



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

# **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ANNA ΜΥΡΩΔΙΑ**

ΑΘΗΝΑ 2010





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

# **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ANNA ΜΥΡΩΔΙΑ**

ΑΘΗΝΑ 2010





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

# **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ANNA ΜΥΡΩΔΙΑ**

ΑΘΗΝΑ 2010



## **Υπεύθυνη Καθηγήτρια**

Δρ. Μαρία Φούντη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.









## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην βαθύτερη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς. Η γυψοσανίδα είναι ένα ευρέως διαδεδομένο δομικό υλικό που χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή κτιρίων για τη διαμόρφωση εσωτερικών και εξωτερικών τοίχων. Κατασκευάζεται και διαμορφώνεται εύκολα, καθώς η πρώτη ύλη από την οποία παράγεται είναι ο γύψος, που βρίσκεται διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες ανά τον κόσμο. Η γυψοσανίδα αποτελεί ένα αισθητικά όμορφο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, ενώ συχνά χρησιμοποιείται για λόγους πυροπροστασίας, καθώς διαθέτει ιδιαίτερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.

Οι φυσικές ιδιότητες της γύψου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αποτελούν κύριο μέρος της μελέτης αυτής. Η γύψος είναι ένα ορυκτό που περιέχει νερό στην κρυσταλλική της δομή. Η ικανότητά της να επιβραδύνει την διάδοση της φωτιάς μέσα από έναν τοίχο οφείλεται στις φυσικές της ιδιότητες. Όταν η γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε φωτιά, το ελεύθερο νερό που περιέχει (υπό τη μορφή υγρασίας), καθώς και το κρυσταλλικό νερό εξατμίζονται και μετακινούνται μέσα στους πόρους της γύψου, απορροφώντας μεγάλα ποσά θερμότητας, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του τοίχου στην πλευρά που δεν εκτίθεται στη φωτιά να παραμένει σταθερή για κάποιο χρονικό διάστημα ή να αυξάνεται με πολύ μικρό ρυθμό. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό από άποψη ασφάλειας, καθώς μπορεί προσφέρει επαρκή χρόνο για την εκκένωση ενός κτιρίου.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας έγινε υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς των γυψοσανίδων σε συνθήκες φωτιάς, με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος μετάδοσης θερμότητας HETRAN (HEat TRansfer Analysis). Ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN είναι ένας αριθμητικός κώδικας που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση μονοδιάστατων προβλημάτων ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πορώδη δομικά υλικά, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, ΕΜΠ.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας, προσομοιώθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις από τη βιβλιογραφία, όπου οι προλέξεις του κώδικα HETRAN συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη μελέτη της μετάδοσης θερμότητας μέσα από ένα απλό δοκίμιο γυψοσανίδας, του οποίου η μία πλευρά εκτίθεται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση αυτή μελετάται η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου στα αποτελέσματα. Η δεύτερη περίπτωση αφορά τη μελέτη

της μετάδοσης θερμότητας διαμέσου δύο γυψοσανίδων, οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε μία συγκεκριμένη θερμοροή, που προστατεύουν ένα κομμάτι ξύλου. Οι παράμετροι που εξετάζονται στην περίπτωση αυτή, αφορούν τόσο στις ιδιότητες της γύψου και του ξύλου, καθώς και στον συνυπολογισμό της επίδρασης της μεταφοράς μάζας μέσα στη γυψοσανίδα και της ροής θερμότητας που δέχεται το δοκίμιο. Τέλος, η τρίτη περίπτωση αφορά τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου μιας τοιχοποιίας, η οποία εκτίθεται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, και αποτελείται από δύο γυψοσανίδες, οι οποίες συγκρατούνται από χαλύβδινους ορθοστάτες, ενώ ο χώρος ενδιάμεσα καλύπτεται από αέρα ή μόνωση. Εξετάστηκαν όλες παράμετροι των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου, του χάλυβα, του αέρα και της μόνωσης, καθώς και των οριακών συνθηκών και της ακτινοβολούμενης, στο εσωτερικό, θερμότητας.

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε, από την μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου και την συσχέτιση τους με τα υπολογιστικά αποτελέσματα του κώδικα HETRAN, μαρτυρούν την πορεία της εν λόγω έρευνας και αποτελούν ερεθίσματα για περαιτέρω μελέτη.

## Summary

This thesis has as its aim the study and deeper understanding of the behavior of gypsum plasterboard under elevated temperatures and fire conditions. Gypsum plasterboard is a common building material used for building interior walls and ceilings. Gypsumboards are manufactured and configured easily, as the raw material from which are produced, gypsum, is available in large quantities around the world. The boards are widely used in construction of walls and ceilings being a material aesthetically beautiful and environmentally friendly, which participates as a mean of passive fire protection for the construction which it is incorporated into.

The physical properties of gypsum are those with keen interest and constitute a major part of this study. In natural state, gypsum contains water of crystallization, which is bound in the form of hydrate. The ability to slow the expansion of the fire as it approaches a wall, is due to its physical properties and thermochemistry, which cause the drop in temperature on the wall. When the plaster is exposed to heat, the free water contained (in the form of moisture) and the crystalline water evaporate and move absorbing large amounts of heat so as to reduce the temperature of the wall. This is particularly important in terms of safety because when exposed to heat or fire, the water slows down heat transfer and provides sufficient time for a building to be evacuated.

Taking into account all the parameters affecting the behavior of gypsum, a computational study was performed in order to investigate the circumstances of exposure to fire using the heat transfer program HETTRAN (HEat Transfer Analysis, Version 3.0). HETTRAN computational code is a numerical code for simulating one-dimensional problems of simultaneous transfer heat and mass, developed in the Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems, NTUA.

During the computational study, three basic experimental specimens were modeled. The first is the simple model of one layer of plasterboard (single-domain), in which mainly parametric studies were elaborated to compare the physical properties of plaster. The second specimen to be modelled up, consists of two sheets of plasterboard protecting a piece of wood, and is exposed to heat flux. The parameters examined in this model concern both the properties of plaster and wood, and the inclusion of the effect of mass transfer through the plasterboard, as well as the effect of heat flux received by the specimen. The last case refers to a model consisted of a cold-formed thin walled steel, whether or not there is interior insulation. Not only all aspects of the physical properties of

gypsum, steel, air and insulation, but also the boundary conditions and radiation heat in the interior area were examined.

The conclusions reached by studying the physical properties of gypsum and its correlation with the results of computer code HETRAN, indicate the course of this investigation and for a stimulus to further study.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη, καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της εν λόγω εργασίας, τη στήριξη και την καθοδήγηση της, καθώς επίσης και τον κ. Δήμο Κοντογεώργο, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τη συμπαράσταση και τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου, όπως επίσης και το προσωπικό του Εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την βοήθειά τους.





# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	i
Summary.....	iii
Ευχαριστίες .....	v
Πίνακας Περιεχομένων .....	vii
Κατάλογος Συμβόλων .....	xi
<b>1 Φωτιές σε κτίρια .....</b>	<b>1</b>
1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	1
1.2 ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	2
1.3 ΑΝΑΦΛΕΞΗ .....	3
1.4 ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΙ ΖΗΜΙΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....	5
1.5 ΑΙΤΙΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ .....	7
1.6 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΟ .....	8
1.7 ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗ .....	11
1.8 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ.....	15
1.8.1 Πυροθερμικό φορτίο.....	16
1.8.2 Σημαντικότητα της φωτιάς .....	18
1.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ.....	22
1.9.1 Καυσαέρια .....	22
1.9.2 Καπνός.....	23
1.9.3 Φλόγες.....	23
1.9.4 Θερμότητα .....	24
1.10 ΔΟΜΙΚΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ .....	24
1.11 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑ.....	25
1.12 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	26
<b>2 Θερμοχημεία της γύψου .....</b>	<b>29</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	29
2.2 ΘΕΡΜΟΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΓΥΨΟΥ .....	30
2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	31
2.3.1 Πυκνότητα .....	31

2.3.2	<i>Απώλεια μάζας</i> .....	32
2.3.3	<i>Ενέργεια των αντιδράσεων</i> .....	33
2.3.3.1	Φαινόμενη θερμοχωρητικότητα .....	34
2.3.4	<i>Θερμική αγωγιμότητα</i> .....	36
2.3.5	<i>Πορώδες</i> .....	38
2.3.6	<i>Διαπερατότητα</i> .....	38
2.4	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	39
2.4.1	<i>Συρρίκνωση</i> .....	39
<b>3</b>	<b>Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών</b> .....	<b>41</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	41
3.2	ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....	42
3.2.1	<i>Εξίσωση διατήρησης ενέργειας</i> .....	42
3.2.2	<i>Οριακές συνθήκες</i> .....	42
3.2.3	<i>Πορώδη υλικά</i> .....	44
3.3	ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	44
3.3.1	<i>Εξίσωση διατήρησης μάζας</i> .....	44
3.3.2	<i>Εξίσωση διατήρησης ενέργειας</i> .....	45
3.3.3	<i>Εξίσωση πίεσης</i> .....	45
3.3.4	<i>Οριακές συνθήκες</i> .....	45
3.4	ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ .....	46
3.5	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	47
3.5.1.1	Διακριτοποίηση οριακών συνθηκών .....	48
3.6	ΓΕΝΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	49
<b>4</b>	<b>Υπολογιστικά αποτελέσματα</b> .....	<b>53</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	53
4.2	ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΛΗΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ.....	53
4.2.1	<i>Περιγραφή του φυσικού προβλήματος</i> .....	53
4.2.2	<i>Οριακές συνθήκες</i> .....	54
4.2.3	<i>Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης</i> .....	54
4.2.4	<i>Επίδραση μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων</i> .....	55
4.2.5	<i>Προσέγγιση μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων με καμπύλες Gauss και επίδραση στα αποτελέσματα</i> .....	57
4.2.6	<i>Επίδραση θερμοκρασιακής αιχμής και εύρους των αντιδράσεων</i> ..	60
4.3	ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΛΗΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΚΑΙ ΞΥΛΟΥ.....	64
4.3.1	<i>Περιγραφή του φυσικού προβλήματος</i> .....	64

4.3.2	Οριακές συνθήκες .....	65
4.3.3	Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης .....	65
4.3.4	Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου .....	66
4.3.5	Παραμετρική μελέτη επίδρασης φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου.....	68
4.3.5.1	Φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα του ξύλου .....	68
4.3.5.2	Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα της γυψοσανίδας .....	69
4.3.5.3	Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του ξύλου .....	71
4.3.5.4	Φαινόμενη πυκνότητα γυψοσανίδας.....	72
4.3.5.5	Παραμετρική μελέτη ιδιοτήτων γυψοσανίδας.....	74
4.3.6	Συντελεστής διόρθωσης, $f_i$ , λόγω μεταφοράς μάζας .....	76
4.3.7	Μελέτη επίδρασης θερμορροής .....	78
4.4	ΣΥΝΘΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΟΡΘΟΣΤΑΤΕΣ ΚΑΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΚΕΝΟ .....	80
4.4.1	Περιγραφή του φυσικού προβλήματος .....	80
4.4.2	Οριακές συνθήκες .....	81
4.4.3	Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης .....	81
4.4.4	Σύγκριση προλέξεων με πειραματικά δεδομένα.....	81
4.4.5	Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων.....	83
4.4.6	Επίδραση του συντελεστή διόρθωσης, $f_i$ , λόγω μεταφοράς μάζας.....	85
4.4.7	Επίδραση του μεταλλικού ορθοστάτη .....	87
4.4.7.1	Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης .....	88
4.4.7.2	Σύγκριση προλέξεων με τα πειραματικά δεδομένα .....	88
4.5	ΣΥΝΘΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥΣ ΟΡΘΟΣΤΑΤΕΣ ΚΑΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΜΟΝΩΣΗ.....	90
4.5.1	Περιγραφή του φυσικού προβλήματος .....	90
4.5.2	Οριακές συνθήκες .....	91
4.5.3	Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης .....	91
4.5.4	Σύγκριση προλέξεων με τα πειραματικά δεδομένα .....	92
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα και προοπτικές.....</b>	<b>95</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>97</b>
	<b>Ηλεκτρονική βιβλιογραφία .....</b>	<b>99</b>



## Κατάλογος Συμβόλων

### Λατινικά Σύμβολα

$C_{add,i}$	Επιπρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα για κάθε αντίδραση κατά τη θέρμανση της γύψου	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_{eff}$	Φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_g^{(k)}$	Κατά μάζα συγκέντρωση του αερίου συστατικού $k$	[kg m <sup>3</sup> ]
$C_i$	Ποσοστό του συνολικού κρυσταλλικού νερού που διαχωρίζεται από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου κατά τη διάρκεια της αντίδρασης $i$ αφυδάτωσης της γύψου	
$C_{p,g}^{(i_g)}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του αερίου συστατικού	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_{ref}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα σε θερμοκρασία αναφοράς	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_s$	Ειδική θερμοχωρητικότητα του αρχικού στερεού υλικού	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_{s,0}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα της γύψου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$D_{eff}$	Φαινόμενος συντελεστής διάχυσης μάζας σε πορώδη υλικά	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$dE$	Στοιχειώδης ενέργεια ανά μονάδα όγκου γύψου που απορροφάται κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος που λαμβάνει χώρα μια αντίδραση αφυδάτωσης	[J m <sup>-3</sup> <sub>γύψου</sub> ]
$E$	Ενέργεια ανά μονάδα όγκου γύψου που απορροφάται από την αρχή μιας αντίδρασης αφυδάτωσης της γύψου και μετά το πέρας συγκεκριμένου χρόνου	[J m <sup>-3</sup> <sub>γύψου</sub> ]
$E_C$	Συνολική ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά τον διαχωρισμό του κρυσταλλικού νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου	[kJ kg <sub>γύψου</sub> <sup>-1</sup> ]
$E_{Ca}$	Ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά	[kJ kg <sub>γύψου</sub> <sup>-1</sup> ]

	την αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου	
$E_{Ca,pure}$	Ενέργεια ανά κιλό ανθρακικού ασβεστίου που απορροφάται κατά την αποσύνθεση καθαρού ανθρακικού ασβεστίου	$[kJ kg_{CaCO_3}^{-1}]$
$E_{C,i}$	Ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά το διαχωρισμό του κρυσταλλικού νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου κατά τη διάρκεια της αντίδρασης $i$ αφυδάτωσης της γύψου	$[kJ kg_{γύψου}^{-1}]$
$E_{dh}$	Συνολική ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά την αφυδάτωση της γύψου	$[kJ kg_{γύψου}^{-1}]$
$E_{dh,i}$	Ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά την $i$ αντίδραση αφυδάτωσης της γύψου	$[kJ kg_{γύψου}^{-1}]$
$E_{Mg}$	Ενέργεια ανά κιλό γύψου που απορροφάται κατά την αποσύνθεση του ανθρακικού μαγνήσιου	$[kJ kg_{γύψου}^{-1}]$
$E_{Mg,pure}$	Ενέργεια ανά κιλό ανθρακικού μαγνήσιου που απορροφάται κατά την αποσύνθεση καθαρού ανθρακικού μαγνήσιου	$[kJ kg_{MgCO_3}^{-1}]$
<b>f</b>	Γενική μεταβλητή των αγνώστων του προς επίλυση συστήματος	[Μονάδα]
<b>F</b>	Γενική συνάρτηση χρονικής ολοκλήρωσης προς επίλυση συστήματος	[Μονάδα/s]
$f_i$	Συντελεστής διόρθωσης της επιπρόσθετης ειδικής θερμοχωρητικότητας, που αντιστοιχεί στην αντίδραση $i$ , λόγω μεταφοράς μάζας	
$H$	Ενθαλπία	$[J kg^{-1}]$
$h_{cond}$	Συντελεστής συναγωγής θερμότητας	$[W m^{-2} K]$
$h_m$	Συντελεστής συναγωγής μάζας	$[m s^{-1}]$
$\mathbf{j}_{diff}^{(i_g)}$	Διάνυσμα ροής μάζας ανά μονάδα επιφάνειας λόγω διάχυσης του συστατικού $i_g$ (νόμος Fick)	$[kg s^{-1} m^{-2}]$
$\mathbf{j}_{pres}^{(k)}$	Διάνυσμα ροής μάζας ανά μονάδα επιφάνειας λόγω κλίσης πίεσης του συστατικού $k$ (νόμος Darcy)	$[kg s^{-1} m^{-2}]$
<b>K</b>	Τανυστής διαπερατότητας	$[m^2]$
$k_{eff}$	Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα σε πορώδη υλικά	$[W m^{-1} K^{-1}]$
$L$	Πάχος του μετώπου αφυδάτωσης	$[m]$
$L_v$	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού, 2260	$[kJ kg_{νερού}^{-1}]$
$m_{vapor}$	Μάζα του υδρατμού που παράγεται κατά τη διάρκεια	$[kg]$

