικά χαμηλή, για τον εξώστη $P300$ αυξάνεται στους 300°C και για τον εξώστη $P200$ εκτινάσσεται στους 500°C . Ο εξώστης βάθους $P100$ παρουσιάζει ακόμα υψηλότερη θερμοκρασία στο ύψος αυτό. Σε ύψος $z=1000$ mm οι εξώστες $P300$ και $P400$ εμφανίζουν αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα δύο μικρότερα βάθη. Η υψηλότερη θερμοκρασία εμφανίζεται για τον εξώστη $P200$, η οποία ξεπερνά ακόμα και τη θερμοκρασία χωρίς εξώστη. Στο Σχήμα 7.25 (αριστερά) για το ύψος $z=700$ mm παρατηρείται και πάλι ότι όσο αυξάνεται το βάθος εξώστη τόσο μειώνονται οι θερμοκρασίες. Στη συγκεκριμένη θέση $(x,z)=(200,700)$ για τον εξώστη $P100$ παρουσιάζεται θερμοκρασία υψηλότερη και από της περίπτωσης $P0$, λόγω του ότι η φλόγα διέρχεται από εκείνο το σημείο μετά την πρόσκρουσή της στον εξώστη. Στο σημείο $(x,z)=(200,800)$ παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας για όλους τους εξώστες εκτός από τον $P100$ και στο σημείο $(x,z)=(200,1000)$ οι θερμοκρασίες μειώνονται και λαμβάνουν την τιμή των 400°C για τους εξώστες $P300, P400$ και 600°C για τους εξώστες $P100, P200$. Στο Σχήμα 7.25 (δεξιά) στη θέση $(x,z)=(500,700)$ παρατηρείται πολύ υψηλή θερμοκρασία για βάθος εξώστη $P400$, καθώς αντιστοιχεί στο σημείο όπου οδηγείται η φλόγα πριν συστραφεί μετά την ακμή του εξώστη. Οι υπόλοιπες θερμοκρασίες είναι αισθητά χαμηλότερες σε αυτό το σημείο. Στα ύψη $z=700, 800$ και 1000 mm και στη θέση $x=500$ mm παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το βάθος του εξώστη αυξάνονται και οι θερμοκρασίες στις αντίστοιχες θέσεις. Ωστόσο, λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης από την πρόσοψη δεν συντρέχει κίνδυνος διάδοσης του πλουμίου στον άνω όροφο.

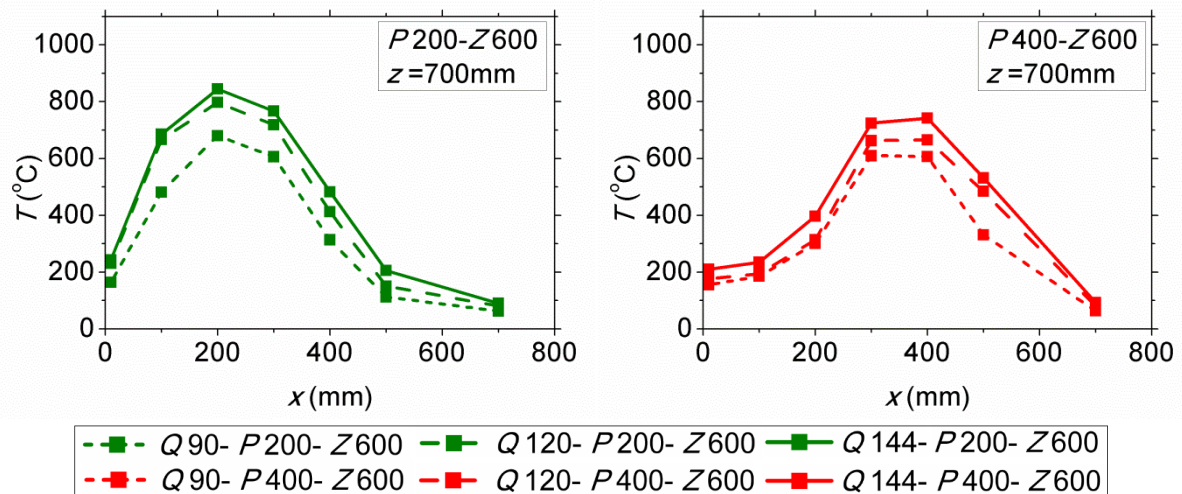
7.5.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Στα Σχήματα 7.26-7.29 παρουσιάζεται η επίδραση της αύξησης της ισχύος στην μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της απόστασης x από την πρόσοψη και για σταθερά ύψη $z=400, 700, 800$ και 1000 mm. Στα αριστερά των σχημάτων εξετάζεται η περίπτωση $P200-Z600$ και στα δεξιά η περίπτωση $P400-Z600$.

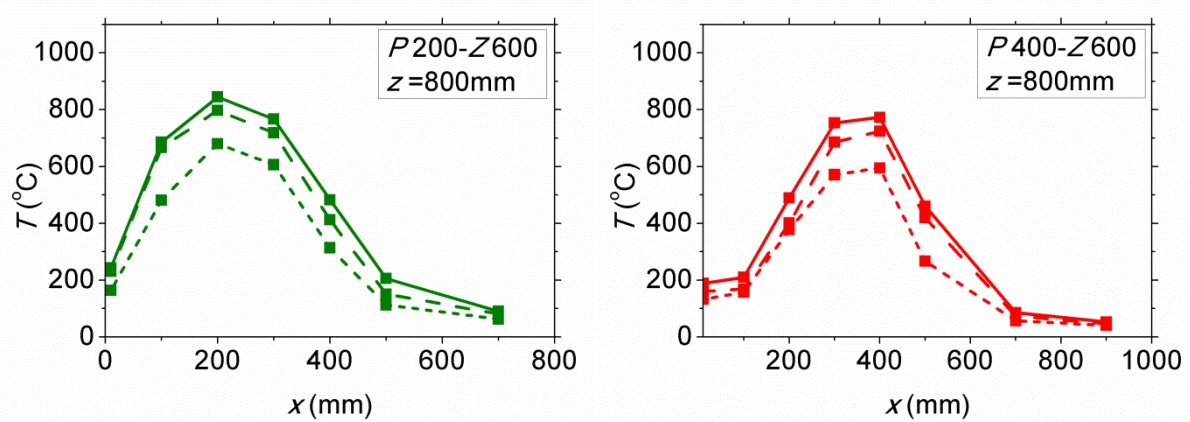
Στο Σχήμα 7.26 τόσο για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) όσο και για βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά), είναι εμφανές ότι για σταθερή οριζόντια θέση x , αύξηση της ισχύος προκαλεί και αύξηση της θερμοκρασίας. Λόγω της ιδιαίτερης θέσης που εξετάζεται, η οποία βρίσκεται στο ύψος του ανοίγματος από όπου εξέρχεται η φλόγα, οι θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές με την αύξηση της ισχύος.



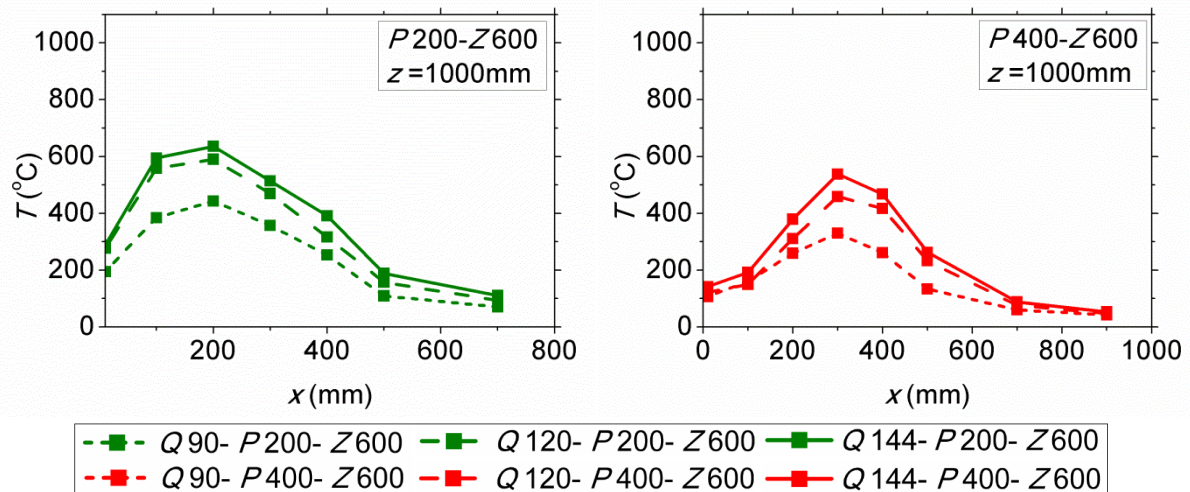
Σχήμα 7.26: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερό ύψος $z=400$ mm και παράμετρο την ισχύ



Σχήμα 7.27: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερό ύψος $z=700$ mm και παράμετρο την ισχύ

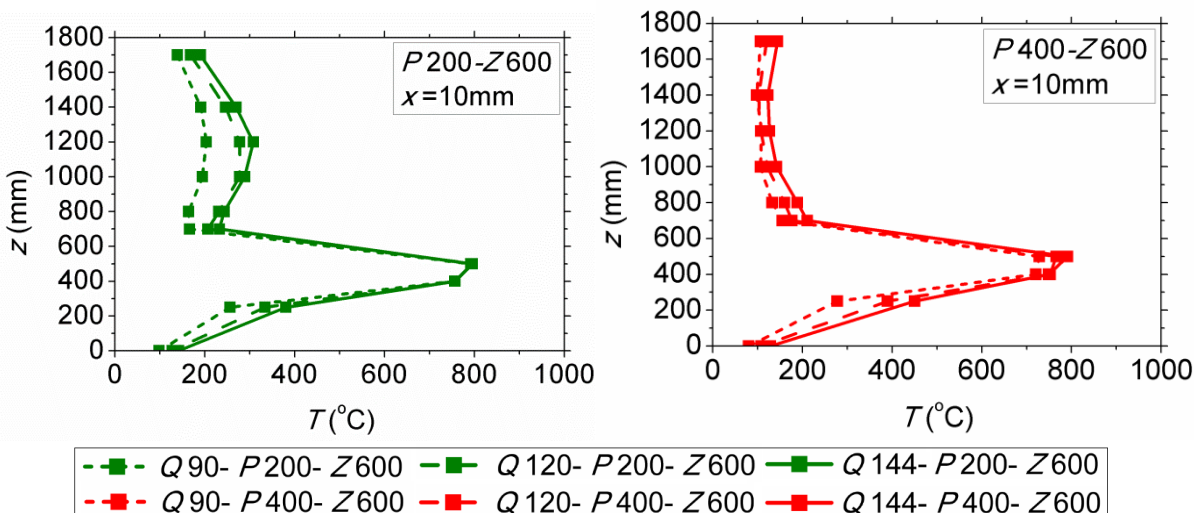


Σχήμα 7.28: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερό ύψος $z=800$ mm και παράμετρο την ισχύ

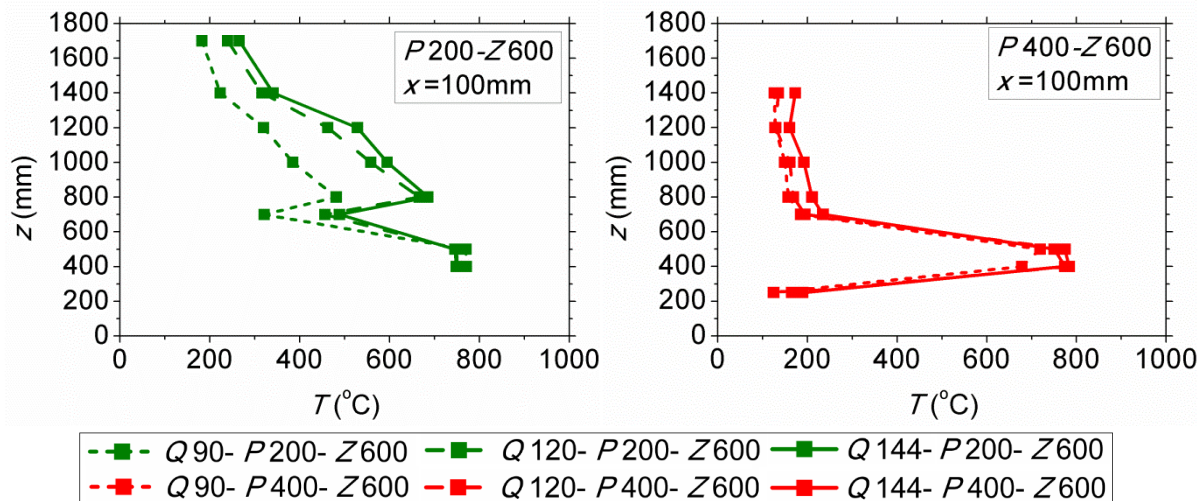


Σχήμα 7.29: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεως της απόστασης x για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερό ύψος $z=1000$ mm και παράμετρο την ισχύ

Στα Σχήματα 7.27 - 7.29 παρατηρείται ότι οι καμπύλες των θερμοκρασιών του κάθε επιμέρους διαγράμματος ομοιάζουν πολύ μεταξύ τους είτε πρόκειται για εξώστη βάθους 200 mm είτε πρόκειται για εξώστη βάθους 400 mm. Στο Σχήμα 7.27 (αριστερά) οι θερμοκρασίες αυξάνονται μέχρι το $x=200$ mm και έπειτα μειώνονται. Στο Σχήμα 7.27 (δεξιά) οι θερμοκρασίες αυξάνονται μέχρι το $x=400$ mm και έπειτα μειώνονται. Και στις δύο περιπτώσεις για σταθερή απόσταση x η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος. Τα Σχήματα 7.28 και 7.29 παρουσιάζουν ακριβώς ίδια συμπεριφορά με το Σχήμα 7.27. Στα Σχήματα 7.30-7.23 παρουσιάζεται η επίδραση της αύξησης της ισχύος στην μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσεως του άξονα z .

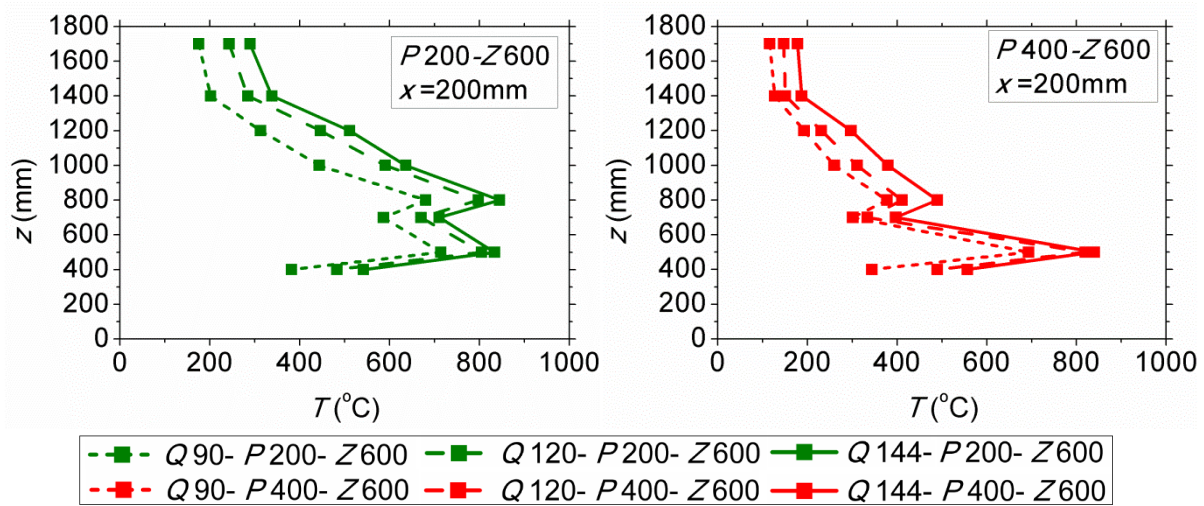


Σχήμα 7.30: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεως του ύψους z για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερή απόσταση $x=10$ mm και παράμετρο την ισχύ

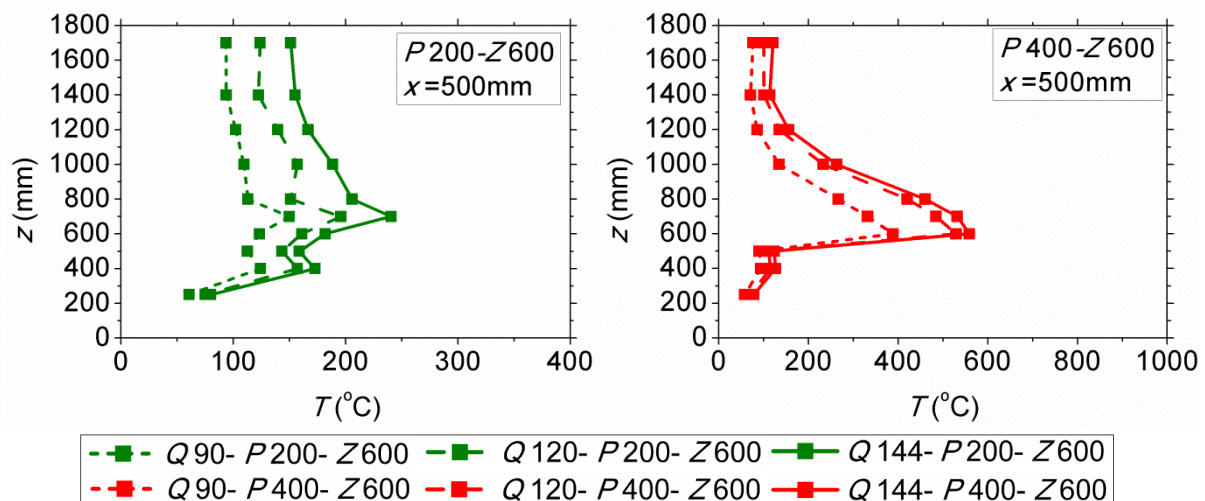


Σχήμα 7.31: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεσι του ύψους z για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερή απόσταση $x=100$ mm και παράμετρο την ισχύ

Στο Σχήμα 7.30 παρατηρείται ότι και για τα δύο βάθη εξώστη οι θερμοκρασίες αυξάνονται μέχρι το ύψος $z=600$ mm και στη συνέχεια μειώνονται πολύ εξαιτίας της παρουσίας του εξώστη. Για σταθερό ύψος όσο αυξάνεται το επίπεδο ισχύος τόσο αυξάνονται και οι θερμοκρασίες. Η διαφορά του Σχήματος 7.30 (αριστερά) σε σύγκριση με το Σχήμα 7.30 (δεξιά) είναι ότι στην πρώτη περίπτωση οι θερμοκρασίες αυξάνονται στα ύψη $z=800,1000$ mm για όλα τα επίπεδα ισχύος, ενώ στην δεύτερη περίπτωση μειώνονται. Στο Σχήμα 7.31 (αριστερά) που αναφέρεται σε οριζόντια απόσταση 100 mm από την πρόσοψη, είναι αξιοσημείωτη η μείωση της θερμοκρασίας στο ύψος $z=700$ mm και εν συνεχεία η μεγάλη αύξησή της στο αμέσως επόμενο ύψος $z=800$ mm. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες για τις ισχείς Q_{120} και Q_{144} σχεδόν συμπίπτουν. Το Σχήμα 7.31 (δεξιά) έχει μεγάλη ομοιότητα με το Σχήμα 7.30 (δεξιά).



Σχήμα 7.32: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεσι του ύψους z για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερή απόσταση $x=200$ mm και παράμετρο την ισχύ

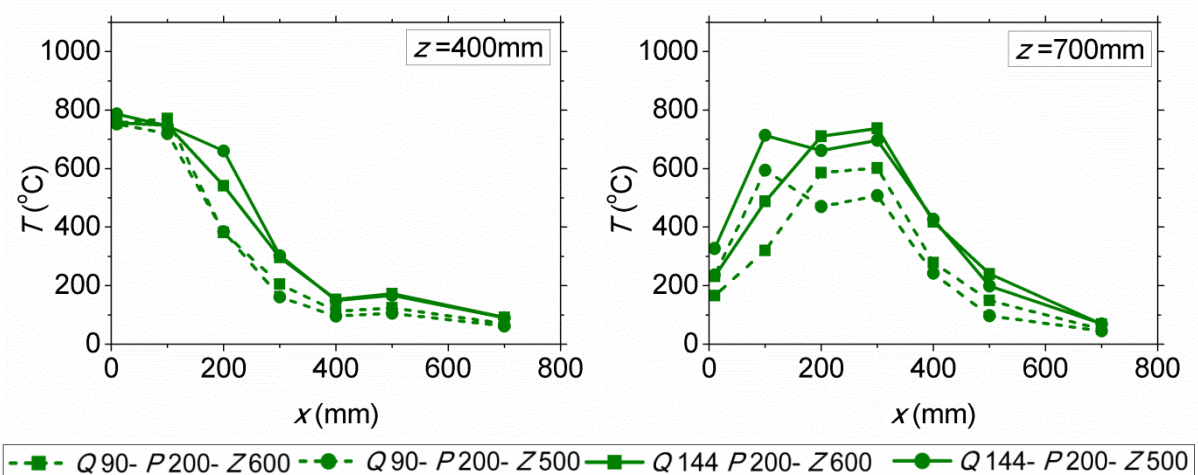


Σχήμα 7.33: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεσι του ύψους z για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, σταθερή απόσταση $x=500$ mm και παράμετρο την ισχύ

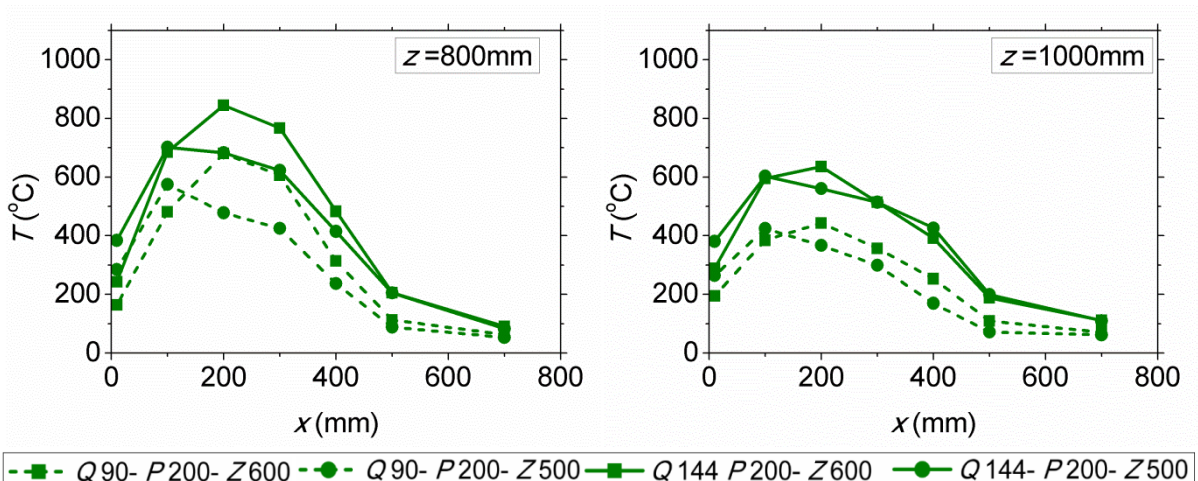
Στο Σχήμα 7.32 (αριστερά) η θερμοκρασία μειώνεται αισθητά στο ύψος $z=700$ mm σε όλα τα επίπεδα ισχύος, στη συνέχεια αυξάνεται απότομα στο ύψος $z=800$ mm και στα επόμενα ύψη μειώνεται σταδιακά. Στο Σχήμα 7.32 (δεξιά) οι καμπύλες ακολουθούν παρόμοιο μοτίβο, με τη διαφορά ότι στη θέση $z=800$ mm η θερμοκρασιακή αύξηση ήταν μικρότερη σε σχέση με το αριστερό διάγραμμα. Και στις δύο περιπτώσεις η αύξηση της ισχύος προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας για σταθερό ύψος z . Στο Σχήμα 7.33 (αριστερά) είναι εμφανές ότι η υψηλότερη θερμοκρασία παρουσιάζεται σε ύψος $z=700$ mm. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στα επίπεδα ισχύος έχουν ακριβώς την ίδια μορφή. Στο Σχήμα 7.33 (δεξιά) φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες στα ύψη $z=700$, 800 και 1000 mm είναι αρκετά υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του αριστερού διαγράμματος. Όσο μεγαλύτερη γίνεται η ισχύς τόσο υψηλότερες είναι και οι θερμοκρασίες.

7.5.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Τα Σχήματα 7.34 και 7.35 παρουσιάζουν συγκριτικά την επίδραση του ύψους εξώστη στη θερμοκρασιακή μεταβολή συναρτήσεσι της οριζόντιας απόστασης x για σταθερό ύψος z . Σε κάθε διάγραμμα απεικονίζονται δύο επίπεδα ισχύος: 90 kW και 144 kW. Στο Σχήμα 7.34 (αριστερά) δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την της καθ' ύψος θέσης του εξώστη στις θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν μεταξύ τους και για τα δύο επίπεδα ισχύος. Στο Σχήμα 7.34 (δεξιά) ωστόσο είναι εμφανές ότι στις θέσεις $(x,z) = (10,700)$ και $(100,700)$ ο εξώστης σε χαμηλή θέση ($Z = 500$ mm) προκαλεί μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τον εξώστη που τοποθετείται σε ύψος $Z = 600$ mm. Αυτό σημαίνει ότι πλησίον της πρόσοψης σε σημείο που ανήκει στην πόρτα του άνω ορόφου είναι πιο αποτελεσματικός ο εξώστης σε υψηλή θέση. Για απόσταση $x > 100$ mm παρατηρείται το αντίθετο, δηλαδή οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται για την περίπτωση P200-Z600.



Σχήμα 7.34: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x στο ύψος $z=400$ mm (αριστερά) και ύψος $z=700$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

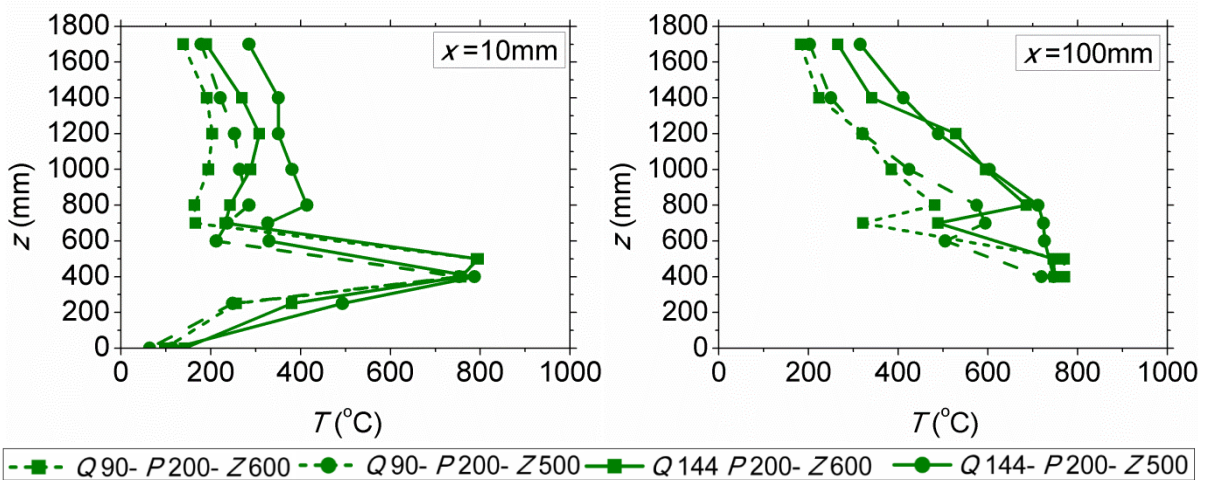


Σχήμα 7.35: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x στο ύψος $z=800$ mm (αριστερά) και ύψος $z=1000$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

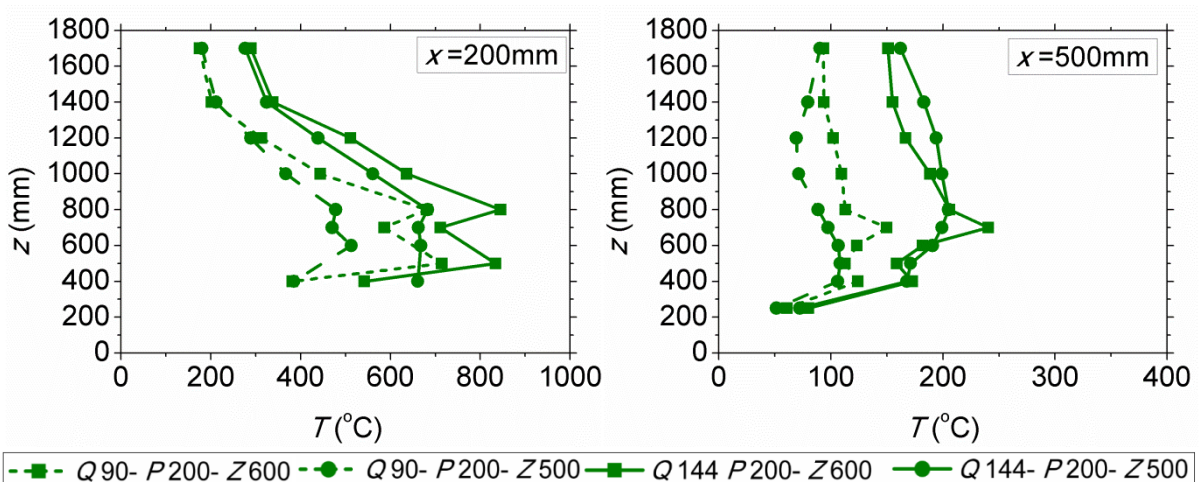
Στο Σχήμα 7.34 (αριστερά) και στο Σχήμα 7.35 (δεξιά) παρατηρείται ότι στις μικρές αποστάσεις από την πρόσοψη ($x=10, 100$ mm) οι θερμοκρασίες που είναι υψηλότερες αντιστοιχούν στην περίπτωση $P200-Z500$. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 mm οι θερμοκρασίες για τον εξώστη $P200-Z600$ υπερिशύουν. Συμπερασματικά, στα ευπαθή σημεία πλησίον της πρόσοψης ($x,z)=(10, 700), (10, 800), (10, 1000), (100, 700), (100,800)$ και $(100, 1000)$, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή της "θεωρητικής πόρτας" του άνω ορόφου ο εξώστης που τοποθετείται σε υψηλή θέση παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι της κάθετης διάδοσης της φωτιάς σε σύγκριση με τον εξώστη που τοποθετείται στο ύψος του ανοίγματος.

Τα Σχήματα 7.36 και 7.37 παρουσιάζουν συγκριτικά την επίδραση της καθ' ύψος θέσης του εξώστη στην καθ' ύψος θερμοκρασιακή μεταβολή, σε σταθερή απόσταση x . Στο Σχήμα 7.36 (αριστερά) παρατηρείται ότι μέχρι το ύψος $z=600$ mm οι καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια μορφή. Μάλιστα για ισχύ $Q90$ οι θερμοκρασίες συμπίπτουν για τα δύο ύψη εξώστη. Από το ύψος $z = 700$ mm και πάνω, ωστόσο, είναι εμφανές ότι οι καθ' ύψος θερμοκρασίες κατά την περίπτωση του εξώστη $P200-Z500$ είναι αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες του εξώστη $P200-Z600$,

Χαρακτηριστικά φαίνεται ότι για ύψος $z=800$ mm και ισχύ $Q144$ η θερμοκρασία για τον εξώστη $P200-Z500$ είναι περίπου 415°C τη στιγμή που για τον εξώστη $P200-Z600$ στην ίδια θέση λαμβάνει την τιμή των 240°C . Στο Σχήμα 7.36 (δεξιά) παρατηρείται διαφορά στη μορφή των καμπυλών ανάλογα με το ύψος εξώστη. Για την περίπτωση $Q144-P200-Z500$, με την αύξηση του ύψους z η θερμοκρασιακή μείωση από το ύψος $z=400\text{mm}$ μέχρι το ύψος $z=800$ mm είναι μόλις 30°C . Για την περίπτωση $Q144-P200-Z600$, η θερμοκρασία υφίσταται μία ραγδαία μείωση στο ύψος $z=700$ mm της τάξης των 250°C και στη συνέχεια ραγδαία αύξηση στο ύψος $z=800$ mm της τάξης των 200°C . Η παρεμπόδιση της ροής της φλόγας είναι εμφανέστερη στην περίπτωση του εξώστη μεγαλύτερου ύψους. Από το ύψος $z=800$ mm και άνω διαπιστώνεται σύγκλιση στις καμπύλες των δύο εξωστών.



Σχήμα 7.36: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεως του ύψους z σε απόσταση $x=10$ mm (αριστερά) και απόσταση $x=100$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη



Σχήμα 7.37: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσεως του ύψους z σε απόσταση $x=200$ mm (αριστερά) και απόσταση $x=500$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

Το Σχήμα 7.37 (αριστερά) δείχνει ότι σε απόσταση θέση $x=200$ mm σε όλα τα ύψη z οι θερμοκρασίες για την περίπτωση $P200-Z600$ είναι υψηλότερες. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα δύο επίπεδα ισχύος που εξετάζονται. Για την περίπτωση του εξώστη $P200-Z600$ οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας στο ύψος $z=800$ mm συμβαίνει και για $x=200$ mm. Για μεγαλύτερη οριζόντια

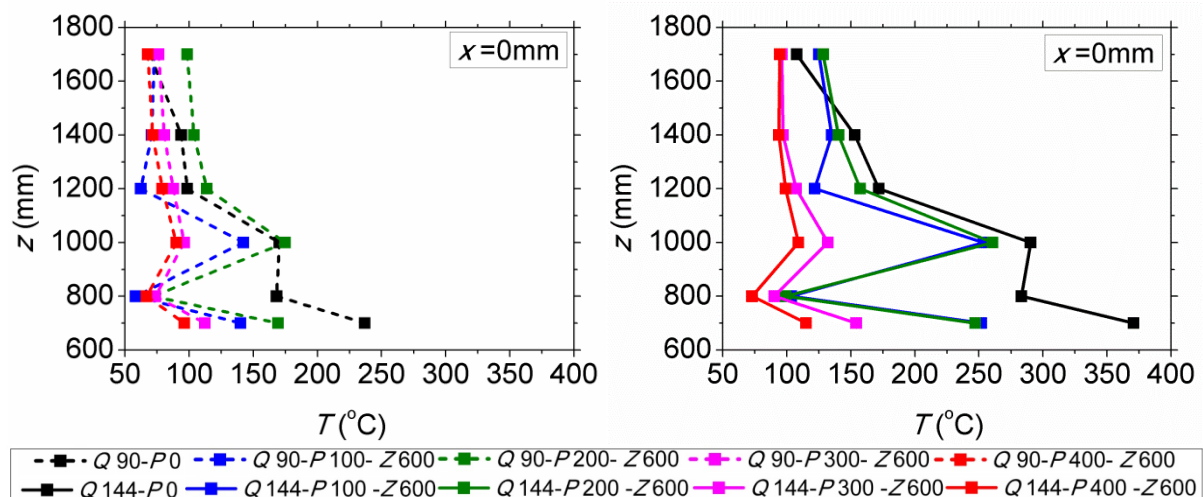
απόστα-ση $x=500$ mm διαπιστώνεται διαφορετική συμπεριφορά των δύο εξωστών στα δύο επίπεδα ισχύος. Για την ισχύ $Q90$ είναι εμφανές ότι καθ' όλο το ύψος z οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες για την περίπτωση του εξώστη $P200-Z600$. Για την ισχύ $Q144$ όμως οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν μέχρι το ύψος $z=800$ mm και στη συνέχεια οι θερμοκρασίες γίνονται υψηλότερες για την περίπτωση $P200-Z500$.

7.6 Θερμοκρασίες στην πρόσοψη

Οι θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη επιφάνεια της πρόσοψης μετρήθηκαν με τη χρήση θερμοστοιχείων που ενσωματώθηκαν στο τοίχωμα χωρίς το άκρο τους να έρχεται σε άμεση επαφή με τα καυσαέρια. Τα ύψη στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ήταν $z=700, 800, 1000, 1200, 1400$ και 1700 mm (βλ. Σχήμα 6.1).

7.6.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.38 απεικονίζεται η επίδραση της προέκτασης εξώστη στην καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας στην πρόσοψη. Στο Σχήμα 7.38 (αριστερά), όπου εξετάζεται η περίπτωση της ισχύος $Q90$, παρατηρείται ότι στο ύψος $z=700$ mm, η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του βάθους εξώστη. Στο ύψος αυτό φαίνεται ότι αποτελεσματικότερος είναι ο εξώστης $P400$. Σε ύψος $z=800$ mm παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας για όλα τα βάθη εξώστη. Είναι αξιοσημείωτο ότι στο δεδομένο ύψος η χαμηλότερη θερμοκρασία παρουσιάζεται για την περίπτωση του εξώστη $P100$. Οι υπόλοιποι εξώστες εμφανίζουν ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες. Σε ύψος $z=1000$ mm οι θερμοκρασίες αυξάνονται και πάλι. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις αφορούν τους εξώστες $P100$ και $P200$, οι οποίες είναι της τάξης των 80°C και 100°C αντίστοιχα. Αντιθέτως, για τους εξώστες $P300$ και $P400$ η αύξηση της θερμοκρασίας είναι της τάξης των 20°C . Σε μεγαλύτερα ύψη φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες συγκλίνουν με εξαίρεση την περίπτωση $P200$, κατά την οποία οι θερμοκρασίες παραμένουν υψηλότερες σε όλα τα ύψη z .



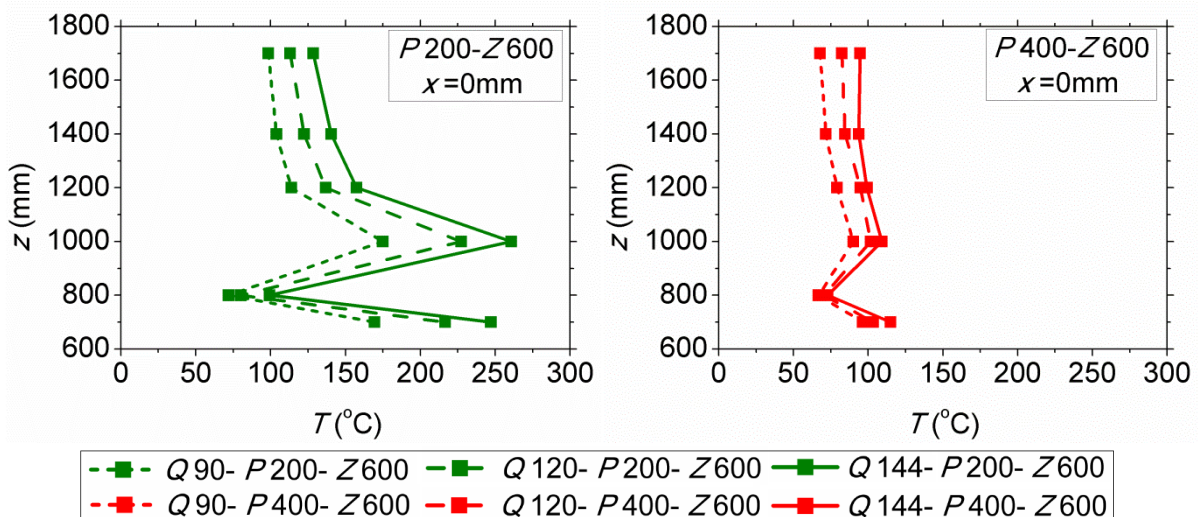
Σχήμα 7.38: Θερμοκρασίες στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x=0$ mm για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm, ισχύ 90 kW (αριστερά) και ισχύ 144 kW (δεξιά) με παράμετρο το βάθος του εξώστη

Στο Σχήμα 7.38 (δεξιά), όπου εξετάζεται η περίπτωση της ισχύος $Q144$, είναι εμφανές ότι καθ' όλο το ύψος z οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στην πρόσοψη καταγράφονται για την περίπτωση εξώστη βάθους 400 mm. Οι καμπύλες $P300$

και P400 παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα στη μορφή μέχρι το ύψος $z=1000$ mm, έπειτα συγκλίνουν και τελικά ταυτίζονται στα μεγαλύτερα ύψη. Αντίστοιχη ομοιότητα παρουσιάζουν οι καμπύλες P100 και P200. Υπάρχει λοιπόν σαφής ομαδοποίηση των εξωστών σε εξώστες με μικρά βάθη (P100, P200) και εξώστες με μεγάλα βάθη (P300, P400). Είναι ενδιαφέρον ότι για τις περιπτώσεις P100 και P200 παρατηρείται έντονη θερμοκρασιακή μείωση 150°C κατά τη μετάβαση από το ύψος $z=700$ mm στο ύψος $z=800$ mm, έπειτα έντονη θερμοκρασιακή αύξηση 170°C κατά τη μετάβαση από το ύψος $z=800$ mm στο ύψος $z=1000$ mm και τέλος μεγάλη θερμοκρασιακή μείωση κατά τη μετάβαση από το ύψος $z=1000$ mm στο ύψος $z=1200$ mm. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στους εξώστες P300 και P400. Αντιθέτως αυτές οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας στην πρόσοψη είναι της τάξης των 50°C το πολύ. Αυτό σημαίνει ότι με την προσθήκη εξωστών βάθους 300 mm και 400 mm εξασφαλίζεται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή ομοιομορφία στην πρόσοψη κατά μήκος του άξονα z σε αντίθεση με τους εξώστες βάθους 100 mm και 200 mm. Επίσης το Σχήμα 7.38 δείχνει ότι οι εξώστες P300 και P400 διατηρούν τη θερμοκρασία της πρόσοψης στα ίδια επίπεδα τόσο στο μικρό (Σχήμα 7.38, αριστερά) όσο και στο μεγάλο επίπεδο ισχύος (Σχήμα 7.38, δεξιά). Γενικά, η δραστική μείωση της θερμοκρασίας της πρόσοψης που προκαλεί η αύξηση του βάθους του εξώστη όχι μόνο μπορεί να αποτρέψει την κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς, αλλά δυνητικά αυξάνει κατά πολύ την πιθανότητα επιβίωσης των ανθρώπων που βρίσκονται σε ορόφους ακριβώς πάνω από το πυροδιαμέρισμα, γεγονός που έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τους Mammoser and Battaglia, (2003) και τους Zhao et al. (2014).

7.6.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Στο Σχήμα 7.39 (αριστερά) απεικονίζεται η επίδραση της αύξησης της ισχύος της φωτιάς στην καθ' ύψος μεταβολή των θερμοκρασιών στην πρόσοψη, για την περίπτωση του εξώστη P200-Z600.



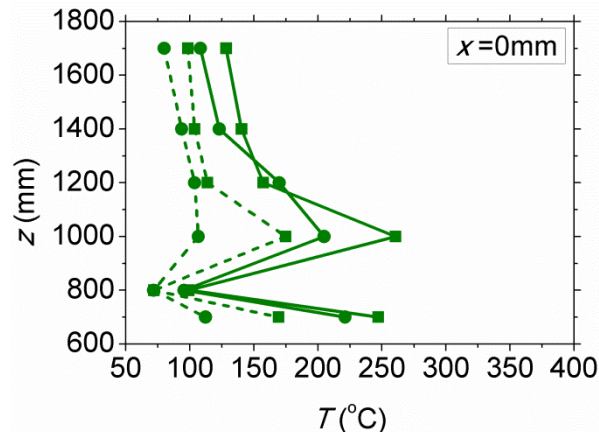
Σχήμα 7.39: Θερμοκρασίες στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x=0$ mm, για βάθη εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά) για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm με παράμετρο την ισχύ

Είναι εμφανές ότι για σταθερό ύψος z, αύξηση της ισχύος επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας. Το ίδιο συμβαίνει και στο Σχήμα 7.39 (δεξιά), που αφορά την περίπτωση P400-Z600. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους προκύπτει

το συμπέρασμα ότι οι θερμοκρασίες και για τους δύο τύπους εξώστη λαμβάνουν παρόμοιες τιμές στο ύψος $z=800$ mm. Σε όλα τα υπόλοιπα ύψη οι θερμοκρασίες που αφορούν τον εξώστη P200-Z600 είναι αρκετά έως πολύ υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που αφορούν τον εξώστη P400-Z600.

7.6.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Το Σχήμα 7.40 απεικονίζει την επίδραση του ύψους του εξώστη στην καθ' ύψος θερμοκρασιακή μεταβολή της πρόσοψης. Εξετάζονται παραμετρικά δύο επίπεδα ισχύος (Q90 και Q144).



---■--- Q 90- P200- Z600 -●- Q 90- P200- Z500 -■- Q 144 P200- Z600 -●- Q 144- P200- Z500

Σχήμα 7.40: Θερμοκρασίες στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x=0$ mm για σταθερό βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

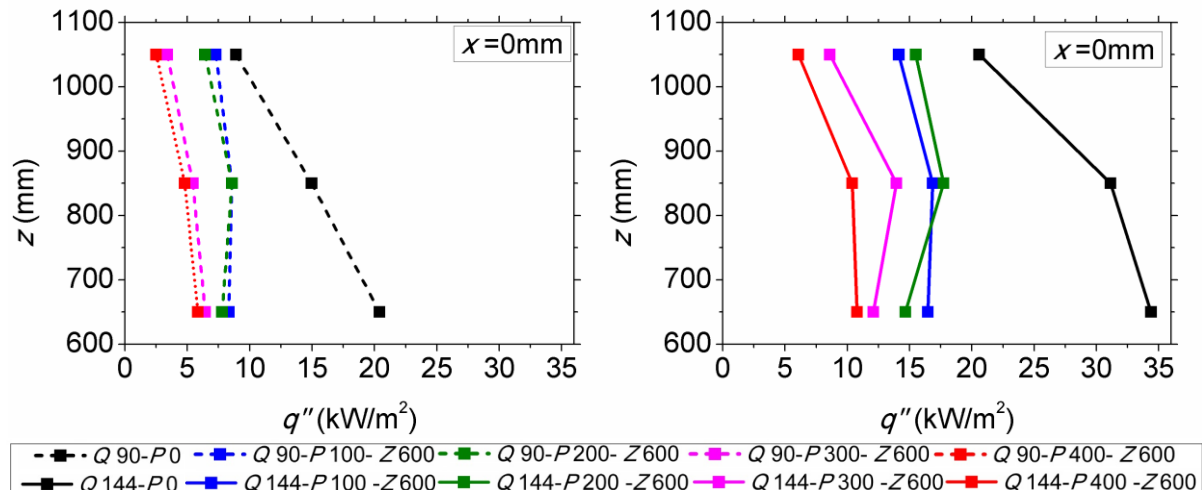
Από το Σχήμα 7.40 προκύπτει ότι και για τα δύο επίπεδα ισχύος η τοποθέτηση του εξώστη σε μεγαλύτερο ύψος ($Z = 600$ mm) προκαλεί αύξηση στη θερμοκρασία της πρόσοψης. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των δύο υψών εξώστη εντοπίζονται στα ύψη $z = 700$ mm και $z = 1000$ mm. Στο ύψος $z = 800$ mm οι θερμοκρασίες συμπίπτουν μεταξύ τους και για τα δύο επίπεδα ισχύος. Βάσει της Εξίσωσης (2.28), η μεταφορά θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος πάχους δ_w μέσω αγωγής ισούται με το άθροισμα των απωλειών θερμότητας δια ακτινοβολίας και συναγωγής. Βάσει των Σχημάτων 7.34 και 7.35 είναι εμφανές ότι οι θερμοκρασίες κοντά στην πρόσοψη ($x \leq 100$ mm) είναι υψηλότερες για την περίπτωση του χαμηλότερου εξώστη. Όμως για μεγαλύτερες αποστάσεις ($x > 100$ mm) ο εξώστης που τοποθετείται σε ύψος 600 mm προκαλεί αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τον χαμηλό εξώστη. Η αυξημένη θερμορροή λόγω της ισχυρής θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπει η φλόγα στα ύψη $z = 700$ mm και $z = 1000$ mm για την περίπτωση του εξώστη που τοποθετείται υψηλότερα, είναι δυνατό ότι επιφέρει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αύξηση στο τοίχωμα. Με άλλα λόγια, το άθροισμα της ακτινοβολίας και συναγωγής που δέχεται το τοίχωμα δύναται να είναι μεγαλύτερο για τον υψηλό εξώστη σε σύγκριση με τον χαμηλό εξώστη.

7.7 Θερμορροή στην πρόσοψη

Η θερμορροή στην πρόσοψη μετρήθηκε με την χρήση τριών μετρητών ροής θερμότητας, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην εκτεθειμένη επιφάνεια της πρόσοψης στα ύψη $z = 650$, 850 και 1050 mm, δηλαδή εντός του πλαισίου της "θεωρητικής" πόρτας του άνω ορόφου.

7.7.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.41 απεικονίζεται η επίδραση της προέκτασης εξώστη στην καθ' ύψος μεταβολή της θερμορροής της πρόσοψης για ισχύ Q90 (αριστερά) και για ισχύ Q144 (δεξιά).

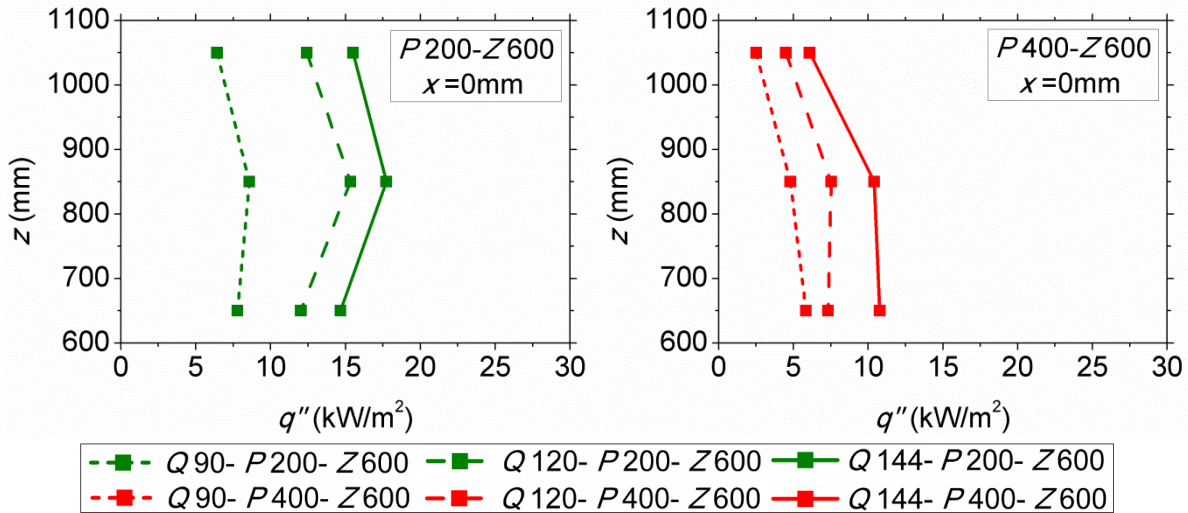


Σχήμα 7.41: Θερμορροή στην πρόσοψη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση x=0 mm για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm, ισχύ 90 kW (αριστερά) και ισχύ 144 kW (δεξιά) με παράμετρο το βάθος του εξώστη

Στο Σχήμα 7.41 (αριστερά) παρατηρείται ότι οι καμπύλες για τις περιπτώσεις εξώστη P300 και P400 πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους και είναι παράλληλες. Σε ύψος z=650 mm, δηλαδή ακριβώς πάνω από τον εξώστη, η χαμηλότερη θερμορροή εμφανίζεται για τον εξώστη P400. Λίγο υψηλότερη είναι η θερμορροή για τον εξώστη P300 και ακολουθούν κατά αύξουσα σειρά οι θερμορροές για τους εξώστες P200 και P100. Για την περίπτωση P0 η τιμή της θερμορροής είναι πολύ μεγαλύτερη κατά 15 kW/m² από αυτήν του εξώστη P100, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προσθήκης εξώστη ακόμα και μικρού βάθους έναντι της κατακόρυφης διάδοσης της ΦΕΑ. Στο ύψος z=850 mm παρατηρείται ότι η τιμή της θερμορροής για τους εξώστες P100 και P200 συμπίπτουν, ενώ για τα μεγαλύτερα βάθη εξωστών η θερμορροή του εξώστη P400 εξακολουθεί να είναι η χαμηλότερη. Στο ύψος z=1050 mm παρατηρείται ότι η θερμορροή για τον εξώστη P200 λαμβάνει ελαφρώς μικρότερη τιμή από εκείνη του εξώστη P100. Στο Σχήμα 7.41 (δεξιά) γίνεται ακόμα εμφανέστερο ότι ο εξώστης P400 προκαλεί τις χαμηλότερες θερμορροές σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ενώ δεύτερος σε αποτελεσματικότητα ακολουθεί ο εξώστης P300. Ο εξώστης P200 εμφανίζει χαμηλότερη θερμορροή από τον εξώστη P100 στο ύψος z=650 mm, αλλά λίγο υψηλότερη στα ύψη z=850 mm και 1050 mm. Λαμβάνοντας υπόψη και τα πιθανά σφάλματα των μετρητικών οργάνων, μπορεί να θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά των εξωστών μικρού βάθους έναντι στην έκθεση της πρόσοψης στη θερμορροή είναι παρόμοια. *Γενικά συμπεραίνεται ότι η παρουσία εξώστη μειώνει πολύ αποτελεσματικά την έκθεση της πρόσοψης στη ροή θερμότητας. Για μεγάλα βάθη εξώστη η προστασία είναι ακόμα μεγαλύτερη.* Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τις έρευνες των Yokoi (1960), Oleszkiewicz (1991), Cao and Guo (2003), An et al. (2017) και Nilsson et al (2018).

7.7.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

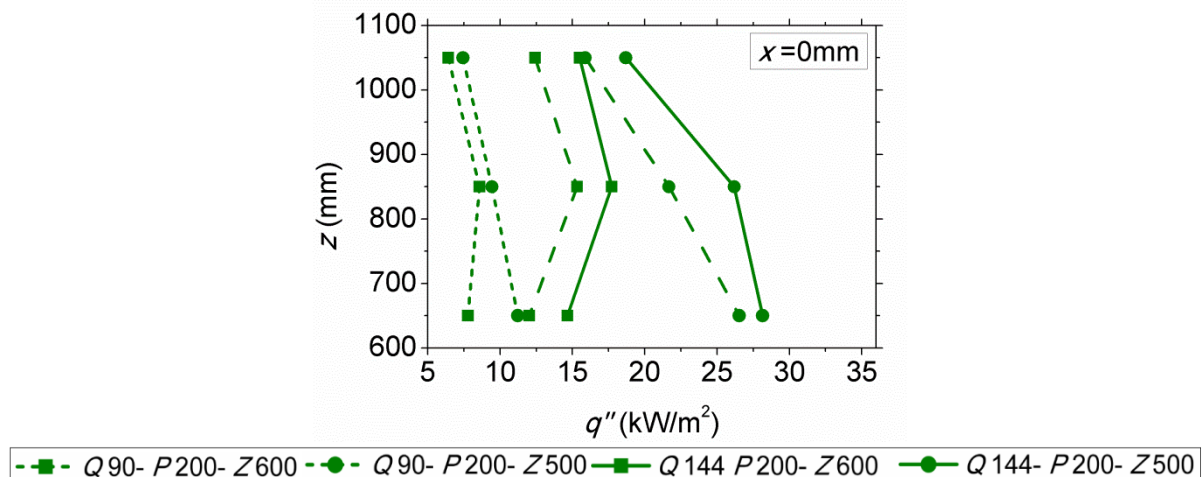
Στο Σχήμα 7.42 παρατηρείται με σαφήνεια ότι η αύξηση της ισχύος οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές θερμορροής για το ίδιο ύψος z. Αυτό επαληθεύεται τόσο για βάθος εξώστη 200 mm όσο για βάθος εξώστη 400 mm.



Σχήμα 7.42: Θερμορροή στην πρόσοψη συναρτήσεσι του ύψους z για απόσταση x=0 mm, για βάθη εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ

7.7.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Εξετάζοντας την επίδραση του ύψους του εξώστη στην έκθεση της πρόσοψης σε θερμορροή, στο Σχήμα 7.43 παρατηρείται ότι και στα τρία ύψη z=650, 850 και 1050 mm οι θερμορροές που αντιστοιχούν στο μικρό ύψος εξώστη (Z=500 mm) είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες που αντιστοιχούν στο μεγάλο ύψος εξώστη (Z=600 mm). Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνεται από δύο επίπεδα ισχύος που αναπαρίστανται στο Σχήμα 7.43.



Σχήμα 7.43: Θερμορροή στην πρόσοψη συναρτήσεσι του ύψους z για απόσταση x=0 mm για σ βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για τη μέγιστη ισχύ Q144 στο ύψος z = 650 mm η θερμορροή που αντιστοιχεί στον εξώστη P200-Z500 είναι 28 kW/m² ενώ η θερμορροή που αντιστοιχεί στον εξώστη P200-Z600 είναι 15 kW/m², δηλαδή

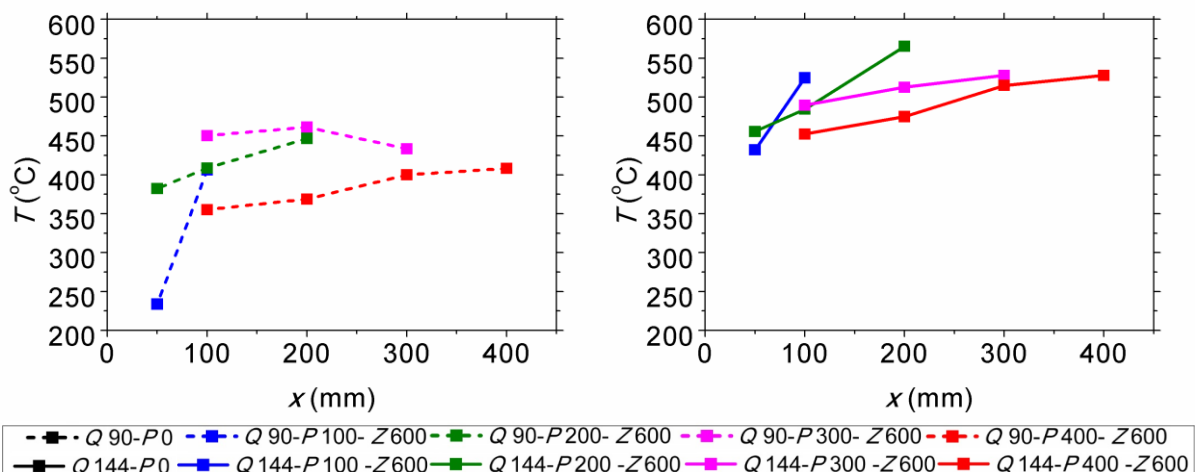
σχεδόν η μισή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις των Cao and Guo (2003), σύμφωνα με τους οποίους η θερμοροή δεν μειώνεται με την καθ' ύψος μεταβολή του εξώστη αλλά απλώς "μετατοπίζεται" σε μεγαλύτερα ύψη. Επισημαίνεται ότι παρόλο που οι μετρητές ροής θερμότητας μετρούν κυρίως ακτινοβολία θερμότητας, όταν η θερμοροή είναι μικρότερη των 50 kW/m^2 , ο όρος της συναγωγής είναι πολύ σημαντικός και δεν αμελείται (Hukseflux, 2011).

7.8 Θερμοκρασίες εξώστη

Οι θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη (κάτω) επιφάνεια του εξώστη μετρήθηκαν με τη χρήση θερμοστοιχείων που τοποθετήθηκαν στην εκτεθειμένη κάτω επιφάνεια του εξώστη κατά μήκος του πάνω στον άξονα συμμετρίας. Οι θέσεις στις οποίες εγκαταστάθηκαν τα θερμοστοιχεία διέφεραν ανάλογα με το βάθος του εξώστη. Οι ακριβείς θέσεις των θερμοστοιχείων φαίνονται στα Σχήματα 6.1-6.6.

7.8.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.44 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες στην εκτεθειμένη επιφάνεια του εξώστη συναρτήσει του βάθους P για ισχύ φωτιάς $Q90$ (αριστερά) και $Q144$ (δεξιά).



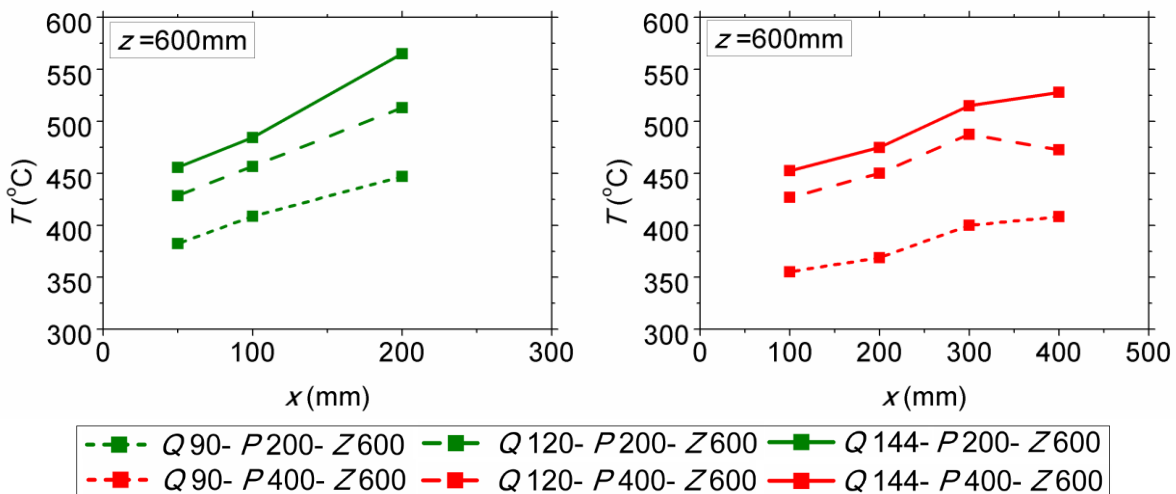
Σχήμα 7.44: Θερμοκρασίες εξώστη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x=0$ mm για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 90 kW (αριστερά) και ισχύ 144 kW (δεξιά) με παράμετρο το βάθος του εξώστη

Στο Σχήμα 7.44 (αριστερά) παρατηρείται ότι για $x=50$ mm ο εξώστης P100 παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εξώστη P200. Για $x=100$ mm την χαμηλότερη θερμοκρασία παρουσιάζει ο εξώστης P400, ενώ μετά ακολουθούν οι εξώστες P100 και P200 των οποίων οι θερμοκρασίες ταυτίζονται στη θέση αυτή. Υψηλότερη είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στον εξώστη P300. Σε βάθος $x=300$ mm ο εξώστης P300 εξακολουθεί να έχει την υψηλότερη θερμοκρασία ενώ ο P400 την χαμηλότερη. Στο Σχήμα 7.44 (δεξιά) παρατηρείται ότι για σταθερό βάθος x ο εξώστης P400 παρουσιάζει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στη θέση $x=50$ mm και πάλι ο εξώστης P100 έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εξώστη P200. Στις θέσεις $x=100, 200$ και 300 mm οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται για τον εξώστη P400. Γενικά συμπεραίνεται ότι οι θερμοκρασίες του τοιχώματος του εξώστη αυξάνονται όσο η θέση της μέτρησης προσεγγίζει την ακμή του εξώστη και μεταξύ διαφορετικών εξωστών δεν υπάρχουν μεγάλες

θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τους Ohmiya et al. (2001), οι οποίοι στις έρευνές στους διαπίστωσαν ότι με την αύξηση του βάθους του εξώστη η κατανομή των θερμοκρασιών κατά μήκος του δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις.

7.8.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

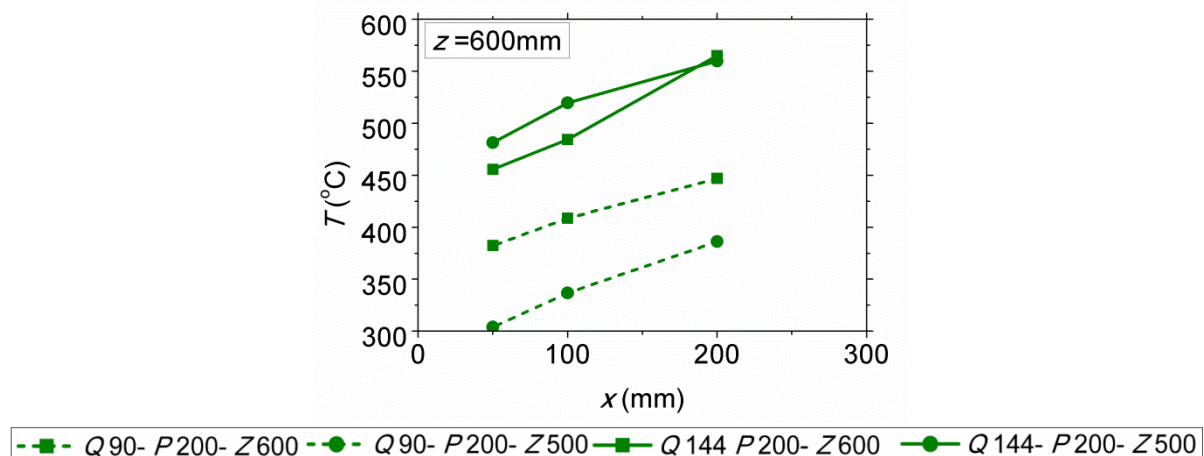
Στο Σχήμα 7.45 απεικονίζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοιχώματος του εξώστη για βάθος εξώστη 200 mm (αριστερά) και βάθος εξώστη 400 mm (δεξιά). Και στα δύο διαγράμματα παρατηρείται ότι για σταθερό βάθος x , η αύξηση της ισχύος της φωτιάς προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος του εξώστη.



Σχήμα 7.45: Θερμοκρασίες εξώστη συναρτήσει του βάθους P βάθη εξώστη 200 mm (αριστερά) και 400 mm (δεξιά) για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm με παράμετρο την ισχύ

7.8.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Το σχήμα 7.46 απεικονίζει την επίδραση του ύψους εξώστη στην θερμοκρασία του τοιχώματος του εξώστη σε διάφορα βάθη.



Σχήμα 7.46: Θερμοκρασίες εξώστη συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x = 0$ mm για σταθερό βάθος εξώστη 200 mm με παραμέτρους δύο επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη

Παρατηρείται ότι για ισχύ $Q90$ ο εξώστης που τοποθετείται σε ύψος $Z600$ παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τον εξώστη που

τοποθετείται σε ύψος Z500. Ωστόσο, σε υψηλότερη ισχύ Q144 το φαινόμενο αντιστρέφεται καθώς ο εξώστης Z500 παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' όλο το μήκος του.

7.9 Συγκεντρώσεις αερίων – Βαθμός απόδοσης καύσης

Σε κάθε πείραμα εφαρμόστηκε επίσης η μέθοδος της θερμιδομετρίας οξυγόνου (oxygen calorimetry), προκειμένου να υπολογιστεί η πραγματική ισχύς της φωτιάς κατά περίπτωση και να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης της καύσης. Για το λόγο αυτό, σε κάθε δοκιμή μετρήθηκαν οι πειραματικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία ξηρής σφαίρας, πίεση και σχετική υγρασία) και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του αναλυτή καυσαερίων και γνωστά μεγέθη που αφορούν το μεθάνιο, εφαρμόστηκαν οι Εξισώσεις (2.45) και (2.46). Τα σταθερά στοιχεία που αφορούν το μεθάνιο και τον αέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1, ενώ τα στοιχεία των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.1: Σταθερά στοιχεία για την εφαρμογή της θερμιδομετρίας οξυγόνου

$X_{O_2,a}$ (%)	$X_{CO_2,a}$ (ppm)	E_{O_2} (kJ/kg)	E_{CO} (kJ/kg)	α	M_{O_2} (kg/kmol)	M_{air} (kg/kmol)	$H_{u_{CH_4}}$ (kJ/kg)
20.95	400	12.54	17.6	1.105	32	28.96	50040

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα της εφαρμογής της θερμιδομετρίας οξυγόνου

Δοκιμή	T (°C)	RH (%)	$X_{O_2,e}$ (%)	$X_{CO_2,e}$ (ppm)	$X_{CO,e}$ (ppm)	ϕ	\dot{m}_g (kg/s)
Q90-P0 Q120-P0 Q144-P0	23.8	32.96	20.01 19.74 19.52	6011 7580 8792	27 16 17	0.0498 0.0638 0.0752	0.5243 0.4953 0.4736
Q90-P100-Z600 Q120-P100-Z600 Q144-P100-Z600	25.1	34.50	20.03 19.76 19.53	5731 7382 8763	38 12 17	0.0488 0.0630 0.0744	0.5032 0.4660 0.4457
Q90-P200-Z600 Q120-P200-Z600 Q144-P200-Z600	25.2	32.49	20.03 19.81 19.52	5803 7200 8867	84 27 32	0.0527 0.0644 0.0793	0.5001 0.4707 0.4542
Q90-P300-Z600 Q120-P300-Z600 Q144-P300-Z600	25.6	58.10	20.06 19.81 19.75	5218 6684 7043	75 50 52	0.0514 0.0645 0.0680	0.4767 0.4532 0.4353
Q90-P400-Z600 Q120-P400-Z600 Q144-P400-Z600	27.8	34.50	20.18 19.97 19.75	4973 6104 7366	138 55 40	0.0405 0.0517 0.0631	0.5104 0.4894 0.4743
Q90-P200-Z500 Q120-P200-Z500 Q144-P200-Z500	24.7	32.96	20.05 19.71 19.53	5609 7653 8655	170 39 40	0.0515 0.0697 0.0786	0.5076 0.4687 0.4551

Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι τιμές της θεωρητικής και υπολογιζόμενης πραγματικής ισχύος, οι πραγματικές ισχύεις και ο βαθμός απόδοσης καύσης για κάθε δοκιμή, με τη χρήση των Εξισώσεων (2.44), (2.47) και (2.48).