	μετρήσεων Θερμοβαρυτικής Ανάλυσης	
$\dot{m}_{c,vapor}^m$	Ρυθμός παραγωγής υδρατμού ανά μονάδα όγκου που προέρχεται από το κρυσταλλικό νερό	$[\text{kg}_{\text{νερού}} \text{s}^{-1} \text{m}^{-3}]$
$\dot{m}_{f,vapor}^m$	Ρυθμός παραγωγής υδρατμού ανά μονάδα όγκου που προέρχεται από την ελεύθερη υγρασία	$[\text{kg}_{\text{νερού}} \text{s}^{-1} \text{m}^{-3}]$
$MW_g^{(i_g)}$	Μοριακό βάρος του αερίου συστατικού $i_g$	$[\text{kg kmol}^{-1}]$
$N^g$	Συνολικός αριθμός αερίων συστατικών	
$P_g$	Ολική πίεση αερίου μίγματος	$[\text{Pa}]$
$\mathbf{q}_{cond}$	Διάνυσμα ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας λόγω αγωγής (νόμος Fourier)	$[\text{W m}^{-2}]$
$\mathbf{q}_{diff}$	Διάνυσμα ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας λόγω μεταφοράς μάζας με διάχυση (νόμος Fick)	$[\text{W m}^{-2}]$
$\mathbf{q}_{pres}$	Διάνυσμα ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας λόγω μεταφοράς μάζας με κλίση πίεσης (νόμος Darcy)	$[\text{W m}^{-2}]$
$p_g^{(i_g)}$	Μερική πίεση του αερίου συστατικού $i_g$	$[\text{Pa}]$
$\dot{Q}_M^{(i_g)}$	Ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης του αερίου συστατικού $i_g$	$[\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}]$
$\dot{Q}_T^m$	Ρυθμός παραγωγής-κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου	$[\text{W m}^{-3}]$
$R_g$	Παγκόσμια σταθερά αερίων, 8314	$[\text{J kmol}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$t$	Υπολογιστικός χρόνος	$[\text{s}]$
$T$	Θερμοκρασία	$[\text{K}]$
$\mathbf{u}_g^D$	Διάνυσμα ταχύτητας Darcy	$[\text{m s}^{-1}]$
$V_f$	Όγκος ρευστού που αναλογεί σε έναν συγκεκριμένο όγκο πορώδους υλικού	$[\text{m}^3]$
$V_t$	Όγκος στερεού που αναλογεί σε έναν συγκεκριμένο όγκο πορώδους υλικού	$[\text{m}^3]$
$\mathbf{x}$	Διάνυσμα θέσης	$[\text{m}]$
$\mathbf{x}_{BOUND}$	Διάνυσμα θέσης οριακού κόμβου	$[\text{m}]$

#### Ελληνικά Σύμβολα

$\alpha$	Συντελεστής θερμικής διάχυσης	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
$\gamma_{Ca}$	Ποσοστό μάζας ανθρακικού ασβεστίου που περιέχεται σε μία γυψοσανίδα	$[\text{kg}_{\text{CaCO}_3} \text{kg}_{\text{γύψου}}^{-1}]$

$\gamma_{Mg}$	Ποσοστό μάζας ανθρακικού μαγνήσιου που περιέχεται σε μία γυψοσανίδα	$[kg_{MgCO_3} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\gamma_S$	Πραγματικό ποσοστό μάζας γύψου (διυδρίτη θειικού ασβεστίου) που περιέχεται σε μία γυψοσανίδα	$[kg_{γύψου} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\gamma_O$	Ποσοστό μάζας των υπολοίπων ενώσεων που περιέχονται σε μία γυψοσανίδα	$[kg_{ενώσεων} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta m_{Ca}$	Ποσοστό απώλειας μάζας κατά την αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου	$[kg_{CO_2} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta m_{c,i}$	Ποσοστό κρυσταλλικού νερού που διαχωρίζεται από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου κατά τη διάρκεια της αντίδρασης $i$ αφυδάτωσης της γύψου	$[kg_{νερού} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta m_{dh}$	Ποσοστό της συνολικής μάζας του νερού (κρυσταλλικό και ελεύθερη υγρασία) που περιέχεται σε μια γυψοσανίδα	$[kg_{νερού} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta m_{f,i}$	Ποσοστό της ελεύθερης υγρασίας που ατμοποιείται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης $i$ αφυδάτωσης της γύψου	$[kg_{νερού} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta m_{Mg}$	Ποσοστό απώλειας μάζας κατά την αποσύνθεση του ανθρακικού μαγνήσιου	$[kg_{CO_2} kg_{γύψου}^{-1}]$
$\delta t$	Χρονικό βήμα	[s]
$\delta x$	Χωρικό βήμα	[m]
$\varepsilon$	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας τοιχώματος	
$\mu_g$	Δυναμική συνεκτικότητα αερίου μίγματος	[Pa s]
$\rho_{eff}$	Φαινόμενη πυκνότητα	$[kg m^{-3}]$
$\rho_s$	Πυκνότητα του αρχικού στερεού υλικού	$[kg m^{-3}]$
$\sigma$	Σταθερά Stefan – Boltzmann, $5.669 \cdot 10^{-8}$	$[W/m^2/K^4]$
$\phi$	Πορώδες	

#### Δείκτες

$amb$	Περιβάλλον
$diff$	Διάχυση
$ext$	Εξωτερικός
$i$	Αρίθμηση κόμβου
$int$	Εσωτερικός
$ref$	Αναφορά
$g$	Αέριο



## Εκθέτες

$i_g$  Αρίθμηση των αερίων συστατικών

## Ειδικά Σύμβολα

$d$  Ολική παράγωγος

$\partial$  Μερική παράγωγος

$\nabla$  Ανάδελτα

## Αρτικόλεξα

DSC Differential Scanning Calorimetry

TGA Thermogravimetric Analysis

ΔΘΣ Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης

ΘΒΑ Θερμοβαρυτική Ανάλυση



# Κεφάλαιο 1

## 1 Φωτιές σε κτίρια

Η φωτιά είναι αναμφισβήτητα ένα από τα πιο σύνθετα φαινόμενα που περιλαμβάνονται στην επιστήμη της καύσης (Φούντη Μ., 2005). Συμβατικά ορίζεται ως η μη ελεγχόμενη διάδοση φλόγας. Εμπεριέχει σχεδόν όλες τις διεργασίες που παρατηρούνται στις αντιδρώσες ροές. Είναι αποτέλεσμα φυσικό-χημικών διεργασιών που περιλαμβάνουν φαινόμενα καύσης, μεταφοράς θερμότητας και αεριοποίησης του, συνήθως, στερεού καυσίμου. Οι μηχανισμοί που ελέγχουν τα χαρακτηριστικά ευφλεκτότητας ενός υλικού εξαρτώνται από διαφορετικούς συνδυασμούς ιδιοτήτων, τη γεωμετρική τοποθέτηση των σε σχέση με την πηγή θερμότητας, τον τύπο της φωτιάς, καθώς και από περιβαλλοντικές παραμέτρους. Όλα αυτά συνδέονται μεταξύ τους συνθέτοντας ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φυσικό και χημικό φαινόμενο.

Σε αυτή την πολυπλοκότητα της φωτιάς οφείλεται η καθυστέρηση στην ανάπτυξη της έρευνας της φωτιάς και την καθιέρωσή της ως επιστήμη περίπου ως το 1950. Η επιστήμη της φωτιάς και κατά επέκταση της πυρασφάλειας έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία 20 χρόνια. Η μαθηματική μοντελοποίηση της φωτιάς αποτελεί ένα ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, και έχει ως στόχο να ενσωματώσει όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας φωτιάς σε ένα υπολογιστικό μοντέλο.

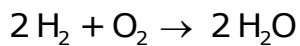
### 1.1 Θεωρητικά στοιχεία καύσης

Η καύση είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο ταυτόχρονης μεταφοράς ορμής, θερμότητας, μάζας και χημικής αντίδρασης. Από επιστημονικής πλευράς η λέξη καύση πηγάζει από την ανάλυση των σχετικών χημικών αντιδράσεων. Ο όρος καύση αποδίδεται σε ταχείς χημικές αντιδράσεις στις οποίες κυριαρχεί μετατροπή της χημικής ενέργειας σε εκμεταλλεύσιμη θερμότητα. Πρόκειται για μια εξώθερμη χημική αντίδραση μεταξύ του καυσίμου και του οξειδωτικού, η οποία λαμβάνει χώρα με αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης θερμότητας, έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ενέργεια να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη.

## 1.2 Χημεία της καύσης

Η φωτιά είναι ένα σύνθετο χημικό φαινόμενο που συνίσταται κυρίως από μια σειρά οξειδωτικών αντιδράσεων (καύσεων) (Κυριάκος Κ. Παπαϊωάννου, 2006). Τα άτομα δηλαδή ενός καυσίμου οξειδώνονται καθώς ενώνονται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα. Η οξείδωση ενός συστατικού ή μιας χημικής ένωσης, στην οποία η εκλυόμενη θερμότητα εξαρτάται από την ποσότητά του και την ταχύτητα της χημικής αντίδρασης και συντηρείται χωρίς την απαίτηση περαιτέρω παροχής θερμότητας από το περιβάλλον, ενώ συνήθως συνοδεύεται από φλόγα, ονομάζεται καύση.

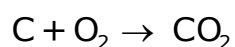
Σε μια πολύ απλή οξείδωση που συναντάται στις περισσότερες φωτιές, δυο διατομικά μόρια υδρογόνου, που είναι εξαιρετικό καύσιμο, ενώνονται μ' ένα διατομικό μόριο οξυγόνου για να σχηματίσουν δύο μόρια νερού.



### Εξίσωση 1-1

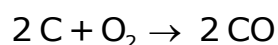
Επειδή το νερό είναι πιο σταθερό στοιχείο από τα αέρια, η αντίδραση είναι ζωνρή με έκλυση μεγάλης θερμότητας (εξώθερμη). Καθώς το υδρογόνο βρίσκεται σαν συνθετικό σχεδόν στα περισσότερα καύσιμα, ακόμη και στα σύνθετα μόρια του ξύλου, των πλαστικών ή του πετρελαίου, η καύση κάθε κοινού καυσίμου παράγει υδρατμούς σε μεγάλες ποσότητες. Αυτό μερικές φορές φαίνεται στα κρύα τζάμια ενός φλεγόμενου κτιρίου.

Άλλο κύριο συστατικό των περισσότερων καυσίμων είναι ο άνθρακας που βρίσκεται στα μόρια των εύφλεκτων υλών. Σ' όλες τις καύσεις ανθρακούχων ενώσεων, και αυτών που γίνονται ακόμη μέσα στο ανθρώπινο σώμα, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση:



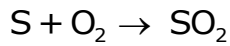
### Εξίσωση 1-2

Ανάλογα με την παροχή οξυγόνου συμβαίνει μια άλλη πρωτεύουσα ή δευτερεύουσα αντίδραση με αποτέλεσμα την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα:



### Εξίσωση 1-3

Αυτές οι τρεις παραπάνω αντιδράσεις συνιστούν τις βασικές χημικές αντιδράσεις στα φαινόμενα της φωτιάς. Σε λιγότερες περιπτώσεις έχουμε οξείδωση ενώσεων του θείου με παραγωγή διοξειδίου του θείου:



### Εξίσωση 1-4

Καύση συμβαίνει όταν ένα καύσιμο υλικό έρθει σ' επαφή με το οξειδωτικό και θερμανθεί τόσο, ώστε ν' αρχίσει η χημική αντίδραση με έκλυση θερμότητας. Το καύσιμο, το οξειδωτικό και η απαιτούμενη αρχική θερμότητα συνηθίστηκε να ονομάζεται «τρίγωνο της φωτιάς». Η απομάκρυνση ενός από τα τρία σταματά την καύση. Η καύση δε σταματά στην περίπτωση που απομακρυνθεί η πηγή θερμότητας, αφού έχει αντικατασταθεί από τη θερμότητα που εκλύεται.

## 1.3 Ανάφλεξη

Ανάφλεξη ονομάζεται η έναρξη του φαινομένου της καύσης. Αυτή μπορεί να συμβεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Αν το καύσιμο είναι αέριο, ανάφλεξη μπορεί να γίνει μόνο όταν υπάρξει ένα μίγμα αερίου/ ατμοσφαιρικού αέρα του οποίου η αναλογία κυμαίνεται μεταξύ ενός κατώτερου και ενός ανώτερου ορίου αναφλεξιμότητας (flammability limits), με τη συνδρομή μιας μικρής πηγής θερμότητας (π.χ. φλόγας ενός σπέρτου).
- Αν το καύσιμο είναι υγρό, η ανάφλεξη συμβαίνει όταν αρκετή ποσότητα ατμού εξατμισθεί από την επιφάνεια του υγρού (ή ήδη βρίσκεται στον αέρα), έτσι ώστε να σχηματισθεί πάλι μίγμα ατμού/ ατμ. αέρα σε αναλογίες που κυμαίνονται ανάμεσα στα όρια αναφλεξιμότητας. Για μερικά υγρά αυτό γίνεται σε θερμοκρασίες δωματίου ή κατώτερες, ενώ για άλλα μπορεί να χρειασθεί θέρμανση πριν από την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ατμού.

Σημείο ανάφλεξης ενός ρευστού (flash point) ονομάζεται η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία σχηματίζεται το κατάλληλο μίγμα ατμού/ αέρα, όπου με μια μικρή πηγή θερμότητας θ' αρχίσει η ανάφλεξη. Αν το σημείο βρασμού (εξαέρωσης) ενός υγρού είναι χαμηλό, συμπεραίνουμε ότι μια φλόγα μπορεί να το αναφλέξει αμέσως σε συνηθισμένες θερμοκρασίες. Με τον ίδιο τρόπο μόνιμα αέρια μπορούν ν' αναφλεγούν σε θερμοκρασίες δωματίου, αν υπάρχει αρκετή ποσότητα ατμού ώστε να σχηματιστεί το ανάλογο μίγμα με τον αέρα.

Στην περίπτωση στερεού καυσίμου η ανάφλεξη μπορεί να συμβεί μ' έναν από τους δυο παρακάτω τρόπους:

- Όταν το στερεό θερμανθεί σε μια ορισμένη θερμοκρασία αρχίζει η χημική του αποσύνθεση (πυρόλυση), με δημιουργία ατμών στην επιφάνειά του, οπότε

σχηματίζεται πάλι ένα εύφλεκτο μίγμα ατμών/ αέρα. Η απαιτούμενη ένταση της πηγής ανάφλεξης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες και το σχήμα του αναφλέξιμου υλικού. Αν ο λόγος της επιφάνειάς του προς τη μάζα του είναι μεγάλος, τότε χρειάζεται μια μικρή πηγή ανάφλεξης (π.χ. φύλλα χαρτιού αναφλέγονται εύκολα μ' ένα σπύρτο), ενώ όταν αντίστοιχα ο λόγος είναι μικρός χρειάζεται έντονη και μακρόχρονη θέρμανση (π.χ. ανάφλεξη χονδρόξυλων). Ο τρόπος αυτός ανάφλεξης ισχύει για τα περισσότερα οργανικά υλικά.