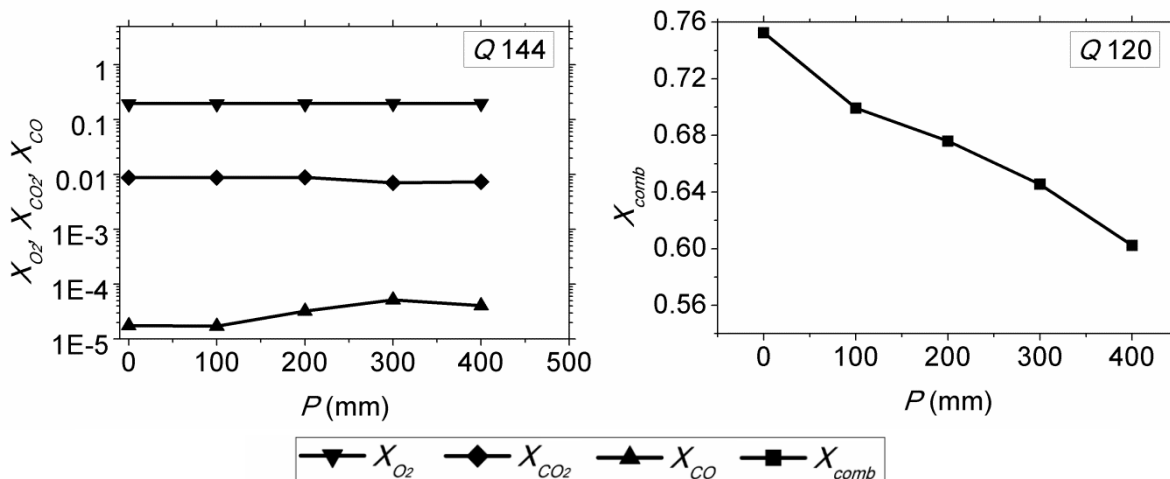
Πίνακας 7.3: Θεωρητικές και πραγματικές ισχύεις της φωτιάς για κάθε δοκιμή

Δοκιμή	Θεωρητική ισχύς (kW)	Υπολογιζόμενη ισχύς (kW)	Βαθμός απόδοσης καύσης X_{comb}
Q90-P0	89.76	74.501	0.830
Q120-P0	119.68	90.053	0.752
Q144-P0	143.61	101.464	0.707

Δοκιμή	Θεωρητική ισχύς (kW)	Υπολογιζόμενη ισχύς (kW)	Βαθμός απόδοσης καύσης X_{comb}
Q90-P100-Z600	89.76	70.057	0.780
Q120-P100-Z600	119.68	83.691	0.699
Q144-P100-Z600	143.61	97.654	0.680
Q90-P200-Z600	89.76	69.037	0.769
Q120-P200-Z600	119.68	80.891	0.676
Q144-P200-Z600	143.61	97.242	0.677
Q90-P300-Z600	89.76	63.478	0.707
Q120-P300-Z600	119.68	77.259	0.646
Q144-P300-Z600	143.61	78.448	0.546
Q90-P400-Z600	89.76	58.070	0.647
Q120-P400-Z600	119.68	72.083	0.602
Q144-P400-Z600	143.61	84.702	0.590
Q90-P200-Z500	89.76	68.439	0.762
Q120-P200-Z500	119.68	87.746	0.733
Q144-P200-Z500	143.61	96.845	0.674

7.9.1 Επίδραση προέκτασης εξώστη

Στο Σχήμα 7.47 (αριστερά) αναπαρίστανται οι συγκεντρώσεις των αερίων προϊόντων της καύσης συναρτήσει του βάθους του εξώστη σε λογαριθμικό διάγραμμα, για τη μέγιστη ισχύ Q144. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του O₂ δεν μεταβάλλεται με την αύξηση του βάθους του εξώστη. Η συγκέντρωση του μετρούμενου CO₂ παραμένει σταθερή για τις περιπτώσεις P0, P100 και P200 και μειώνεται ελάχιστα για τους εξώστες P300 και P400. Η συγκέντρωση του παραγόμενου CO είναι χαμηλή για την περίπτωση χωρίς εξώστη κα για την περίπτωση του εξώστη βάθους 100 mm (17 ppm). Για μεγαλύτερα βάθη εξώστη η συγκέντρωση του CO αυξάνεται για την περίπτωση P200, μειοδοποιείται για την περίπτωση P300 και μειώνεται λίγο στην περίπτωση P400.



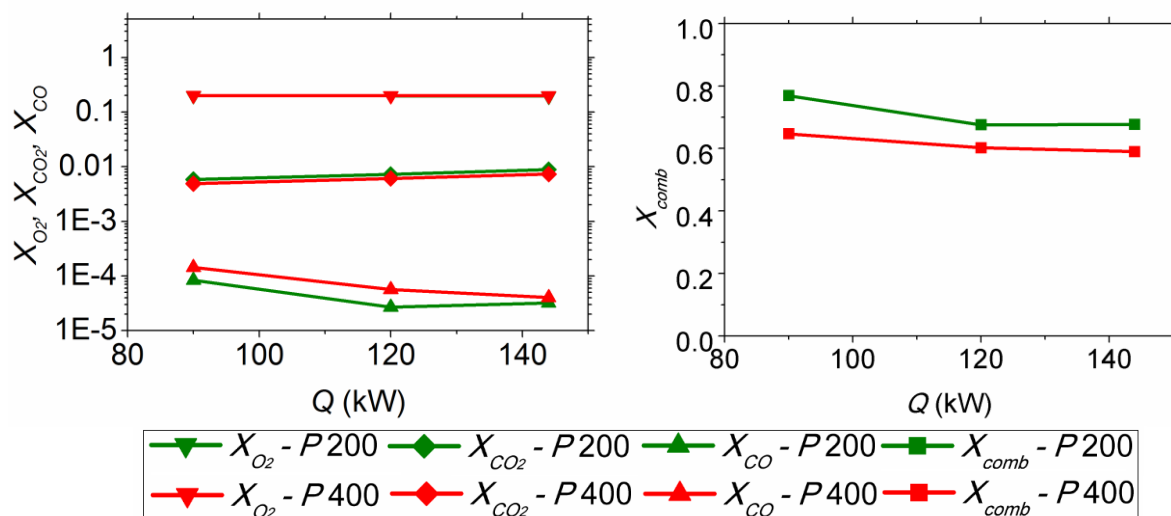
Σχήμα 7.47: Συγκεντρώσεις αερίων (αριστερά) και βαθμός απόδοσης καύσης (δεξιά) συναρτήσει του βάθους P για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm και ισχύ 144 kW

Στο Σχήμα 7.47 (δεξιά) παρουσιάζονται οι τιμές του βαθμού απόδοσης της καύσης συναρτήσει του βάθους P, για ισχύ Q120. Για την περίπτωση απουσίας του εξώστη ο βαθμός απόδοσης της καύσης είναι ο μέγιστος και ίσος περίπου με

0.75. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους εξώστη ο βαθμός απόδοσης καύσης μειώνεται γραμμικά.

7.9.2 Επίδραση ισχύος φωτιάς

Στο Σχήμα 7.48 (αριστερά) απεικονίζεται η επίδραση της ισχύος στις συγκεντρώσεις των αερίων προϊόντων της καύσης για δύο περιπτώσεις εξώστη P200 και P400. Η συγκέντρωση O₂ φαίνεται να μην επηρεάζεται από την αύξηση της ισχύος, ενώ η συγκέντρωση CO₂ αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος τόσο για τον εξώστη P200 όσο και για τον εξώστη P400. Όσον αφορά την συγκέντρωση του CO, για την περίπτωση του εξώστη P200 παρατηρείται μείωση για την ισχύ Q120 και στη συνέχεια μικρή αύξηση για την ισχύ Q144. Για την περίπτωση του εξώστη P400 παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης του CO με την αύξηση της ισχύος. Στο Σχήμα 4.48 (δεξιά) παρατηρείται ότι με την αύξηση της ισχύος ο βαθμός απόδοσης της καύσης μειώνεται για τους δύο εξεταζόμενους εξώστες. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι όσο αυξάνεται η παροχή καυσίμου, τόσο πιο υποαεριζόμενη γίνεται η φωτιά εντός του πυροδιαμερίσματος. Το οξυγόνο δεν επαρκεί ώστε να επιτευχθεί πλήρης καύση με αποτέλεσμα να αποκλίνει κατά πολύ από τις στοιχειομετρικές συνθήκες. Συνεπώς, με την προσθήκη ολοένα και περισσότερου καυσίμου, η ατελής καύση οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης.

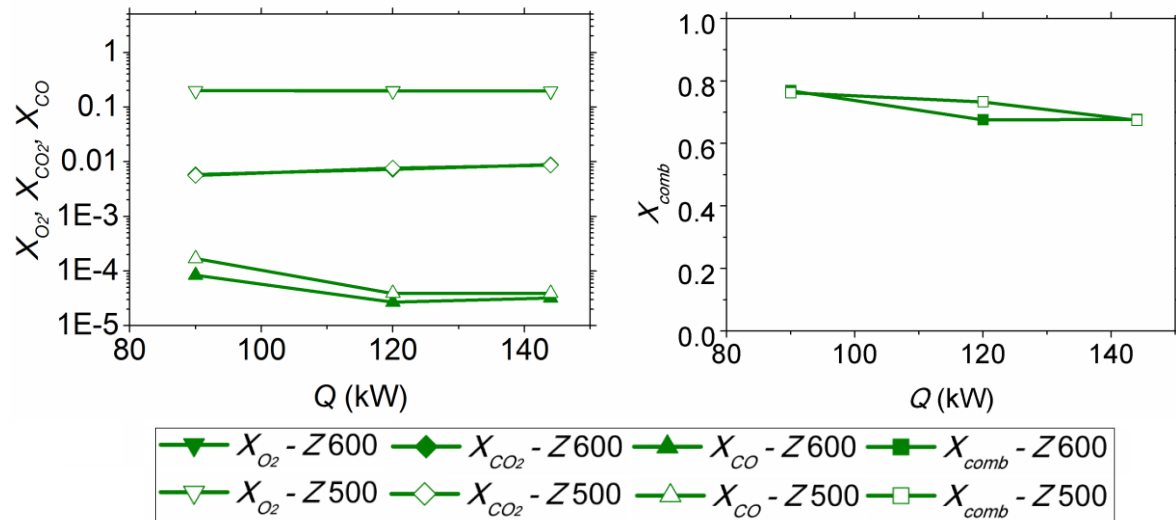


Σχήμα 7.48: Συγκεντρώσεις αερίων (αριστερά) και βαθμός απόδοσης καύσης (δεξιά) συναρτήσει της ισχύος για σταθερό ύψος εξώστη 600 mm και δύο βάθη εξώστη

7.9.3 Επίδραση ύψους εξώστη

Στο Σχήμα 7.49 (αριστερά) απεικονίζεται η επίδραση του ύψους του εξώστη στις συγκεντρώσεις των αερίων προϊόντων της καύσης συναρτήσει της ισχύος της φωτιάς. Οι συγκεντρώσεις του O₂ και του CO₂ είναι πανομοιότυπες για τα δύο ύψη του εξώστη και οι καμπύλες ταυτίζονται απόλυτα. Όσον αφορά τη συγκέντρωση του CO, παρατηρείται ότι για την περίπτωση του εξώστη Z500 είναι υψηλότερες για όλα τα επίπεδα ισχύος. Στο Σχήμα 7.49 (δεξιά) παρουσιάζονται συγκριτικά οι βαθμοί απόδοσης συναρτήσει της ισχύος για τις δύο περιπτώσεις ύψους εξώστη. Για τα επίπεδα ισχύος Q90 και Q144 οι βαθμοί απόδοσης καύσης για τις δύο περιπτώσεις είναι ίσοι. Μόνο για την ισχύ Q120 φαίνεται ότι ο βαθμός

απόδοσης καύσης είναι ελαφρώς υψηλότερος για την περίπτωση του εξώστη που τοποθετείται στο ύψος του ανοίγματος (Z500).



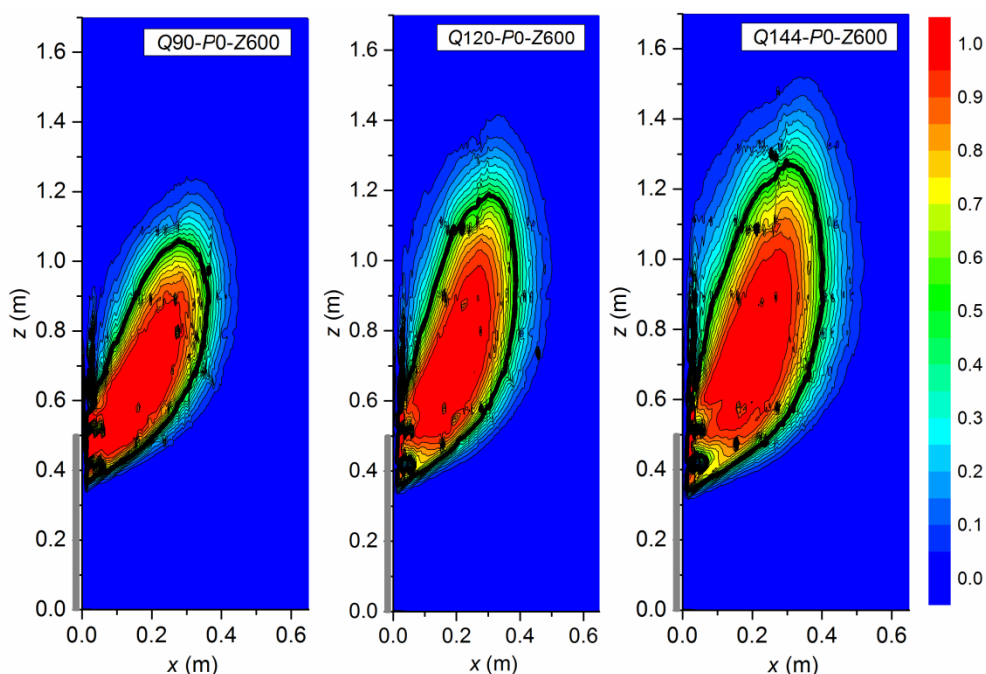
Σχήμα 7.49: Συγκεντρώσεις αερίων (αριστερά) και βαθμός απόδοσης καύσης (δεξιά) συναρτήσει της ισχύος για σταθερό βάθος εξώστη 200 mm και δύο ύψη εξώστη

8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ

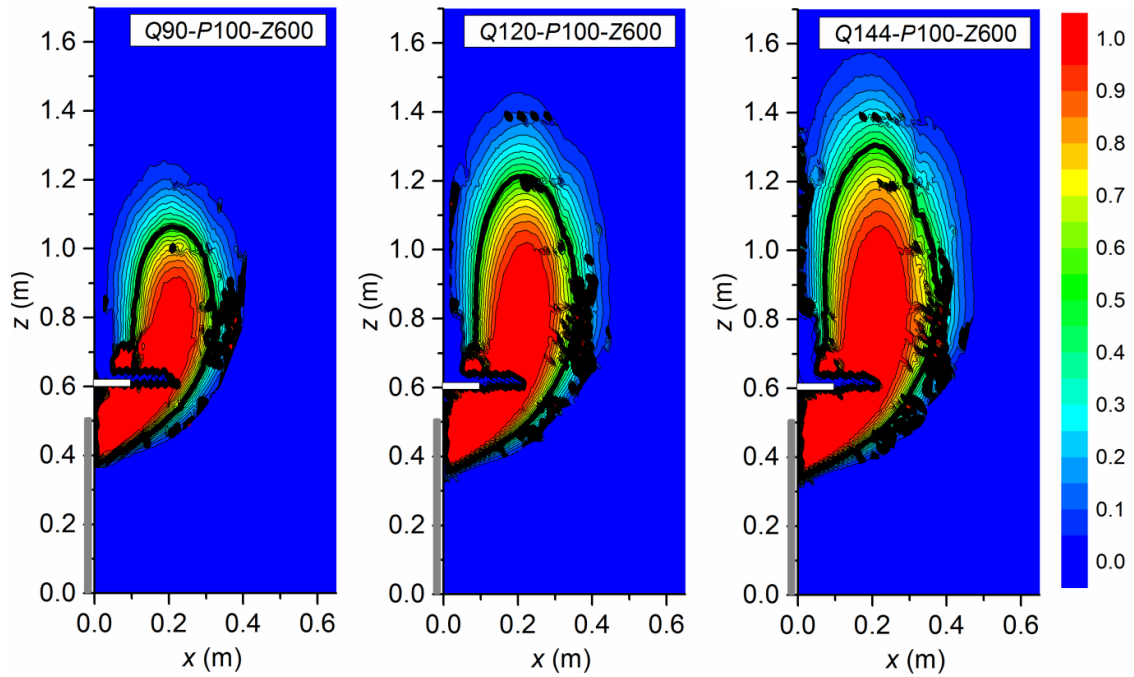
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνας (image processing), η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην Ενότητα 5.3, με κύριο στόχο τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ΦΕΑ (ύψος, προέκταση και πλάτος). Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με θεωρητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις χρήσεις των εξισώσεων του Ευρωκώδικα (Eurocode 1, Annex B).

8.1 Ύψος και προέκταση εξερχόμενης φλόγας

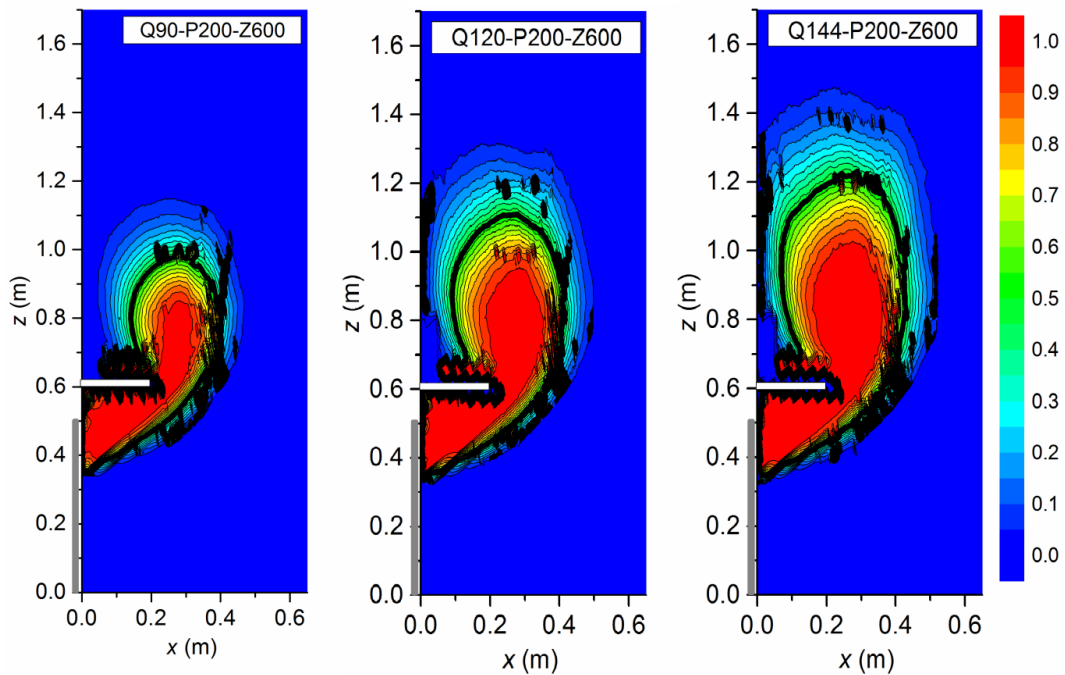
Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνας των βίντεο μονίμων συνθηκών πλάγιας όψης, από τα οποία υπολογίζεται το ύψος και η προέκταση της εξερχόμενης φλόγας. Οι μαύρες γραμμές των Σχημάτων αντιστοιχούν στην ισοπιθανοτική καμπύλη 50%, η οποία αναπαριστά τον άξονα της φλόγας.



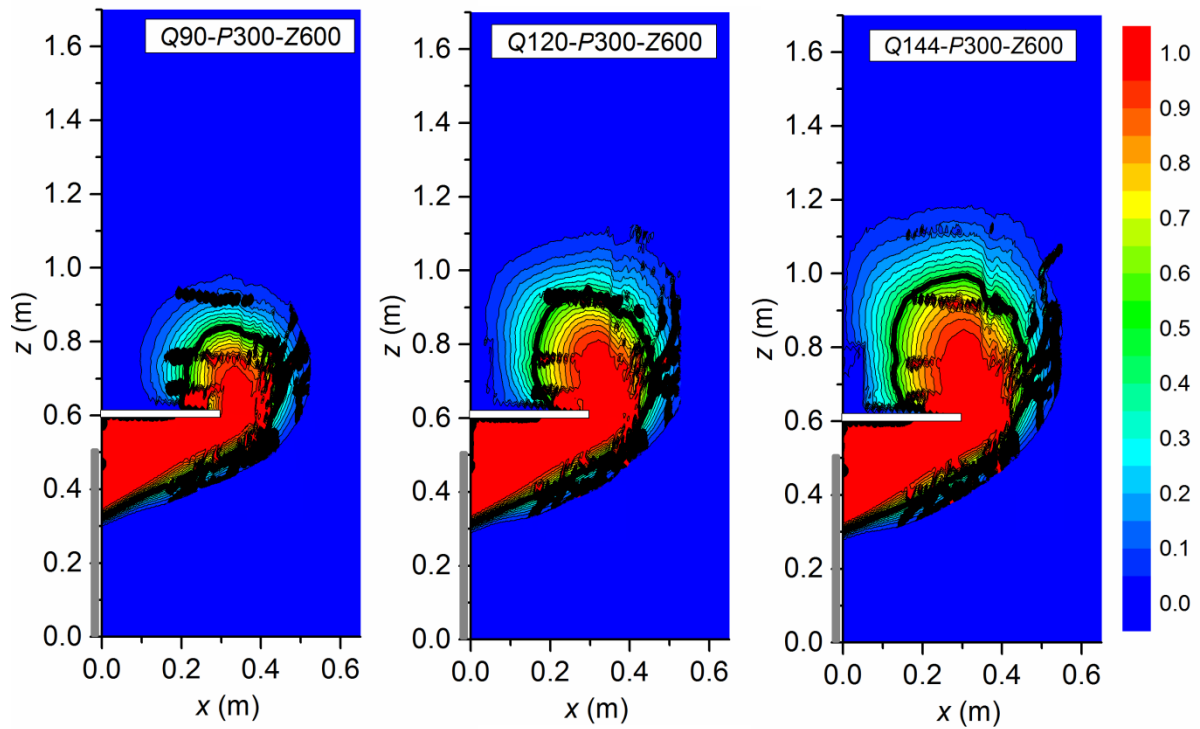
Σχήμα 8.1: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση χωρίς εξώση για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



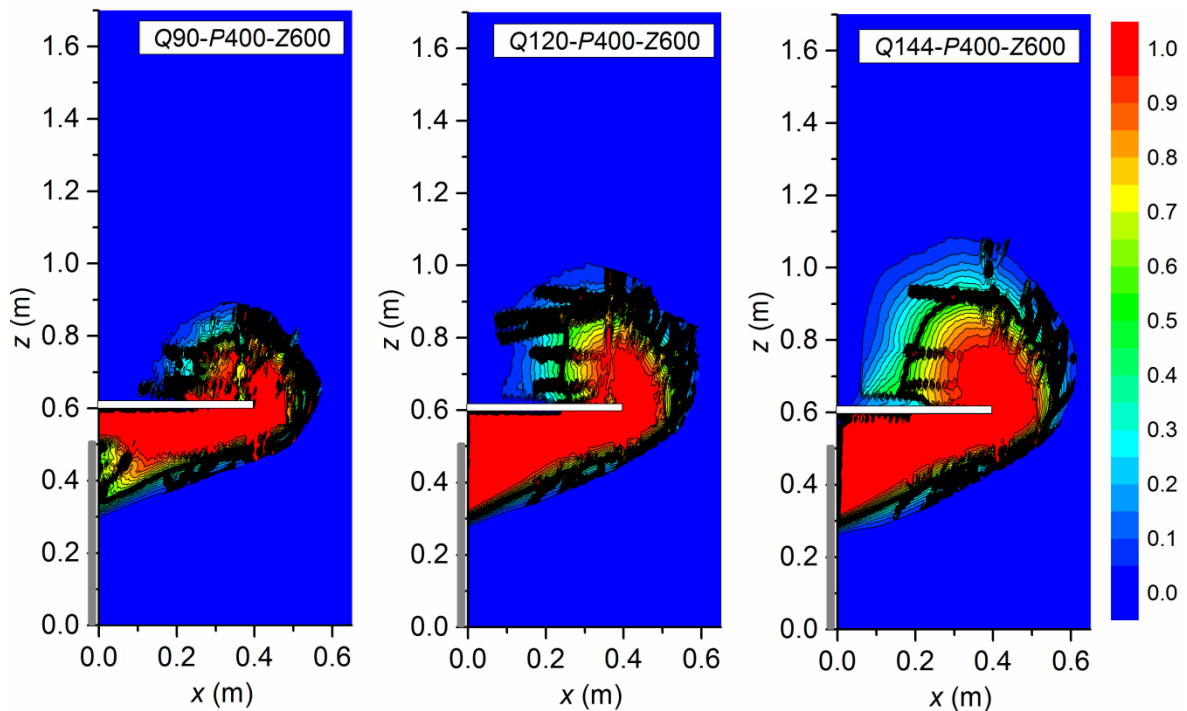
Σχήμα 8.2: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 100 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



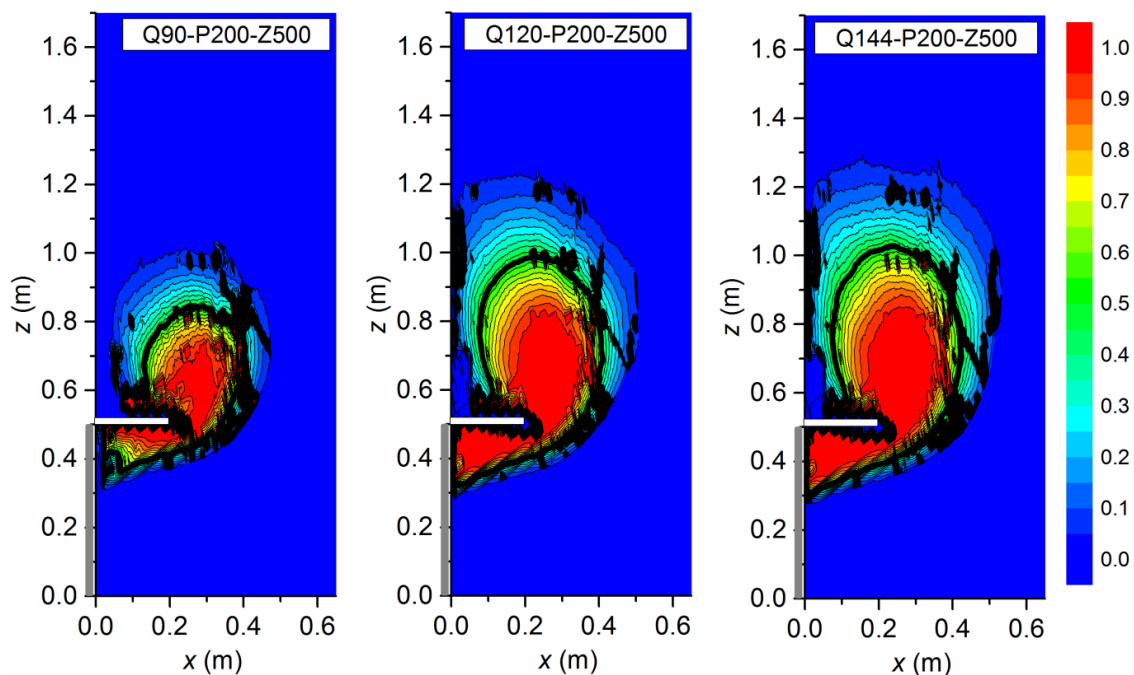
Σχήμα 8.3: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



Σχήμα 8.4: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 300 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



Σχήμα 8.5: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 400 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)

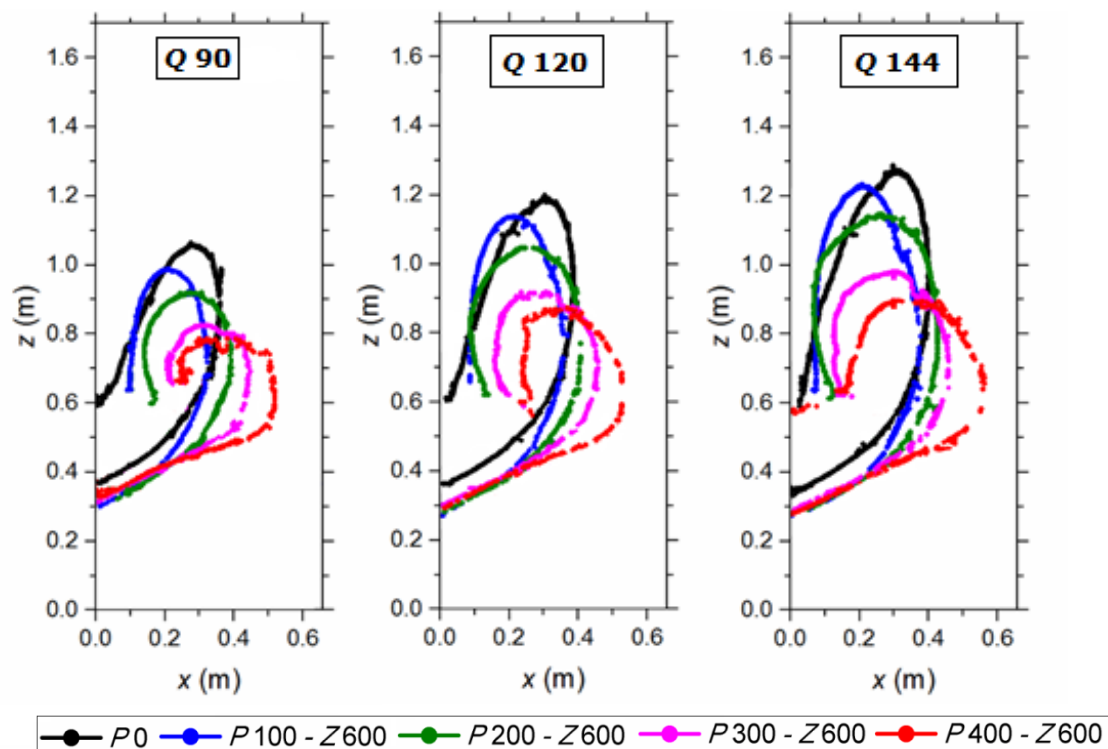


Σχήμα 8.6: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm, σε ύψος 500 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)

Από τα Σχήματα 8.1-8.6 παρατηρείται ποιοτικά ότι όσο μειώνεται το βάθος του εξώστη τόσο η φλόγα τείνει να προσκολληθεί στην επιφάνεια του εξωτερικού τοιχώματος, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις έρευνες των Yokoi (1960) και Suzuki et al. (2000). Επίσης, είναι εμφανές ότι με την αύξηση του βάθους εξώστη το ύψος της φλόγας μειώνεται και η οριζόντια απόστασή της από την ακμή του εξώστη μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση του βάθους. Οι παρατηρήσεις αυτές έρχονται σε μερική συμφωνία με την έρευνα των Suzuki et al. (2000), οι οποίοι αναφέρουν ότι με την αύξηση του βάθους μειώνεται το κατακόρυφο ύψος της φλόγας, ενώ η οριζόντια απόστασή της από την ακμή του εξώστη είναι ανεξάρτητη του βάθους εξώστη. Η μείωση του ύψους της φλόγας με την αύξηση του βάθους εξώστη παρατηρήθηκε επίσης από τους An et al. (2017). Σύμφωνα με τους Ohmiya et al. (2001), η θέση του άξονα του πλουμίου κάτω από τον εξώστη παραμένει σχεδόν αμετάβλητη ανεξάρτητα από το αν υπάρχει εξώστης ή όχι. Μόλις το πλούμιο προσκρούσει πάνω στον εξώστη, η ζώνη υψηλών θερμοκρασιών επεκτείνεται πλευρικά κατά το πλάτος του εξώστη. Εξετάζοντας τα Σχήματα 8.1-8.3 και 8.6 παρατηρείται πλήρης συμφωνία με τα αποτελέσματα της έρευνας των Ohmiya et al. (2001). Στα Σχήματα 8.4 και 8.5, ο κύριος άξονας της φλόγας παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς εξώστη.

Στο Σχήμα 8.7 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι ισοπιθανοτικές καμπύλες 50% για όλα τα βάθη εξώστη ύψους 600 mm. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της ισχύος αυξάνεται τόσο το ύψος όσο και η προέκταση της φλόγας για όλα τα βάθη εξώστη. Για σταθερή ισχύ παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους εξώστη αυξάνεται η προέκταση της φλόγας και μειώνεται το ύψος της. Δεδομένου ότι το ύψος εξώστη ορίζεται ως η διαφορά του ελάχιστου από το μέγιστο ύψος φλόγας παρατηρείται ότι παρόλο που για την περίπτωση P0 η κορυφή της φλόγας βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο από αυτήν του εξώστη P100, το ίδιο συμβαίνει και για τη βάση της. Συνεπώς, το μεγαλύτερο ύψος φλόγας αποδίδεται στον εξώστη P100 και η μέγιστη προέκταση της φλόγας στον εξώστη P400. Επίσης, είναι εμφανές ότι σε αντίθεση με την περίπτωση απουσίας εξώστη, για όλες τις

υπόλοιπες περιπτώσεις οι ισοπιθανοτικές καμπύλες δεν καταλήγουν στο τοίχωμα, γεγονός που αποδεικνύει ότι με την προσθήκη εξώστη παρεμποδίζεται η προσκόλληση της φλόγας στο τοίχωμα. Τέλος διαπιστώνεται ότι η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια για τα μικρά βάθη εξώστη ($P100$ και $P200$) όπως επίσης και για τα μεγάλα βάθη εξώστη ($P300$ και $P400$).