- Ορισμένα στερεά, όπως ο άνθρακας και τα περισσότερα μέταλλα που έχουν υψηλό σημείο τήξης, αναφλέγονται αφού προηγηθεί μια έντονη επιφανειακή οξειδωση. Αυτό προϋποθέτει μεγάλες τιμές του λόγου επιφάνειας προς μάζα, καθώς και έντονες πηγές εξωτερικής θερμότητας. Από τη στιγμή όμως που το υλικό αναφλεγεί, η καύση μπορεί ν' αυτοσυντηρηθεί.

Οι δυο παραπάνω τύποι καύσης δεν είναι εναλλακτικοί μεταξύ τους, δηλαδή κάθε στερεό καίγεται μ' έναν από τους δυο τρόπους μόνον.

Ο όρος θερμοκρασία ανάφλεξης συναντιέται κυρίως στα στερεά και τα υγρά. Σημαίνει φυσικά τη θερμοκρασία εκείνη στην οποία πρέπει να θερμανθεί το καύσιμο για να ξεκινήσουν οι αντιδράσεις της καύσης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η απαιτούμενη θερμότητα γεννιέται συνολικά μέσα στο καύσιμο, οπότε έχουμε την αυτανάφλεξη. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι χημική ή βιολογική. η αυτανάφλεξη της θυμωνιάς από βακτηριολογικούς λόγους είναι ένα γνωστό παράδειγμα.

Όταν μια φλόγα έρθει σ' επαφή ή είναι κοντά σ' ένα υλικό, μεταφέρεται θερμότητα στην επιφάνεια του υλικού αυξάνοντας τη θερμοκρασία της. Ένα ποσοστό αυτής της θερμότητας θα χαθεί από την ακτινοβολία της επιφάνειας, την αγωγιμότητα κατά μήκος του υλικού και με μεταφορά. Αυτό το ισοζύγιο μεταφοράς θερμότητας είναι το ίδιο σημαντικό με τη θερμοκρασία ανάφλεξης για τον καθορισμό της αναφλεξιμότητας του υλικού. Έχει αποδειχθεί ότι το γινόμενο  $K \times \rho \times C$ , όπου  $K$  η θερμική αγωγιμότητα,  $\rho$  η πυκνότητα και  $C$  η ειδική θερμότητα, είναι ένα μέτρο του χρόνου που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας της επιφάνειας του υλικού και επομένως του καθορισμού των χαρακτηριστικών ανάφλεξής του.

Εκρήξεις γενικά συμβαίνουν στις περιπτώσεις όπου το καύσιμο (συνήθως σε αέρια κατάσταση) και το οξειδωτικό μέσο (αέρας) έχουν προαναμιχθεί σε ορισμένη αναλογία πριν γίνει ανάφλεξη. Η εκρηκτική αυτή καύση διαφέρει από τη συνηθισμένη στο ότι είναι πλήρης και συμβαίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, χωρίς την καθυστέρηση από την ανάγκη να ενωθούν πρώτα χημικά καύσιμο και οξειδωτής. Στις φωτιές η μίξη καυσίμου-οξειδωτικού ελέγχεται από την ίδια την

εξέλιξη της φωτιάς με αποτέλεσμα, η ταχύτητα καύσης ανά μονάδα όγκου να είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτήν των εκρήξεων. Το φαινόμενο της έκρηξης μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές με την απότομη εκτόνωση και εκπομπή μεγάλης ενέργειας.

## 1.4 Κόστος και Ζημιές πυρκαγιών

Οι πυρκαγιές αποτελούν μία συνεχή πηγή κινδύνου. Ξεσπούν σε τυχαίο τόπο και χρόνο και προξενούν απώλειες ανθρώπων, ζώων, τραυματισμούς και τεράστια οικονομική και οικολογική επιβάρυνση. Εκτιμάται ότι μόνο από αστικές πυρκαγιές δαπανάται το 0.5 – 1% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος ετησίως. Οι πυρκαγιές σχεδόν πάντοτε ξεκινούν από κάποιο μικρό αίτιο, αναπτύσσουν μία μικρή εστία, η οποία με την πάροδο του χρόνου κλιμακώνεται, και αποκτά ανεξέλεγκτες διαστάσεις. Υπολογίζεται ότι το Πυροσβεστικό Σώμα καλείται να αντιμετωπίσει κατά μέσο όρο περίπου 14 πυρκαγιές ημερησίως σε όλη την Ελληνική Επικράτεια.

Οι υλικές ζημιές μιας πυρκαγιάς μπορεί να διακριθούν σε:

- Ζημιές στη συγκεκριμένη κατασκευή και τα περιεχόμενά της
- Ζημιές που είναι πιθανό να προκληθούν σε γειτονικές κατασκευές από την επέκταση της φωτιάς
- έμμεσες ζημιές που προέρχονται από τη μερική ή ολική διακοπή χρήσης της κατασκευής

Η νομοθεσία ενδιαφέρεται κυρίως για το 2<sup>ο</sup> είδος των ζημιών, καλύπτοντας όμως έμμεσα και ένα μεγάλο μέρος από τις άλλες, γιατί είναι σοβαρή η επιβάρυνση μιας εθνικής οικονομίας από τις πυρκαγιές. Οι ασφαλιστικές εταιρείες ασφαλίζουν τους κινδύνους υλικών ζημιών απαιτώντας μερικές φορές πρόσθετα μέτρα πυρασφάλειας.

Το κόστος μιας πυρκαγιάς περιέχει δύο ομάδες συνιστωσών. Από τη μια μεριά, τις ζημιές ή τις απώλειες και από τη άλλη, τις κάθε είδους δαπάνες που γίνονται για την πρόληψη ή των περιορισμό των παραπάνω ζημιών. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι άμεσες υλικές ζημιές στις κατασκευές και στα περιεχόμενά τους, οι έμμεσες ζημιές και η αποτίμηση του κόστους θυμάτων από θανάτους ή τραυματισμούς. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι δαπάνες πυρασφάλειας ενοίκων και κατασκευών, οι δημόσιες δαπάνες για τα τις Πυροσβεστικές Υπηρεσίες, τα έξοδα σχετικά με την Ασφάλιση και τέλος οι δαπάνες για επιστημονική έρευνα και δημοσιοποίηση των προβλημάτων πυρασφάλειας.

Από συστηματική συλλογή στατιστικών στοιχείων σε ορισμένα ανεπτυγμένα κράτη, το συνολικό κόστος των πυρκαγιών κυμαίνεται γύρω στο 1% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος μιας χώρας (Α.Ε.Π.). Όσον αφορά στο κόστος Πυροπροστασίας, από δειγματικές έρευνες και εμπειρικές εκτιμήσεις έχει βρεθεί ότι είναι ένα ποσοστό της τάξης του 0.15% του Α.Ε.Π. Δαπάνες έρευνας και δημοσιοποίησης του προβλήματος κυμαίνονται για την Ελλάδα κοντά στο μηδέν.

Όσον αφορά την Ελλάδα, το κόστος από τις καταστροφές είναι μεγάλο. Στην πυρκαγιά του Αυγούστου 2009 κήκαν ολοσχερώς και πρέπει να κατεδαφιστούν 101 κατοικίες, ενώ 183 χρειάζονται σημαντικές επισκευές. Σύμφωνα με στοιχεία του υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων το σύνολο των ζημιών είναι: 800 αιγοπρόβατα, 750 μελισσοσμήνη, 40 βοοειδή, 10 χοίροι, 130.000 ελαιόδεντρα, 700 στρέμματα αμπέλια, 132 αποθήκες-ποιμνιοστάσια και 110 σταυλοϋπόστεγα. Το κόστος των αποζημιώσεων υπολογίστηκε περίπου στα 20 εκατομμύρια ευρώ.

Πέρα από την Ελλάδα, όπου τα τελευταία χρόνια οι φωτιές αποτελούν ένα, δυστυχώς, αρκετά συχνό επαναλαμβανόμενο φαινόμενο, οι εμπρησμοί σε εγκαταλελειμμένα κτίρια αποτελούν το υπό αριθμόν ένα πρόβλημα για τις Πυροσβεστικές Υπηρεσίες των Η.Π.Α. Για παράδειγμα, μόνο το 1975, η Πυροσβεστική Υπηρεσία της Νέας Υόρκης επενέβη σε 54.000 αστικές πυρκαγιές, από τις οποίες οι 9.000 (18%) ήταν εμπρησμοί σε τέτοια κτίρια. Υπολογίζεται ότι κάθε χρόνο στις ΗΠΑ πεθαίνουν από πυρκαγιές περίπου 3.000-4.000 άτομα (4.250 κατά το 2004), παθαίνουν εγκαύματα περίπου 20.000 άτομα και το ετήσιο κόστος από τις καταστροφές περιουσιών από πυρκαγιές ανέρχεται περίπου στα 11 δισεκατομμύρια δολάρια. Από τα στοιχεία μιας στατιστικής μελέτης που αναφέρεται σε μια περιοδική ενημερωτική έκδοση για ασφαλιστικές εταιρείες, το "Geneva Association Information Newsletter: World Fire Statistics", οι πυρκαγιές, μόνο στις αναπτυγμένες χώρες, προκάλεσαν το θάνατο περισσότερων από 10.000 ατόμων τον χρόνο, ενώ το κόστος (2002-2004) αντιστοιχούσε στο 0.01 έως 0.03 % του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος κάθε χώρας.

Επίσης, οι πυρκαγιές, πέρα από το υψηλό κόστος σε ζωές και οικονομικές καταστροφές, παράγουν υψηλές ποσότητες τοξικών και καρκινογόνων ουσιών (όπως διοξίνες, πολυχλωριωμένα διφαινύλια και φουράνια), ρυπαίνουν το περιβάλλον και έχουν επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου από τις τοξικές αναθυμιάσεις και τον καπνό.

Τις τελευταίες δεκαετίες τα διάφορα μέτρα πρόληψης των πυρκαγιών, όπως οι ανιχνευτές φλόγας και καπνού, τα αυτόματα συστήματα κατάσβεσης και συναγερμού, οι διάφορες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως επιβραδυντές φλόγας έχουν περιορίσει τον αριθμό των θυμάτων και την καταστροφή σπιτιών,



βιοτεχνιών, εργοστασίων και διαφόρων εγκαταστάσεων. Σε αυτό συνέβαλαν και τα αυστηρότερα κριτήρια για πολλά υλικά που είναι εύφλεκτα και χρησιμοποιούνται ως οικοδομικά υλικά (ηλεκτρικές καλωδιώσεις, θερμομονώσεις) αλλά και σε πολλά καταναλωτικά προϊόντα (ενδύματα, χαλιά, έπιπλα, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές κ.λπ.).

## 1.5 Αιτίες πυρκαγιών

Μία από τις αναγκαίες ταξινομήσεις των πυρκαγιών, που βοηθούν στην μελέτη και την πρόληψή τους, είναι οι αιτίες που τις προκαλούν. Την πρώτη θέση στις βασικές αιτίες των πυρκαγιών κρατούν σταθερά τα υπολείμματα καπνίσματος. Άλλες σοβαρές αιτίες από τις οποίες μπορούν να προκληθούν πυρκαγιές είναι οι γυμνές φλόγες (λυχνιών, κεριών, σπέρτων, αναπτήρων, εστιών πυρός κλπ.) ερχόμενες σε επαφή με καύσιμα υλικά, καθώς επίσης και οι αναμμένες θερμάστρες πετρελαίου, ξύλου ή μαγκάλια. Κύριες αιτίες θεωρούνται, ακόμη, ο ηλεκτρισμός (σπινθήρες, βραχυκύκλωμα), η τριβή, η κρούση, η πίεση, καθώς και τα φυσικά φαινόμενα (κεραυνός - σεισμός - ηφαίστεια). Τέλος, στις αιτίες συγκαταλέγονται οι ηλιακές ακτίνες που πέφτουν σε γυαλιά, η αυτόματη ανάφλεξη (λόγω οξειδώσεως ή ζυμώσεως) και οι σπινθήρες ή η υπερθέρμανση που προέρχονται από την λειτουργία συσκευών ή μηχανημάτων (ατμομηχανών, λεβήτων, καυστήρων, κλιβάνων κ.α.).

Τις πυρκαγιές, ανάλογα με την πρόθεση ή την υπαιτιότητα τις κατατάσσουμε σε τέσσερις κατηγορίες.

- Πυρκαγιές από αμέλεια. Εδώ ανήκουν όλες οι πυρκαγιές που οφείλονται σε αμέλεια ή απροσεξία των ανθρώπων. Π.χ. ανατροπή αναμμένης λάμπας, πέταγμα τσιγάρου, κακή συντήρηση μηχανήματος, μη λήψη μέτρων προφύλαξης κατά το κάψιμο ξερών χόρτων, άναμμα φωτιάς στο δάσος για ψήσιμο, κ.α. Διακρίνουμε ελαφριά ή βαριά αμέλεια.
- Πυρκαγιές από δόλο. Στην κατηγορία αυτή ανήκει ο εμπρησμός από πρόθεση. Τα κίνητρα του εμπρησμού ποικίλουν (είσπραξη ασφάλειας, εκδίκηση, καταστροφή πειστηρίων άλλων εγκλημάτων κ.α.). Ο εμπρησμός από πρόθεση είναι σοβαρό έγκλημα γιατί κινδυνεύει η ζωή και η περιουσία των ανθρώπων, ακόμα και ολόκληρων περιοχών.
- Τυχαίες πυρκαγιές. Εδώ ανήκουν οι πυρκαγιές που προκαλούνται από ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, από τριβή, κρούση ή πίεση, από τις ηλιακές ακτίνες, από αυτανάφλεξη κ.α. Μπορούν να καταταγούν είτε σε πυρκαγιές από ελαφρά

αμέλεια, οι οποίες αν ερευνηθούν στο βάθος, θα μπορούσαν να αποφευχθούν εάν είχαν παρθεί τα σωστά μέτρα προστασίας και προληπτικού ελέγχου.

- Πυρκαγιές από ανώτερη βία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πυρκαγιές από κεραυνούς, σεισμούς, ηφαιστεια και από πολεμικά γεγονότα. Δεν μπορούν να προβλεφθούν, όμως η λήψη προληπτικών μέτρων μπορεί να αποτρέψει την καταστροφική επέκτασή τους.

Τέλος, οι πυρκαγιές, ανάλογα με το υλικό που καίγεται, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: A, B, C, D.

- Κατηγορία A: *Στερεών καυσίμων υλικών*. Συνήθως οργανικής σύνθεσης (ξύλα, χαρτιά, άχυρα, ελαστικά, μερικά πλαστικά, κ.α.).
- Κατηγορία B: *Υγρών καυσίμων υλικών* ή στερεών που υγροποιούνται κατά την καύση τους (αιθέρας, οινόπνευμα, βενζίνη, λάδια, λίπη, κερί, κ.α.).
- Κατηγορία C: *Αερίων καυσίμων υλικών* (π.χ. μεθάνιο, προπάνιο, υδρογόνο, ασετιλίνη, κ.α.).
- Κατηγορία D: *Μετάλλων* (π.χ. νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο, τιτάνιο, κ.α.).

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται και μια πέμπτη κατηγορία, η E, που είναι ουσιαστικά μία από τις παραπάνω περιπτώσεις αλλά με σημαντική παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος.

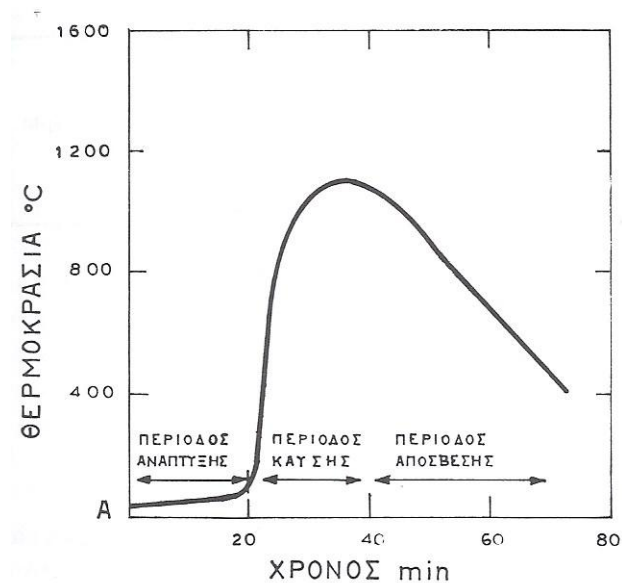
- Κατηγορία E: Ηλεκτρικές πυρκαγιές.

## 1.6 Ανάπτυξη φωτιάς σε κλειστό χώρο

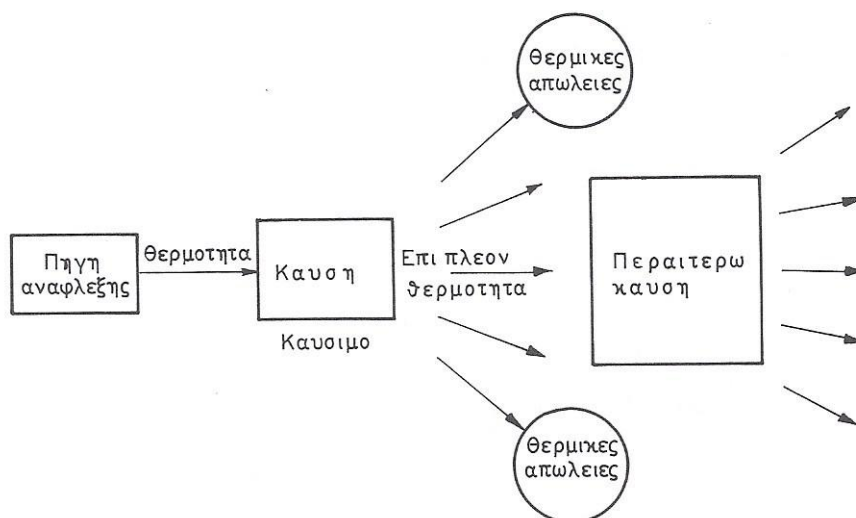
Με όσα έχουν ειπωθεί μέχρι στιγμής διαφαίνεται η συνθετότητα και η πολυπλοκότητα του φαινομένου της φωτιάς. Ερευνητές που εργάζονται σε εργαστήρια κάτω από προσεκτικά ρυθμιζόμενες συνθήκες, συναντούν πολλές δυσκολίες να αναπαραστήσουν μια συγκεκριμένη φωτιά. Γιατί είναι γεγονός πως, ποτέ δύο φωτιές δεν μπορεί να είναι ίδιες. Σημασία έχουν και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπου συμβαίνει η πυρκαγιά. Παρόλα αυτά, κάνοντας ορισμένες υποθέσεις μπορούν να δημιουργηθούν μοντέλα ικανά να μελετηθεί και να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια η ανάπτυξη και η εξέλιξη των πυρκαγιών.

Η διαδικασία ανάπτυξης της φωτιάς μέσα σ' έναν κλειστό χώρο (πυροδιαμέρισμα) ακολουθεί τρία στάδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-1. Το αρχικό στάδιο, που λαμβάνει χώρα τα πρώτα 20 λεπτά, αφορά την ανάφλεξη υλικών συνήθως από μια μικρή πηγή. Η περίοδος αυτή συνοδεύεται από χαμηλές θερμοκρασίες. Βασικό για το μηχανισμό εξάπλωσης της φωτιάς είναι το γεγονός

ότι, η παραγόμενη θερμική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για τη διατήρηση της καύσης, οπότε η υπόλοιπη μετά από τις αναπόφευκτες θερμικές απώλειες μεταδίδεται με ακτινοβολία και μεταφορά σε άλλα αναφλέξιμα υλικά (Εικόνα 1-2). Η ταχύτητα, επομένως, εξάπλωσης της φωτιάς εξαρτάται από αυτήν την επί πλέον ποσότητα θερμότητας. Εκτός από τις φυσικές, γεωμετρικές και θερμικές ιδιότητες των καυσίμων, η ταχύτητα και η διάρκεια του πρώτου αυτού σταδίου εξαρτάται από τα φυσικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος κυρίως ως προς τις θερμικές απώλειες.



**Εικόνα 1-1 Ανάπτυξη φωτιάς σε πυροδιαμέρισμα**



**Εικόνα 1-2 Αρχικό στάδιο ανάπτυξης φωτιάς**

Όταν η φωτιά σταθεροποιηθεί τοπικά, θα συνεχίσει ν' αυξάνει όσο είναι διαθέσιμα καύσιμα και οξυγόνο. Η παραγόμενη θερμότητα θα ανεβάζει από τη μια

μεριά με επαγωγή τη θερμοκρασία των φλεγομένων υλικών και με μεταφορά και ακτινοβολία τη θερμοκρασία του χώρου και των γειτονικών υλικών. Γρήγορα οι φλόγες φθάνουν στην οροφή και διασπείρονται οριζόντια. Η γεωμετρία του πυροδιαμερίσματος, ο εξαερισμός και τα εύφλεκτα εσωτερικά τελειώματα των τοίχων και των οροφών παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς. Αρχίζει πλέον να δημιουργείται από την οροφή μια ακτινοβολία με κατεύθυνση προς το χώρο, που έχει σαν αποτέλεσμα περαιτέρω άνοδο της θερμοκρασίας και ανάφλεξη όλων των υλικών. Αυτό το χρονικό σημείο, όπου η φωτιά από το αρχικό στάδιο περνά στο δεύτερο στάδιο της «καθολικά αναπτυγμένης φωτιάς», λέγεται σημείο «καθολικής ανάφλεξης» (flash-point ή flashover). Κριτήρια για τον καθορισμό του flashover μπορεί να θεωρηθούν, είτε μια κρίσιμη ακτινοβολία στο δάπεδο του πυροδιαμερίσματος της τάξης των  $2\text{W}/\text{cm}^2$ , είτε η χρονική στιγμή που οι φλόγες αρχίζουν να βγαίνουν έξω από τα ανοίγματα του χώρου. Το δεύτερο αυτό στάδιο της «καθολικά αναπτυγμένης φωτιάς» είναι το πιο σημαντικό και εκείνο για το οποίο η επιστημονική έρευνα έχει φθάσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Διακρίνονται δύο φάσεις «καθολικά αναπτυγμένης φωτιάς»:

α) η ρυθμιζόμενη από το ποσοστό *εξαερισμού*, όπου η ταχύτητα της καύσης είναι γενικά ανάλογη με την παροχή του αέρα από τα ανοίγματα και ανεξάρτητη από την ποσότητα, τις ιδιότητες και τη μορφή των καυσίμων. Ισχύει τότε ο τύπος:

$$R = cA\sqrt{H}$$

#### **Εξίσωση 1-5**

όπου  $R$  είναι η ταχύτητα καύσης σε  $\text{kg}/\text{min}$ ,  $c$  σταθερός συντελεστής ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 5.0 ως 6.2,  $H$  είναι το ύψος των ανοιγμάτων σε  $\text{m}$  και η επιφάνεια των ανοιγμάτων σε  $\text{m}^2$  ορίζεται ως

$$A = H \cdot B$$

#### **Εξίσωση 1-6**

Η χρονική διάρκεια καύσης  $t$  αυτήν την περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{F}{9A\sqrt{H}}$$

#### **Εξίσωση 1-7**

Όπου  $t$  είναι ο χρόνος μετρημένος σε  $\text{min}$  και  $F$  το πυροθερμικό φορτίο σε  $\text{kg}$ .

β) η ρυθμιζόμενη από τα *καύσιμα*, όπου η ταχύτητα καύσης εξαρτάται μόνον από τον τύπο, την ποσότητα και τη θέση των καυσίμων. Το είδος αυτό της φωτιάς συμβαίνει είτε σε χώρους με μεγάλη επιφάνεια ανοιγμάτων είτε, όταν στην

προηγούμενη περίπτωση, ο αέρας από τα ανοίγματα φθάσει να είναι περισσότερος από τον απαιτούμενο για τη συνέχιση της καύσης. Είναι τότε σαν μια φωτιά σε ανοικτό χώρο.

Το τρίτο στάδιο της «απόσβεσης» αρχίζει, όταν πια έχει καεί το μεγαλύτερο ποσοστό των καυσίμων του πυροδιαμερίσματος και η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς μέχρι να φθάσει στις κανονικές θερμοκρασίες δωματίου.

## 1.7 Πυραντίσταση

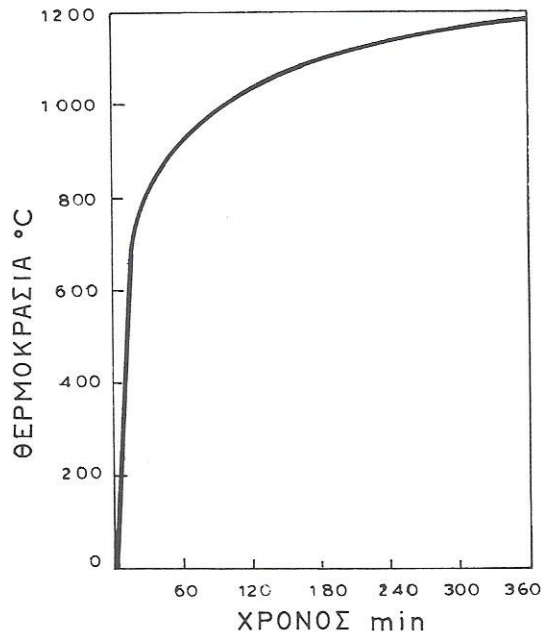
Η πυραντίσταση είναι μία από τις βασικότερες έννοιες της δομικής πυροπροστασίας. Αναφέρεται σε δομικά στοιχεία και όχι σε μεμονωμένα δομικά υλικά. Ο βαθμός (ή δείκτης) πυραντίστασης ενός δομικού στοιχείου συγκεκριμένης σύνθεσης και καθορισμένης λειτουργίας στην κατασκευή, προσδιορίζεται μετά από δοκιμασία σε πειραματικό φούρνο, όπου ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες προσομοιάζουν, όσο είναι δυνατό, τις συνθήκες λειτουργίας του δομικού στοιχείου στην κατασκευή. Ο βαθμός πυραντίστασης εκφράζεται με τη διάρκεια του χρόνου, όπου το εξεταζόμενο δοκίμιο ικανοποιεί ορισμένα προκαθορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι η ευστάθεια, η ακεραιότητα και η θερμομονωτική ικανότητα. Το εισαγόμενο στο φούρνο δοκίμιο είναι σχεδόν αδύνατο να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες της λειτουργίας του δομικού στοιχείου στο κτίριο. Επιδιώκεται εντούτοις η προσομοίωση των οριακών συνθηκών στήριξης, των συνθηκών φόρτισης και θερμοκρασίας (ψυχρό ή θερμό στάδιο) της δοκιμασίας, με τις αναμενόμενες στη διάρκεια λειτουργίας.

Το δοκίμιο εισάγεται σε ειδικά σχεδιασμένους φούρνους, όπου αναπαράγεται μεταβολή θερμοκρασίας σύμφωνα με πρότυπη καμπύλη (Εικόνα 1-3). Η καμπύλη αυτή προτείνεται από επιτροπή του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO 834-1975) και δεν διαφέρει σημαντικά από την πρότυπη καμπύλη των Βρετανικών προδιαγραφών (BS 476: Part 8: 1972) που ακολουθεί τη μαθηματική συνάρτηση

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1)$$

### Εξίσωση 1-8

όπου,  $t$  ο χρόνος από την έναρξη της δοκιμασίας σε min,  $T$  η θερμοκρασία του φούρνου στο χρόνο  $t$  σε °C και  $T_0$  η αρχική θερμοκρασία του φούρνου σε °C.



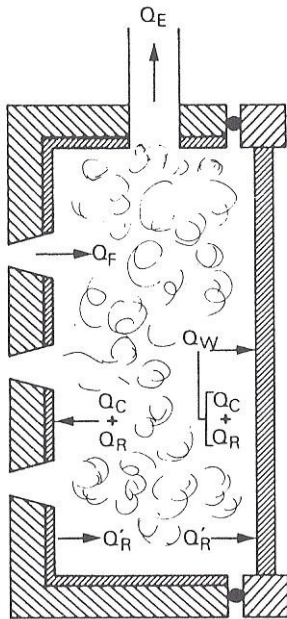
**Εικόνα 1-3 Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου**

Έχει παρατηρηθεί ότι, παρά τη χρήση της ίδιας πρότυπης καμπύλης, είναι πιθανό να διαφέρουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας σε διάφορους φούρνους εξαιτίας του τύπου του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, της θέσης και της κατανομής των θερμαντικών πηγών, της διεύθυνσης της απαγωγής των καυσαερίων και των θερμικών χαρακτηριστικών των τοιχωμάτων του φούρνου. Για την ομογενοποίηση των αποτελεσμάτων ο ISO προτείνει να προδιαγράφεται για το εσωτερικό τοίχωμα του φούρνου ένα όριο της θερμικής αδράνειας  $K\rho c$ . Συγκεκριμένα πρέπει:

$$\sqrt{K\rho c} \leq \frac{600 \text{Ws}^{1/2}}{\text{m}^2\text{K}}$$

### Εξίσωση 1-9

Το πάχος του εσωτερικού τοιχώματος με αυτά τα χαρακτηριστικά δεν χρειάζεται να είναι πάνω από 5cm. Τοιχώματα με τέτοια χαμηλή θερμική αδράνεια αυξάνουν τη θερμοκρασία του φούρνου γρήγορα και ακτινοβολούν θερμότητα στο δοκίμιο αυξάνοντας το ποσό της προσλαμβανόμενης ενέργειας στην αρχική περίοδο θέρμανσης. Το θερμικό ισοζύγιο στο εσωτερικό του φούρνου φαίνεται στην Εικόνα 1-4.



**Εικόνα 1-4 Θερμικό ισοζύγιο φούρνου**

Ισχύει ότι:

$$Q_F = Q_W + Q_E$$

**Εξίσωση 1-10**

όπου  $Q_F$  είναι η συνολικά αποδιδόμενη ενέργεια του καυσίμου,  $Q_W$  η προσλαμβανόμενη ενέργεια από τα τοιχώματα και το δοκίμιο και  $Q_E$  που χάνεται από τα εξερχόμενα αέρια και τα διάφορα κενά. Η  $Q_W$  αποτελείται από συνιστώσες ( $Q_C + Q_R$ ) συναγωγής (μεταφοράς) και ακτινοβολίας. Αν τα τοιχώματα του φούρνου έχουν χαμηλή θερμική αδράνεια, δεν απαιτούν μεγάλη θερμότητα για την αύξηση της θερμοκρασίας τους στο επίπεδο αυτής των καυσαερίων, για ν' ακτινοβολήσουν θερμότητα ( $Q'_R$ ) στο δοκίμιο.