Σχήμα 8.7: Απεικόνιση των ισοπιθανοτικών καμπυλών 50% για όλα τα βάθη εξώστη σταθερού ύψους 600 mm και επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)

Επισημαίνεται ότι για τον υπολογισμό του ύψους και της προέκτασης της φλόγας με τις σχέσεις του Eurocode χρησιμοποιήθηκαν οι Εξισώσεις (3.4) και (3.8). Όπως διακρίνεται από τα Σχήματα 8.1-8.6, το ύψος της φλόγας προκύπτει ως η διαφορά του ελάχιστου από το μέγιστο ύψος της ισοπιθανοτικής καμπύλης 50%, η οποία αντιστοιχεί στον κεντρικό άξονα της φλόγας. Βάσει του Σχήματος 3.1 παρατηρείται ότι το ύψος της φλόγας L_L μετράται από το ανώφλι του ανοίγματος. Επομένως, για να εκτιμηθεί το συνολικό ύψος της φλόγας θα πρέπει να προστεθεί το ύψος από τον άξονα της φωτιάς έως το ανώφλι. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (δεξιά), το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση της πόρτας, το ύψος αυτό είναι $h_{eq}/3$. Με άλλα λόγια, το συνολικό ύψος της φλόγας ισούται με την προβολή του μήκους φλόγας L_f στον κατακόρυφο άξονα z . Όσον αφορά την προέκταση της φλόγας, πειραματικά προκύπτει ως η διαφορά του ελάχιστου από το μέγιστο μήκος της ισοπιθανοτικής καμπύλης 50% κατά τον άξονα x . Για τα πειράματα που διεξήχθησαν, η ελάχιστη οριζόντια απόσταση ήταν η μηδενική. (Σχήματα 8.1-8.6). Βάσει του Σχήματος 3.1 (δεξιά) παρατηρείται ότι η προέκταση της φλόγας L_H μετράται από το τοίχωμα έως τον κεντρικό άξονα της φλόγας. Επομένως, ο θεωρητικός τρόπος μέτρησης της προ-έκτασης φλόγας ταυτίζεται με τον πειραματικό. Έτσι, το συνολικό ύψος και προέκτα-ση της φλόγας υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (8.1) και (8.2):

$$L_{L,tot} = \max \left\{ 0; h_{eq} \left[2.37 \left(\frac{\dot{Q}}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right] - P \right\} + h_{eq} / 3 \quad (8.1)$$

$$L_H = 0.3h_{eq} (h_{eq} / w_t)^{0.54} + P \quad (8.2)$$

Τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού του ύψους φλόγας για όλες τις δοκιμές με τα σχετικά σφάλματά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού του ύψους φλόγας για όλες τις δοκιμές με τα σχετικά σφάλματά τους

Δοκιμή	Ύψος φλόγας $L_{L,tot}$ (m) για $\rho_{g,avg}$			Ύψος φλόγας $L_{L,tot}$ (m) για $\rho_{g,top}$		
	Πειραματικό	Ευρωκώδικας	Σφάλμα (%)	Πειραματικό	Ευρωκώδικας	Σφάλμα (%)
Q90-P0	0.6920	0.7171	3.63	0.6920	0.8560	23.69
Q120-P0	0.8390	0.8922	6.34	0.8390	1.0332	23.15
Q144-P0	0.9360	1.0104	7.95	0.9360	1.1437	22.19
Q90-P100-Z600	0.6930	0.6063	-12.51	0.6930	0.7197	3.85
Q120-P100-Z600	0.8476	0.7597	-10.37	0.8476	0.8785	3.64
Q144-P100-Z600	0.9696	0.9170	-5.42	0.9696	1.0378	7.03
Q90-P200-Z600	0.6287	0.4454	-29.15	0.6287	0.5741	-8.68
Q120-P200-Z600	0.7763	0.5888	-24.16	0.7763	0.7176	-7.56
Q144-P200-Z600	0.8741	0.7562	-13.49	0.8741	0.8800	0.67
Q90-P300-Z600	0.5146	0.3474	-32.49	0.5146	0.4042	-21.45
Q120-P300-Z600	0.6187	0.5023	-18.82	0.6187	0.5680	-8.20
Q144-P300-Z600	0.6908	0.5267	-23.75	0.6908	0.5852	-15.29
Q90-P400-Z600	0.4534	0.1849	-59.22	0.4534	0.2919	-35.62
Q120-P400-Z600	0.5682	0.2647	-53.41	0.5682	0.3904	-31.30
Q144-P400-Z600	0.6279	0.4147	-33.95	0.6279	0.5427	-13.57
Q90-P200-Z500	0.5053	0.3571	-29.34	0.5053	0.4723	-6.52
Q120-P200-Z500	0.6848	0.6123	-10.58	0.6848	0.7315	6.82
Q144-P200-Z500	0.7241	0.7257	0.22	0.7241	0.8602	18.80

Στην Εξίσωση (8.1) περιλαμβάνεται ο όρος της πυκνότητας των καυσαερίων ρ_g . Στον Ευρωκώδικα αναφέρεται ότι το μέγεθος αυτό αντιστοιχεί στην πυκνότητα των καυσαερίων στο εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος, χωρίς ωστόσο να διευκρινίζεται επακριβώς η θέση μέτρησης της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό, η Εξίσωση (8.1) εφαρμόστηκε για δύο διαφορετικές τιμές πυκνότητας καυσαερίων. Η 1^η ($\rho_{g,avg}$) προέκυψε από τον μέσο όρο όλων των μετρούμενων θερμοκρασιών του πυροδιαμερίσματος και η 2^η ($\rho_{g,top}$) προέκυψε από τον μέσο όρο των μετρούμενων θερμοκρασιών στο άνω τμήμα του πυροδιαμερίσματος ($z = 400, 500, 570$ mm). Σύμφωνα με την παράγραφο B.4.1 (13) του Ευρωκώδικα, η Εξίσωση (8.1) εφαρμόζεται για την περίπτωση κατά την οποία ο εξώστης βρίσκεται στο επίπεδο του ανωφλίου του ανοίγματος (βλ. Σχήμα 3.2). Σε αντιστοιχία με την παρούσα εργασία, οι δοκιμές για τις οποίες υπάρχει άμεση

εφαρμογή των θεωρητικών σχέσεων είναι οι Q90-P0, Q120-P0, Q144-P0, Q90-P200-Z500, Q120-P200-Z500 και Q144-P200-Z500. Ωστόσο, η Εξίσωση (8.1) εφαρμόστηκε για όλες τις πειραματικές δοκιμές.

Από τον Πίνακα 8.1 παρατηρείται ότι για την πυκνότητα $\rho_{g,avg}$ για τις περιπτώσεις P0 και P200-Z500 το σχετικό σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων είναι πολύ μικρό, πλην της δοκιμής Q90-P200-Z500. Αυτό σημαίνει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον Ευρωκώδικα σε πολύ μεγάλο βαθμό. Για τους εξώστες οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε ύψος Z600 παρατηρείται ότι για την περίπτωση του εξώστη P100 το σχετικό σφάλμα λαμβάνει χαμηλές τιμές για όλα τα επίπεδα ισχύος, για τις περιπτώσεις P200 και P300 το σχετικό σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 13% και 29% ενώ για την περίπτωση P400 λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές (34-59%). Είναι εμφανές ότι για τις περιπτώσεις τοποθέτησης του εξώστη σε ύψος 600 mm οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα δεν είναι συντηρητικές, καθότι οι θεωρητικές τιμές είναι μικρότερες από τις πειραματικές (αρνητικά σφάλματα). Για την πυκνότητα $\rho_{g,top}$ παρατηρείται ότι για την περίπτωση P0 το σχετικό σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων αυξάνεται για όλα επίπεδα ισχύος ενώ για την περίπτωση P200-Z500 μειώνεται πλην της δοκιμής Q144-P200-Z500. Για τις περιπτώσεις P100 και P200 τα σχετικά σφάλματα λαμβάνουν πολύ μικρές τιμές (0-9%) για όλα τα επίπεδα ισχύος. Για τις περιπτώσεις P300 και P400 οι τιμές των σφαλμάτων μειώνονται αλλά εξακολουθούν να κυμαίνονται σε υψηλά ποσοστά (8-36%).

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού της προέκτασης της φλόγας για όλες τις δοκιμές με τα σχετικά σφάλματά τους.

Πίνακας 8.2: Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού της προέκτασης της φλόγας για όλες τις δοκιμές με τα σχετικά σφάλματά τους

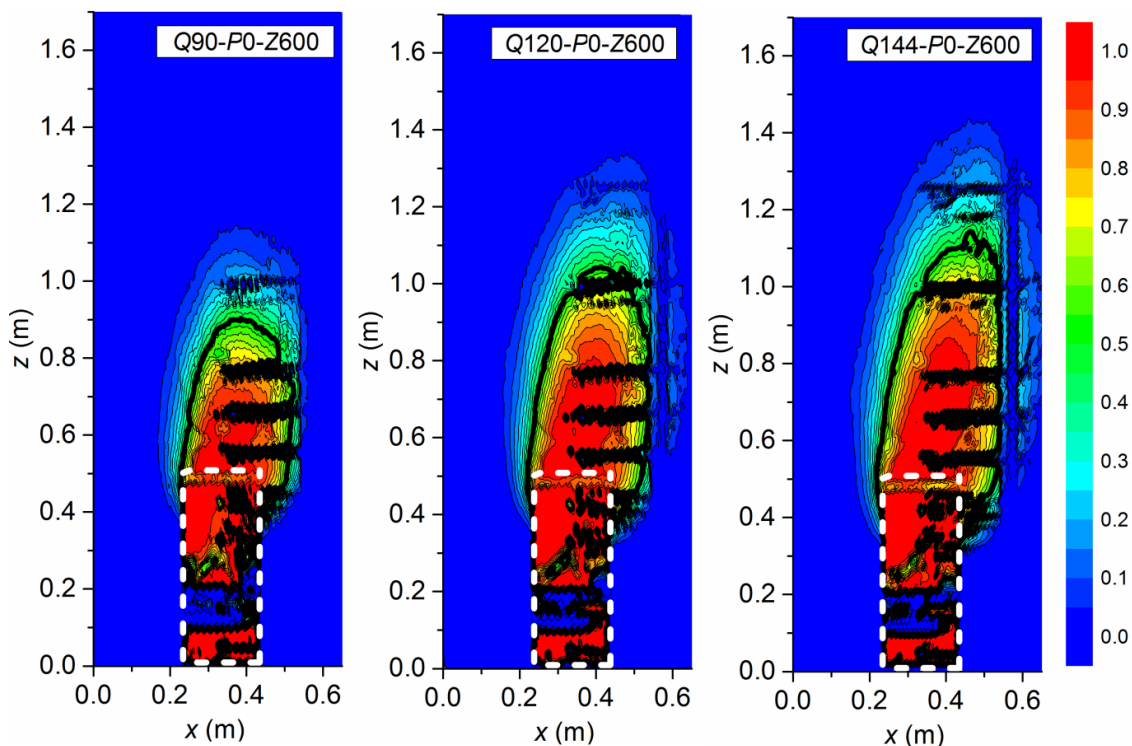
Δοκιμή	Προέκταση φλόγας $L_H(m)$		
	Πειραματική	Θεωρητική	Σφάλμα (%)
Q90-P0	0.3590	0.2460	-31.47
Q120-P0	0.3752	0.2460	-34.43
Q144-P0	0.3902	0.2460	-36.95
Q90-P100-Z600	0.3220	0.3460	7.46
Q120-P100-Z600	0.3570	0.3460	-3.07
Q144-P100-Z600	0.3728	0.3460	-7.18
Q90-P200-Z600	0.3955	0.4460	12.77
Q120-P200-Z600	0.4130	0.4460	7.80
Q144-P200-Z600	0.4270	0.4460	4.46
Q90-P300-Z600	0.4500	0.5460	21.34
Q120-P300-Z600	0.4554	0.5460	19.90
Q144-P300-Z600	0.4572	0.5460	19.43
Q90-P400-Z600	0.5220	0.6460	23.76
Q120-P400-Z600	0.5274	0.6460	22.49
Q144-P400-Z600	0.5670	0.6460	13.94
Q90-P200-Z500	0.3893	0.4460	14.57
Q120-P200-Z500	0.4063	0.4460	9.78
Q144-P200-Z500	0.4302	0.4460	3.68

Από τον Πίνακα 8.2 παρατηρείται ότι τα μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα παρουσιάζονται για την περίπτωση $P0$ (31.5-37%) ενώ μεγάλες αποκλίσεις εμφανίζουν οι περιπτώσεις $P300$ (19-21%) και $P400$ (14-24%). Για όλες τις υπόλοιπες δοκιμές τα σχετικά σφάλματα κυμαίνονται σε χαμηλά ποσοστά (3-15%). Γενικά συμπεραίνεται ότι για τις περιπτώσεις εξωστών μικρού βάθους ($P100$, $P200$) υπάρχει σχετικά καλή σύγκλιση των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Επίσης, οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα όσον αφορά την προέκταση της φλόγας είναι συντηρητικές.

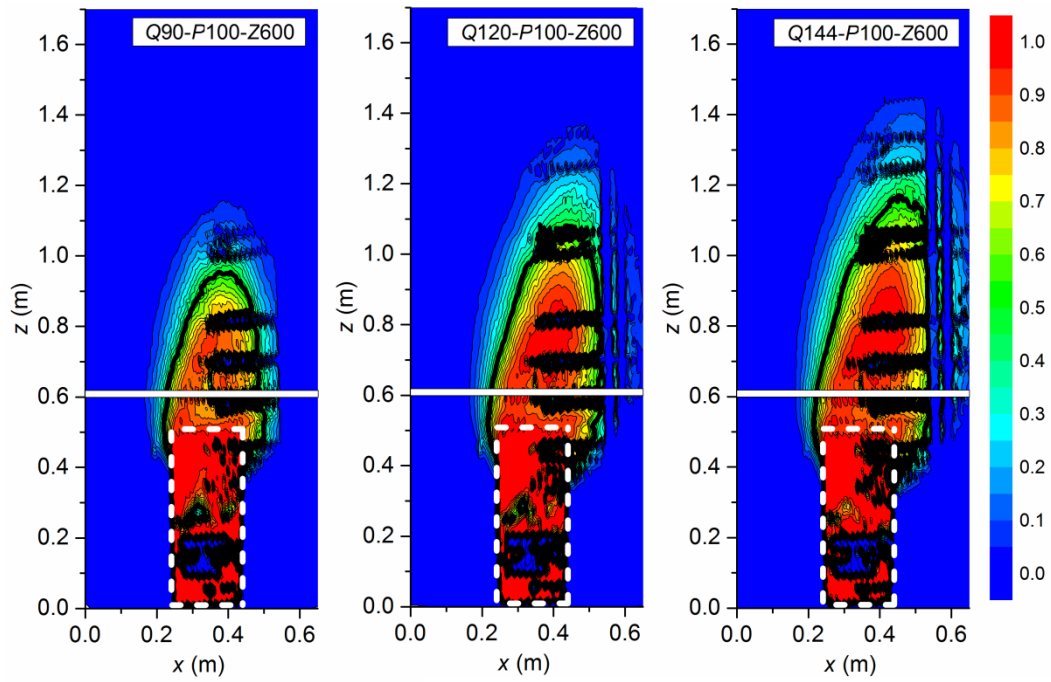
Βάσει των Lu et al. (2017), όσο αυξάνεται το ύψος του εξώστη από το ανώφλι, το μήκος της προέκτασης της φλόγας μειώνεται, γεγονός το οποίο δεν επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι προεκτάσεις φλόγας για τις περιπτώσεις $P200$ - $Z500$ και $P200$ - $Z600$ είναι σχεδόν ίσες.

8.2 Πλάτος εξερχόμενης φλόγας

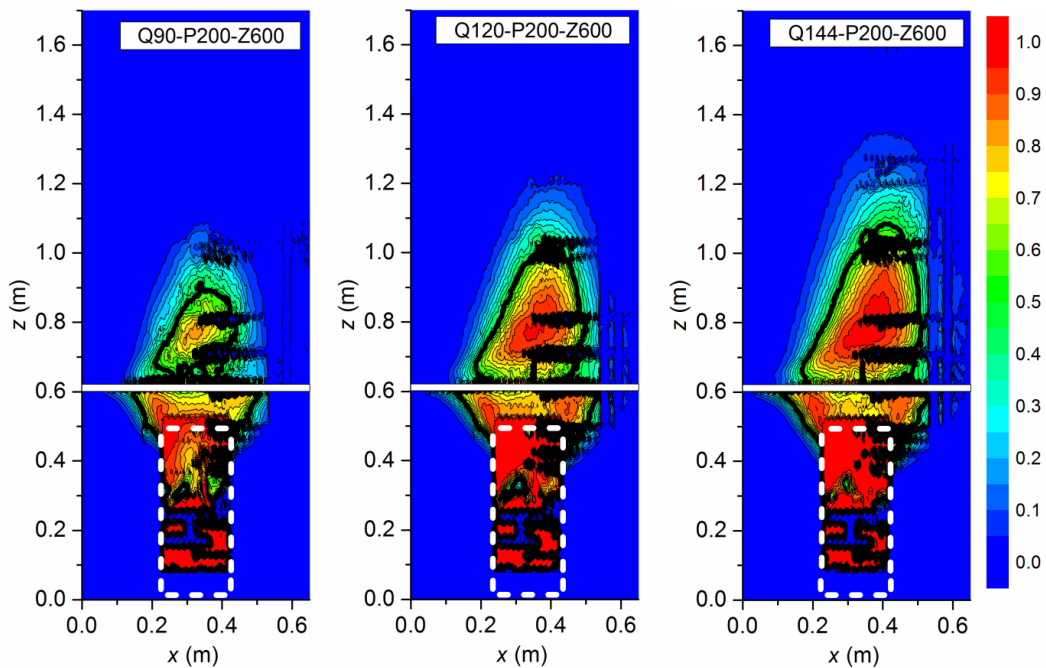
Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνας των βίντεο μόνιμων συνθηκών της εμπρόσθιας όψης, από τα οποία υπολογίζεται το πλάτος της εξερχόμενης φλόγας. Οι μαύρες γραμμές των Σχημάτων αντιστοιχούν στην ισοπιθανοτική καμπύλη 50%, η οποία αναπαριστά τα όρια της φλόγας.



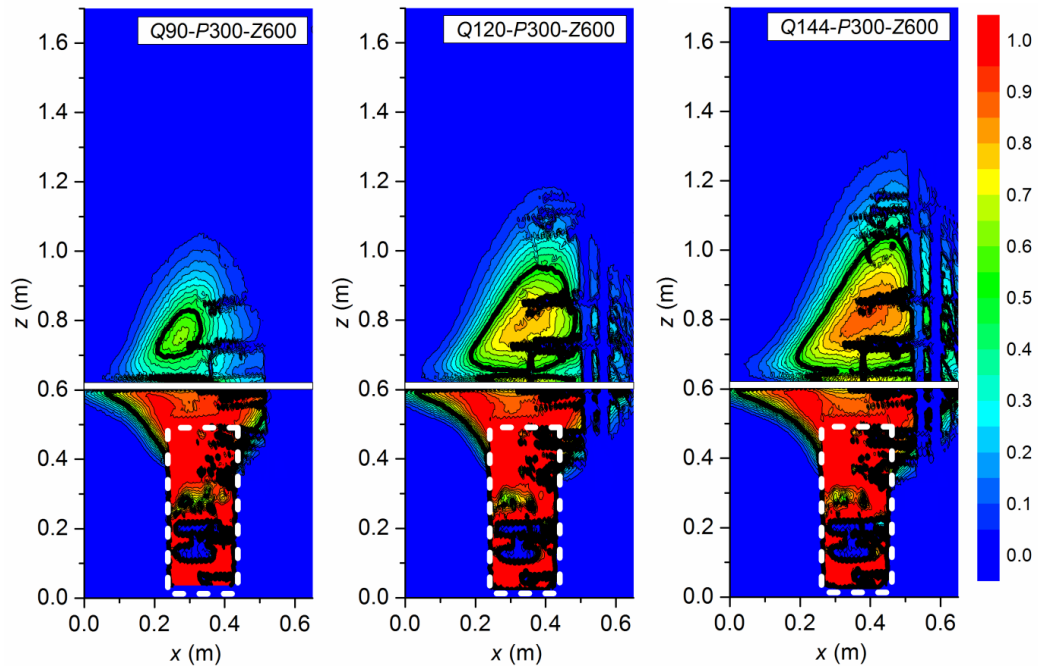
Σχήμα 8.8: Πλάτος της φλόγας για την περίπτωση χωρίς εξώστη για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



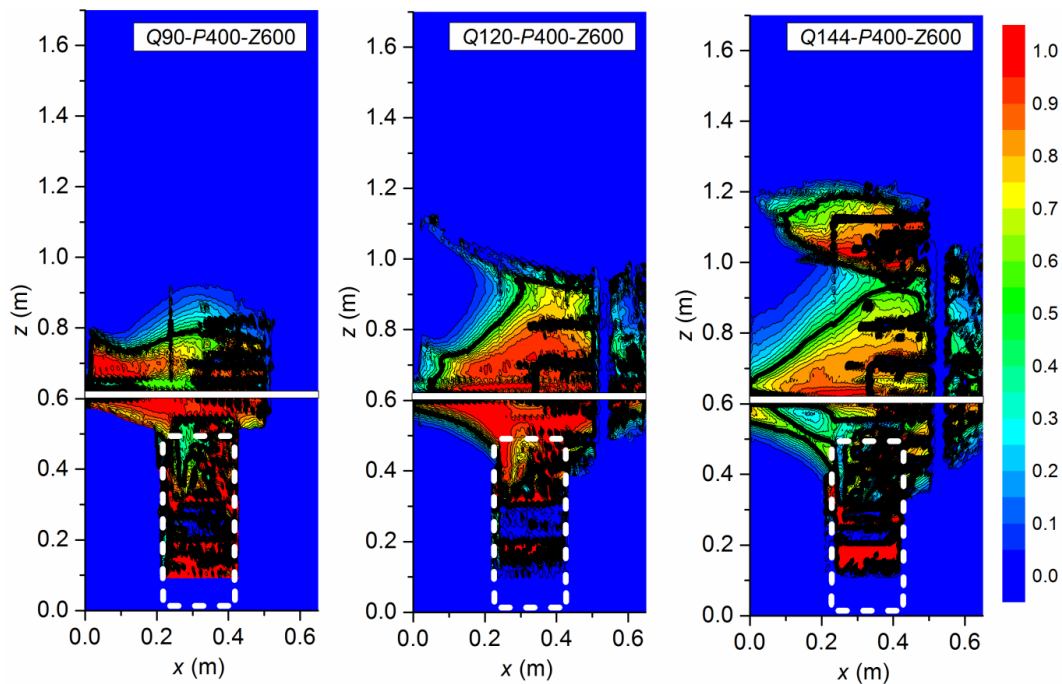
Σχήμα 8.9: Πλάτος της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 100 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



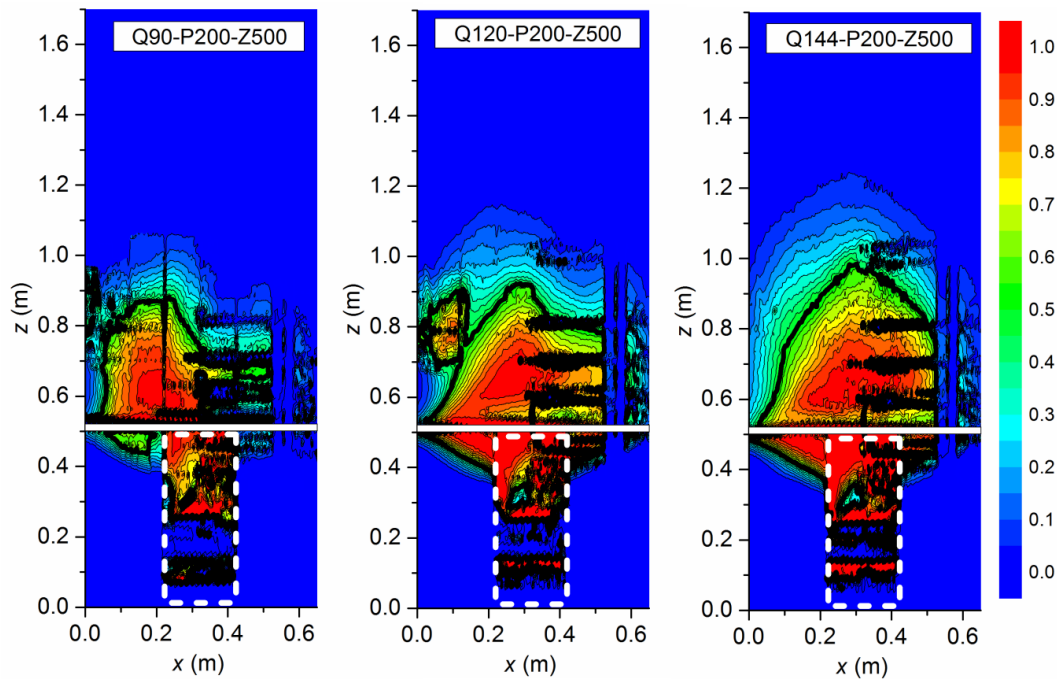
Σχήμα 8.10: Πλάτος της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



Σχήμα 8.11: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 300 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



Σχήμα 8.12: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 400 mm, σε ύψος 600 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)



Σχήμα 8.13: Ύψος και προέκταση της φλόγας για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm, σε ύψος 500 mm για επίπεδο ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά)

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού του πλάτους φλόγας για όλες τις δοκιμές.

Πίνακας 8.3: Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμού του πλάτους φλόγας για όλες τις δοκιμές με τα σχετικά σφάλματά τους

Δοκιμή	Πλάτος φλόγας (m)		
	Πειραματικό	Ευρωκώδικας	Σφάλμα (%)
Q90-P0	0.2984	0.2000	-32.98
Q120-P0	0.3188	0.2000	-37.264
Q144-P0	0.3245	0.2000	-38.37
Q90-P100-Z600	0.2867	0.2000	-30.24
Q120-P100-Z600	0.3196	0.2000	-37.42
Q144-P100-Z600	0.3255	0.2000	-38.56
Q90-P200-Z600	0.3721	0.2000	-46.25
Q120-P200-Z600	0.4130	0.2000	-51.57
Q144-P200-Z600	0.4232	0.2000	-52.74
Q90-P300-Z600	0.5376	0.2000	-62.80
Q120-P300-Z600	0.5984	0.2000	-66.58
Q144-P300-Z600	0.6394	0.2000	-68.72
Q90-P400-Z600	0.7141	0.2000	-71.99
Q120-P400-Z600	0.8209	0.2000	-75.64
Q144-P400-Z600	0.8564	0.2000	-76.65
Q90-P200-Z500	0.4138	0.2000	-51.67
Q120-P200-Z500	0.5922	0.2000	-66.23
Q144-P200-Z500	0.5951	0.2000	-66.39

Βάσει της Εξίσωσης (3.11) διαπιστώνεται ότι σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα το πλάτος της εξερχόμενης φλόγας ισούται με το πλάτος του ανοίγματος για την

περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει εξώστης. Ωστόσο, δεν υπάρχει διαφοροποίηση για την περίπτωση κατά την οποία υπάρχει κάποια οριζόντια προεξοχή. Από τον Πίνακα 8.3 είναι εμφανές ότι η συνθήκη που ορίζεται από τον Ευρωκώδικα δεν ισχύει, καθώς τα σφάλματα λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές (33-77%). Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι το πλάτος της φλόγας αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος για σταθερό βάθος εξώστη. Επίσης, για σταθερό επίπεδο ισχύος το πλάτος της φλόγας αυξάνεται όταν αυξάνεται το βάθος του εξώστη. Συνεπώς το μέγιστο πλάτος φλόγας παρατηρείται για τη δοκιμή Q144-P400-Z600, κατά την οποία είναι 4.3 φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του ανοίγματος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για την περίπτωση του μέγιστου βάθους εξώστη το πλάτος της φλόγας είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της πρόσοψης και κατ' επέκταση του εξώστη. Είναι εμφανές ότι για όλες τις πειραματικές δοκιμές οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα είναι μη συντηρητικές, καθότι οι θεωρητικές τιμές είναι πολύ μικρότερες από τις πειραματικές (αρνητικά σφάλματα).

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επίδραση του εξώστη στην κατακόρυφη διάδοση της φωτιάς εξερχόμενης από άνοιγμα από όροφο σε όροφο έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα τόσο σε πειραματικό όσο και θεωρητικό επίπεδο. Η ενίσχυση της πυροπροστασίας των κτιρίων και η διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής είναι ζητήματα μείζονος σημασίας. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη πολλά σημεία που δεν έχουν καλυφθεί επαρκώς από τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ερευνάται πειραματικά η επίδραση του εξώστη στα ροϊκά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά φωτιάς εξερχόμενης από άνοιγμα (πόρτα) σε διάταξη δωματίου – πρόσοψης υπό κλίμακα. Εντός του δωματίου και συγκεκριμένα στο κέντρο του, τοποθετήθηκε σε σταθερό ύψος πορώδης καυστήρας, ο οποίος διοχέτευε μεθάνιο καθαρότητας 99.95%. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών χωρίς εξώστη και στη συνέχεια τοποθετήθηκε εξώστης μεταβλητού βάθους και σε δύο διαφορετικά ύψη από τη βάση της πόρτας.

Για μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη διερευνήθηκε η επίδραση τριών παραγόντων στα ροϊκά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας. Οι παράγοντες αυτοί ήταν:

- Η προέκταση (βάθος) του εξώστη
- Η ισχύς της φωτιάς
- Το ύψος στο οποίο τοποθετήθηκε ο εξώστης

Χρησιμοποιώντας τέσσερα βάθη εξώστη, τρία επίπεδα ισχύος και δύο ύψη εξώστη προέκυψαν συνολικά 18 πειραματικές δοκιμές. Στόχος ήταν να διερευνηθεί η μεταβολή των ακόλουθων ροϊκών χαρακτηριστικών της φωτιάς, τα οποία μετρούνταν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων:

- Θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος
- Θερμοκρασίες στο άνοιγμα
- Ταχύτητες στο άνοιγμα
- Κατακόρυφες ταχύτητες στους σωλήνες Pitot-Static
- Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς
- Θερμοκρασίες στην πρόσοψη
- Θερμορροή στην πρόσοψη
- Θερμοκρασίες εξώστη
- Συγκεντρώσεις αερίων
- Βαθμός απόδοσης καύσης

Παράλληλα, προσδιορίστηκαν τα ακόλουθα τρία γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας με τη χρήση επεξεργασίας εικόνας (image processing) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες σχέσεις υπολογισμού του Ευρωκώδικα:

- Ύψος φλόγας
- Προέκταση φλόγας
- Πλάτος φλόγας

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 109 θερμοστοιχεία, 4 δικατευθυντικοί μετρητές ταχύτητας, 2 σωλήνες Pitot- Static και 3 μετρητές ροής θερμότητας.

Αξιολογώντας τα Σχήματα του Κεφαλαίου 7 εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Για τις θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος:

- Η αύξηση του βάθους εξώστη επιφέρει μείωση της μέσης θερμοκρασίας του άνω τμήματος του πυροδιαμερίσματος (Σχήμα 7.4, δεξιά).
- Δεν υπάρχει σαφής επίδραση του βάθους του εξώστη στην καθ' ύψος μεταβολή των θερμοκρασιών εντός του πυροδιαμερίσματος. Στη θέση $x = -267.5$ mm οι υψηλότερες καθ' ύψος θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν για την περίπτωση του εξώστη P300 ενώ οι χαμηλότερες για την περίπτωση του εξώστη P400 (Σχήμα 7.3).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών εντός του πυροδιαμερίσματος τόσο στο εμπρόσθιο ($x = -267.5$ mm) όσο και στο οπίσθιο ($x = -717.5$ mm) τμήμα του (Σχήματα 7.5 και 7.6).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πυροδιαμερίσματος και της μέσης θερμοκρασίας του άνω τμήματος του πυροδιαμερίσματος (Σχήματα 7.7 και 7.8).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση αυξάνονται οι θερμοκρασίες εντός του πυροδιαμερίσματος τόσο στο εμπρόσθιο ($x = -267.5$ mm) όσο και στο οπίσθιο ($x = -717.5$ mm) τμήμα του (Σχήμα 7.9).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πυροδιαμερίσματος και της μέσης θερμοκρασίας του άνω τμήματος του πυροδιαμερίσματος (Σχήμα 7.10).

2. Για τις θερμοκρασίες στο άνοιγμα:

- Δεν υπάρχει σαφής επίδραση του βάθους του εξώστη στην καθ' ύψος μεταβολή των θερμοκρασιών στο άνοιγμα. Οι υψηλότερες καθ' ύψος θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν για την περίπτωση του εξώστη P300 ενώ οι χαμηλότερες για την περίπτωση του εξώστη P400 (Σχήμα 7.11).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών στο άνοιγμα (Σχήμα 7.12).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών στο άνοιγμα (Σχήμα 7.13).

3. Για τις ταχύτητες στο άνοιγμα:

- Δεν υπάρχει σαφής επίδραση του βάθους του εξώστη στην καθ' ύψος μεταβολή των ταχυτήτων στο άνοιγμα (Σχήμα 7.14).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων στο άνοιγμα (Σχήμα 7.16).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων στο άνοιγμα (Σχήμα 7.17).

4. Για τις κατακόρυφες ταχύτητες στους σωλήνες Pitot – Static:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη παρατηρείται μείωση της κατακόρυφης ταχύτητας στη θέση $(x,z) = (50,1200)$ (Σχήμα 7.15, αριστερά).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας στη θέση $(x,z) = (50,1200)$ για την περίπτωση απουσίας εξώστη. Για την περίπτωση παρουσίας εξώστη η ταχύτητα στη θέση $(x,z) = (50,1200)$ θεωρείται πρακτικά αμετάβλητη με την αύξηση της ισχύος (Σχήμα 7.15, αριστερά).
- Με την αύξηση του βάθους εξώστη παρατηρείται μείωση της κατακόρυφης ταχύτητας στη θέση $(x,z) = (P+1,600)$ (Σχήμα 7.15, δεξιά).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας στη θέση $(x,z) = (P+1,600)$ (Σχήμα 7.15, δεξιά).