Τα εθνικά Πρότυπα προδιαγράφουν το μέγεθος, τις συνθήκες στήριξης και τις διαδικασίες θέρμανσης για τις διάφορες κατηγορίες δοκιμών. Εν τούτοις είναι πολύ δύσκολο να αναπαραχθούν οι οριακές συνθήκες και οι συνθήκες στήριξης του δομικού στοιχείου της κατασκευής. Πρόβλημα επίσης αποτελεί η μέθοδος φόρτισης. Το μέγεθος του φορτίου παραμένει συνήθως σταθερό στη διάρκεια της θέρμανσης. Τα βρετανικά Πρότυπα προδιαγράφουν και δοκιμασία επαναφόρτισης μετά από ψύξη του δοκιμίου.

Τα προαναφερθέντα κριτήρια της ευστάθειας, ακεραιότητας και θερμομόνωσης αφορούν τους βασικούς αντικειμενικούς στόχους, δηλαδή να προλάβουν την κατάρρευση του κτιρίου και να θέσουν υπό έλεγχο την εξάπλωση της φωτιάς, σχηματίζοντας πυροφραγμούς ή πυροδιαμερίσματα. Αυτοί οι φραγμοί εμποδίζουν για ένα χρονικό διάστημα τη μετάδοση των φλογών και των καυσαερίων καθώς

και τη μεταφορά θερμότητας που μπορεί ν' αναφλέξει εύφλεκτα υλικά από την απρόσβλητη πλευρά του δομικού στοιχείου. Οι οριακές καταστάσεις για τα τρία κριτήρια μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- **Ευστάθεια:** Η οριακή κατάσταση ορίζεται με την αστοχία του δοκιμίου ή την εμφάνιση μη αποδεκτών παραμορφώσεων. Οριακή παραμόρφωση για ελαστικά δομικά στοιχεία θεωρείται η τιμή  $L/30$ , όπου  $L$  το άνοιγμα του στοιχείου.
- **Ακεραιότητα:** Το δοκίμιο φθάνει στην οριακή κατάσταση, όταν εμφανιστούν ρηγματώσεις ή άλλα κενά, απ' όπου μπορούν να περάσουν φλόγες ή καυσαέρια ικανά ν' αναφλέξουν ένα εύφλεκτο υλικό από την άλλη πλευρά. Οριακή συνθήκη είναι η ανάφλεξη ενός βαμβακερού υφάσματος που κρατιέται κοντά στο άνοιγμα για 10 sec.
- **Θερμομόνωση:** Η οριακή κατάσταση σημειοδοτείται όταν η μεταφορά θερμότητας διαμέσου της κατασκευής αυξάνει τη θερμοκρασία της απρόσβλητης πλευράς, πάνω από προκαθορισμένα όρια. Συγκεκριμένα μια αύξηση κατά μέσο όρο  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ή περισσότερο από  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε κάθε σημείο του δοκιμίου.

Ορισμένες χώρες χρησιμοποιούν την ανηγμένη παραμόρφωση σαν εναλλακτική ή σαν πρόσθετη απαίτηση. Γι' αυτό το σκοπό ισχύει η σχέση:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} \leq \frac{l^2}{9000d}$$

### **Εξίσωση 1-11**

όπου  $\Delta l/\Delta t$  είναι η ταχύτητα παραμόρφωσης ανά λεπτό,  $l$  το άνοιγμα και  $d$  το πάχος του δοκιμίου.

Τα κριτήρια της ακεραιότητας και της θερμομόνωσης απαιτούνται κυρίως από δομικά στοιχεία που λειτουργούν σαν πυροφραγμοί (π.χ. τοιχώματα και δάπεδα), ενώ το κριτήριο της ευστάθειας αναφέρεται σε όλα τα φέροντα στοιχεία, όπως δοκοί, στύλοι, πλάκες, φέρουσες τοιχοποιίες, κλπ.

Οι Κανονισμοί επιβάλλουν συνήθως απαιτήσεις ενός ελάχιστου βαθμού πυραντίστασης για διάφορα δομικά στοιχεία ανάλογα με τη χρήση, το μέγεθος και το βαθμό επικινδυνότητας της κατασκευής. Απαραίτητος κρίνεται ο προκαθορισμός της πυραντίστασης βασικών δομικών στοιχείων, όπως τα τοιχώματα (εξωτερικά, διαχωριστικά, τοιχώματα πυροδιαμερισμάτων), τα δάπεδα (οροφές, πατώματα, επιστεγάσεις) και τα στοιχεία του φέροντα οργανισμού (δοκοί, στύλοι, πλάκες κλπ.). Οι απαιτήσεις πυραντίστασης των δομικών στοιχείων που ορίζουν ένα πυροδιαμέρισμα μειώνονται, όσο είναι πυκνότερη η διαμερισματοποίηση και μικρότερη η επιφάνεια κάτοψης του πυροδιαμερίσματος.



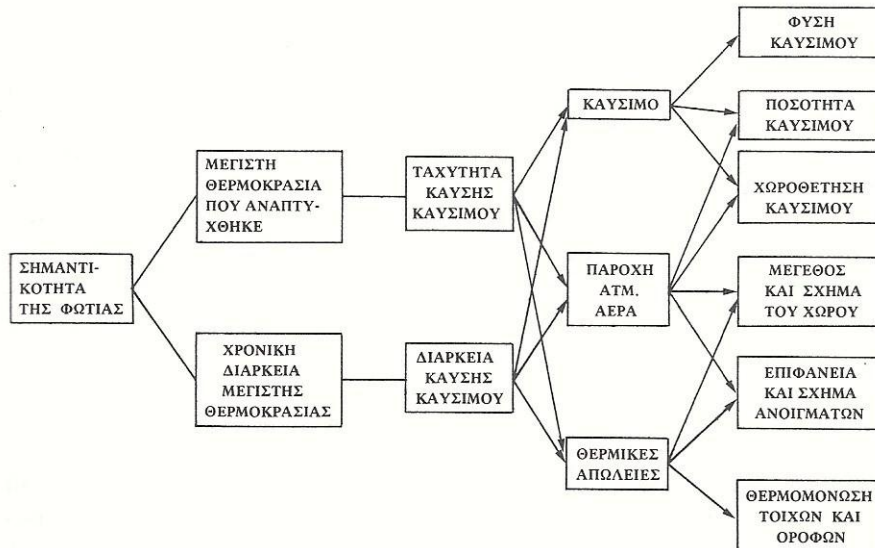
Δεν είναι δυνατό κάθε δομικό στοιχείο ενός κτιρίου να υποβάλλεται σε πρότυπη δοκιμασία πυραντίστασης. Υπάρχουν βοηθητικοί πίνακες που δίνουν τις πυραντιστάσεις των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων δομικών στοιχείων. Εξάλλου, πολλοί ερευνητές (Menzel, Neisel, McGuire, Law, κ.α.) έχουν δώσει εμπειρικούς τύπους ή αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού, που βασίζονται στις διαστάσεις, τα υλικά και τα θερμικά χαρακτηριστικά των εξεταζομένων δομικών στοιχείων.

Παρά την εισαγωγή του Διεθνούς Προτύπου ISO-834 του 1975, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των εθνικών Προτύπων για τον καθορισμό της πυραντίστασης. Η Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα έχει ετοιμάσει ήδη μια κατευθυντήρια οδηγία πάνω στη δοκιμασία αυτή (EEC-1202). Οι πρότυπες δοκιμασίες πυραντίστασης ορισμένων κρατών δίνονται με τα εξής αρχικά:

<i>Μ. Βρετανία</i>	BS 476: Part 8,1972
Η.ΠΑ.	ANSI ASTM: E 119
	ANSI/ASTM: E 152 (πόρτες)
	ANSI/ASTM: E163 (παράθυρα)
<i>Δ. Γερμανία</i>	DIN 4102: Parts 2, 3, 5 και 6
<i>Γαλλία</i>	Arrête της 5.1.1959
<i>Βέλγιο</i>	NBN 713-020
<i>Δανία</i>	DS 1051
<i>Ιταλία</i>	Circular 91 (1961)
<i>Ολλανδία</i>	NEN 3884
<i>Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης (ISO)</i>	ISO 834, 3008, 3009

## 1.8 Σημαντικότητα της φωτιάς

Ενώ η πυραντίσταση εκφράζει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα μιας πρότυπης δοκιμασίας, η «σημαντικότητα» μιας φωτιάς (fire severity) είναι μια γενικότερη έννοια, που ορίζεται σαν το μέτρο των θερμικών συνθηκών μιας πυρκαγιάς και των επιπτώσεών της στη δομική κατασκευή. Αν και οι κύριοι συντελεστές για τη σημαντικότητα είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία και η χρονική διάρκεια (Εικόνα 1-5), υπάρχουν και ορισμένοι άλλοι παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας από τις φλόγες, η κατανομή θερμοκρασίας, κλπ.



**Εικόνα 1-5 Σημαντικότητα της φωτιάς**

Η έκφραση του βαθμού σημαντικότητας της φωτιάς βασίζεται κυρίως ή στη μελέτη των αποτελεσμάτων και επιπτώσεων μιας πραγματικής πυρκαγιάς ή σε πειράματα πάνω σε ομοιώματα, όπου επιδιώκεται η δημιουργία καταστάσεων όμοιων με αληθινή φωτιά. Αυτό οπωσδήποτε αποτελεί μια πολύ πιο εύστοχη προσέγγιση, όσον αφορά στην αναπαράσταση μιας φωτιάς, από μια δοκιμασία ενός δομικού στοιχείου σε φούρνο.

### 1.8.1 Πυροθερμικό φορτίο

Το *πυροθερμικό φορτίο* ενός πυροδιαμερίσματος καθορίζεται συνήθως από τη συνολική ποσότητα θερμότητας  $Q$ , που εκλύεται κατά την πλήρη καύση των περιεχομένων καυσίμων υλικών, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα έπιπλα, τα επιχρίσματα και γενικότερα τα εσωτερικά τελειώματα. Το φορτίο αυτό  $Q$ , ανηγμένο σε μία επιφάνεια αναφοράς, δίνει την έκφραση της *πυκνότητας* του πυροθερμικού φορτίου  $q$ . Συνηθέστερα σαν επιφάνεια αναφοράς παίρνεται η επιφάνεια του δαπέδου  $A_f$ , ενώ μερικές φορές το άθροισμα των εσωτερικών επιφανειών του πυροδιαμερίσματος συμπεριλαμβανομένων και των ανοιγμάτων. Έτσι δίνονται δύο εκφράσεις της πυκνότητας του πυροθερμικού φορτίου:

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum m_v H_v$$

#### Εξίσωση 1-12

$$q_t = \frac{1}{A_t} \sum m_v H_v$$

### Εξίσωση 1-13

Όπου  $q_f$  είναι η η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου ( $\text{MJ m}^{-2}$ ),  $q_t$  η πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας συνόλου περιβαλλουσών επιφανειών πυροδιαμερίσματος ( $\text{MJ m}^{-2}$ ),  $m_v$  είναι η συνολική μάζα των  $v$  καυσίμων (kg),  $H_v$  η θερμαντική αξία των  $v$  καυσίμων ( $\text{MJ Kg}^{-1}$ ),  $A_f$  ορίζεται ως η επιφάνεια του δαπέδου του πυροδιαμερίσματος ( $\text{m}^2$ ) και, τέλος,  $A_t$  το άθροισμα των περιβαλλουσών επιφανειών του πυροδιαμερίσματος ( $\text{m}^2$ ).

Επειδή σχεδόν ποτέ σε μια πυρκαγιά δεν παρατηρείται πλήρης καύση όλων των υλικών, στις παραπάνω εκφράσεις Εξίσωση 1-11 και Εξίσωση 1-12 εισάγεται ένας συντελεστής  $\mu_v$ , που η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 1 ανάλογα με το βαθμό πυρόλυσης καθενός από τα καύσιμα υλικά του χώρου. Έτσι οι Εξίσωση 1-11 και Εξίσωση 1-12 γίνονται:

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum \mu_v m_v H_v$$

### Εξίσωση 1-14

$$q_t = \frac{1}{A_t} \sum \mu_v m_v H_v$$

### Εξίσωση 1-15

Ο αδιάστατος αυτός συντελεστής  $\mu_v$  εξαρτάται κύρια από τον τύπο, τις διαστάσεις και τη θέση του καυσίμου, καθώς και από τη διάρκεια της φωτιάς και τα χαρακτηριστικά της καμπύλης θερμοκρασίας - χρόνου. Θεωρητικά είναι δυνατός ο υπολογισμός των συντελεστών  $\mu$ , για ένα καθορισμένο πυροδιαμέρισμα με αμετάβλητα σε πλήθος και σε θέση περιεχόμενα. Στην πράξη όμως προσέγγιση του συντελεστή  $\mu_v$  μπορεί να γίνει με το στατιστικό μέσο όρο για μια κατηγορία ομοειδών κτιρίων.

Επειδή μέσα σε ένα πυροδιαμέρισμα υπάρχουν υλικά με διαφορετικές θερμαντικές αξίες και σε διάφορες ποσότητες, συνήθως το πυροθερμικό φορτίο μετατρέπεται και εκφράζεται σε «ισόποσο ξύλου», παίρνοντας υπόψη ότι η θερμαντική αξία του ξύλου είναι  $4450 \text{ kcal/kg}$ , ή  $8000 \text{ Btu/lb}$ , ή  $16\text{-}18 \text{ MJ/kg}$ . Η «θερμαντική αξία» ενός υλικού είναι η συνολική ποσότητα θερμότητας που αποδίδεται κατά την πλήρη καύση της μονάδας μάζας του υλικού.

Η τιμή του πυροθερμικού φορτίου για ένα συγκεκριμένο κτίριο δεν μπορεί να είναι σταθερή, γιατί ποικίλλει από χώρο σε χώρο και από μια χρονική στιγμή σε μια

άλλη (π.χ. μετακίνηση επίπλων, εμπορευμάτων, κλπ.). Είναι αναγκαίος επομένως ο καθορισμός ενός στατιστικού μέσου όρου πυροθερμικού φορτίου, που για λόγους ασφαλείας παίρνει υπόψη του τις μεγαλύτερες παρατηρούμενες τιμές.

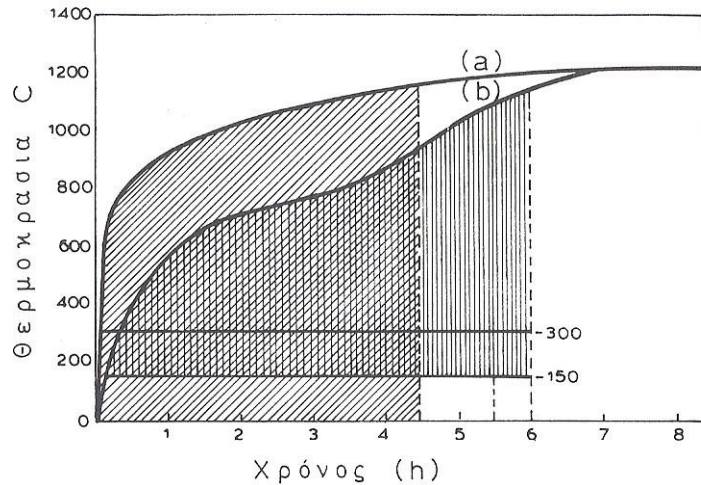
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-1) δίνονται τιμές πυροθερμικών φορτίων για ορισμένες κατηγορίας κτιρίων από μετρήσεις που έγιναν στη Μεγ. Βρετανία.