5. Για τις θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς:

- Η αύξηση του βάθους του εξώστη προκαλεί μεγάλη μείωση των καθ' ύψος θερμοκρασιών κοντά στην πρόσοψη ($x = 10-200$ mm), ιδιαίτερα στα ευπαθή ύψη που αντιστοιχούν στην πόρτα του άνω ορόφου $z = 700, 800, 1000$ mm. Για οριζόντιες αποστάσεις $x > 200$ mm η αύξηση του βάθους του εξώστη προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιών στα αντίστοιχα ύψη. Η τοποθέτηση του εξώστη ενισχύει πολύ την πυροπροστασία του άνω ορόφου (Σχήματα 7.22-7.25).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών εξερχόμενης φωτιάς κατά μήκος του οριζόντιου άξονα x για σταθερό ύψος z (Σχήματα 7.26-7.29).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών εξερχόμενης φωτιάς κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα z για σταθερή οριζόντια απόσταση x (Σχήματα 7.30-7.33).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται μείωση των καθ' ύψος θερμοκρασιών κοντά στην πρόσοψη ($x = 10-100$ mm) και αύξηση των καθ' ύψος θερμοκρασιών μακριά από την αυτήν ($x > 100$ mm) (Σχήματα 7.34-7.37). Συμπερασματικά, στα ευπαθή σημεία πλησίον της πρόσοψης $(x,z)=(10, 700), (10, 800), (10, 1000), (100, 700), (100,800)$ και $(100, 1000)$, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή της "θεωρητικής πόρτας" του άνω ορόφου ο εξώστης που τοποθετείται σε υψηλή θέση παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι της κάθετης διάδοσης της φωτιάς σε σύγκριση με τον εξώστη που τοποθετείται στο ύψος του ανοίγματος.

6. Για τις θερμοκρασίες της πρόσοψης:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη παρατηρείται μεγάλη μείωση των καθ' ύψος θερμοκρασιών του τοιχώματος της πρόσοψης, ιδιαίτερα για τα μεγάλα βάθη εξώστη (300 και 400 mm). Είναι αξιοσημείωτο ότι η μέγιστη πτώση παρατηρείται στο ύψος $z = 800$ mm. Επίσης, οι εξώστες P300 και P400 διατηρούν τη θερμοκρασία της πρόσοψης στα ίδια επίπεδα τόσο στο μικρό (Σχήμα 7.38, αριστερά) όσο και στο μεγάλο επίπεδο ισχύος (Σχήμα 7.38, δεξιά).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των καθ' ύψος θερμοκρασιών της πρόσοψης (Σχήμα 7.39).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται αύξηση των καθ' ύψος θερμοκρασιών του τοιχώματος της πρόσοψης (Σχήμα 7.40). Το άθροισμα της ακτινοβολίας και συναγωγής που

δέχεται το τοίχωμα δύναται να είναι μεγαλύτερο για τον υψηλό εξώστη σε σύγκριση με τον χαμηλό εξώστη.

7. Για τη θερμορροή στην πρόσοψη:

- Η παρουσία εξώστη μειώνει πολύ αποτελεσματικά την έκθεση της πρόσοψης στη ροή θερμότητας. Με την αύξηση του βάθους εξώστη, τα επίπεδα θερμορροής στην πρόσοψη μειώνονται ολοένα και περισσότερο (Σχήμα 7.41).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση της θερμορροής στην πρόσοψη (Σχήμα 7.42).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται σημαντική μείωση της θερμορροής στην πρόσοψη (Σχήμα 7.43).

8. Για τις θερμοκρασίες εξώστη:

- Γενικά συμπεραίνεται ότι οι θερμοκρασίες του τοιχώματος του εξώστη αυξάνονται όσο η θέση της μέτρησης προσεγγίζει την ακμή του εξώστη και για όλα τα βάθη εξώστη η θερμοκρασία στην ακμή του είναι περίπου 550°C (Σχήμα 7.44).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών του εξώστη (Σχήμα 7.45).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση παρατηρείται ότι για ισχύ Q_{90} ο εξώστης που τοποθετείται σε ύψος Z600 παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τον εξώστη που τοποθετείται σε ύψος Z500. Ωστόσο, σε υψηλότερη ισχύ Q_{144} το φαινόμενο αντιστρέφεται καθώς ο εξώστης Z500 παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες καθ' όλο το μήκος του (Σχήμα 7.46).

9. Για τις συγκεντρώσεις αερίων:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη οι συγκεντρώσεις των O_2 και CO_2 παραμένουν αμετάβλητες ενώ η συγκέντρωση του CO αυξάνεται (Σχήμα 7.47, αριστερά).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς η συγκέντρωση του O_2 παραμένει αμετάβλητη, η συγκέντρωση του CO_2 αυξάνεται και η συγκέντρωση του CO μειώνεται (Σχήμα 7.48, αριστερά).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, οι συγκεντρώσεις των O_2 και CO_2 είναι ίσες για κάθε επίπεδο ισχύος, ενώ η συγκέντρωση του CO είναι μικρότερη για κάθε επίπεδο ισχύος (Σχήμα 7.49, αριστερά).

10. Για τον βαθμό απόδοσης καύσης:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη ο βαθμός απόδοσης της καύσης μειώνεται (Σχήμα 7.47, δεξιά).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς ο βαθμός απόδοσης της καύσης μειώνεται (Σχήμα 7.48, δεξιά).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη ο βαθμός απόδοσης της καύσης παραμένει σταθερός (Σχήμα 7.49, δεξιά).

Στον Πίνακα 9.1 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της επίδρασης που προκαλεί η **αύξηση** των βασικών παραμέτρων που εξετάστηκαν (βάθος εξώστη, ισχύς φωτιάς, ύψος τοποθέτησης του εξώστη) στα κύρια μετρούμενα μεγέθη (θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, θερμοκρασίες και θερμορροή στην πρόσοψη, θερμοκρασίες τοιχώματος εξώστη, ταχύτητες στο άνοιγμα, κατακόρυφες ταχύτητες, συγκεντρώσεις αερίων και βαθμός απόδοσης καύσης).

Πίνακας 9.1: Επίδραση αύξησης βασικών παραμέτρων στα μετρούμενα μεγέθη

A/A		Βάθος εξώστη	Ισχύς	Ύψος τοποθέτησης εξώστη
1	Θερμοκρασίες διαμερίσματος	-	↑	↑
2	Μέση θερμοκρασία άνω τμήματος πυροδιαμερίσματος	↓	↑	↑
3	Θερμοκρασίες στο άνοιγμα	-	↑	↑
4	Ταχύτητες στο άνοιγμα	-	↑	↑
5	Ταχύτητα στη θέση (x,z) = (50,1200)	↓	↑	↓
6	Ταχύτητα στην θέση (x,z) = (P+100,600)	↓	↑	N/A
7	Θερμοκρασίες κοντά στην πρόσοψη	↓	↑	↓
8	Θερμοκρασίες μακριά από την πρόσοψη	↑	↑	↑
9	Θερμοκρασίες στο τοίχωμα της πρόσοψης	↓	↑	↑
10	Θερμορροή στην πρόσοψη	↓	↑	↓
11	Θερμοκρασία στο κέντρο της ακμής του εξώστη	-	↑	-
12	Συγκέντρωση O ₂	-	-	-
13	Συγκέντρωση CO ₂	-	↑	-
14	Συγκέντρωση CO	↑	↓	↓
15	Βαθμός απόδοσης καύσης	↓	↓	-

Αξιολογώντας τα Σχήματα του Κεφαλαίου 8 εξαγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Για το ύψος της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη το ύψος της φλόγας μειώνεται (Πίνακας 8.1).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς το ύψος της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.1).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, το ύψος της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.1).

2. Για την προέκταση της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη η προέκταση της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.2).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς η προέκταση της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.2).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, η προέκταση της φλόγας παραμένει αμετάβλητη (Πίνακας 8.2).

3. Για το πλάτος της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη το πλάτος της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.3).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς το πλάτος της φλόγας αυξάνεται (Πίνακας 8.3).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, το πλάτος της φλόγας μειώνεται (Πίνακας 8.3).

Στον Πίνακα 9.2 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της επίδρασης που προκαλεί η **αύξηση** των βασικών παραμέτρων που εξετάστηκαν (βάθος εξώστη, ισχύς φωτιάς, ύψος τοποθέτησης του εξώστη) στα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας (ύψος, προέκταση, πλάτος).

Πίνακας 9.2: Επίδραση αύξησης βασικών παραμέτρων στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας

A/A		Βάθος εξώστη	Ισχύς	Ύψος τοποθέτησης εξώστη
1	Ύψος φλόγας	↓	↑	↑
2	Προέκταση φλόγας	↑	↑	-
3	Πλάτος φλόγας	↑	↑	↓

Όσον αφορά τη σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες θεωρητικές που εξήχθησαν με την εφαρμογή των σχέσεων του Ευρωκώδικα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για το ύψος της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη το σχετικό σφάλμα αυξάνεται. Επειδή οι θεωρητικές τιμές είναι μικρότερες από τις πειραματικές,

συμπεραίνεται ότι οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα είναι μη συντηρητικές (Πίνακας 8.1).

- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς το σχετικό σφάλμα μειώνεται (Πίνακας 8.1).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, το σχετικό σφάλμα παραμένει αμετάβλητο για ισχύ φωτιάς 90 kW ενώ για τις μεγαλύτερες ισχύεις αυξάνεται (Πίνακας 8.1).

2. Για την προέκταση της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη το σχετικό σφάλμα αυξάνεται. Οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα είναι συντηρητικές (Πίνακας 8.2).
- Για την περίπτωση απουσίας εξώστη το σχετικό σφάλμα είναι αρκετά υψηλό και οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα είναι μη συντηρητικές.
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς το σχετικό σφάλμα μειώνεται (Πίνακας 8.2).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, το σχετικό σφάλμα παραμένει αμετάβλητο για ισχύ 144 kW, ενώ για τις ισχύεις 90 και 120 kW μειώνεται (Πίνακας 8.2).

3. Για το πλάτος της φλόγας:

- Με την αύξηση του βάθους εξώστη το σχετικό σφάλμα αυξάνεται. Οι προβλέψεις του Ευρωκώδικα είναι μη συντηρητικές (Πίνακας 8.3).
- Με την αύξηση της ισχύος της φωτιάς το σχετικό σφάλμα αυξάνεται (Πίνακας 8.3).
- Με την τοποθέτηση του εξώστη σε υψηλότερη θέση, το σχετικό σφάλμα μειώνεται (Πίνακας 8.3).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Agilent 34970A/34972A, Data Acquisition / Switch Unit User's Guide, Agilent Technologies Inc., 2012.
2. An W., Meng Q., Pan R. and Zhu H., Influence of horizontal projection on upward flame spread over XPS thermal insulation material, *Fam Fire and materials international journal*, Wiley, Vol. 42, pp. 527-536, 2017.
3. BCA (Building Codes of Australia), *National Construction Code Series Volume 1: Class 2 to 9 buildings – Building Code of Australia*, Australian Building Codes Board, 2015.
4. Borges P.V.K., Mayer J. and Izquierdo E., Efficient visual fire detection applied for video retrieval, in: *Proceedings of 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2008.
5. Borges P.V.K., Izquierdo E., A probabilistic approach for vision-based fire detection in videos, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 20 (5) 721–731, 2010.
6. Bronkhorst, General instructions digital Mass Flow / Pressure instruments laboratory style / IN-FLOW, 2016.
7. Bryner N.P., Johnson E.L., Pitts W.M., Carbon Monoxide Production in Compartment Fires - Reduced-Scale Enclosure Test Facility, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1994.
8. Calderara S., Piccinini P. and Cucchiara V., Smoke detection in video surveillance: a MoG model in the wavelet domain, in: *Proceedings of 6th International Conference in Computer Vision Systems (ICVS)*, pp. 119–128), 2008.
9. Cao L., and Guo Y.. Large eddy simulation of external fire spread through openings. *International journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 5(4), pp 176-180., 2003.
10. Celik T., Ozkaramanli H., Demirel H., Fire and smoke detection without sensors: image processing based approach, in: *Proceedings of 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 1794–1798), 2007.
11. Celik T., Demirel H., Ozkaramanli H., Uyguroglu M., Fire detection using statistical color model in video sequences, *J. Vis. Commun. Image Represent.* 18 (2) 176–185, 2007.
12. Celik T., Fast and efficient method for fire detection using image processing, *ETRI J.* 32 (6) pp. 881–890, 2010.

- 13.Çetin A.E., Merci B., Günay O., Töreyn B.U. and Verstockt S., Methods and Techniques for Fire Detection Signal, Image and Video Processing Perspectives, 2016.
- 14.Chen T.H., Wu P.H., Chiou Y.C., An early fire-detection method based on image processing, in: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), vol. 3, pp. 1707–1710, 2004.
- 15.Chen J., He Y. and Wang J., Multi-feature fusion based fast video flame detection, Build. Environ. 45 (5) pp. 1113–1122, 2010.
- 16.Code de la construction et de l'habitation [Γαλλικός κανονισμός πυροπροστασίας], *Arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP)*. Latest version 12 October. 2015.
- 17.Collins R.T., Lipton A.J. and Kanade T., A system for video surveillance and monitoring, in: Proceedings of American Nuclear Society (ANS) Eighth International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 1999.
- 18.Cooper L.Y., Smoke and Heat Venting, Handbook of Fire Protection Engineering (SFPE) Third Edition, Section 3, Chapter 9, 2002.
- 19.Croce P.A., Modeling of vented enclosure fires, Part 1. Quasi-steady wood-crib source fires, FMRCJ.I.7A0R5.G0, Factory Mutual Research, Norwood, Massachusetts, July 1978.
- 20.Delichatsios M.A., “Enclosure and Façade Fires: Physics and Applications”, *Fire Safety Science* 11, 3–27, 2014.
- 21.Dieck R., Measurement uncertainty models, ISA transactions, vol 36. No. 1, pp. 29-35, 1997.
- 22.Emori R.I. and Saito K., A study of scaling laws in pool and crib fires, *Combust. Sci. Technol.*, 31, 217–31, 1983.
- 23.Eurocode 1: Actions on structures- Part1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, 2006.
- 24.Fu J., Li Y. and Zhang J., Effects of the Horizontal Projection on the Distribution of the Façade Temperature, International Conference on Advances in Energy and Environmental Science (ICAEES), 2015.
- 25.Gomez-Rodriguez F., Pascual-Pena S., Arrue B., Ollero A., Smoke detection using image processing, in: Proceedings of 4th International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, pp. 1–8, 2002.

26. Gomez-Rodriguez F., Arrue B.C., Ollero A., Smoke monitoring and measurement using image processing—application to forest fires, in: Proceedings of SPIE AeroSense 2003: XIII Automatic Target Recognition, pp. 404–411, 2003.
27. Gonzalez-Gonzalez R.A., Alarcon-Aquino V., Starostenko O., Rosas- Romero R., Ramirez-Cortes J.M. and Rodriguez-Asomoza J., Wavelet-based smoke detection in outdoor video sequences, in: Proceedings of the 53rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), pp. 383–387, 2010.
28. Gubbi J., Marusic S. and Palaniswami M., Smoke detection in video using wavelets and support vector machines, *Fire Saf. J.* 44 (8) pp. 1110–1115, 2009.
29. Gunay O., Tasdemir K., Toreyin B.U., Cetin A.E., Fire detection in video using lms based active learning, *Fire. Technol* 46 (3) pp. 551–577, 2010.
30. Harmathy T. Z. and Mehaffey J. R., Post-flashover Compartment Fires. *Fire and Materials*, Volume 7, No.2, pp 49-61, 1983.
31. Heskestad G., Modeling of enclosure fires, *Proc. Comb. Inst.*, Vol.14, pp. 1021–30, 1973.
32. Hong Kong Buildings Department, *Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011*. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region: Buildings Department, 2012.
33. Huggett C., "Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption," *Fire and Materials*, 12, pp. 61–65, 1980.
34. Hukseflux Thermal Sensors, SBG01 manual v1208
35. Hurley M.J. and Rosenbaum E.R., *Performance-Based Fire Safety Design*, 2015.
36. Hurley M.J., Gottuk D.T., Hall Jr., J.R., Harada K., Kuligowski E.D., Puchovsky M., Torero J.L., Watts Jr. J.M., Wieczorek C.J., "SFPE Handbook of fire protection engineering", 5th Ed., SFPE, Quincy, Massachusetts, U.S.A., 2016.
37. ICC. *International Building Code*, International Code Council, Inc, USA, 2014.
38. ISO 9705, "International Organization for Standardization, ISO 9705 Fire Tests: Full-Scale Room Test for Surface Products", 1st Edition, Geneva, Switzerland, 1993.
39. Janssens M., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Chapter 27, 2016.

40. Janssens M., "Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption," *Fire Technology*, 27, pp. 234–249, 1991.
41. Jolly S. and Saito K., *Fire Safety Journal*, Vol. 18, Issue 2, pp. 139-182, 1992.
42. Karlsson B., Quintiere J.C., "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press LLC, U.S.A., 2000.
43. Kimo Debimo, Air flow measuring blades, technical data sheet.
44. Kimo CP210, Temperature and differential pressure transmitter, technical data sheet.
45. Ko B.C., Cheong K.H., Nam J.Y., Early fire detection algorithm based on irregular patterns of flames and hierarchical Bayesian networks, *Fire Saf. J.* 45 (4) pp. 262–270, 2010.
46. Kolesov I., Karasev P., Tannenbaum A., Haber E., Fire and smoke detection in video with optimal mass transport based optical flow and neural networks, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 761–764, 2010.
47. Lee B. and Han D., Real-time fire detection using camera sequence image in tunnel environment, in: *Proceedings of International Conference on Intelligent, Computing*, pp. 1209–1220, 2007.
48. Liu C.Y., Wong Y. W., Chan W.K. and Can T. C., Note on the Robust Bidirectional Low Velocity Probe, *Experiments in Fluids* 9, p. 394, 1990.
49. Liu C.B. and Ahuja N., Vision based fire detection, in: *Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, vol. 4, pp. 134–137, 2004.
50. Lock A., Bundy M., Johnsson E., Hamins A., Ko G.H., Hwang C., Fuss P., Harris R., Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution, and Vent Size on Full Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room., National Institute of Standards and Technology (NIST), 2008.
51. Lu K.H., Mao S.H., Wang J. Hu L.H., Flame extension length beneath a horizontal eave in fire-induced thermal plume ejected from a compartment, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 729-735, 2017.
52. Luo M., Zhao L., Cheng V. and Yau R., Performance - based fire engineering design: Application of a CFD model for the prevention of external fire spread, *Proceedings, 5th AOSFST, Newcastle, Australia*, 2001.
53. Mammoser III, J.H., and Battaglia F., A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires. *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 277-296, 2004.

54. Marbach G., Loepfe M., Brupbacher T., An image processing technique for fire detection in video images, *Fire Saf. J.* 41 (4) pp. 285–289, 2006.
55. McCaffrey B.J and Heskestad G., A robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire application, *Combustion and Flame* 26, 125-127, 1976.
56. Morgado H.J.L., & Rodrigues J.P.C., Avaliação experimental e numérica da propagação de incêndio entre pisos sucessivos através de vãos de fachada em edifícios. *The Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio*, 29 May – 1 June, Coimbra, Portugal, 2013.
57. Morgado H.J.L., Rodrigues J.P.C., & Laim L.M.S., Experimental and numerical study of balcony effect in external fire spread into upper floors. *Journal of Application of Structural Fire Engineering*, 19-20 April, Czech Republic, 2013.
58. Mutafi M.A. , Nasif M.S. , Pao W. and Ismail F.B., Numerical investigation on the effect of balcony open and solid upstand on smoke contamination in atrium balconies, *ICADME, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 908, 2017.
59. Nakos, J.T., Uncertainty analysis of thermocouple measurements used in normal and abnormal thermal environment experiments at Sandia's radiant heat facility and Lurance Canyon burn site., Technical Report SAND2004-1023, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2004.
60. New Zealand Building codes, *Acceptable Solution for Buildings with Sleeping (non institutional) (Risk Group SM)*. For New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire. Ministry of Business, Innovation & Employment, New Zealand Government, 2014.
61. NI cDAQ-9172, User Guide and Specifications, National Instruments Corporation, 2008.
62. Nilsson M., Husted B., Mossberg A., Anderson J. and McNamee R.J., A numerical comparison of protective measures against external fire spread, *Fam Fire and materials international journal*, Wiley, Vol. 42, pp. 493-507, 2018.
63. Norwegian Building Codes, *Veiledning om tekniske krav till byggverk Kapittel 11. Sikkerhet ved brann*. Direktoratet For Byggkvalitet, Norway, 2015.
64. Ohmiya Y., S. Yusa S., Matsuyama K. and Harada K., Prediction method of opening jet plume behaviour in the presence of an opening soffit, *Proceedings, 5th AOSFST*, Newcastle, Australia, 2001.
65. Oleszkiewicz I., Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections, *Fire Technology*, Vol. 27(4), NFPA, 1991.
66. Omega, PX274, PX275, PX277, PX278 Series Low Pressure Sensors, technical data sheet.

67. Parker W., "An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E84 Tunnel Test," NBS Technical Note 945, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1977.
68. Parker W., "Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications," NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1982.
69. Phillips W., Shah M., Vitoria Lobo N., Flame recognition in video, *Pattern Recogn. Lett.* 23 (1-3) pp. 319-327, 2002.
70. Piccinini P., Calderara S., Cucchiara R., Reliable smoke detection system in the domains of image energy and color, in: *Proceedings of International Conference on Image Processing*, pp. 1376-1379, 2008.
71. Prah J. and Emmons H.W., Fire Induced Flow Through an Opening., *Combustion and Flame* 25, 369-385, 1975.
72. Qi X. and Ebert J., A computer vision based method for fire detection in color videos, *Int. J. Imag.* 2 (S09), pp. 22-34. Spring, 2009.
73. Quintiere J.G., McCaffrey B.J. and Kashiwagi T., A scaling study of a corridor subject to a room fire, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 1-19, 1978.
74. Quintiere J.G., Scaling applications in fire research, *Fire Safety J.*, 1989, 15, 3-29.
75. Quintiere J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley and Sons Ltd, 2006.
76. Rockett J.A., Fire Induced Gas Flow in an Enclosure, *Combustion Science and Technology* 12, 165-175, 1976.
77. Rossi L., Akhloufi M., Tison Y., On the use of stereo vision to develop a novel instrumentation system to extract geometric fire fronts characteristics, *Fire Saf. J. (Forest Fires)* 46 (1-2) pp. 9-20, 2011.
78. Skelly M.J., Roby R.J. and Beyler C.L., An experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, *Journal of Fire Protection Engineering*, 3:1, pp25-34, 1991.
79. Smardz P., Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows, Master of Science in Fire Safety Engineering, University of Ulster, 2006.
80. Smith E., "Heat Release Rate of Building Materials," in *Ignition, Heat Release and Noncombustibility of Materials*, ASTM STP 502, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 119-134, 1972.
81. Steckler K.D., Baum H.R. and Quintiere J.G., Fire Induced Flows Through Room Openings Flow Coefficients., *Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 1591-1600, 1984.

82. Suzuki T., Sekizawa A., Yamada T., Yanai E., Satoh H., Kurioka H. and Kimura Y. An experimental study of ejected flames of a high-rise buildings. Technical report, National Research Institute of Fire and Disaster, Japan, p. 363–73, 2000.
83. Swedish standards institute, *Swedish standard SS-EN 572-1:2012*. Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties. Third edition. Stockholm: SIS Förlag AB, 2012.
84. Thornton W., "The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds," *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 33, 1917.
85. Toreyin B.U., Dedeoglu Y., Gudukbay U., Cetin A.E., Computer vision based method for real-time fire and flame detection, *Pattern Recogn. Lett.* 27 (1), pp. 49–58, 2006.
86. Toreyin B.U., Dedeoglu Y., Cetin A.E., Contour based smoke detection in video using wavelets, in: *Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2006.
87. Van Hamme D., Veelaert P., Philips W. and Teelen K., Fire detection in color images using Markov random fields, in: *Proceedings of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS)*, vol. 2, pp. 88–97, 2010.
88. Wang T., Zhao H. and Zhou Y., Analysis on the influence of fire overhangs on the window to exterior wall vertical fire plume spreading under external wind, *Procedia Engineering*, Vol. 135, pp. 384 – 392, 2016.
89. White N. and Delichatsios M., "Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components", 1st Edition, *SpringerBriefs in Fire*, Springer, New York, U.S.A., 2014.
90. Xing X., Zhang J. and Li Y., A Computational Study on Structural Barrier to Vertical Spread of Window Spill Plume along Building Exterior Façade, *Procedia Engineering*, Vol. 52, pp. 475 – 482, 2013.
91. Xiong Z., Caballero R., Wang H., Finn A.M., Lelic M.A. and Peng P.Y., Video-based smoke detection: possibilities, techniques, and challenges, in: *Proceedings of Suppression and Detection Research and Applications (SUPDET)—A Technical Working Conference*, 2007.
92. Xu Z. and Xu J., Automatic fire smoke detection based on image visual features, in: *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops*, pp. 316–319, 2007.
93. Yang J., Wang R.S., A survey on fire detection and application based on video image analysis, *Video Eng.* 2006 pp. 92–96, 2006.

94. Yamaguchi J. and Tanaka T., Temperature Profiles of Window Jet Plume, Fire Science and Technology, Vol. 24, No.1, 2005.
95. Yasmin R., Detection of smoke propagation direction using color video sequences, Int. J. Soft Comput. 4 pp. 145–48, 2009.
96. Yii E.H, Modelling the Effects of Fuel Types and Ventilation Openings on Post-Flashover Compartment Fires, Thesis, 2002.
97. Yokoi S., "Study on the prevention of fire spread caused by hot upward current", Building Research Institute, Report No 34, Tokyo, Japan, 1960.
98. Yuan F., A fast accumulative motion orientation model based on integral image for video smoke detection, Pattern Recogn. Lett. 29 (7) pp. 925–932, 2008.
99. Yuan F., Video-based smoke detection with histogram sequence of lbp and lbpv pyramids, Fire Saf. J. 46 (3) pp. 132–139, 2011.
100. Yung O. and Oleskiewicz I., Fire Spread Via Exterior Walls of Buildings, Proceedings of the Fourth Conference on Building Science and Technology, Toronto, Canada, pp. 1-12, 1988.
101. Zhao N., Zhang J. and Xing X., A Computational Study on Effect of Balcony on Vertical Spread of Window Spill Plume Along Building Exterior Façade, Procedia Engineering, Vol. 71, pp. 523 – 528, 2014.
102. Zukoski, E., T. Kubota, and B. Cetegen, "Entrainment in Fire Plumes," Fire Safety. Journal, 3: 107-122, 1981.
103. Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων, Προεδρικό Διάταγμα 41/2018 - ΦΕΚ 80/Α, 2018.
104. Μαθιουλάκης, Δ., Τεχνικές μέτρησης ρευστομηχανικών μεγεθών
105. Σιμόπουλος Σ.Ε, Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών Β' Έκδοση, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, 1989.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στους Πίνακες Α.1-Α.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σφαλμάτων για όλα τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πειραματική δοκιμή. Κάθε Πίνακας περιλαμβάνει τις μέσες τιμές και τα ολικά σφάλματα των μεγεθών για κάθε επίπεδο ισχύος. Οι μέσες τιμές προέκυψαν από μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μόνιμες συνθήκες (βλ. 4.4.1). Για τον υπολογισμό των ολικών σφαλμάτων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στην Ενότητα 4.5 και έγινε χρήση των Εξισώσεων (4.13)-(4.20).

Πίνακας Α.1: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P0, Q120-P0 και Q144-P0

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	48.117	3.174	62.740	3.189	66.843	3.174	°C
W1_BACK	-942.5	300	184.459	7.150	291.458	4.656	328.805	3.590	°C
R18 FARDOWN	-912.5	30	397.534	5.141	466.851	5.100	499.577	5.004	°C
R1_FARUP	-912.5	570	635.973	6.451	683.581	5.882	705.719	6.111	°C
R12	-717.5	100	420.351	6.384	493.034	5.061	521.485	6.234	°C
R13	-717.5	200	457.468	6.021	529.519	5.052	560.576	5.593	°C
R14	-717.5	300	743.455	7.589	819.915	10.675	866.819	12.265	°C
R15	-717.5	400	701.651	8.802	724.965	6.508	744.946	6.379	°C
R11	-717.5	500	686.732	7.861	726.907	6.338	742.452	6.549	°C
R4	-492.5	100	332.278	5.762	401.954	4.319	422.023	4.291	°C
R2	-492.5	200	389.813	5.692	451.528	4.418	461.710	4.262	°C
R3	-492.5	300	648.248	21.983	531.821	7.032	576.291	6.956	°C
R16	-492.5	400	854.448	9.642	853.646	13.403	731.598	19.029	°C
R17	-492.5	500	784.863	9.698	788.094	7.999	787.750	9.165	°C
W5_UP	-492.5	600	66.112	3.188	72.427	3.197	78.018	3.251	°C
W4_UP	-492.5	625	456.998	5.429	519.210	5.006	547.047	4.905	°C
R5	-267.5	100	452.657	6.242	520.196	5.217	552.772	7.155	°C
R7	-267.5	200	529.053	6.425	591.187	5.514	623.249	6.440	°C
R9	-267.5	300	634.717	6.880	717.152	6.766	775.067	8.054	°C
R10	-267.5	400	884.678	9.881	904.438	8.325	923.115	8.267	°C
R8	-267.5	500	904.150	8.198	899.789	7.879	911.516	10.068	°C
R19 NEARDOWN	-72.5	30	185.766	3.542	215.200	3.536	231.236	3.314	°C
R6 NEARUP	-72.5	570	798.087	7.364	829.395	6.923	840.383	7.196	°C
W8	-12.5	700	76.952	3.370	99.338	3.574	126.682	3.526	°C
W11	-12.5	1000	52.582	3.208	66.622	3.235	78.720	3.338	°C
BD1	0	50	304.590	5.493	358.109	4.199	378.886	4.725	°C
VELOCITY_1	0	50	1.115	0.182	1.170	0.184	1.278	0.216	m/s
BD2	0	150	344.262	5.582	401.356	5.741	424.576	7.304	°C
VELOCITY_2	0	150	0.990	0.190	1.102	0.177	1.246	0.190	m/s
BD3	0	350	771.494	7.641	770.660	6.876	772.760	7.694	°C
VELOCITY_3	0	350	2.335	0.207	2.545	0.194	2.497	0.254	m/s
BD4	0	450	815.569	13.606	821.955	9.621	816.989	12.481	°C
VELOCITY_4	0	450	4.005	0.243	4.338	0.843	4.476	0.302	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	20.402	4.260	28.330	4.471	34.380	5.007	kW/m ²

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W7	0	700	236.914	4.652	313.663	4.576	370.633	6.409	°C
W3	0	800	168.191	3.997	230.690	4.239	283.197	4.194	°C
HEAT FLUX 2	0	850	14.958	4.805	21.887	4.409	31.126	7.277	kW/ m ²
W9	0	1000	170.319	3.975	237.908	4.139	290.273	6.118	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	8.908	4.220	13.837	4.267	20.573	6.854	kW/ m ²
W6	0	1200	98.605	3.409	136.511	3.802	171.858	3.402	°C
W12	0	1400	93.908	3.305	124.369	3.469	153.098	3.257	°C
W10	0	1700	69.648	3.275	89.857	3.390	107.896	3.270	°C
OP_1	10	0	91.051	3.245	105.006	3.316	111.062	3.263	°C
OP_2	10	250	266.457	5.230	286.846	7.258	348.594	12.090	°C
OP_3	10	400	816.734	16.047	792.417	7.707	797.744	8.242	°C
OP_5	10	500	825.313	7.527	838.169	7.609	835.562	8.322	°C
FAC_1 NEAR	10	600	361.488	11.205	470.824	14.207	543.110	19.045	°C
FAC2NEAR	10	700	257.044	7.169	345.459	10.739	438.381	12.127	°C
FAC3NEAR	10	800	258.988	6.294	355.486	10.549	449.493	13.202	°C
FAC4NEAR	10	1000	225.597	7.224	313.656	9.060	373.821	10.009	°C
FAC5NEAR	10	1200	189.666	6.907	261.522	7.274	318.368	14.601	°C
FAC_6 NEAR	10	1400	169.437	5.305	229.119	8.025	272.460	9.975	°C
FAC_7 NEAR	10	1700	154.574	5.123	205.728	7.322	234.248	10.619	°C
OP_4	50	500	836.955	10.252	844.386	9.866	826.555	11.437	°C
FAC_1FAR	50	600	664.504	13.834	784.673	13.767	839.980	13.291	°C
FAC2FAR	50	700	496.235	9.388	638.354	10.590	734.566	14.851	°C
FAC3FAR	50	800	426.069	11.595	559.464	12.569	662.619	21.192	°C
FAC4FAR	50	1000	305.711	11.818	430.345	9.746	509.394	17.122	°C
FAC_6FAR	50	1200	238.446	9.024	349.494	11.600	403.669	16.066	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	1.876	0.738	2.707	0.561	3.004	0.843	m/s
FAC5FAR	50	1400	210.138	6.890	292.259	9.970	335.259	12.851	°C
FAC_7FAR	50	1700	184.815	5.231	247.826	7.117	285.811	13.886	°C
TA_21	100	0	128.714	3.379	147.492	3.298	158.586	3.216	°C
TA1	100	250	132.191	3.659	164.559	3.408	180.903	3.218	°C
TA3	100	400	704.195	9.395	752.268	7.357	753.878	8.524	°C
TA5	100	500	794.109	12.626	795.370	8.029	794.628	13.870	°C
TA7	100	600	796.230	12.224	884.261	8.352	905.353	8.646	°C
TA9	100	700	699.834	14.146	807.126	9.597	852.109	10.412	°C
TA11	100	800	585.151	8.401	703.524	11.055	767.004	18.339	°C
TA13	100	1000	366.371	9.294	481.844	8.614	533.005	18.207	°C
TA15	100	1200	309.442	8.528	430.875	14.452	474.621	26.070	°C
TA17	100	1400	219.286	5.431	302.394	5.500	345.661	10.683	°C
TA19	100	1700	199.483	5.000	271.062	7.472	318.289	10.757	°C
TA_22	200	0	2300.745	ΑΣΤΟΧΙ Α	2300.825	ΑΣΤΟΧΙ Α	2300.917	ΑΣΤΟΧΙ Α	°C
TA2	200	250	178.243	3.629	199.676	4.147	208.489	4.792	°C
TA4	200	400	223.836	5.191	297.928	9.665	369.616	16.158	°C
TA6	200	500	489.999	9.740	595.689	8.208	657.220	8.205	°C
TA8	200	600	693.357	10.734	765.608	12.577	803.279	10.467	°C
TA10	200	700	665.729	12.932	720.150	11.981	757.288	12.318	°C
TA12	200	800	694.406	11.973	765.472	11.657	784.337	14.900	°C
TA14	200	1000	482.062	9.300	584.531	11.125	621.399	22.990	°C
TA16	200	1200	358.577	8.763	465.451	13.548	521.478	24.574	°C
TA18	200	1400	268.600	8.097	355.134	10.520	407.553	20.569	°C
TA20	200	1700	233.499	9.181	304.835	11.655	342.591	13.081	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
TB_21	300	0	52.985	3.241	58.027	3.207	60.529	3.503	°C
TB1	300	250	86.059	3.257	102.623	3.209	107.007	3.543	°C
TB3	300	400	179.543	3.400	215.699	3.679	232.312	3.883	°C
TB5	300	500	190.736	3.707	236.790	4.646	278.277	9.199	°C
TB7	300	600	278.532	7.489	378.548	6.878	430.498	9.877	°C
TB9	300	700	369.865	8.442	443.551	12.514	486.984	14.105	°C
TB11	300	800	414.217	12.259	484.313	17.914	542.245	17.518	°C
TB13	300	1000	348.499	12.660	355.609	30.175	458.257	41.367	°C
TB15	300	1200	318.674	19.610	403.124	15.332	447.203	33.616	°C
TB17	300	1400	253.003	11.149	313.270	12.704	362.537	18.560	°C
TB19	300	1700	185.865	4.593	228.315	6.393	263.245	6.789	°C
TB_22	500	0	44.136	3.169	49.755	3.180	53.363	3.206	°C
TB2	500	250	61.464	3.188	71.953	3.265	78.459	3.327	°C
TB4	500	400	81.945	3.574	97.738	3.364	107.319	4.671	°C
TB6	500	600	91.168	3.319	113.695	3.299	126.626	3.435	°C
TB8	500	600	100.218	3.309	126.637	3.380	139.143	3.781	°C
TB10	500	700	102.567	3.281	132.402	3.377	149.960	3.262	°C
TB12	500	800	85.795	3.316	111.545	3.526	125.917	3.667	°C
TB14	500	1000	98.100	3.233	139.852	3.872	164.535	4.316	°C
TB16	500	1200	96.365	4.757	128.444	7.670	145.729	6.624	°C
TB18	500	1400	105.312	3.529	138.569	4.394	163.341	4.221	°C
TB20	500	1700	109.337	3.419	135.349	3.946	158.073	4.662	°C
TUBE TEMP	-	-	85.350	3.305	112.590	3.448	130.513	5.451	°C
AIRFLOW	-	-	1918.038	50.833	1949.393	51.25	1950.558	54.211	m ³ /h r

Πίνακας Α.2: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P100-Z600, Q120-P100-Z600 και Q144-P100-Z600

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	62.980	3.169	76.517	3.263	95.750	3.684	°C
W1_BACK	-942.5	300	191.555	5.132	262.756	5.493	331.462	4.816	°C
R18 FARDOWN	-912.5	30	547.145	7.829	626.033	5.952	679.099	5.951	°C
R1 FARUP	-912.5	570	650.204	6.723	714.438	6.809	757.933	6.346	°C
R12	-717.5	100	447.722	8.042	528.181	5.598	584.503	5.194	°C
R13	-717.5	200	492.278	5.333	588.343	6.895	664.510	6.647	°C
R14	-717.5	300	764.519	11.795	816.415	8.867	844.197	9.197	°C
R15	-717.5	400	717.208	9.640	759.501	6.782	796.042	6.598	°C
R11	-717.5	500	693.511	6.886	750.818	6.751	787.736	6.578	°C
R4	-492.5	100	255.227	3.756	313.551	4.602	366.703	4.677	°C
R2	-492.5	200	598.299	20.607	515.165	4.923	527.509	5.108	°C
R3	-492.5	300	826.280	15.134	588.624	10.932	526.095	4.922	°C
R16	-492.5	400	902.228	12.138	777.454	18.447	708.722	16.432	°C
R17	-492.5	500	806.455	14.431	814.148	7.590	829.613	7.818	°C
W4_UP	-492.5	600	406.136	7.984	505.539	6.979	584.528	5.849	°C
W5_UP	-492.5	625	58.187	3.226	71.211	3.901	92.834	3.237	°C
R5	-267.5	100	491.908	9.812	569.413	5.807	621.838	5.731	°C
R7	-267.5	200	542.965	6.077	623.377	6.202	681.498	6.007	°C
R9	-267.5	300	668.097	8.016	792.892	7.528	852.066	8.753	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
R10	-267.5	400	858.607	13.789	909.508	8.196	966.905	8.238	°C
R8	-267.5	500	926.569	11.467	940.477	8.036	957.775	8.618	°C
R19 NEARDOWN	-72.5	30	210.549	4.648	253.195	4.017	286.431	3.908	°C
R6 NEARUP	-72.5	570	823.693	7.134	847.972	7.051	864.254	7.135	°C
W8	-12.5	700	59.643	3.539	87.907	3.505	108.701	3.384	°C
W11	-12.5	1000	50.214	3.575	72.291	3.417	90.426	3.214	°C
BD1	0	50	200.092	3.875	249.636	3.720	288.319	3.746	°C
VELOCITY_1	0	50	-1.081	0.163	-1.088	0.142	-1.027	0.165	m/s
BD2	0	150	345.674	6.612	413.137	4.792	457.911	4.410	°C
VELOCITY_2	0	150	-1.063	0.191	-1.382	0.146	-1.821	0.141	m/s
BD3	0	350	757.799	8.272	752.170	6.466	761.180	6.272	°C
VELOCITY_3	0	350	2.379	0.250	2.667	0.176	2.907	0.194	m/s
BD4	0	450	808.419	10.151	842.903	7.670	832.375	7.595	°C
VELOCITY_4	0	450	3.740	0.348	4.366	0.242	4.822	0.351	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	8.324	4.041	13.235	4.035	16.474	4.054	kW/ m ²
W7	0	700	140.031	4.435	209.125	3.923	251.825	3.244	°C
W3	0	800	58.461	3.303	83.662	3.340	103.447	4.064	°C
HEAT FLUX 2	0	850	8.577	4.238	14.548	4.152	16.861	4.156	kW/ m ²
W9	0	1000	142.368	3.823	211.832	3.496	253.697	3.300	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	7.288	4.794	12.612	4.181	14.133	4.232	kW/ m ²
W6	0	1200	62.453	3.628	96.619	3.542	121.799	3.213	°C
W12	0	1400	70.908	3.579	108.092	3.460	135.050	3.211	°C
W10	0	1700	73.004	3.496	106.262	3.250	125.086	3.175	°C
OP_1	10	0	115.064	3.388	138.999	3.399	159.190	3.255	°C
OP_2	10	250	321.314	4.844	415.746	5.368	487.080	6.748	°C
OP_3	10	400	764.457	8.249	776.603	6.792	785.967	6.894	°C
FAC_1 NEAR	10	500	770.806	12.073	853.473	8.659	834.840	8.312	°C
FAC2NEAR	10	700	140.455	7.147	201.845	4.314	233.767	5.130	°C
FAC3NEAR	10	800	148.708	9.423	208.166	6.539	242.355	7.448	°C
FAC4NEAR	10	1000	183.027	5.566	242.868	5.698	266.483	6.999	°C
FAC5NEAR	10	1200	165.551	6.925	227.264	5.572	251.282	5.997	°C
FAC_6 NEAR	10	1400	157.655	7.588	206.951	7.320	218.830	5.776	°C
FAC_7 NEAR	10	1700	113.770	4.448	148.248	3.586	164.521	3.480	°C
OP_5	50	600	233.760	8.039	380.304	8.512	432.019	3.951	°C
PITOT TEMPUP	50	1200	249.860	10.187	329.308	13.327	332.437	10.992	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	1.376	1.013	1.341	0.498	1.293	0.795	m/s
TB2	100	250	138.573	3.296	145.138	3.633	179.942	7.590	°C
TB1	100	400	782.446	14.309	789.146	6.922	773.757	7.556	°C
FAC_1FAR	100	500	695.348	8.192	726.452	6.482	745.749	6.857	°C
OP_4	100	600	406.113	7.149	489.761	4.680	524.807	4.586	°C
FAC2FAR	100	700	523.557	20.714	648.502	7.853	710.450	10.138	°C
FAC3FAR	100	800	548.828	14.535	678.596	9.589	724.433	16.633	°C
FAC4FAR	100	1000	420.699	31.902	527.942	13.070	546.168	16.778	°C
FAC5FAR	100	1200	322.945	29.996	392.641	11.586	410.054	11.639	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
FAC_6FAR	100	1400	214.725	14.992	293.197	9.980	302.572	9.848	°C
FAC_7FAR	100	1700	185.162	8.407	234.072	6.382	245.018	6.349	°C
TA3	200	400	314.546	10.191	427.100	5.775	509.084	7.711	°C
TA7	200	500	577.266	26.048	730.364	9.410	778.037	14.028	°C
PITOT TEMPDOWN	200	600	672.504	8.866	756.873	6.196	769.185	6.257	°C
VELOCITY BALCONY	200	600	2.948	0.594	3.162	0.238	3.207	0.289	m/s
TA9	200	700	774.056	13.954	857.616	8.203	882.665	8.406	°C
TA11	200	800	707.738	23.726	811.550	13.329	836.689	14.564	°C
TA13	200	1000	524.347	23.124	619.379	12.006	644.317	18.409	°C
TA15	200	1200	343.767	10.199	442.273	10.921	482.108	18.289	°C
TA17	200	1400	217.680	6.957	284.676	5.146	306.680	8.095	°C
TA19	200	1700	186.625	5.924	249.328	5.684	276.455	6.095	°C
TA_22	300	0	75.364	3.290	84.498	3.223	93.980	3.208	°C
TA2	300	250	117.861	4.073	140.206	3.362	150.911	3.876	°C
TA4	300	400	155.782	3.330	193.392	3.446	223.522	3.514	°C
TA8	300	500	191.980	9.197	300.464	7.456	359.695	11.275	°C
W13	300	600	312.406	16.335	447.226	9.262	504.361	10.529	°C
TA10	300	700	397.614	10.149	502.692	11.057	519.931	22.743	°C
TA12	300	800	412.468	21.215	525.854	10.648	585.197	16.001	°C
TA14	300	1000	327.240	26.242	414.187	6.447	458.316	10.563	°C
TA16	300	1200	223.740	14.287	297.849	4.730	340.383	7.183	°C
TA18	300	1400	172.478	9.332	230.117	4.130	270.988	6.004	°C
TA20	300	1700	141.207	10.594	185.316	5.416	203.834	6.648	°C
TA1	400	400	98.662	3.242	121.991	3.247	140.782	3.218	°C
TA6	400	500	95.861	3.264	116.497	3.237	133.375	3.196	°C
TB_21	400	600	94.384	6.049	136.937	4.093	175.254	5.675	°C
TA5	400	700	145.016	6.228	210.674	4.475	261.011	7.398	°C
TA_21	400	800	164.743	5.614	240.488	5.331	289.269	5.425	°C
TA23	400	1000	170.584	12.742	243.655	6.462	300.358	9.271	°C
TB23	500	250	54.469	3.184	63.817	3.175	71.043	3.166	°C
TB3	500	400	109.620	3.605	135.703	3.252	155.016	3.233	°C
TB5	500	500	100.117	3.300	127.117	3.252	146.122	3.202	°C
TB7	500	600	104.878	3.364	136.334	3.270	157.935	3.228	°C
TB9	500	700	108.099	3.414	144.812	3.288	168.182	3.249	°C
TB11	500	800	79.350	3.393	112.971	3.291	139.026	4.089	°C
TB13	500	1000	75.899	5.172	112.995	3.871	134.088	5.859	°C
TB15	500	1200	69.180	6.230	106.274	4.115	131.302	6.467	°C
TB17	500	1400	74.582	6.134	107.070	3.665	132.791	4.599	°C
TB19	500	1700	87.699	3.514	113.186	3.338	138.345	3.936	°C
TB_22	700	0	44.551	3.235	51.640	3.234	54.911	3.202	°C
TB4	700	400	53.104	3.185	66.610	3.204	73.335	3.238	°C
TB6	700	500	62.416	3.175	79.157	3.168	89.000	3.182	°C
TB8	700	600	60.126	3.173	76.169	3.175	84.891	3.167	°C
TB10	700	700	46.902	3.171	58.590	3.164	64.935	3.190	°C
TB12	700	800	50.466	3.170	64.154	3.173	72.448	3.174	°C
TB14	700	1000	61.116	3.195	87.639	3.209	101.590	3.261	°C
TB16	700	1200	45.330	3.186	62.711	3.195	73.884	3.185	°C
TB18	700	1400	59.011	3.260	88.563	3.198	108.245	3.234	°C
TB20	700	1700	61.741	3.629	87.599	3.233	104.103	3.398	°C
TUBE TEMP	-	-	100.910	4.273	133.794	3.372	155.326	3.644	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
AIRFLOW	-	-	1905.82	59.940	1934.972	49.841	1948.876	51.233	m ³ /hr

Πίνακας Α.3: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P200-Z600, Q120-P200-Z600 και Q144-P200-Z600

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	59.741	3.171	63.406	3.159	78.368	3.168	°C
W1_BACK	-942.5	300	166.011	5.046	275.089	3.190	296.380	5.299	°C
R18 FARDOWN	-912.5	30	331.091	6.463	443.219	4.970	488.212	4.805	°C
R1_FARUP	-912.5	570	569.439	6.952	664.720	5.848	697.038	5.811	°C
R12	-717.5	100	364.960	6.107	475.719	4.392	524.578	4.768	°C
R13	-717.5	200	442.896	6.020	540.481	5.369	599.018	6.861	°C
R14	-717.5	300	721.940	8.371	795.146	22.721	802.425	9.118	°C
R15	-717.5	400	672.503	8.701	710.091	5.970	740.470	6.646	°C
R11	-717.5	500	630.322	7.211	705.745	6.068	734.748	6.256	°C
R4	-492.5	100	217.831	5.397	294.282	3.809	334.093	3.716	°C
R2	-492.5	200	423.443	6.779	399.065	4.326	419.863	4.125	°C
R3	-492.5	300	784.024	14.341	493.408	11.059	513.625	7.144	°C
R16	-492.5	400	846.239	9.208	723.875	39.719	587.545	12.447	°C
R17	-492.5	500	769.114	8.496	772.027	10.906	735.964	13.562	°C
W4_UP	-492.5	600	352.624	5.199	393.317	3.870	416.948	4.157	°C
W5_UP	-492.5	625	58.996	3.169	63.722	3.227	67.039	3.296	°C
R5	-267.5	100	411.483	6.169	518.286	5.134	569.866	5.035	°C
R7	-267.5	200	493.469	6.751	594.558	5.182	643.416	5.603	°C
R9	-267.5	300	601.475	7.371	757.599	8.737	815.133	9.816	°C
R10	-267.5	400	838.725	7.938	905.705	8.835	939.570	7.910	°C
R8	-267.5	500	889.585	7.816	908.004	9.473	930.063	9.349	°C
R19 NEARDOWN	-72.5	30	163.470	4.539	213.324	4.033	242.676	3.616	°C
R6_NEARUP	-72.5	570	779.397	6.748	805.883	6.910	821.999	7.461	°C
W8	-12.5	700	72.075	3.161	84.939	3.158	93.920	3.288	°C
W11	-12.5	1000	70.339	3.170	80.230	3.180	86.649	3.169	°C
BD1	0	50	177.711	4.573	227.888	4.326	263.979	4.197	°C
VELOCITY_1	0	50	-0.889	0.148	-0.880	0.185	-0.955	0.246	m/s
BD2	0	150	306.378	5.711	377.270	4.123	421.209	4.089	°C
VELOCITY_2	0	150	-1.330	0.133	-1.618	0.153	-1.826	0.151	m/s
BD3	0	350	729.842	7.157	731.978	6.524	738.546	6.392	°C
VELOCITY_3	0	350	2.405	0.179	2.482	0.219	2.668	0.201	m/s
BD4	0	450	808.639	7.924	807.443	8.385	798.983	9.090	°C
VELOCITY_4	0	450	4.084	0.224	4.300	0.251	4.479	0.285	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	7.781	4.020	12.016	4.078	14.659	4.092	kW/m ²
W7	0	700	169.327	3.217	216.546	3.208	247.029	3.329	°C
W3	0	800	71.969	3.234	80.084	3.239	99.340	3.737	°C
HEAT FLUX 2	0	850	8.581	4.087	15.324	4.831	17.722	4.634	kW/m ²
W9	0	1000	174.850	3.284	227.187	3.558	260.649	3.218	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	6.426	4.113	12.415	4.564	15.501	4.896	kW/m ²

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W6	0	1200	113.754	3.156	136.769	3.224	157.400	3.189	°C
W12	0	1400	103.875	3.157	122.297	3.247	140.435	3.264	°C
W10	0	1700	98.464	3.166	113.002	3.194	128.413	3.218	°C
OP_1	10	0	98.256	3.458	127.354	3.297	141.696	3.252	°C
OP_2	10	250	256.297	6.630	334.089	5.713	380.419	10.990	°C
OP_3	10	400	756.676	7.415	757.069	7.619	757.168	6.773	°C
FAC_1NEAR	10	500	791.934	7.140	795.447	7.606	795.593	8.644	°C
FAC2NEAR	10	700	165.948	3.757	206.908	4.594	232.337	4.574	°C
FAC3NEAR	10	800	163.978	6.538	231.345	10.163	242.942	6.336	°C
FAC4NEAR	10	1000	194.918	10.764	277.511	8.366	288.782	17.343	°C
FAC5NEAR	10	1200	203.448	11.217	277.676	10.482	308.007	17.729	°C
FAC_6NEAR	10	1400	191.131	7.234	246.207	8.201	269.373	9.826	°C
FAC_7NEAR	10	1700	138.980	3.993	168.209	4.237	190.283	4.908	°C
OP_5	50	600	382.376	4.013	428.610	4.097	455.756	4.172	°C
PITOT TEMP_UP	50	1200	268.394	13.523	361.539	17.692	400.375	19.229	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	1.214	0.607	1.306	1.631	1.011	0.184	m/s
TB2	100	250	59.412	3.173	69.968	3.181	72.427	3.294	°C
TB1	100	400	771.129	7.534	750.945	8.224	748.496	7.131	°C
FAC_1FAR	100	500	770.280	7.610	748.598	8.028	745.540	7.300	°C
OP_4	100	600	408.655	4.263	456.705	4.228	484.477	4.332	°C
FAC2FAR	100	700	321.094	12.790	456.087	13.620	488.716	16.955	°C
FAC3FAR	100	800	481.560	19.707	666.266	14.876	685.739	29.534	°C
FAC4FAR	100	1000	384.749	18.889	558.033	15.214	594.810	25.048	°C
FAC5FAR	100	1200	319.636	12.254	462.770	15.424	528.644	31.442	°C
FAC_6FAR	100	1400	223.565	9.209	316.180	18.559	340.962	17.300	°C
FAC_7FAR	100	1700	182.439	5.094	239.759	11.312	265.546	9.585	°C
TA3	200	400	381.952	6.007	482.976	9.409	541.856	11.763	°C
TA7	200	500	714.148	10.889	804.708	10.316	833.718	8.567	°C
W13	200	600	446.891	4.316	513.252	4.545	565.115	4.923	°C
TA9	200	700	586.556	10.793	670.148	14.794	710.818	15.855	°C
TA11	200	800	680.652	9.021	797.665	11.674	845.097	12.536	°C
TA13	200	1000	443.649	11.183	590.617	24.316	636.078	32.049	°C
TA15	200	1200	312.963	9.317	446.260	13.957	511.242	45.127	°C
TA17	200	1400	201.745	6.323	284.564	7.480	338.030	22.320	°C
TA19	200	1700	175.513	5.475	242.880	7.348	289.500	19.256	°C
TA_22	300	0	74.133	3.214	87.311	3.286	96.591	3.355	°C
TA2	300	250	136.023	3.884	169.749	3.949	182.514	6.915	°C
TA4	300	400	205.671	3.355	256.661	4.288	296.762	6.500	°C
TA8	300	500	387.406	9.392	514.262	11.163	564.649	17.264	°C
PITOT TEMP_DOWN	300	600	616.572	5.440	703.534	6.172	727.387	6.320	°C
VELOCITY BALCONY	300	600	2.680	0.241	2.703	0.517	2.861	0.505	m/s
TA10	300	700	602.398	11.275	701.328	11.431	737.945	15.145	°C
TA12	300	800	606.269	13.244	718.759	13.255	766.904	19.797	°C
TA14	300	1000	357.128	7.868	469.800	13.864	514.158	14.359	°C
TA16	300	1200	227.673	5.387	318.232	10.242	377.129	18.643	°C
TA18	300	1400	176.629	4.520	243.118	7.493	293.244	15.332	°C
TA20	300	1700	146.666	6.413	198.049	6.751	236.907	10.126	°C
TA1	400	400	112.905	3.238	137.399	3.426	153.325	3.295	°C
TA6	400	500	119.846	3.229	146.823	3.322	169.223	3.565	°C
TB_21	400	600	180.463	12.595	260.358	12.501	361.447	18.201	°C
TA5	400	700	279.223	9.890	344.445	9.329	418.280	17.008	°C
TA_21	400	800	313.812	14.520	412.950	16.193	483.167	17.661	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
TA23	400	1000	253.483	9.532	316.513	15.382	391.276	12.539	°C
TB23	500	250	60.760	3.186	74.931	3.169	79.975	3.436	°C
TB3	500	400	124.100	3.229	157.088	3.275	172.711	4.609	°C
TB5	500	500	112.632	3.281	143.341	3.299	158.823	5.608	°C
TB7	500	600	123.299	3.318	160.941	3.238	181.834	4.991	°C
TB9	500	700	149.866	3.684	195.719	3.460	240.427	5.607	°C
TB11	500	800	112.935	4.915	151.149	5.222	205.760	9.369	°C
TB13	500	1000	109.590	6.890	157.190	12.948	188.535	11.705	°C
TB15	500	1200	102.191	6.138	139.720	11.928	166.640	14.082	°C
TB17	500	1400	93.754	5.118	122.373	9.161	155.101	8.360	°C
TB19	500	1700	93.538	3.435	123.929	4.052	151.078	4.769	°C
TB_22	700	0	49.269	3.254	57.693	3.191	60.116	3.188	°C
TB4	700	400	70.847	3.394	88.090	3.472	91.669	3.692	°C
TB6	700	500	75.476	3.251	93.985	3.178	102.213	3.237	°C
TB8	700	600	69.678	3.250	85.831	3.247	93.888	3.222	°C
TB10	700	700	51.292	3.168	63.070	3.192	68.630	3.208	°C
TB12	700	800	63.232	3.255	81.215	3.516	90.841	3.329	°C
TB14	700	1000	71.138	3.217	93.641	3.610	111.219	3.502	°C
TB16	700	1200	49.904	3.168	63.790	3.391	75.126	3.247	°C
TB18	700	1400	59.821	3.182	83.952	3.391	105.397	3.374	°C
TB20	700	1700	62.846	3.196	79.343	3.540	99.607	3.945	°C
TUBE_TEMP	-	-	99.305	3.442	128.132	3.728	144.596	4.151	°C
AIRFLOW	-	-	1900.646	49.840	1927.323	59.349	1926.195	54.583	m ³ /hr

Πίνακας Α.4: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P300-Z600, Q120-P300-Z600 και Q144-P300-Z600

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	79.432	3.240	91.221	3.245	118.257	4.397	°C
W1_BACK	-942.5	300	218.852	4.999	301.826	4.860	354.470	3.798	°C
R18_FARDOWN	-912.5	30	515.607	5.114	568.514	5.410	598.099	5.898	°C
R1_FARUP	-912.5	570	699.097	5.864	743.380	6.295	773.207	6.471	°C
R12	-717.5	100	520.920	5.099	577.966	5.208	610.020	5.348	°C
R13	-717.5	200	548.151	6.929	622.701	10.157	656.612	9.529	°C
R14	-717.5	300	741.409	6.936	787.155	7.428	813.890	7.146	°C
R15	-717.5	400	738.961	7.059	782.027	6.781	807.129	6.931	°C
R11	-717.5	500	740.551	6.583	780.738	6.597	804.324	6.756	°C
R4	-492.5	100	388.352	4.364	439.640	5.233	465.123	4.414	°C
R2	-492.5	200	634.772	10.700	567.275	5.115	568.876	5.131	°C
R3	-492.5	300	835.312	12.837	587.235	8.361	560.589	5.543	°C
R16	-492.5	400	877.809	9.119	940.006	8.522	873.758	21.989	°C
R17	-492.5	500	810.373	8.401	840.249	7.800	845.002	8.512	°C
W4_UP	-492.5	600	250.044	4.657	323.353	4.148	332.203	3.369	°C
W5_UP	-492.5	625	122.541	4.026	170.184	3.316	175.552	3.227	°C
R5	-267.5	100	564.286	5.522	624.296	5.685	656.259	5.983	°C
R7	-267.5	200	660.978	6.613	723.816	8.249	758.996	8.652	°C
R9	-267.5	300	784.208	9.035	882.457	7.868	923.847	8.598	°C
R10	-267.5	400	931.240	8.388	945.319	8.716	968.411	8.892	°C
R8	-267.5	500	942.889	8.188	931.932	8.918	944.242	9.601	°C
R19	-72.5	30	343.227	4.154	382.937	5.830	404.447	4.410	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
NEARDOWN									
R6_NEARUP	-72.5	570	141.502	4.089	109.323	3.689	107.044	3.166	°C
W8	-12.5	700	73.588	3.216	86.779	3.199	93.082	3.238	°C
W11	-12.5	1000	66.732	3.175	77.177	3.186	82.723	3.188	°C
BD1	0	50	228.121	4.216	257.183	5.053	277.898	3.890	°C
VELOCITY_1	0	50	-1.221	0.208	-1.303	0.227	-1.192	0.239	m/s
BD2	0	150	438.891	4.477	487.199	5.123	522.567	4.844	°C
VELOCITY_2	0	150	-1.476	0.126	-1.731	0.129	-2.038	0.134	m/s
BD3	0	350	824.100	7.609	804.462	8.046	799.690	6.757	°C
VELOCITY_3	0	350	2.662	0.124	2.764	0.124	2.782	0.135	m/s
BD4	0	450	861.198	7.995	872.758	8.049	862.590	7.833	°C
VELOCITY_4	0	450	3.931	0.179	4.171	0.204	4.420	0.215	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	6.433	4.039	9.350	4.066	12.090	4.221	kW/m ²
W7	0	700	112.406	3.224	135.617	3.219	154.139	3.436	°C
W3	0	800	73.733	3.158	83.215	3.189	90.316	3.290	°C
HEAT FLUX 2	0	850	5.445	4.042	8.901	4.078	13.951	4.543	kW/m ²
W9	0	1000	96.131	3.158	115.721	3.222	132.072	3.228	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	3.401	4.055	5.642	4.053	8.606	4.277	kW/m ²
W6	0	1200	87.706	3.155	99.534	3.175	107.215	3.153	°C
W12	0	1400	80.618	3.154	91.382	3.169	97.115	3.152	°C
W10	0	1700	76.199	3.160	88.752	3.199	96.120	3.152	°C
OP_1	10	0	163.898	3.439	181.371	3.287	198.243	3.333	°C
OP_2	10	250	466.815	6.829	545.969	8.652	589.357	12.907	°C
OP_3	10	400	856.210	8.803	834.338	9.415	822.727	8.153	°C
FAC_1NEAR	10	500	925.962	8.587	946.871	8.883	956.268	9.489	°C
NEAR BALCONY DOWN	10	600	570.962	5.071	606.139	5.316	623.047	5.556	°C
NEAR BALCONY UP	10	620	245.232	4.597	299.341	4.197	345.480	4.420	°C
FAC2NEAR	10	700	158.884	5.873	204.419	5.932	236.580	12.444	°C
FAC3NEAR	10	800	128.414	6.941	176.618	6.735	191.316	19.046	°C
FAC4NEAR	10	1000	109.817	4.136	152.049	4.876	175.718	10.860	°C
FAC_6NEAR	10	1200	114.311	8.191	144.247	7.909	160.014	7.756	°C
FAC5NEAR	10	1400	109.772	5.828	130.357	6.587	141.494	14.981	°C
FAC_7NEAR	10	1700	117.805	4.215	141.634	5.137	155.594	5.719	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	0.159	0.034	0.137	0.042	0.166	0.049	m/s
TB2	100	250	195.811	3.569	212.230	4.198	234.362	5.427	°C
TB1	100	400	804.691	10.624	828.272	8.086	812.830	8.556	°C
FAC_1FAR	100	500	810.556	8.620	793.548	7.508	789.200	7.391	°C
OP_5	100	600	450.481	4.279	473.822	4.277	489.627	4.354	°C
FAC2FAR	100	700	197.333	7.083	266.534	10.022	301.291	36.017	°C
FAC3FAR	100	800	202.739	9.342	286.138	12.520	322.674	48.366	°C
FAC4FAR	100	1000	182.914	15.829	237.307	12.867	265.774	33.419	°C
FAC5FAR	100	1200	153.669	8.289	183.172	12.141	218.260	17.305	°C
FAC_6FAR	100	1400	148.153	6.701	176.719	10.123	200.759	13.631	°C
TA3	200	400	433.468	5.668	545.564	8.354	591.182	11.104	°C
TA7	200	500	796.938	13.437	859.824	8.244	859.758	9.460	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
OP_4	200	600	461.299	4.314	493.919	4.401	512.720	4.542	°C
TA9	200	700	466.745	16.091	581.917	16.915	604.995	48.663	°C
TA11	200	800	519.469	18.095	602.562	23.849	649.396	29.040	°C
TA13	200	1000	335.867	14.566	374.613	13.688	409.491	18.975	°C
TA15	200	1200	229.118	8.440	263.914	13.501	292.105	13.386	°C
TA17	200	1400	143.485	4.448	159.468	6.577	180.489	8.984	°C
TA19	200	1700	133.205	4.727	156.428	5.339	179.705	6.283	°C
FAC_7FAR	300	0	68.096	3.156	74.948	3.206	81.054	3.173	°C
TA2	300	250	161.370	3.313	179.741	3.464	193.384	3.446	°C
TA4	300	400	231.452	3.881	307.314	7.732	347.031	11.383	°C
TA8	300	500	453.094	11.247	586.884	9.808	622.174	24.617	°C
W13	300	600	433.543	3.999	490.731	4.520	527.974	4.745	°C
TA10	300	700	519.173	9.677	612.698	14.606	658.867	33.984	°C
TA12	300	800	660.257	15.520	762.604	17.212	802.702	23.350	°C
TA14	300	1000	404.508	11.675	468.303	18.569	502.659	28.470	°C
TA16	300	1200	197.840	5.714	233.878	7.647	261.202	16.977	°C
TA18	300	1400	145.503	6.029	167.667	7.793	185.175	14.626	°C
TA20	300	1700	123.920	6.074	143.432	6.579	159.179	9.615	°C
NEAR BALCONY EDGE	310	610	380.669	5.425	480.769	6.701	528.296	13.229	°C
TA1	400	400	166.452	3.722	188.083	3.792	205.147	3.684	°C
TA6	400	500	193.553	12.437	327.874	15.251	385.925	26.533	°C
PITOT TEMP_DOWN	400	600	560.131	5.609	679.615	6.336	701.477	7.562	°C
VELOCITY BALCONY	400	600	2.470	0.254	2.765	0.302	2.755	0.465	m/s
TA5	400	700	567.005	20.141	678.853	14.565	692.332	82.030	°C
TA_21	400	800	478.443	15.472	587.587	19.181	644.215	39.053	°C
PITOT TEMP_UP	400	1000	288.095	8.580	378.807	21.928	409.788	25.506	°C
TB23	500	250	66.310	3.204	73.322	3.261	77.557	5.385	°C
TB3	500	400	104.429	3.280	120.791	3.423	129.665	3.752	°C
TB5	500	500	92.817	3.224	107.804	3.285	116.303	4.577	°C
TA23	500	600	99.531	8.145	167.500	14.109	176.429	15.774	°C
TB9	500	700	212.481	11.392	302.897	10.729	337.177	25.257	°C
TB11	500	800	214.465	9.119	294.991	10.429	343.626	39.002	°C
TB13	500	1000	158.259	6.624	220.978	11.470	272.662	27.755	°C
TB15	500	1200	118.073	6.272	161.098	8.107	177.656	17.226	°C
TB17	500	1400	90.790	5.716	117.040	7.508	129.985	12.160	°C
TB19	500	1700	82.098	4.146	106.787	4.073	119.691	3.996	°C
TB4	700	400	61.654	3.239	71.622	3.203	75.466	3.322	°C
TB6	700	500	89.509	3.323	106.966	3.346	119.364	3.729	°C
TB8	700	600	87.526	3.264	105.393	3.200	116.186	3.469	°C
TB10	700	700	75.777	3.189	92.888	3.187	104.931	3.173	°C
TB12	700	800	52.668	3.173	65.673	3.254	73.229	3.186	°C
TB14	700	1000	61.813	3.237	82.219	3.552	93.036	3.354	°C
TB16	700	1200	50.689	3.348	68.660	4.717	70.447	3.987	°C
TB18	700	1400	53.184	3.358	70.924	4.246	74.225	4.257	°C
TB20	700	1700	61.927	3.295	74.414	3.328	85.849	3.732	°C
TB24	900	0	42.605	3.219	47.390	3.216	49.466	3.319	°C
TA24	900	800	39.382	3.156	44.521	3.155	49.304	3.167	°C
TB_22	900	1000	41.280	3.186	47.801	3.173	54.001	3.180	°C
TB_21	900	1200	36.488	3.173	41.464	3.184	46.121	3.187	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
TB7	900	1400	42.232	3.230	48.583	3.206	55.944	3.250	°C
TA_22	900	1700	44.909	3.800	47.955	3.561	56.359	3.862	°C
TUBE_TEMP	-	-	111.529	3.383	138.404	3.547	159.791	3.580	°C
AIRFLOW	-	-	1871.137	50.551	1903.046	50.205	1923.243	53.223	m ³ /hr

Πίνακας Α.5: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P400-Z600, Q120-P400-Z600 και Q144-P400-Z600