**Πίνακας 1-1 Τιμές πυροθερμικών φορτίων σε κτίρια**

Είδος κτιρίων	Πυροθερμικό φορτίο [kg/m <sup>2</sup> ]
Κατοικίες	25
Γραφεία	25-50
Καταστήματα	Μέχρι 250
Εργοστάσια	Μέχρι 150
Συνάθροιση κοινού	25-50
Αποθήκες	Μέχρι 500

### 1.8.2 Σημαντικότητα της φωτιάς

Στις Η.Π.Α. άρχισαν οι πρώτες έρευνες για συσχετισμό του βαθμού σημαντικότητας των πυρκαγιών με πειραματικά δεδομένα. Ο Ingberg, το 1930, έδωσε μια σχέση μεταξύ πυροθερμικού φορτίου και σημαντικότητας της φωτιάς και καθόρισε τις απαιτήσεις πυραντίστασης για διάφορα είδη κτιρίων μελετώντας τα αντίστοιχα πυροθερμικά φορτία. Την εργασία αυτή συνέχισαν και τελειοποίησαν οι Robertson και Gross (1970) που εισήγαγαν την αρχή των ίσων εμβαδών (Εικόνα 1-6), όπου η σημαντικότητα μιας φωτιάς παριστάνεται με το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη της θερμοκρασίας και την παράλληλη προς τον άξονα των  $x$  ευθεία μιας θερμοκρασίας 150 ή 300 °C, που παίρνεται σαν γραμμή αφετηρίας. Έτσι, αν η καμπύλη (b) παριστάνει το σενάριο μιας φωτιάς πειραματικής ή πραγματικής και η καμπύλη (a) την πρότυπη των Κανονισμών, η σημαντικότητα της συγκεκριμένης φωτιάς για 6 ώρες είναι ισοδύναμη με αυτήν της πρότυπης φωτιάς για 4,5 ώρες (ίσα εμβαδά). Με αυτόν τον τρόπο, οι απαιτήσεις πυραντίστασης των δομικών στοιχείων για μια κατηγορία κτιρίων με γνωστό πυροθερμικό φορτίο και πιθανή καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας, εκφράζονται σε κοινή γλώσσα, δηλαδή αυτήν της πρότυπης καμπύλης.



**Εικόνα 1-6 Αρχή των ίσων εμβαδών**

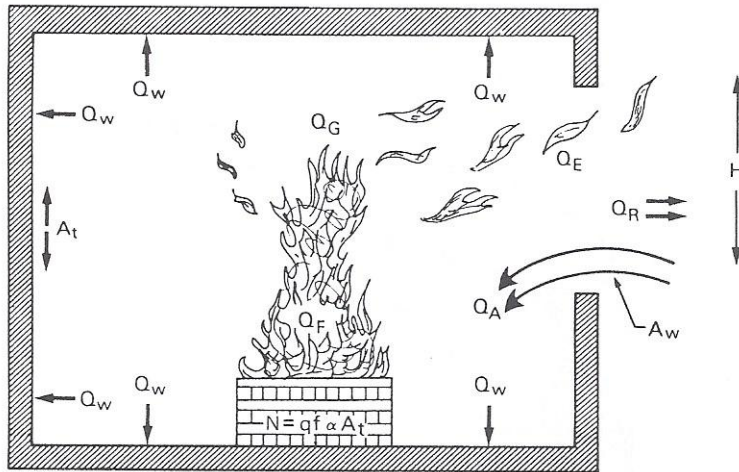
Ιάπωνες επιστήμονες συνέχισαν τις έρευνες πάνω στη σημαντικότητα της φωτιάς και με τη θεωρία ομοιωμάτων έφθασαν να μετρήσουν το βαθμό επιρροής του εξαερισμού στην εξέλιξη της φωτιάς. Έτσι, ο Kawagoe (1950) απέδειξε ότι η ταχύτητα καύσης είναι ανάλογη του γινομένου  $A\sqrt{H}$ , όπου  $A$  η επιφάνεια των ανοιγμάτων και  $H$  το ύψος τους. Στη δεκαετία του 60, Βρετανοί επιστήμονες (Heselden, Law, Thomas) απέδειξαν ότι η ταχύτητα καύσης και η θερμοκρασία εξαρτώνται εκτός από τις παραμέτρους του εξαερισμού, από τη μορφή και το μέγεθος του χώρου και το πυροθερμικό φορτίο. Ο Thomas πρώτος διέκρινε τα δύο είδη φωτιάς σε κλειστό χώρο, που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ρυθμιζόμενη από τον εξαερισμό ή από τα καύσιμα). Τέλος, η Law έδωσε τον τύπο της ισοδύναμης πυραντίστασης:

$$t_e = \frac{N}{A_f} \times \frac{A_f}{A_u(A_t - A_u)}$$

**Εξίσωση 1-16**

Όπου  $t_e$  η ισοδύναμη πυραντίσταση (min),  $N$  το πυροθερμικό φορτίο σε ισοδύναμο βάρος ξύλου (kg),  $A_f$  η επιφάνεια δαπέδου ( $m^2$ ),  $A_u$  η επιφάνεια εξαερισμού ( $m^2$ ) και  $A_t$  η επιφάνεια του πυροδιαμερίσματος ( $m^2$ ).

Περαιτέρω έρευνες Σουηδών Επιστημόνων (Odeen, Pettersson, Magnusson) αποκάλυψαν το ρόλο που παίζουν τα θερμικά χαρακτηριστικά των ορίων. Στην Εικόνα 1-7 φαίνεται ένα απλό θερμικό ισοζύγιο φωτιάς πυροδιαμερίσματος.



**Εικόνα 1-7 Θερμικό ισοζύγιο πυροδιαμερίσματος**

Ισχύει ότι:

$$Q_F + Q_A = Q_G + Q_w + Q_E + Q_R$$

### Εξίσωση 1-17

όπου  $Q_F$  η θερμότητα η παραγόμενη από την καύση,  $Q_A$  η θερμότητα που περιέχεται στον εισερχόμενο αέρα,  $Q_G$  η θερμότητα για την άνοδο της θερμοκρασίας των καυσαερίων,  $Q_w$  η θερμότητα η μεταφερόμενη στους τοίχους, το δάπεδο και την οροφή,  $Q_E$  η θερμότητα που περιέχεται στα εξερχόμενα αέρια και τέλος  $Q_R$  η θερμότητα που ακτινοβολείται από τα ανοίγματα.

Η Εξίσωση 1-15 εξελίχθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τα οριακά θερμικά χαρακτηριστικά στην Εξίσωση 1-17:

$$t_e = \frac{0.057q_f \cdot A_f}{\sqrt{A_u(A_t - A_u)}}$$

### Εξίσωση 1-18

Όπου  $q_f = N/A_f$ , η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου.

Από όλη την παραπάνω πειραματική και θεωρητική έρευνα συμπεραίνεται ότι, τρεις είναι οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν το βαθμό σημαντικότητας μιας αναμενόμενης φωτιάς σ' ένα χώρο:

α) το *πυροθερμικό φορτίο* (ποσότητα, τύπος και κατανομή), που είναι καθοριστικό για το ποσό θερμότητας καθώς και την ταχύτητα έκλυσής της μέσα στο χώρο

β) ο *εξαερισμός*, που αφορά κυρίως τον εισερχόμενο αέρα από τα παράθυρα, γιατί οι πόρτες θεωρούνται κατά κανόνα κλειστές; και με ορισμένη πυραντίσταση

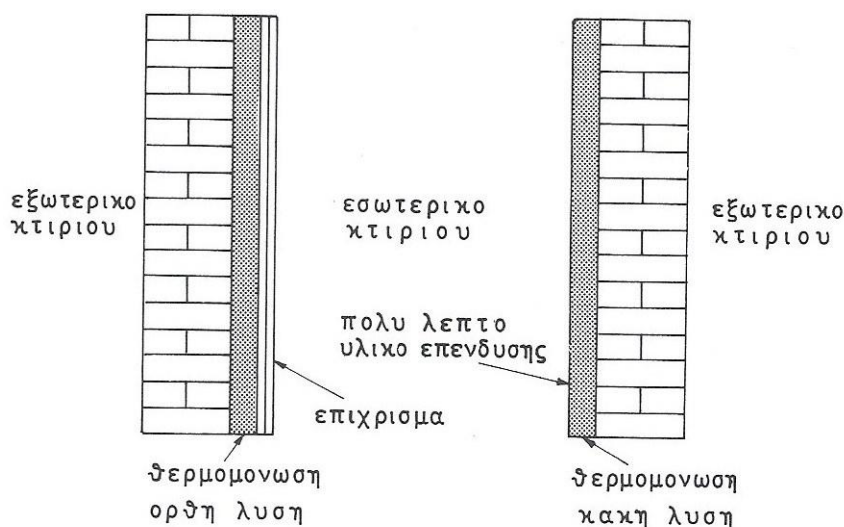
γ) το μέγεθος του πυροδιαμερίσματος, που παίρνεται έμμεσα υπόψη στον υπολογισμό του πυροθερμικού φορτίου.

Για το πυροδιαμέρισμα σημασία έχουν τα θερμικά χαρακτηριστικά των εσωτερικών ορίων. Έτσι, εσωτερικές επιφάνειες με υλικά που έχουν μικρή θερμική αδράνεια ( $K\rho c$ ) απορροφούν πιο αργά τη θερμότητα, επιτρέποντας να φθάσουν τα αέρια σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-2) αναγράφονται τα θερμικά χαρακτηριστικά ορισμένων τέτοιων υλικών.

**Πίνακας 1-2 Θερμικές ιδιότητες υλικών εσωτερικών τελειωμάτων**

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα [W/m/K]	Πυκνότητα [kg/m <sup>3</sup> ]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kg/K]	Θερμική αδράνεια [W/m <sup>2</sup> /K]
Τοιχοποιία	0.800	2600	800	$1700 \times 10^3$
Επίχρισμα	0.160	950	840	$130 \times 10^3$
Μοριοσανίδες	0.053	240	1250	$15 \times 10^3$
Διογκ. Πολυστερίνη	0.034	20	1500	$1 \times 10^3$
Αφρός πολυουρεθάνης	0.028	30	1260	$1 \times 10^3$
Αέρας	0.024	1.3	1000	$0.03 \times 10^3$

Εύκολα επομένως συμπεραίνεται ότι, μια λύση θερμομόνωσης με σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά που έχουν πολύ μικρή θερμική αδράνεια από τη μέσα πλευρά του κτιρίου θα δημιουργήσει πολλά προβλήματα σε περιπτώσεις φωτιάς, αν δεν προστατευθεί κατάλληλα με ικανό πάχος επιχρίσματος (Εικόνα 1-8).



## Εικόνα 1-8 Θέση μόνωσης από σκοπιά πυροπροστασίας

### 1.9 Επίδραση προϊόντων πυρκαγιάς στον άνθρωπο

Τα παράγωγα των σύνθετων καύσεων μιας πυρκαγιάς μπορούν να χωριστούν σε 4 κατηγορίες:

- Καυσαέρια
- Καπνός
- Φλόγες
- Θερμότητα

Αυτά τα προϊόντα έχουν σημαντική επίδραση στη φυσιολογία και στη μπεριφορά των ατόμων στη διάρκεια καθώς και μετά από μία πυρκαγιά.

Η εισπνοή θερμού αέρα και καυσαερίων έχει τοξικολογικές επιπτώσεις στα άτομα. Επιπλέον, η μείωση της ορατότητας από τους καπνούς και τις φλόγες εντείνει την απώλεια των φυσικών ικανοτήτων και της ψυχραιμίας των ατόμων για ασφαλή διαφυγή, ενώ μπορεί να παραμείνουν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα σε άτομα που εισέπνεαν αρκετή ώρα καυσαέρια, εκτός από τα εγκαύματα που πιθανόν να προκάλεσε η φωτιά.

#### 1.9.1 Καυσαέρια

Ως καυσαέρια ονομάζονται τα αέρια προϊόντα μιας καύσης που παραμένουν μετά την απόψυξη στις συνηθισμένες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος. Το πιο συνηθισμένο ανάμεσά τους είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, γιατί στις περισσότερες πυρκαγιές δε συμμετέχει εκείνη η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου για πλήρη καύση του άνθρακα. Εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα σχηματίζει με την αιμογλοβίνη του ανθρώπινου αίματος την καρβοξυαιμογλοβίνη, μειώνοντας έτσι την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου από το αίμα και προκαλώντας ασφυξία. Ο θάνατος μπορεί να προέλθει από έκθεση του ατόμου για λίγα λεπτά της ώρας σε ατμόσφαιρα με περιεκτικότητα CO 1-1.3% «κατ' όγκον», ή σε 4 λεπτά με περιεκτικότητα 0.2%.

Εξίσου άφθονο στις πυρκαγιές εμφανίζεται και το διοξείδιο του άνθρακα, που έχει σαν κύρια συνέπεια την αύξηση του αναπνευστικού ρυθμού. Συγκεντρώσεις του αερίου σε ποσοστά μέχρι 5% «κατ' όγκον», δημιουργούν έντονα αναπνευστικά προβλήματα, ενώ πάνω από 10%, όταν υπάρχει σύγχρονη έλλειψη οξυγόνου, μπορεί να αποβούν θανατηφόρες. Αν η συγκέντρωση, όμως, υπερβεί το



14%, το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι η κατάσβεση της φωτιάς.

Από τα υπόλοιπα παραγόμενα καυσαέρια τοξικότητα παρουσιάζουν οι ενώσεις του θείου όπως, το υδρόθειο ( $H_2S$ ) και το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), προϊόντα καύσης ενώσεων θείου σαν το μαλλί, ελαστικά κ.α., που σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 500 ppm (parts per million - μέρη ανά εκατομμύριο) γίνονται θανατηφόρες. Η αμμωνία ( $NH_3$ ), που παράγεται από καύσεις μαλλιού, μεταξιού, νάυλον, μελαμίνης κλπ., είναι καυσαέριο εξαιρετικά δραστικό όσον αφορά τη μείωση της ορατότητας, αν και γενικά παρουσιάζει μικρές συγκεντρώσεις σε πυρκαγιές κτιρίων. Το υδροκυάνιο ( $HCN$ ), εμφανίζεται σε μικρές ποσότητες κατά την καύση μαλλιού, μεταξιού, ξύλου, χαρτιού, πολυουρεθάνης κλπ. Έχει γρήγορη ασφυξιογόνα δράση, που γίνεται θανατηφόρα σε μικρές συγκεντρώσεις, γύρω στα 350 ppm. Πιο τοξικό εμφανίζεται το διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ), που παράγεται σε μικρές ποσότητες από την καύση υφασμάτων, ενώ σε μεγαλύτερες από την πυρόλυση των ανοργάνων αλάτων νιτρικής κελουλόζης, αμμωνίου κλπ. Προκαλεί αναισθησία και θάνατο σε 10 λεπτά για μια συγκέντρωση γύρω στα 200 ppm. Η ακρυλική αλδεΐδη (ακρολεΐνη), προϊόν καύσης πετρελαιοειδών, είναι τοξικότατο καυσαέριο σε μικρές συγκεντρώσεις από 50 μέχρι 100 ppm. Η καύση του χλωρίου ορισμένων πλαστικών όπως το PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο), παράγει υδροχλώριο ( $HCl$ ) αέριο με πολύ δυσάρεστη οσμή, που γίνεται επικίνδυνο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 500 ppm.

### 1.9.2 Καπνός

Ο καπνός δε θεωρείται άμεση αιτία θανάτου από πυρκαγιά, αλλά συντελεί έμμεσα στην αύξηση του κινδύνου, μειώνοντας την ορατότητα των εγκλωβισμένων και αυξάνοντας τον πανικό τους. Ο καπνός αποτελείται από αιωρούμενα σωματίδια άνθρακα και πίσσας τα οποία έχουν υποστεί ατελή καύση. Το ορατό αυτό τμήμα των παραγώνων μιας καύσης που συνοδεύεται, επίσης, και από υγροποιημένα σταγονίδια, προκαλεί σοβαρά προβλήματα στην ορατότητα, γιατί το μέγεθος των σωματιδίων είναι ίσο με το μήκος κύματος του φωτός, προκαλώντας έτσι διασπορά του φωτός και συσκότιση. Εισπνοή αυτού του υγροποιημένου μίγματος προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα, ενώ η επίδρασή του στην όραση είναι εκτυφλωτική.

### 1.9.3 Φλόγες

Η μετάδοση της θερμότητας μιας καύσης γίνεται με μεταφορά και ακτινοβολία και συνοδεύεται συνήθως από φλόγες, χωρίς όμως σ' όλες τις περιπτώσεις να είναι απαραίτητη η παρουσία τους. Τα εγκαύματα στο ανθρώπινο σώμα προέρχονται είτε

από άμεση επαφή με τις φλόγες είτε από ακτινοβολούμενη θερμότητα. Η αντοχή και ο χρόνος επιβίωσης σε διαφόρων βαθμών σοβαρότητας εγκαύματα είναι κατά τεκμήριο αυξημένα σε άτομα νεώτερης ηλικίας και θηλυκού γένους. Ένας εξίσου σημαντικός ρόλος των φλογών είναι η δημιουργία συνθηκών πανικού από τη θέα τους.

#### 1.9.4 Θερμότητα

Έκθεση του σώματος σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει υπερθερμία, σοκ, αφυδάτωση, απόφραξη του αναπνευστικού συστήματος, αύξηση του καρδιακού ρυθμού και εγκαύματα που διαβαθμίζονται συνήθως σε τρεις βαθμούς σοβαρότητας. Τα αποτελέσματα της έκθεσης σε υψηλά θερμαινόμενη ατμόσφαιρα επηρεάζονται από την παρουσία υγρασίας, που είναι δυνατό να υπάρχει είτε σαν φυσική υγρασία, είτε προερχόμενη από την καύση, είτε από το νερό κατάσβεσης. Μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας εξασθενούν την αντίσταση του σώματος στην επιβάρυνση της θερμότητας. Έχει βρεθεί από παρατηρήσεις ότι, η θερμοκρασία των 150°C είναι το ανώτατο όριο για την ανθρώπινη επιβίωση, για μικρή όμως χρονική περίοδο έκθεσης και χωρίς τη ταυτόχρονη παρουσία μεγάλου ποσοστού σχετικής υγρασίας. Επίσης, μια απότομη εισροή θερμότητας στους πνεύμονες έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη πτώση της πίεσης του αίματος. Στους πυροσβέστες συνιστάται να μην εισέρχονται σε χώρους με θερμοκρασίες πάνω από 50-60°C, χωρίς ειδικές προστατευτικές στολές και προσωπίδες.

Στις επιπτώσεις και τους κινδύνους της φωτιάς ίσως θα έπρεπε να αναφερθεί και η παρατηρούμενη έλλειψη οξυγόνου που, όπως είναι γνωστό, περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα σε μια αναλογία 21% «κατ' όγκον». Για μείωση του οξυγόνου μέχρι την αναλογία του 15% παρατηρείται πτώση της μυϊκής δύναμης (ανοξία). Για περαιτέρω μείωση της περιεκτικότητας σε ποσοστά 14% ως 10%, το άτομο εξακολουθεί να διατηρεί τις αισθήσεις του αλλά με εμφανή τα σημάδια της κόπωσης και με καθαρά μειωμένη ικανότητα κρίσης. Σε μικρότερα ποσοστά από 10% ως 6%, ο άνθρωπος χάνει τις αισθήσεις του, αλλά μπορεί να επανέλθει στη ζωή, όταν σε σύντομο χρονικό διάστημα του παρασχεθεί καθαρός αέρας και οξυγόνο.

### 1.10 Δομική πυροπροστασία

Η δομική πυροπροστασία (παθητική πυρασφάλεια) αποτελεί την πλέον σύγχρονη, αλλά και απαραίτητη μορφή πυρασφάλειας για τις δομικές κατασκευές. Κύρια απαίτηση παθητικής πυροπροστασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η πρόβλεψη

των απαραίτητων οδεύσεων διαφυγής (τρόποι και μέσα διαφυγής από το κτίριο προς ασφαλή χώρο εκτός του κτιρίου). Παράλληλα, κατά την μελέτη και το σχεδιασμό ενός χώρου πρέπει να ορίζεται ο δείκτης πυραντίστασης. Αυτός αφορά στην ικανοποιητική αντίσταση στη διάδοση των φλογών των υλικών που χρησιμοποιούνται σε τοίχους και οροφές, ώστε όταν καίγονται να εμφανίζουν περιορισμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας. Ένα ακόμη επιτακτικό μέτρο παθητικής πυροπροστασίας είναι ο σχεδιασμός πυροδιαμερισμάτων. Πρόκειται για την διαμερισματοποίηση του κτιρίου ώστε να αποτρέπεται η εσωτερική διάδοση της πυρκαγιάς, να επικρατούν κατάλληλες συνθήκες και να εξασφαλίζεται ο απαραίτητος χρόνος πριν την εξάπλωση για την εκκένωση του χώρου.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα θύματα λόγω της οικοδομικής κατάρρευσης κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η δομική αντίσταση των στοιχείων της κατασκευής σε συνθήκες πυρκαγιάς, η οποία καλύπτει κυρίως:

- τη προσομοίωση και πρόβλεψη της αστοχίας της κατασκευής και η διαδικασία κατάρρευσης για τις δομές κάτω από τα συνδυασμένα αποτελέσματα της θερμότητας και της εκρηκτικής γόμωσης, καθώς επίσης τη βελτίωση και αξιολόγηση της δομικής αντίστασης σε πυρκαγιά
- μια προσεγγιστική αξιολόγηση για τα συστήματα πυροπροστασίας των δομικών στοιχείων από χάλυβα, την απόδοση των επιστρωμάτων ως προς την πυρασφάλεια και την αντίσταση στη φωτιά των νέων τύπων των κατασκευών και δομικών στοιχείων
- τη μοντελοποίηση της φωτιάς και τον σχεδιασμό μεθόδων πυροπροστασίας για τις κατασκευές από χάλυβα σε μεγάλης έκτασης οικοδομές
- τους μηχανισμούς της καταστροφικής δομικής κατάρρευσης οικοδομών

### **1.11 Ενεργητική πυρασφάλεια**

Ως μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας ορίζεται το σύνολο των μέτρων με τα οποία εξασφαλίζεται η έγκαιρη αυτόματη ανίχνευση και ο εντοπισμός των σημείων όπου εκδηλώθηκε πυρκαγιά, η σήμανση συναγερμού καθώς και η αυτόματη ή χειροκίνητη κατάσβεση. Συνοπτικά τα μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας μπορεί να είναι μερικά ή όλα τα παρακάτω:

Σύστημα ανίχνευσης και έγκαιρης ειδοποίησης. Περιλαμβάνει:

- Αυτόματη πυρανίχνευση (ανιχνευτές, πίνακα πυρανίχνευσης, καλωδιώσεις)
- Σήμανση συναγερμού

- σειρήνες για ηχητική ειδοποίηση
- φλας για οπτική ειδοποίηση
- μέσα ενεργοποίησης του συστήματος, όπως κομβία χειροκίνητης αναγγελίας πυρκαγιάς και όργανα διαπιστώσεως λειτουργίας αυτόματων συστημάτων πυρόσβεσης
- διακόπτης ροής νερού σε υδροδοτικό δίκτυο με πυροσβεστικές φωλιές ή σε δίκτυο sprinkler
- όργανα ενδείξεως αντλιών πυρόσβεσης
- όργανα ενδείξεως λειτουργίας συστημάτων CO<sub>2</sub>, Inergen κλπ)
- Αυτόματη ειδοποίηση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας

Συστήματα πυρόσβεσης / κατάσβεσης. Τέτοια συστήματα είναι:

- Αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος (Sprinkler) το οποίο διακρίνεται σε: υγρού τύπου (wet), ξηρού τύπου (dry), προενέργειας (preaction), ολικής κατάκλισης (deluge) και μικτό.
- Αυτόματο σύστημα ψεκασμού σταγονιδίων (water spray) ή ομίχλης (fog)
- Αυτόματο σύστημα κατάκλισης με αφρό (foam)
- Αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με αέρια (CO<sub>2</sub>, αλογονομένους υδρογονάνθρακες / HALON, αδρανή αέρια / Inergen, Argonite κλπ)
- Αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με ξηρές σκόνες
- Υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (πυροσβεστικές φωλιές) – χειροκίνητο
- Φορητοί πυροσβεστήρες και άλλα μέσα (αντιπυρικές κουβέρτες, άμμος, κλπ)

Συστήματα εξαερισμού καπνού από πυρκαγιά. Ενεργοποιούνται αυτόματα με την πρώτη εμφάνιση της πυρκαγιάς.

Σήμανση οδεύσεων διαφυγής – Φωτισμός ασφάλειας (δεν αποτελεί αντικείμενο της ενεργητικής πυροπροστασίας αλλά μπαίνει στα σχέδια που κατατίθενται στη πυροσβεστική για την άδεια).

## 1.12 Νομοθεσία Πυροπροστασίας

**Π.Δ. 71/88** (ΦΕΚ 32 Α' / 17.2.1988) 'Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων'.

- Μέρος Α: Καλύπτει τα **νέα κτίρια** των οποίων η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με τη χρήση τους εννέα κατηγορίες.
- Μέρος Β: Καλύπτει τα **υφιστάμενα ξενοδοχεία** (κατά την ημερομηνία έκδοσης του Π.Δ. 71/88).

**ΚΥΑ 5905/Φ15/839/1995** (ΦΕΚ 611 Β' / 12.7.1995) 'Λήψη μέτρων πυροπροστασίας στις βιομηχανικές - βιοτεχνικές εγκαταστάσεις και αποθήκες αυτών καθώς και αποθήκες εύφλεκτων και εκρηκτικών υλών'. Τα κύρια σημεία

είναι:

- Γίνεται κατάταξη των διαφόρων βιομηχανιών – βιοτεχνιών και αποθηκών σε κατηγορίες, σύμφωνα με τη παραγωγική διαδικασία και το είδος των πρώτων υλών και προϊόντων, από άποψη κινδύνου πυρκαγιάς.
- Οι νέες εγκαταστάσεις υποχρεούνται να λαμβάνουν τα παθητικά μέτρα που προβλέπονται για την κατηγορία για την κατηγορία τους από το Π.Δ. 71/88, ενώ σε όλες (υφιστάμενες και νέες), και πάλι ανάλογα με την κατηγορία, επιβάλλονται μέτρα πρόληψης και καταστολής της πυρκαγιάς.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιβάλλονται από την ΚΥΑ 5905 ορισμένα παθητικά μέτρα όπως πυροδιαμερισματοποίηση λίαν επικίνδυνων χώρων ακόμα και σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις.
- Συνιστάται η συγκρότηση ομάδων πυροπροστασίας σε κάθε επιχείρηση και προτείνονται διαδικασίες λειτουργίας και εκπαίδευσής των.

**Π.Δ. 6/96** (ΦΕΚ 150B της 13.3.96) 'Λήψη μέτρων πυροπροστασίας σε αποθήκες'.

**Π.Δ. 3/81** 'Λήψη βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού'.

**Π.Δ. 3α/81** 'Περί τροποποίησης της υπ' αριθμόν 3/19.1.1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού'.

**Π.Δ. 36/95** 'Περί τροποποίησης και συμπλήρωσης της υπ' αριθμόν 3/1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού'.



## Κεφάλαιο 2

### 2 Θερμοχημεία της γύψου

#### 2.1 Εισαγωγή

Μια γυψοσανίδα αποτελείται από τον εσωτερικό πυρήνα, που είναι ασβεστοκονίαμα γύψου (η ημι-ένυδρη μορφή θειικού άλατος ασβεστίου), και από δύο φύλλα χαρτονιού, που τυλίγουν την γύψο. Επίσης, μια γυψοσανίδα μπορεί να περιέχει κάποια ποσότητα ελεύθερης υγρασίας και διάφορες άλλες ανόργανες ενώσεις, όπως το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) και μαγνήσιο ( $\text{MgCO}_3$ ). Τέλος, ανάλογα με την εφαρμογή τους μπορεί να περιέχουν και διάφορα άλλα πρόσμικτα που μειώνουν την υδροαπορροφητικότητα τους (για χώρους με υψηλά ποσοστά υγρασίας, π.χ. μπάνια) ή αυξάνουν την αντοχή τους στη φωτιά (για χώρους που απαιτούν αυξημένη παθητική πυροπροστασία).

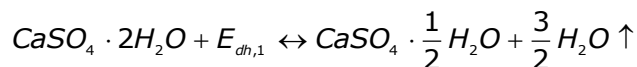
Η γυψοσανίδα χρησιμοποιείται ευρέως στον κατασκευαστικό κλάδο σε όλο τον κόσμο (ενδεικτική τιμή: 5.6 δις  $\text{m}^2$  που παρήχθησαν το έτος 2000) (πηγή διαδικτύου). Αυτό οφείλεται στην ευκολία κατασκευής τους, στην ευρεία διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης για την παραγωγή της, στην φιλικότητα προς το περιβάλλον, καθώς και στην ενδόθερμη διαδικασία αφυδάτωσης που λαμβάνει χώρα όταν εκτίθεται στη φωτιά. Το τελευταίο χαρακτηριστικό της είναι αυτό που έχει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την πυρασφάλεια των κτιρίων. Η ικανότητα μιας γυψοσανίδας να επιβραδύνει τη διείσδυση της φωτιάς σε τοίχους και οροφές, όπου και χρησιμοποιείται, είναι ο κύριος λόγος για τη ευρεία χρήση της σε κλασικές ελαφριές κατασκευές, όπως σε χαλύβδινα ή ξύλινα δοκάρια και σε τοίχους κατασκευασμένους από γυψοσανίδα. Οι κατασκευές αυτές αποτελούνται από δύο ή περισσότερα φύλλα γυψοσανίδων εκατέρωθεν των δύο πλευρών των δοκαριών, ενώ η μεταξύ τους κοιλότητα είναι μονωμένη ή έχει αφεθεί κενή.

Οι τύποι των γυψοσανίδων, και κατά συνέπεια οι ιδιότητές τους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα υπολογιστικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι τύπου X και C. Οι γυψοσανίδες τύπου X έχουν έναν ειδικά διαμορφωμένο πυρήνα ο οποίος παρέχει μεγαλύτερη αντίσταση στη φωτιά από αυτόν μιας οποιασδήποτε άλλης γυψοσανίδας ίσου πάχους. Από την άλλη, οι γυψοσανίδες τύπου C φημίζονται να έχουν καλύτερη συμπεριφορά απέναντι στη φωτιά, από τις γυψοσανίδες τύπου X, ενώ δεν έχουν κάποια τυποποιημένη συνταγή, αλλά εξαρτάται κάθε φορά από την εταιρία κατασκευής τους.

## 2.2 Θερμοχημεία της γύψου

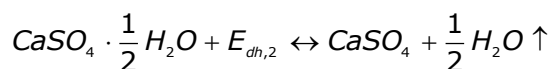
Η κύρια χρήση των γυψοσανίδων έγκειται στην ικανότητά της γύψου να ενεργεί ως εμπόδιο για την διάδοση της πυρκαγιάς και στην προστασία από την υπερθέρμανση των μη-εκτεθειμένων πλευρών των τοίχων και των δαπέδων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι απόρροια της χημικής σύνθεσης των γυψοσανίδων. Το κύριο συστατικό των γυψοσανίδων είναι η γύψος (δι-υδρίτης θειικού ασβεστίου,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) που περιέχει περίπου 21% κατά μάζα του χημικά δεσμευμένο νερό. Όταν η γυψοσανίδα είναι εκτεθειμένη σε κάποια πηγή θερμότητας, το νερό που βρίσκεται δεσμευμένο στην κρυσταλλική της δομή, διασπάται από το κρυσταλλικό πλέγμα και μαζί με την ελεύθερη υγρασία ατμοποιείται. Αυτές οι δύο διαδικασίες, γνωστές ως αφυδάτωση της γύψου, συνοδεύονται από την απορρόφηση ενός μεγάλου ποσού ενέργειας, γεγονός που επιβραδύνει δραστικά τη διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας μέσω των γυψοσανίδων.