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	58.342	3.152	64.181	3.171	74.739	3.163	°C
W1_BACK	-942.5	300	86.924	3.263	104.992	3.344	143.593	3.860	°C
R18 FARDOWN	-912.5	30	255.452	5.198	361.804	6.005	440.331	4.865	°C
R1 FARUP	-912.5	570	488.126	4.758	565.921	6.690	628.203	5.923	°C
R12	-717.5	100	277.840	5.416	396.056	4.983	467.029	5.560	°C
R13	-717.5	200	373.450	9.935	456.695	4.722	520.151	5.139	°C
R14	-717.5	300	513.334	5.590	668.726	8.901	692.044	6.951	°C
R15	-717.5	400	528.376	4.981	637.697	5.734	683.431	6.222	°C
R11	-717.5	500	547.698	4.994	618.371	6.390	670.403	6.092	°C
R4	-492.5	100	180.434	4.755	251.088	4.914	311.095	4.557	°C
R2	-492.5	200	428.087	15.107	381.318	4.120	405.667	4.591	°C
R3	-492.5	300	751.719	11.201	508.872	12.385	473.674	4.887	°C
R16	-492.5	400	716.423	15.002	810.891	8.070	774.500	10.853	°C
R17	-492.5	500	640.125	11.424	712.502	6.246	733.961	6.614	°C
W4_UP	-492.5	600	176.063	3.241	170.495	4.200	181.117	3.781	°C
W5_UP	-492.5	625	78.042	3.177	81.061	3.173	87.798	3.224	°C
R5	-267.5	100	340.513	5.899	450.593	5.776	517.986	5.498	°C
R7	-267.5	200	438.107	6.121	542.467	6.257	614.434	6.240	°C
R9	-267.5	300	560.133	9.843	726.243	7.602	817.300	8.508	°C
R10	-267.5	400	783.534	9.373	874.578	7.718	908.673	7.811	°C
R8	-267.5	500	844.303	7.275	855.575	7.672	872.493	8.674	°C
R19 NEARDOWN	-72.5	30	118.307	4.209	162.538	3.940	203.249	4.237	°C
R6 NEARUP	-72.5	570	692.772	7.428	746.905	7.147	789.332	7.148	°C
W8	-12.5	700	63.384	3.160	68.549	3.158	72.030	3.167	°C
W11	-12.5	1000	60.815	3.231	70.055	3.163	73.486	3.171	°C
BD1	0	50	130.454	3.996	190.362	4.248	218.466	4.545	°C
VELOCITY_1	0	50	-0.950	0.213	-0.948	0.226	-0.843	0.264	m/s
BD2	0	150	259.011	5.073	367.217	4.166	409.182	4.486	°C
VELOCITY_2	0	150	-1.201	0.132	-1.594	0.122	-1.911	0.126	m/s
FAC_7FAR	0	300	55.971	3.194	67.004	3.209	75.056	3.184	°C
BD3	0	350	692.725	10.619	728.670	6.407	729.674	6.077	°C
VELOCITY_3	0	350	2.282	0.132	2.579	0.118	2.675	0.116	m/s
BD4	0	450	740.971	9.026	814.899	8.279	794.985	7.776	°C
VELOCITY_4	0	450	3.620	0.223	4.151	0.240	4.421	0.244	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	5.841	4.023	7.313	4.030	10.775	4.035	kW/m ²
W7	0	700	96.378	3.160	103.266	3.154	114.975	3.283	°C
W3	0	800	66.767	3.155	70.408	3.161	72.919	3.189	°C
HEAT FLUX 2	0	850	4.793	4.026	7.518	4.025	10.396	4.043	kW/m ²
W9	0	1000	90.112	3.308	101.551	3.155	109.131	3.189	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	2.504	4.009	4.491	4.022	6.080	4.020	kW/m ²
W6	0	1200	79.144	3.227	94.815	3.156	99.134	3.154	°C
W12	0	1400	71.662	3.177	84.455	3.169	93.812	3.157	°C
W10	0	1700	67.838	3.179	82.290	3.172	94.587	3.186	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
OP_1	10	0	80.131	3.479	107.900	3.251	128.752	3.442	°C
OP_2	10	250	277.600	5.364	390.046	7.107	450.030	6.004	°C
OP_3	10	400	720.531	16.243	752.132	7.469	749.060	6.412	°C
FAC_1NEAR	10	500	728.197	7.501	766.349	7.644	791.023	7.279	°C
NEAR BALCONY DOWN	10	600	472.415	4.327	511.210	4.679	539.755	4.973	°C
NEAR BALCONY UP	10	620	159.036	3.538	186.028	3.667	218.726	3.523	°C
FAC2NEAR	10	700	155.465	4.521	176.683	4.387	210.605	4.280	°C
FAC3NEAR	10	800	132.784	4.235	160.444	3.865	188.689	4.257	°C
FAC4NEAR	10	1000	106.909	4.064	121.929	4.117	141.986	4.041	°C
FAC_6NEAR	10	1200	108.766	6.626	107.489	4.626	126.535	4.824	°C
FAC5NEAR	10	1400	98.134	3.728	102.174	3.929	123.034	5.549	°C
FAC_7NEAR	10	1700	106.580	3.676	120.358	3.831	144.217	4.702	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	0.154	0.072	0.164	0.019	0.160	0.023	m/s
TB2	100	250	124.893	3.886	165.414	3.799	189.653	3.404	°C
TB1	100	400	678.002	12.721	783.620	7.249	774.103	7.183	°C
FAC_1FAR	100	500	719.107	8.703	774.427	7.986	750.161	7.288	°C
OP_5	100	600	355.363	5.821	426.832	4.736	452.427	4.121	°C
FAC2FAR	100	700	185.603	6.420	194.133	5.860	234.872	5.409	°C
FAC3FAR	100	800	157.640	7.433	168.776	7.376	210.442	7.296	°C
FAC4FAR	100	1000	160.550	9.463	149.727	7.557	192.360	9.045	°C
FAC5FAR	100	1200	128.185	6.736	129.608	5.451	159.970	6.334	°C
FAC_6FAR	100	1400	126.379	5.561	135.172	6.169	172.874	8.854	°C
TA3	200	400	343.934	4.833	489.498	7.242	557.011	7.117	°C
TA7	200	500	692.989	13.893	819.618	7.566	839.896	7.731	°C
OP_4	200	600	368.809	6.305	450.059	4.787	474.930	4.252	°C
VELOCITY BALCONY	200	600	1.120	0.498	2.179	0.257	2.372	0.277	m/s
TA9	200	700	301.347	18.381	313.899	12.759	397.096	15.237	°C
TA11	200	800	377.461	23.605	400.851	14.733	489.636	14.862	°C
TA13	200	1000	259.808	8.478	310.718	10.892	379.489	15.101	°C
TA15	200	1200	192.692	5.808	231.071	8.461	297.090	13.403	°C
TA17	200	1400	127.018	3.833	150.486	4.407	187.008	6.702	°C
TA19	200	1700	115.988	3.656	147.179	4.080	178.117	5.152	°C
TA2	300	250	117.692	3.596	149.633	3.365	166.541	3.379	°C
TA4	300	400	227.644	4.425	295.421	4.351	338.002	5.018	°C
TA8	300	500	494.093	12.917	645.184	8.378	699.052	9.332	°C
W13	300	600	399.956	7.510	487.542	4.767	515.039	4.643	°C
TA10	300	700	609.914	15.487	662.924	18.158	724.618	13.324	°C
TA12	300	800	571.371	13.904	685.860	12.015	753.224	10.240	°C
TA14	300	1000	329.981	10.308	459.330	14.268	538.418	16.180	°C
TA16	300	1200	165.584	4.347	216.639	7.012	269.310	7.735	°C
TA18	300	1400	124.263	4.474	161.529	5.746	196.789	7.591	°C
TA20	300	1700	102.156	4.508	133.832	5.218	160.417	5.813	°C
TA1	400	400	125.943	3.937	157.651	3.406	174.842	3.330	°C
TA6	400	500	339.140	6.446	472.112	6.234	528.828	8.739	°C
TA23	400	600	408.234	4.234	472.701	4.397	527.944	5.263	°C
TA5	400	700	607.240	17.005	665.393	12.457	742.360	11.994	°C
TA_21	400	800	594.855	10.972	724.269	8.478	773.345	9.121	°C
PITOT TEMP_UP	400	1000	261.728	10.507	417.424	14.610	467.682	14.053	°C
NEAR BALCONY EDGE	410	610	397.044	6.292	543.750	9.029	688.344	11.594	°C
TB23	500	250	57.901	3.302	71.239	3.268	77.666	3.247	°C
TB3	500	400	94.171	3.889	115.502	3.640	126.308	3.493	°C
TB5	500	500	90.404	3.694	111.110	3.513	123.507	3.541	°C
PITOT TEMP_DOWN	500	600	388.355	4.192	529.181	5.105	558.610	6.301	°C
TB9	500	700	331.797	6.405	484.784	11.713	531.778	12.378	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
TB11	500	800	266.701	9.814	420.053	12.812	460.449	13.244	°C
TB13	500	1000	134.397	6.031	232.945	14.451	262.864	10.570	°C
TB15	500	1200	85.841	4.718	135.133	8.734	155.694	5.824	°C
TB17	500	1400	71.092	4.217	100.697	6.158	113.558	4.845	°C
TB19	500	1700	76.332	3.238	100.817	3.390	120.506	3.289	°C
TB4	700	400	52.203	3.231	63.559	3.211	70.133	3.207	°C
TB6	700	500	86.126	3.506	108.110	3.366	119.855	3.371	°C
TB8	700	600	88.759	3.350	112.908	3.204	126.738	3.281	°C
TB10	700	700	63.954	3.196	81.247	3.187	92.864	3.211	°C
TB12	700	800	57.526	3.213	74.045	3.318	85.502	3.293	°C
TB14	700	1000	60.231	3.240	76.552	3.297	88.435	3.243	°C
TB16	700	1200	50.934	3.198	65.300	3.487	75.211	3.260	°C
TB18	700	1400	52.534	3.180	66.842	3.319	77.546	3.215	°C
TB20	700	1700	70.908	3.514	75.837	3.656	94.554	4.427	°C
TB24	900	0	42.646	3.188	47.582	3.172	51.682	3.174	°C
TA24	900	800	41.085	3.169	47.412	3.159	52.713	3.171	°C
TB_22	900	1000	42.109	3.168	48.577	3.164	53.635	3.164	°C
TB_21	900	1200	40.408	3.171	46.202	3.175	50.330	3.173	°C
TB7	900	1400	46.809	3.169	56.502	3.172	64.748	3.201	°C
TA_22	900	1700	67.003	3.704	68.755	3.971	78.180	4.298	°C
TUBE_TEMP	-	-	87.883	3.298	105.004	3.346	119.113	3.347	°C
AIRFLOW	-	-	1880.302	48.295	1888.631	48.465	1898.657	48.984	m ³ /hr

Πίνακας Α.6: Μέσες τιμές και ολικά σφάλματα θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμορροής και παροχής καυσαερίων για τις δοκιμές Q90-P200-Z500, Q120-P200-Z500 και Q144-P200-Z500

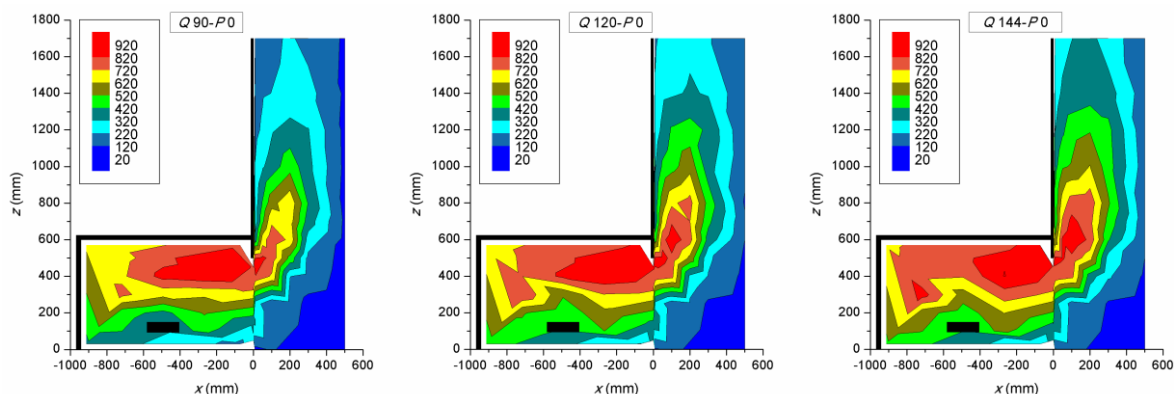
Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
W2_BACK	-967.5	300	57.676	3.186	56.925	3.153	68.597	3.214	°C
W1_BACK	-942.5	300	107.479	3.190	107.041	6.821	211.511	5.097	°C
R18 FARDOWN	-912.5	30	228.582	4.900	435.681	7.312	443.963	10.462	°C
R1 FARUP	-912.5	570	463.118	6.322	559.706	5.530	625.100	7.023	°C
R12	-717.5	100	239.299	5.056	391.603	4.897	458.071	5.956	°C
R13	-717.5	200	259.020	6.676	416.854	5.354	483.414	7.337	°C
R14	-717.5	300	493.347	13.490	704.572	16.219	734.921	31.532	°C
R15	-717.5	400	493.179	5.697	636.073	7.692	685.117	13.244	°C
R11	-717.5	500	509.728	5.501	611.493	5.754	670.733	6.147	°C
R4	-492.5	100	184.067	4.865	299.334	4.741	367.673	5.361	°C
R2	-492.5	200	533.511	17.352	393.325	7.072	380.565	4.992	°C
R3	-492.5	300	797.969	12.694	798.360	26.084	605.067	44.149	°C
R16	-492.5	400	618.093	33.065	764.416	20.962	802.107	21.448	°C
R17	-492.5	500	561.275	15.273	678.520	10.917	736.123	9.696	°C
W4_UP	-492.5	600	216.443	4.131	340.129	4.046	377.088	4.215	°C
W5_UP	-492.5	625	59.712	3.160	69.952	3.172	74.129	3.163	°C
R5	-267.5	100	266.614	5.778	398.583	5.307	476.177	5.505	°C
R7	-267.5	200	367.210	8.592	507.814	7.957	573.286	6.782	°C
R9	-267.5	300	501.007	7.136	702.731	10.579	817.442	19.901	°C
R10	-267.5	400	793.580	15.252	871.976	9.252	920.524	14.806	°C
R8	-267.5	500	822.559	9.959	815.951	13.078	842.971	17.395	°C
R19 NEARDOWN	-72.5	30	112.283	4.206	174.235	4.382	212.109	7.238	°C
R6_NEARUP	-72.5	570	694.061	11.325	732.245	10.936	763.530	9.074	°C
W8	-12.5	700	64.888	3.163	76.831	3.199	83.380	3.227	°C
W11	-12.5	1000	64.630	3.225	63.032	3.159	72.624	3.403	°C
BD1	0	50	118.982	5.130	183.913	7.699	227.076	10.858	°C
VELOCITY_1	0	50	-0.911	0.226	-1.055	0.194	-1.127	0.231	m/s
BD2	0	150	204.004	15.760	328.360	13.974	366.367	16.816	°C

Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
VELOCITY_2	0	150	-0.309	0.501	-0.801	0.275	-0.900	0.263	m/s
BD3	0	350	680.927	13.776	749.166	11.495	737.512	10.669	°C
VELOCITY_3	0	350	2.152	0.226	2.394	0.184	2.337	0.337	m/s
BD4	0	450	712.207	11.127	770.882	10.333	768.943	10.874	°C
VELOCITY_4	0	450	2.749	0.206	3.372	0.265	3.688	0.246	m/s
HEAT FLUX 1	0	650	11.227	6.218	26.536	6.267	26.769	9.425	kW/m ²
W7	0	700	112.234	3.363	177.216	4.290	221.243	4.046	°C
W3	0	800	71.855	3.197	82.090	3.189	95.523	3.266	°C
HEAT FLUX 2	0	850	9.445	6.109	21.677	8.003	26.190	9.767	kW/m ²
W9	0	1000	106.602	3.323	160.555	4.673	204.875	3.568	°C
HEAT FLUX 3	0	1050	7.442	4.904	15.891	6.147	18.696	5.902	kW/m ²
W6	0	1200	103.825	3.318	138.334	3.801	169.871	3.227	°C
W12	0	1400	93.669	3.460	109.003	3.216	122.992	3.154	°C
W10	0	1700	79.970	3.408	102.434	3.159	108.332	3.156	°C
OP_1	10	0	64.149	3.273	94.233	3.692	115.304	4.308	°C
OP_2	10	250	248.690	6.952	383.720	11.911	493.406	39.931	°C
OP_3	10	400	753.031	29.507	818.717	24.143	787.168	16.609	°C
FAC_1NEAR	10	600	212.145	31.035	292.971	26.022	329.926	42.956	°C
FAC2NEAR	10	700	236.841	8.249	316.921	14.209	327.266	27.648	°C
FAC3NEAR	10	800	285.058	19.446	405.738	19.582	384.086	46.138	°C
FAC4NEAR	10	1000	264.265	11.689	387.298	16.108	380.756	37.527	°C
FAC5NEAR	10	1200	252.861	11.636	352.951	20.729	350.375	40.570	°C
FAC_6NEAR	10	1400	221.356	17.075	318.255	20.079	350.655	39.460	°C
FAC_7NEAR	10	1700	178.882	13.526	262.706	17.099	285.349	25.478	°C
OP_5	50	500	303.882	7.923	455.907	4.328	481.450	4.429	°C
PITOT TEMP_UP	50	1200	307.050	28.681	464.802	24.754	513.963	55.914	°C
VELOCITY FACADE	50	1200	3.196	0.643	3.626	0.633	3.339	0.731	m/s
TB2	100	250	94.411	5.202	123.795	5.445	136.250	5.227	°C
TB1	100	400	719.647	29.525	770.811	14.684	746.627	12.673	°C
OP_4	100	500	336.755	7.569	488.528	4.778	519.675	4.590	°C
FAC_1FAR	100	600	504.853	47.025	668.151	42.826	726.256	77.163	°C
FAC2FAR	100	700	594.550	38.645	724.515	43.443	714.053	83.820	°C
FAC3FAR	100	800	575.283	29.203	709.409	46.210	702.036	81.043	°C
FAC4FAR	100	1000	424.626	11.674	438.843	186.93 1	603.262	63.732	°C
FAC5FAR	100	1200	320.531	15.420	455.010	23.992	489.181	59.161	°C
FAC_6FAR	100	1400	249.894	19.564	361.070	21.643	411.626	46.080	°C
FAC_7FAR	100	1700	202.887	11.953	282.992	16.463	315.451	22.983	°C
TA3	200	400	384.851	15.965	574.072	30.564	660.763	23.929	°C
W13	200	500	386.271	7.535	514.826	4.971	559.938	4.879	°C
TA7	200	600	512.858	86.019	733.088	64.646	667.605	130.60 6	°C
TA9	200	700	470.354	76.371	723.716	76.452	662.253	116.29	°C
TA11	200	800	477.967	46.437	686.980	45.453	682.842	94.517	°C
TA13	200	1000	367.000	21.174	514.785	25.647	560.784	69.990	°C
TA15	200	1200	589.119	24.029	377.650	20.634	438.579	57.413	°C
TA17	200	1400	211.661	7.711	268.603	18.445	324.390	11.178	°C
TA19	200	1700	180.222	9.769	217.673	22.714	276.889	9.983	°C
TA_22	300	0	73.743	4.270	93.439	4.635	105.912	3.892	°C

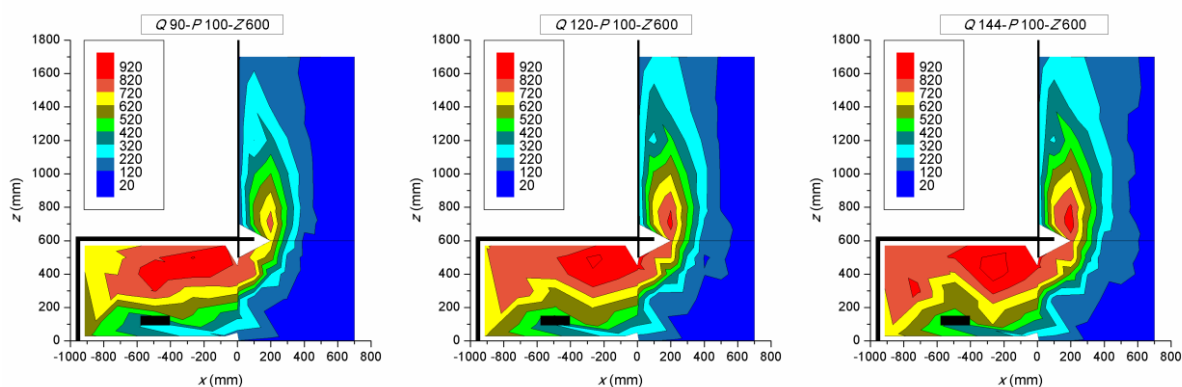
Αισθητήρας	x (mm)	z (mm)	Q90		Q120		Q144		Mov.
			Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	Μέση τιμή	U_T	
TA2	300	250	116.028	6.032	155.652	8.592	173.693	9.670	°C
TA4	300	400	161.438	4.902	239.705	11.413	302.950	7.695	°C
ΠΙΤΟΤ TEMP_DOWN	300	500	513.217	7.857	632.997	6.102	695.776	11.745	°C
VELOCITY BALCONY	300	500	0.256	0.118	2.223	0.686	2.839	0.724	m/s
TA8	300	600	526.344	38.099	627.350	36.544	724.169	48.004	°C
TA10	300	700	507.653	39.360	623.067	33.639	697.173	47.418	°C
TA12	300	800	425.245	32.129	531.374	42.515	622.966	45.681	°C
TA14	300	1000	299.187	11.298	377.252	21.113	514.168	47.927	°C
TA16	300	1200	219.512	10.398	257.172	25.839	381.510	28.912	°C
TA18	300	1400	174.501	6.297	211.545	26.892	313.283	29.926	°C
TA20	300	1700	143.105	10.517	163.817	25.744	253.129	41.820	°C
TA1	400	400	96.157	4.590	134.243	3.665	149.750	3.655	°C
TA6	400	500	112.943	4.536	169.427	8.130	203.908	8.249	°C
TB_21	400	600	185.685	24.578	272.875	23.594	419.876	60.209	°C
TA5	400	700	242.194	16.416	315.277	20.359	426.509	39.767	°C
TA_21	400	800	237.090	31.929	288.549	34.924	414.707	88.555	°C
TA23	400	1000	169.473	20.360	186.965	22.282	426.505	94.958	°C
TB23	500	250	51.414	3.645	67.427	4.009	72.341	3.335	°C
TB3	500	400	106.119	5.260	148.324	3.851	167.770	7.358	°C
TB5	500	500	108.370	4.825	151.716	3.973	171.150	7.760	°C
TB7	500	600	106.637	4.482	156.259	4.176	190.657	5.996	°C
TB9	500	700	97.541	3.848	141.345	4.091	199.059	16.762	°C
TB11	500	800	88.678	5.907	121.988	5.004	204.965	30.789	°C
TB13	500	1000	71.316	10.553	87.163	7.400	198.891	50.029	°C
TB15	500	1200	69.106	8.917	83.962	12.715	193.983	61.919	°C
TB17	500	1400	79.506	15.983	89.534	8.310	183.029	54.992	°C
TB19	500	1700	90.237	7.037	114.977	5.703	162.027	13.325	°C
TB_22	700	0	38.379	3.170	45.399	3.252	50.358	3.432	°C
TB4	700	400	62.567	3.543	83.632	4.719	90.454	4.595	°C
TB6	700	500	60.451	3.293	82.612	3.543	94.463	3.381	°C
TB8	700	600	57.508	3.477	79.300	3.971	90.300	3.697	°C
TB10	700	700	45.574	3.216	59.905	3.256	69.642	3.697	°C
TB12	700	800	53.226	3.920	71.963	3.488	83.068	5.457	°C
TB14	700	1000	61.994	3.844	90.137	4.069	110.257	4.470	°C
TB16	700	1200	44.882	3.310	58.181	3.553	74.349	6.851	°C
TB18	700	1400	53.180	3.366	77.831	3.277	98.699	4.058	°C
TB20	700	1700	68.562	3.374	95.560	5.076	112.039	3.915	°C
TUBE_TEMP	-	-	90.446	5.543	126.035	5.687	139.765	13.324	°C
AIRFLOW	-	-	1883.335	54.353	1909.067	52.807	1917.613	83.885	m ³ /h r

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

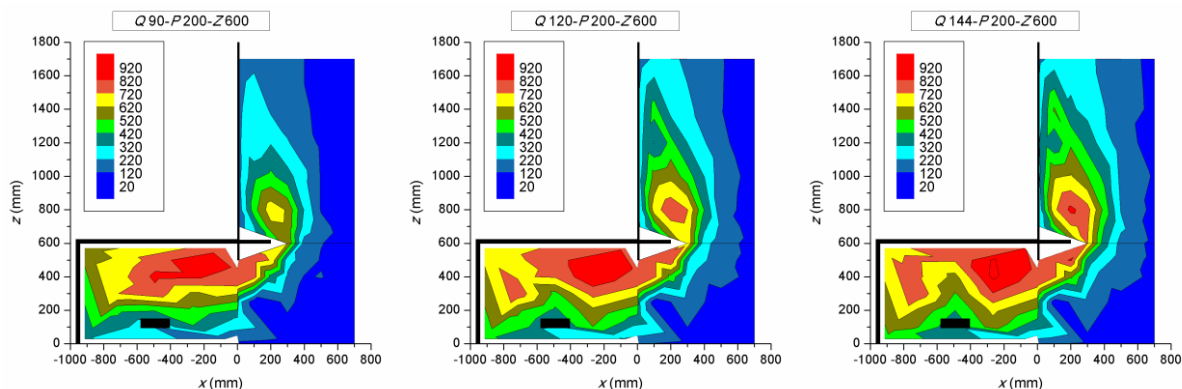
Στα Σχήματα Β.1-Β.6 απεικονίζονται οι κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών για όλες τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Κάθε Σχήμα αφορά σταθερό βάθος και ύψος εξώστη και από αριστερά προς τα δεξιά παρουσιάζονται τα τρία αυξανόμενα επίπεδα ισχύος (Q_{90} , Q_{120} και Q_{144}).



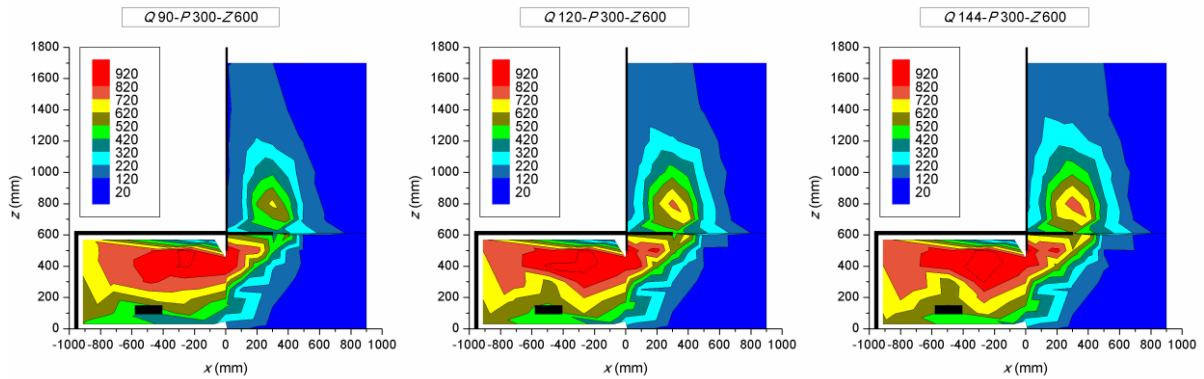
Σχήμα Β.1: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q_{90-P0} (αριστερά), Q_{120-P0} (αριστερά) και Q_{144-P0} (δεξιά)



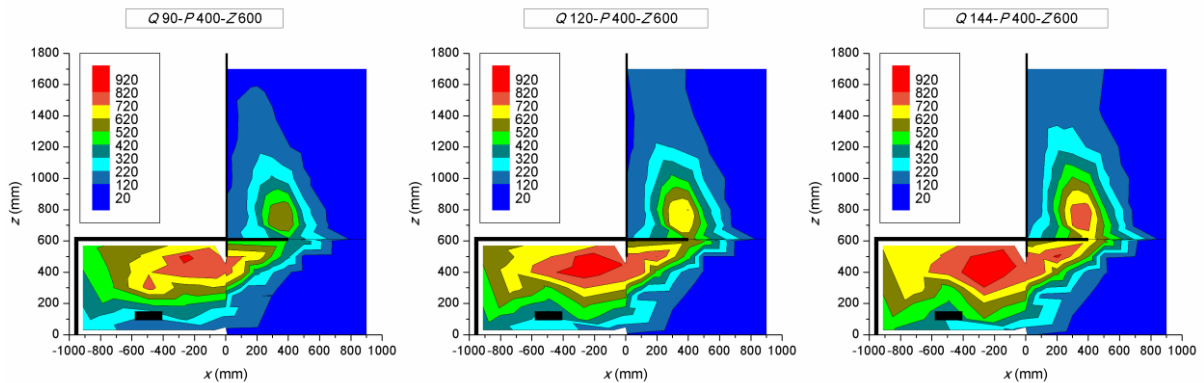
Σχήμα Β.2: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις $Q_{90-P100-Z600}$ (αριστερά), $Q_{120-P100-Z600}$ (αριστερά) και $Q_{144-P100-Z600}$ (δεξιά)



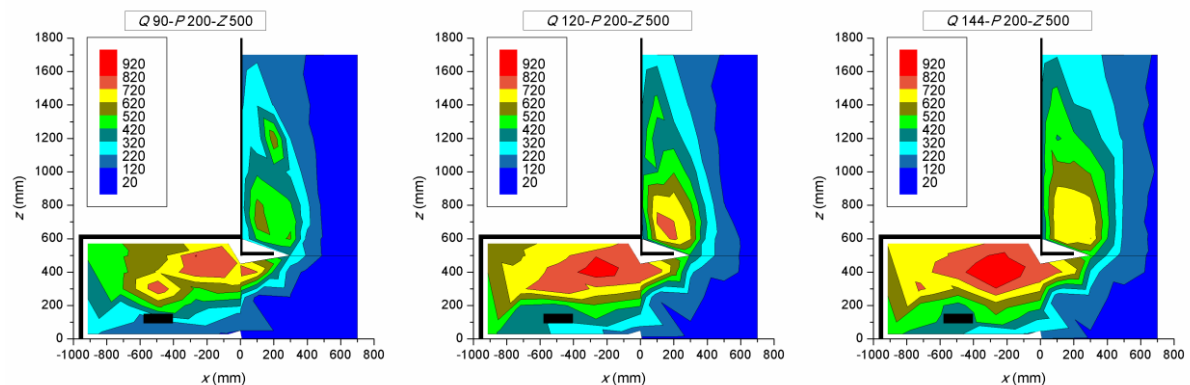
Σχήμα Β.3: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P200-Z600 (αριστερά), Q120-P200-Z600 (αριστερά) και Q144- P200-Z600 (δεξιά)



Σχήμα Β.4: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P300-Z600 (αριστερά), Q120-P300-Z600 (αριστερά) και Q144- P300-Z600 (δεξιά)



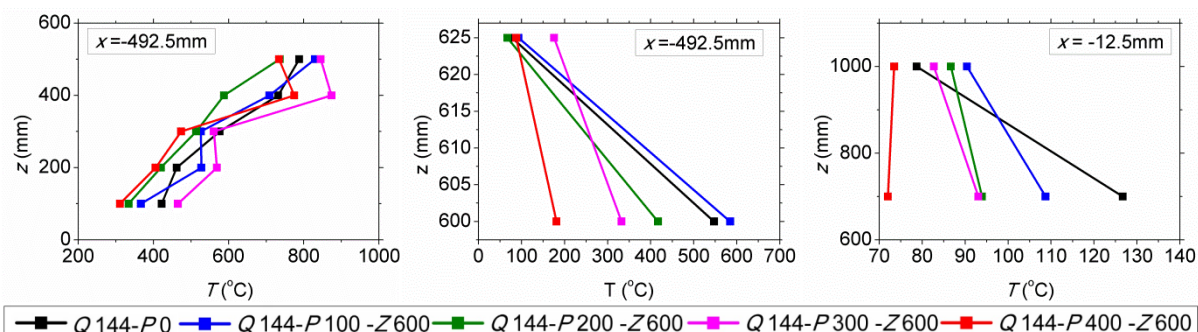
Σχήμα Β.5: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P400-Z600 (αριστερά), Q120-P400-Z600 (αριστερά) και Q144- P400-Z600 (δεξιά)



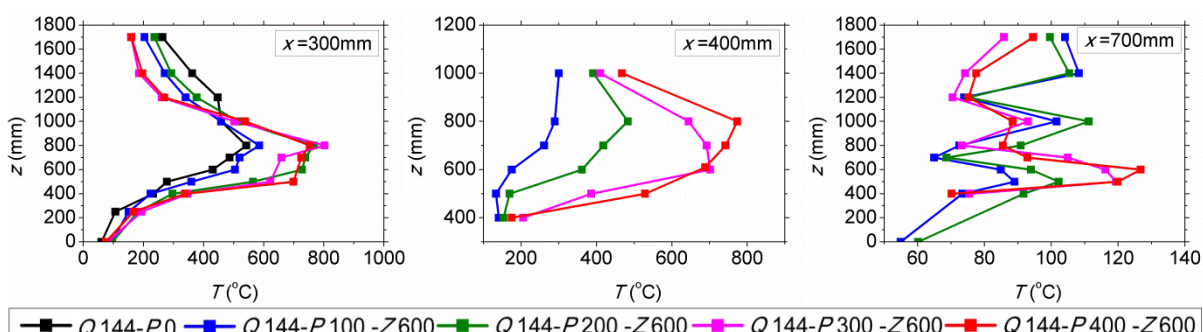
Σχήμα Β.6: Κατανομές ισοθερμοκρασιακών καμπυλών εσωτερικά και εξωτερικά του διαμερίσματος για τις περιπτώσεις Q90-P200-Z500 (αριστερά), Q120-P200-Z500 (αριστερά) και Q144- P200-Z500 (δεξιά)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

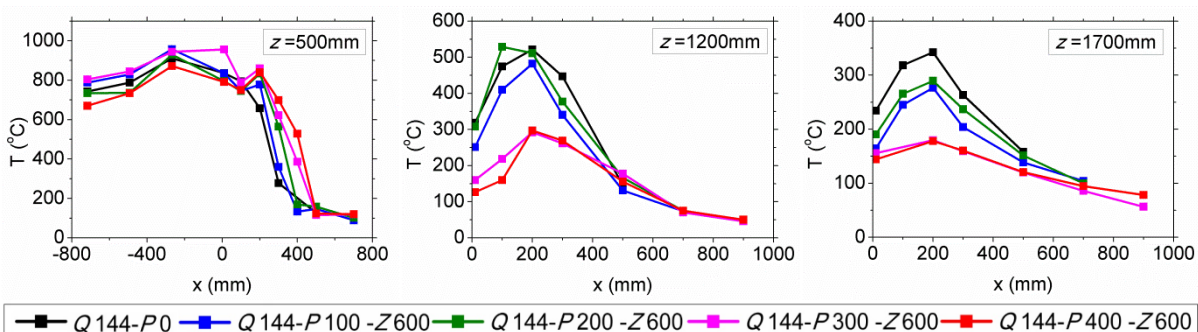
Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και δεν παρατέθηκαν στο κυρίως κείμενο της εργασίας.



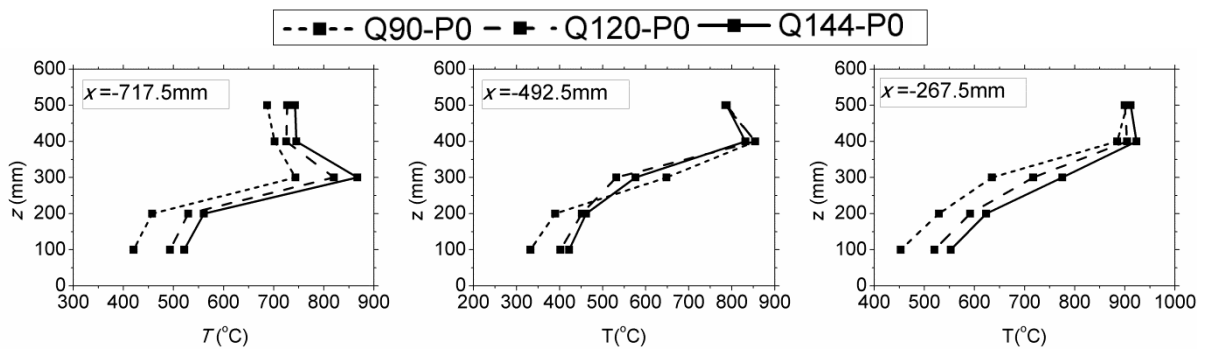
Σχήμα Γ.1: Θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος (αριστερά), στο τοίχωμα της οροφής του διαμερίσματος (κέντρο) στη θέση $x = -492.5$ mm και στο τοίχωμα της πρόσοψης στη θέση $x = -12.5$ mm (δεξιά) συναρτήσει του ύψους z στη mm για ισχύ 144 kW για εξώστες σε ύψος 600 mm με παράμετρο το βάθος εξώστη



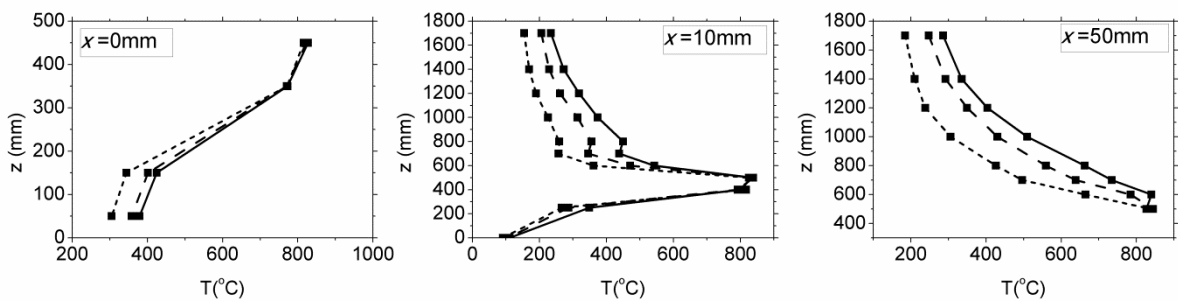
Σχήμα Γ.2: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει του ύψους z για απόσταση $x = 300$ mm (αριστερά), $x = 400$ mm (κέντρο) και $x = 700$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη



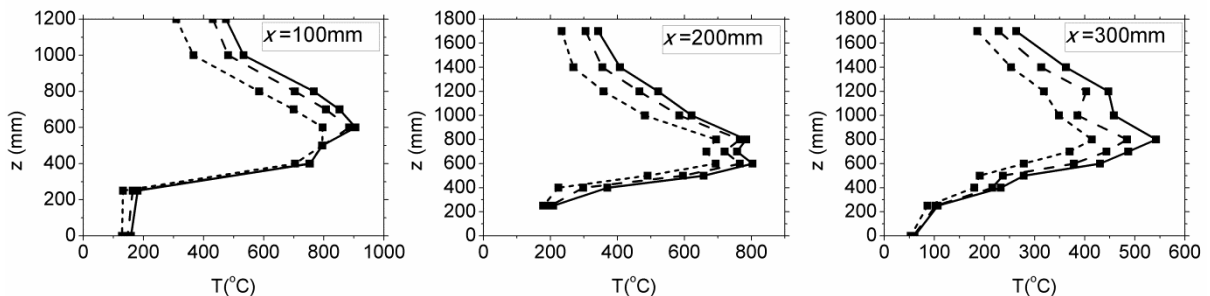
Σχήμα Γ.3: Θερμοκρασίες εξερχόμενης φωτιάς συναρτήσει της απόστασης x για ύψος $z = 500$ mm (αριστερά), ύψος $z = 1200$ mm (κέντρο) και ύψος $z = 1700$ mm (δεξιά) για εξώστη σε ύψος 600 mm, ισχύ 144 kW με παράμετρο το βάθος του εξώστη



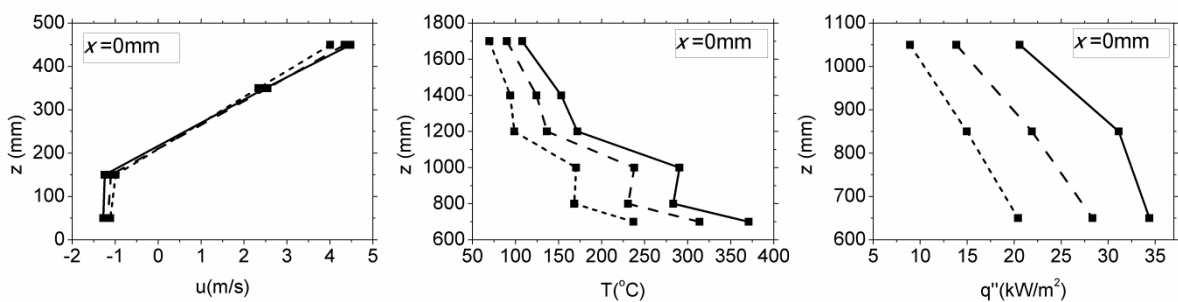
Σχήμα Γ.4: Θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος στη θέση $x=-717.5$ mm (αριστερά), $x=-492.5$ mm (κέντρο) και $x=-267.5$ mm (δεξιά) για την περίπτωση χωρίς εξώστη με παράμετρο την ισχύ



Σχήμα Γ.5: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=0$ mm (αριστερά), στη θέση $x=10$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=50$ mm (δεξιά) για την περίπτωση χωρίς εξώστη με παράμετρο την ισχύ

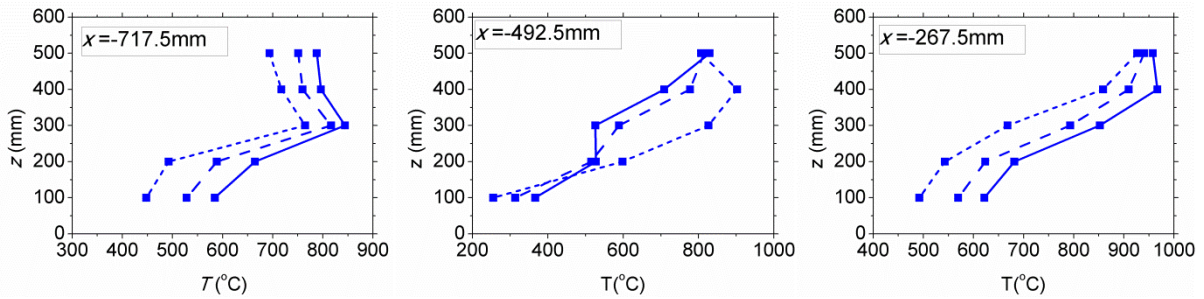


Σχήμα Γ.6: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=100$ mm (αριστερά), στη θέση $x=200$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=300$ mm (δεξιά) για την περίπτωση χωρίς εξώστη με παράμετρο την ισχύ

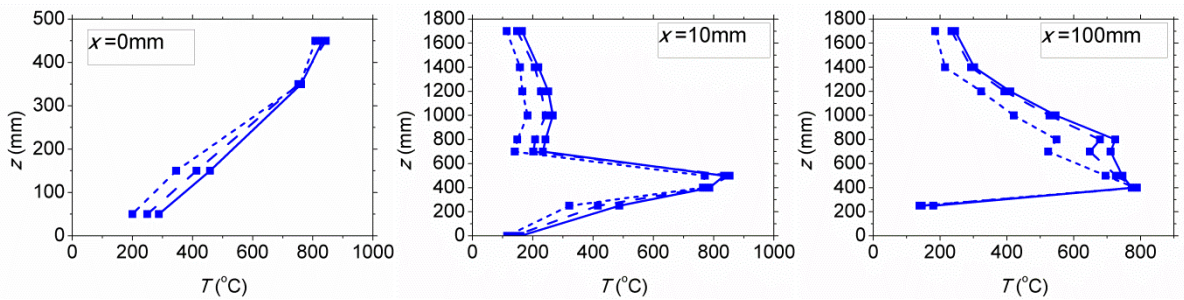


Σχήμα Γ.7: Ταχύτητες στο άνοιγμα (αριστερά), θερμοκρασίες στο τοίχωμα της πρόσοψης (κέντρο) και θερμορροή στην πρόσοψη (δεξιά) συναρτήσεσι του ύψους z για την περίπτωση χωρίς εξώστη με παράμετρο την ισχύ

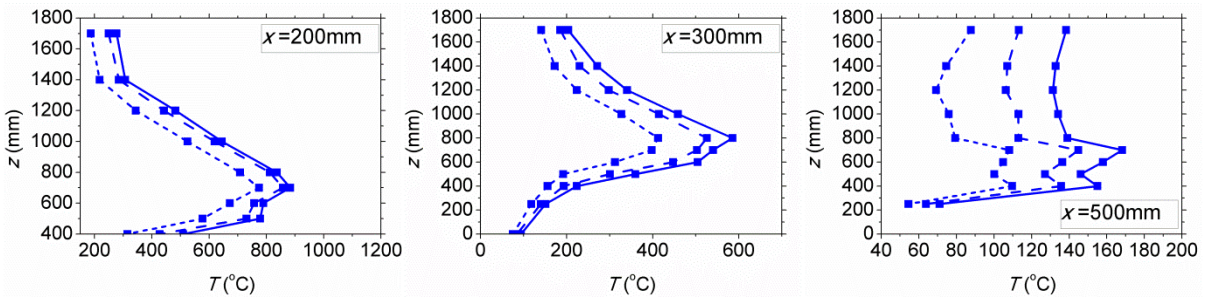
—■— Q 90-P 100- Z 600 —■— Q 120-P 100- Z 600 —■— Q 144-P 100 -Z 600



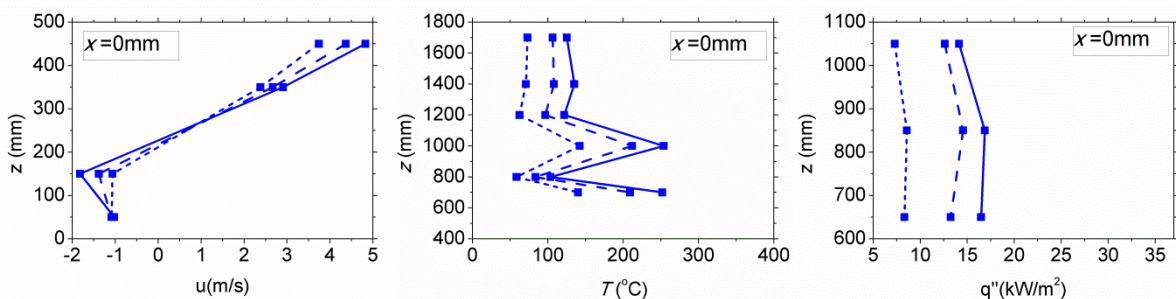
Σχήμα Γ.8: Θερμοκρασίες εντός του διαμερισματος στη θέση $x=-717.5$ mm (αριστερά), $x=-492.5$ mm (κέντρο) και $x=-267.5$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 100 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ



Σχήμα Γ.9: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=0$ mm (αριστερά), στη θέση $x=10$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=100$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 100 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ

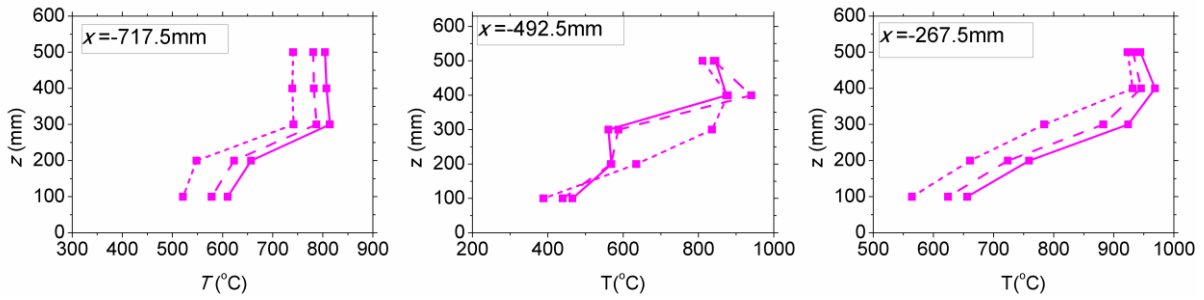


Σχήμα Γ.10: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=200$ mm (αριστερά), στη θέση $x=300$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=500$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 100 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ

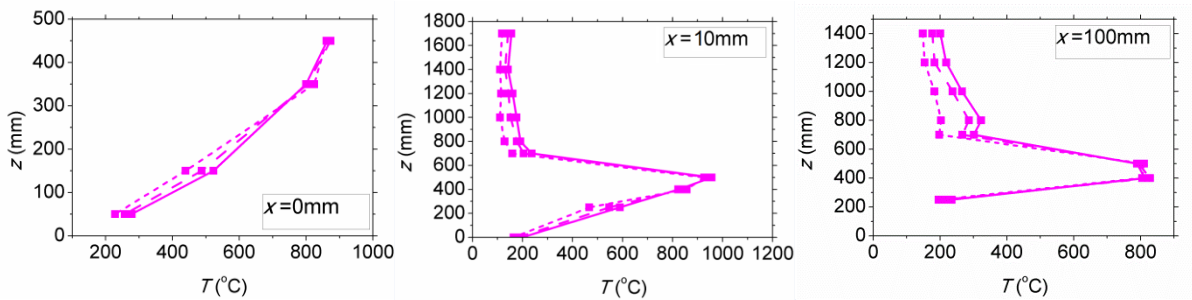


Σχήμα Γ.11: Ταχύτητες στο άνοιγμα (αριστερά), θερμοκρασίες στο τοίχωμα της πρόσοψης (κέντρο) και θερμορροή στην πρόσοψη (δεξιά) συναρτήσεσι του ύψους z για βάθος εξώστη 100 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ

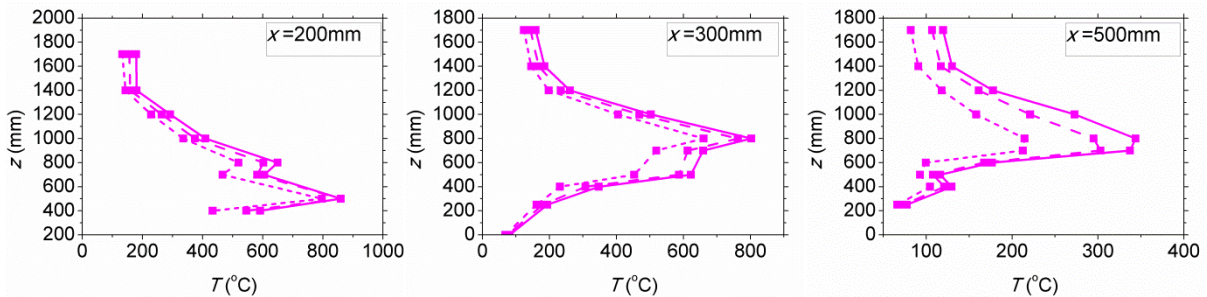
---■--- Q 90-P 300-Z 600 -■- Q 120 -P 300 -Z 600 -■- Q 144-P 300 -Z 600



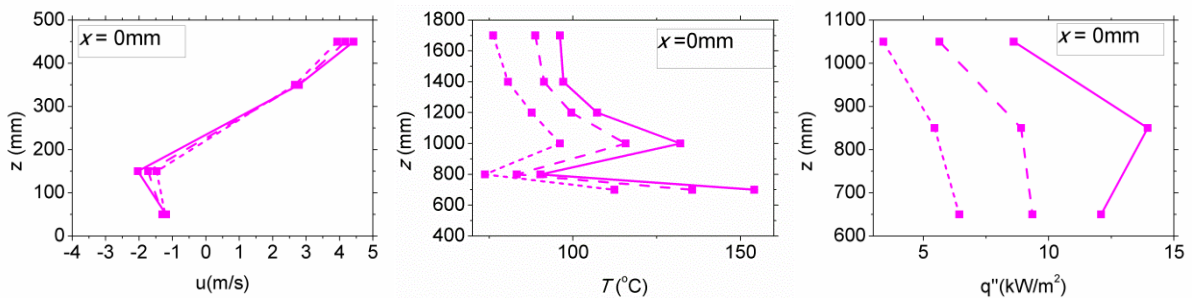
Σχήμα Γ.12: Θερμοκρασίες εντός του διαμερίσματος στη θέση $x=-717.5$ mm (αριστερά), $x=-492.5$ mm (κέντρο) και $x=-267.5$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 300 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ



Σχήμα Γ.13: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=0$ mm (αριστερά), στη θέση $x=10$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=100$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 100 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ



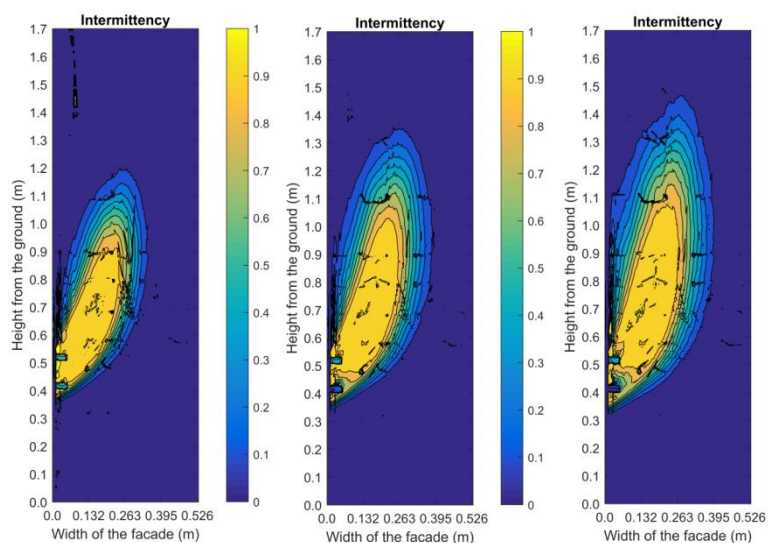
Σχήμα Γ.14: Θερμοκρασίες ΦΕΑ συναρτήσεσι του ύψους z στη θέση $x=200$ mm (αριστερά), στη θέση $x=300$ mm (κέντρο) και στη θέση $x=500$ mm (δεξιά) για βάθος εξώστη 300 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ



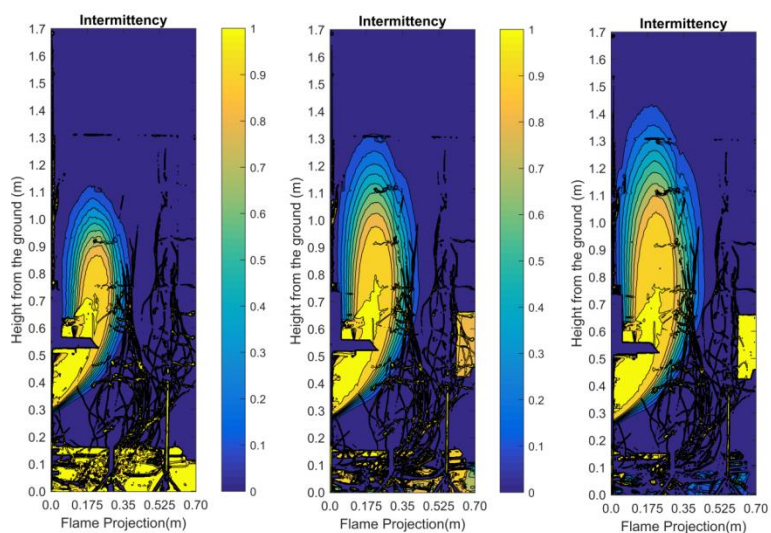
Σχήμα Γ.11: Ταχύτητες στο άνοιγμα (αριστερά), θερμοκρασίες στο τοίχωμα της πρόσοψης (κέντρο) και θερμορορή στην πρόσοψη (δεξιά) συναρτήσεσι του ύψους z για βάθος εξώστη 300 mm σε ύψος 600 mm με παράμετρο την ισχύ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

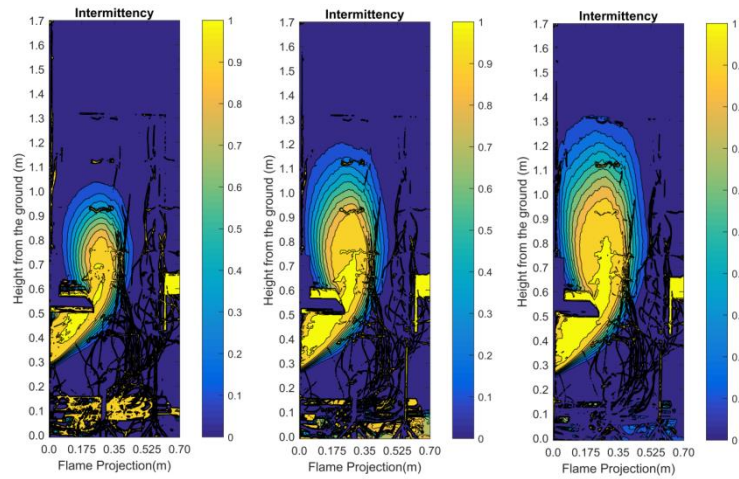
Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνας που εξήχθησαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πρόγραμμα MATLAB. Τα Σχήματα Δ.1-Δ.6 αντιστοιχούν στις πλάγιες όψεις των δοκιμών, ενώ τα Σχήματα Δ.7-Δ.12 αντιστοιχούν στις εμπρόσθιες όψεις των δοκιμών. Σε κάθε Σχήμα απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά τα ισοπιθανοτικά διαγράμματα για ισχύ 90, 120 και 144 kW αντίστοιχα.



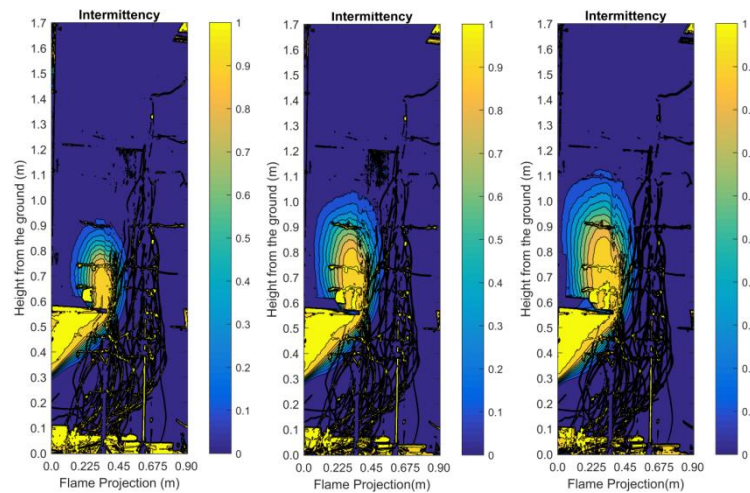
Σχήμα Δ.1: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση χωρίς εξώστη



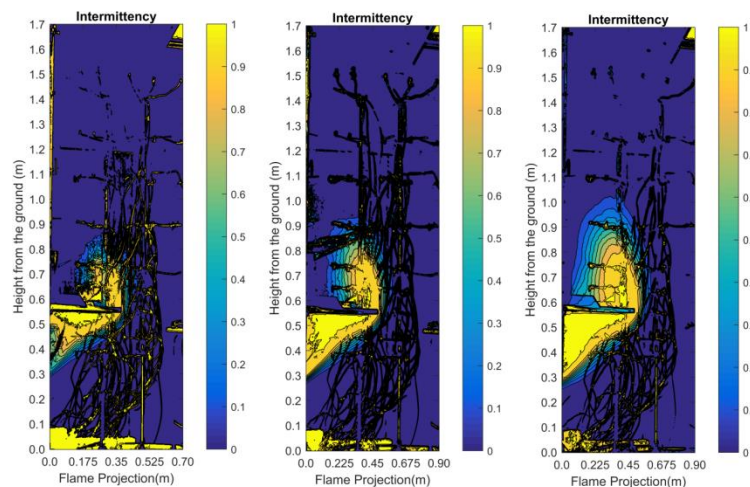
Σχήμα Δ.2: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 100 mm σε ύψος 600 mm



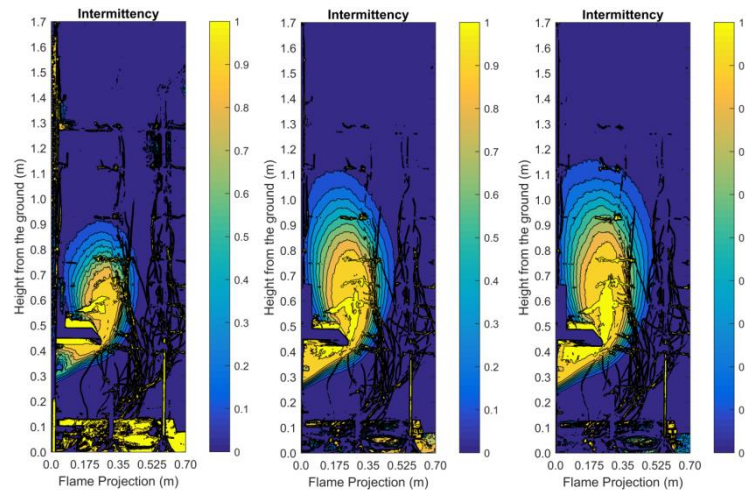
Σχήμα Δ.3: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm σε ύψος 600 mm



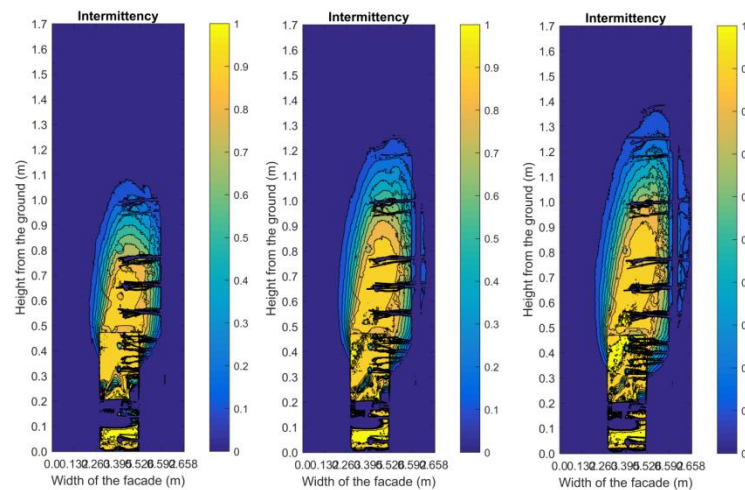
Σχήμα Δ.4: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm



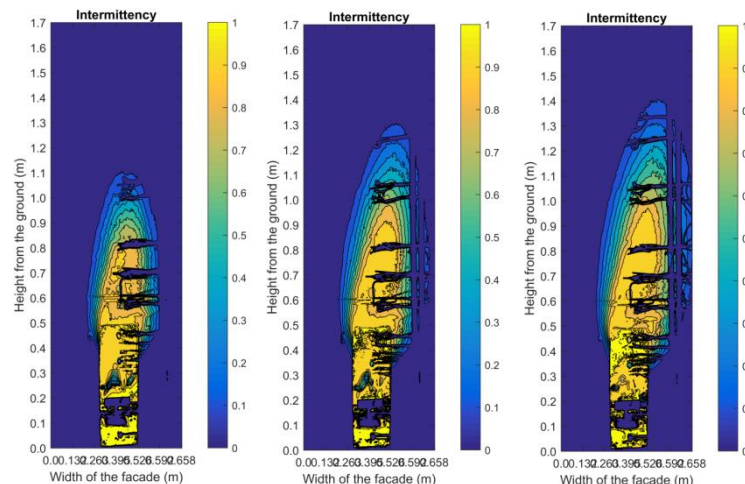
Σχήμα Δ.5: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 400 mm σε ύψος 600 mm



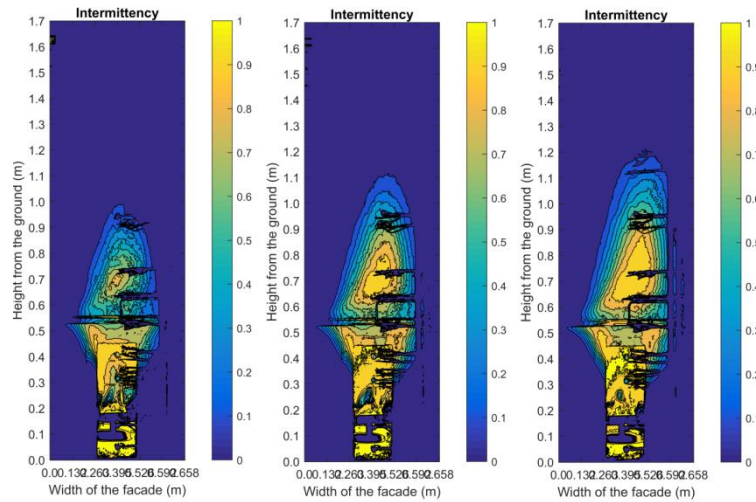
Σχήμα Δ.6: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από πλάγια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm σε ύψος 500 mm



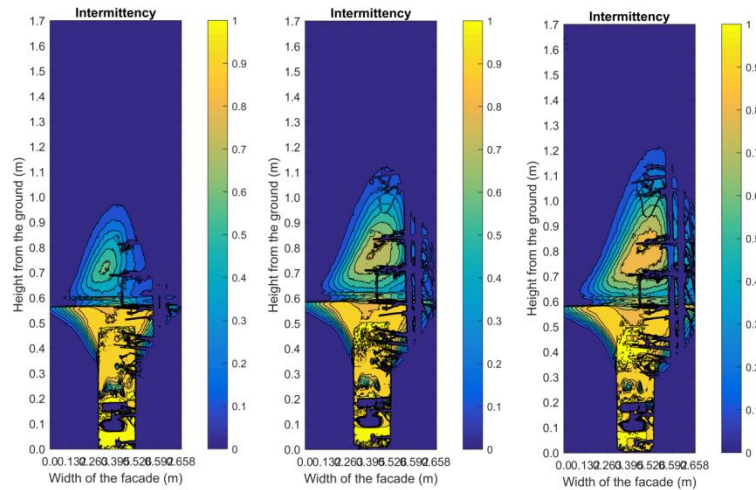
Σχήμα Δ.7: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση χωρίς εξώστη



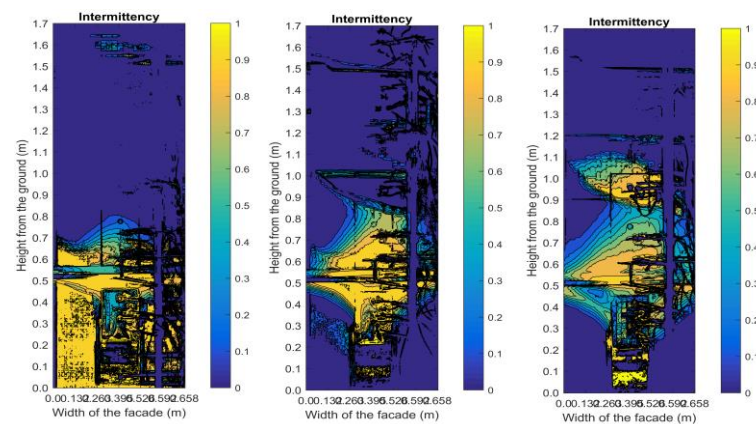
Σχήμα Δ.8: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 100 mm σε ύψος 600 mm



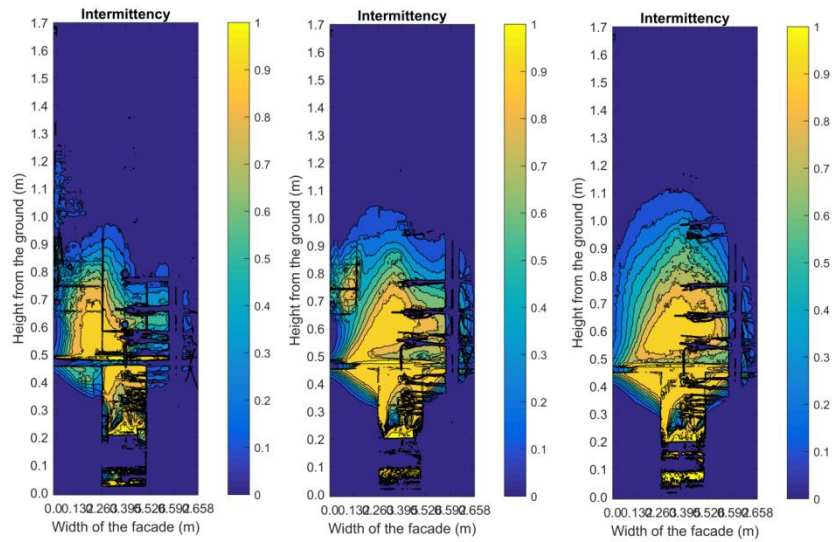
Σχήμα Δ.9: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 200 mm σε ύψος 600 mm



Σχήμα Δ.10: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 300 mm σε ύψος 600 mm



Σχήμα Δ.11: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση εξώστη βάθους 400 mm σε ύψος 600 mm



Σχήμα Δ.12: Ισοπιθανοτικό διάγραμμα φλόγας (flame intermittency) ισχύος 90 kW (αριστερά), 120 kW (κέντρο) και 144 kW (δεξιά) από την εμπρόσθια όψη για την περίπτωση εξώστη βάρους 200 mm σε ύψος 500 mm