Ο διαχωρισμός του κρυσταλλικού νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, ο δι-υδρίτης θειικού ασβεστίου χάνει το 75% του κρυσταλλικού του νερού και μετασχηματίζεται σε ημι-υδρίτη θειικού ασβεστίου:



### Εξίσωση 2-1

Περαιτέρω θέρμανση της γυψοσανίδας προκαλεί επιπλέον αφυδάτωση, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση και του υπολειπόμενου νερού που περιέχει ο ημι-υδρίτης θειικού ασβεστίου και τον μετασχηματισμό του σε ανυδρίτη θειικού ασβεστίου ή άνυδρο θειικό ασβέστιο,  $\text{CaSO}_4$ .



### Εξίσωση 2-2

Οι δυο παραπάνω αντιδράσεις είναι ενδόθερμες, ως εκ τούτου απορροφούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Ενδεικτικές τιμές για αυτά τα ποσά ενέργειας σύμφωνα με τους Andersson και Jansson (Andersson L. and Jansson B.,1987) είναι 515 KJ/kg για το πρώτο στάδιο και 185 KJ/kg για το δεύτερο, σύμφωνα με τον Tomas (Thomas G.,2002) οι αντίστοιχες ενέργειες είναι 456 KJ/kg και 68 KJ/kg, δηλαδή συνολική ενέργεια αφυδάτωσης 524 KJ/kg, ενώ σύμφωνα με τους Mehaffey et al. (Mehaffey et al.,2008) είναι 500 KJ/kg.

Σε θερμοκρασίες γύρω στους 350°C-400°C, πραγματοποιείται μια ελαφρώς

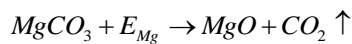


εξώθερμη αντίδραση, κατά την οποία αλλάζει η κρυσταλλική δομή της διαλυτής γύψου (εξαγωνική) σε αδιάλυτη (ορθορομβική).

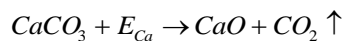


### Εξίσωση 2-3

Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600°C, ορισμένες γυψοσανίδες υφίστανται περαιτέρω απώλεια μάζας. Αυτό οφείλεται στην παρουσία ενώσεων, όπως το ανθρακικό μαγνήσιο,  $MgCO_3$ , και το ανθρακικό ασβέστιο,  $CaCO_3$ , οι οποίες αποσυντίθενται. Ωστόσο επικρατεί μια σύγχυση σχετικά με το που οφείλεται αυτή η απώλεια μάζας από ορισμένους ερευνητές, όπως τους Axenenko και Thorpe (Axenenko O. and Thorpe G., 1996), οι οποίοι την απέδωσαν στο δεύτερο στάδιο της αφυδάτωσης.



### Εξίσωση 2-4



### Εξίσωση 2-5

Η αποσύνθεση του ανθρακικού μαγνήσιου και ασβεστίου είναι δύο αντιδράσεις ενδόθερμες και η ενέργεια που απορροφάται για την αποσύνθεση ενός κιλού καθαρού συστατικού ( $MgCO_3$  και  $CaCO_3$ ) είναι  $E_{Mg,pure}=2500$  KJ/kg και  $E_{Ca,pure}=2000$  KJ/kg, αντίστοιχα.

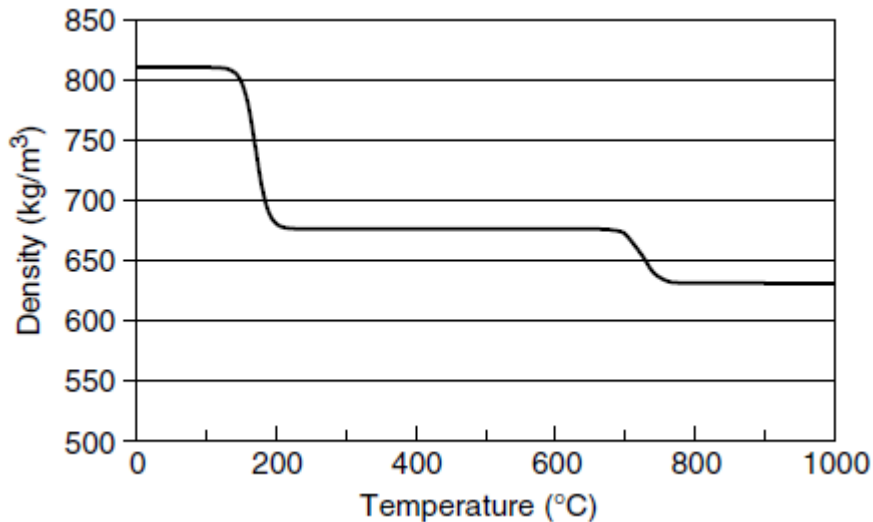
## 2.3 Θερμικές ιδιότητες

Για την μελέτη της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου μιας γυψοσανίδας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις θερμικές της ιδιότητες. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε μια μεγάλη ποικιλία θερμικών ιδιοτήτων, που οφείλεται στο γεγονός ότι η χημική σύνθεση του πυρήνα της κάθε γυψοσανίδας διαφέρει από γυψοσανίδα σε γυψοσανίδα. Επιπλέον, οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου επηρεάζονται και από τον ρυθμό θέρμανσης.

### 2.3.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα (density) της γυψοσανίδας δεν έχει κάποια σταθερή τιμή και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας λόγω της εξάτμισης του νερού που περιέχει. Στην εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 1994) μετρήθηκε η πυκνότητα γυψοσανίδων τύπου X και C πάχους 15.9mm και 12.7mm και την

βρήκαν ίση με  $648 \text{ kg/m}^3$  και  $732 \text{ kg/m}^3$  αντίστοιχα. Επίσης, στην εργασία των Sultan et al. (Sultan et al., 2005) χρησιμοποιήθηκαν γυψοσανίδες ελαφριές ( $579 \text{ kg/m}^3$ ), βαριές ( $616 \text{ kg/m}^3$ ) και τύπου X ( $654\text{-}733 \text{ kg/m}^3$ ), στην εργασία των Feng et al. (Feng et al., 2002) γυψοσανίδες πυκνότητας  $727.1 \text{ kg/m}^3$ , ενώ στην εργασία των Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al., 2007) γυψοσανίδες πυκνότητας  $810 \text{ kg/m}^3$ . Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για μια τυπική εμπορική γυψοσανίδα.



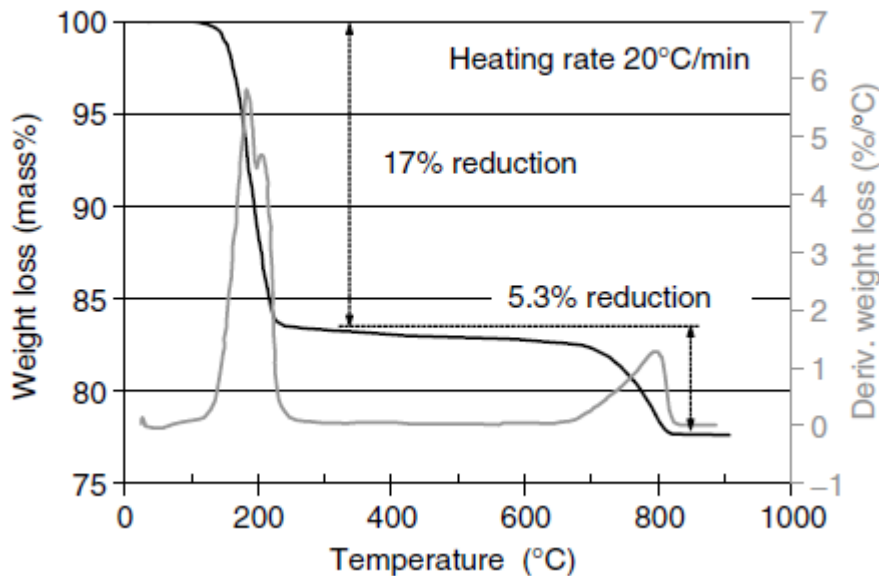
**Εικόνα 2-1 Διάγραμμα πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας (Ghazi Wakili et al., 2007)**

Για τα υπολογιστικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί γυψοσανίδες πυκνότητας  $620 \text{ kg/m}^3$ ,  $690 \text{ kg/m}^3$ ,  $720 \text{ kg/m}^3$  και  $740 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.3.2 Απώλεια μάζας

Στην εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 1994) μετρήθηκε η απώλεια μάζας (mass loss) μικρών δοκιμίων ( $10\text{-}30 \text{ mg}$ ), με την μέθοδο θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης, χρησιμοποιώντας ρυθμό θέρμανσης  $20^\circ\text{C min}^{-1}$ . Παρατηρήθηκε ότι μεταξύ  $100^\circ\text{C}\text{-}160^\circ\text{C}$  χάθηκε το 17.5% της αρχικής μάζας των δοκιμίων. Στα ίδια αποτελέσματα για την απώλεια μάζας κατέληξαν και οι Alexenenko και Thorpe (Alexenenko και Thorpe, 1996). Αντίστοιχα αποτελέσματα έδωσαν και οι μετρήσεις των G. Wakili et al. (G. Wakili et al., 2007), όπου με ίδιο ρυθμό θέρμανσης ( $20^\circ\text{C min}^{-1}$ ), για δοκίμια βάρους  $55 \text{ mg}$  παρατήρησαν απώλεια μάζας  $\sim 17\%$  της αρχικής μάζας των δοκιμίων. Στην Εικόνα 2-2 παρουσιάζεται η απώλεια μάζας (μαύρη γραμμή) ενός δείγματος γυψοσανίδας και η παράγωγός της (γκρίζα γραμμή) συναρτήσει της θερμοκρασίας που προέκυψαν με τη μέθοδο της

θερμοβαρυτικής ανάλυσης.



**Εικόνα 2-2 Καμπύλες θερμοβαρυτικής ανάλυσης (TGA) του γύψου σε ξηρό αέρα (Ghazi Wakili et al., 2007)**

### 2.3.3 Ενέργεια των αντιδράσεων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την θέρμανση της γύψου είναι είτε εξώθερμες είτε ενδόθερμες. Στις μελέτες των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 1994) και Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al., 2007) υπολογίζονται αυτά τα ποσά ενέργειας με την μέθοδο της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης.

Τα δύο στάδια αφυδάτωσης της γύψου απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας ( $E_{dh,1}$  και  $E_{dh,2}$ ) για να επιτύχουν τον διαχωρισμό του κρυσταλλικού νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου και την ατμοποίησή του. Η ενέργεια που απαιτείται για καθένα στάδιο δίνεται από την Εξίσωση 2-6.

$$E_{dh,i} = \gamma_s E_{c,i} + (\delta m_{c,i} + \delta m_{f,i}) L_v$$

#### Εξίσωση 2-6

Όπου  $\gamma_s$  είναι το κλάσμα μάζας της γύψου στην γύψο,  $E_{c,i}$  είναι η ενέργεια που απαιτείται για τον διαχωρισμό του κρυσταλλικού νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου στο αντίστοιχο στάδιο αφυδάτωσης,  $\delta m_{c,i}$  είναι το ποσοστό κατά μάζας του κρυσταλλικού νερού,  $\delta m_{f,i}$  είναι το ποσοστό κατά μάζας της ελεύθερης υγρασίας και  $L_v$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού.

Στην εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008) η συνολική ενέργεια,

$E_{dh}$ , υπολογίστηκε μεταξύ 505-531 kJ/kg, με αντίστοιχα την  $E_{dh,1}$  να είναι από 355 kJ/kg έως 455 kJ/kg και την  $E_{dh,2}$  από 100 kJ/kg έως 112 kJ/kg. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουν και οι Andersson και Jansson (Andersson L. and Jansson B.,1987) με συνολική ενέργεια για τα δυο στάδια αφυδάτωσης ίση με 515 kJ/kg.

Η αποσύνθεση του ανθρακικού μαγνησίου και ασβεστίου είναι δύο αντιδράσεις ενδόθερμες, οι οποίες απορροφούν ενέργεια,  $E_{Mg}$  και  $E_{Ca}$ , αντίστοιχα, ανάλογα με την αρχική τους σύσταση μέσα στη γύψο. Οι ενέργειες αυτές υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$E_{Mg} = \gamma_{Mg} E_{Mg,pure}$$

### **Εξίσωση 2-7**

$$E_{Ca} = \gamma_{Ca} E_{Ca,pure}$$

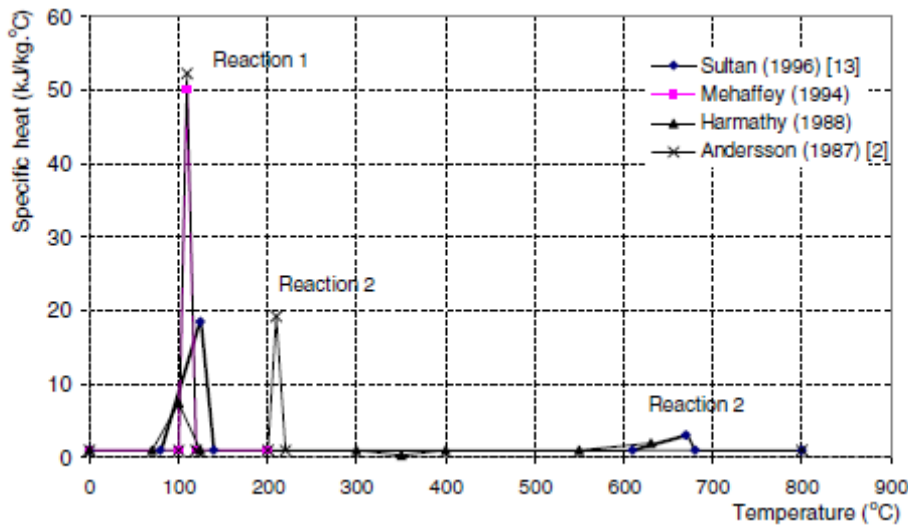
### **Εξίσωση 2-8**

#### 2.3.3.1 Φαινόμενη θερμοχωρητικότητα

Μια απλοϊκή εξήγηση του φαινομένου της αφυδάτωσης στο εσωτερικό της γύψου είναι η αύξηση της ειδικής θερμότητας του υλικού. Ο Sultan (Sultan M.A., 1996) ανέφερε μέγιστη τιμή θερμοχωρητικότητας τα 18.500 J/kgK μετρημένα στους 125°C και 3070 J/kgK στους 670°C, αντίστοιχα. Ο Harmathy έδωσε μέγιστη τιμή του 7320 J/kgK σε 100°C. Οι Andersson και Jansson (Andersson L. and Jansson B.,1987), δίνουν τιμές για την ειδική θερμότητα που προκύπτουν από μετρήσεις σκανδιναβικών γυψοσανίδων, με τιμή αιχμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας τα 52.200 J/kgK και 19.200 J/kgK, μετρημένα στους 110°C και 210°C, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 2-3 παρουσιάζεται η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα που έχει μετρηθεί από διάφορους ερευνητές.

Η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα (effective specific heat) συνήθως μετριέται με τη μέθοδο της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης. Στη μελέτη των Mehaffey et al. (Mehaffey et al.,1994) τα δοκίμια αφήνονταν για 24 ώρες στους 40°C ούτως ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία τους. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης με ρυθμούς θέρμανσης 2°C/min και 20°C/min. Η τιμή αναφοράς για την φαινόμενη θερμοχωρητικότητα ήταν 950 J/kgK. Στην εργασία των Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al.,2007) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης σε ρεύμα αέρος αρχικής θερμοκρασίας 20 °C έως 250 °C και με ρυθμό θέρμανσης 5 °C/min. Η τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 1000J/kgK. Την ίδια αρχική τιμή χρησιμοποιούν και οι Mehaffey et al. ( Mehaffey et al.,2008), ενώ με

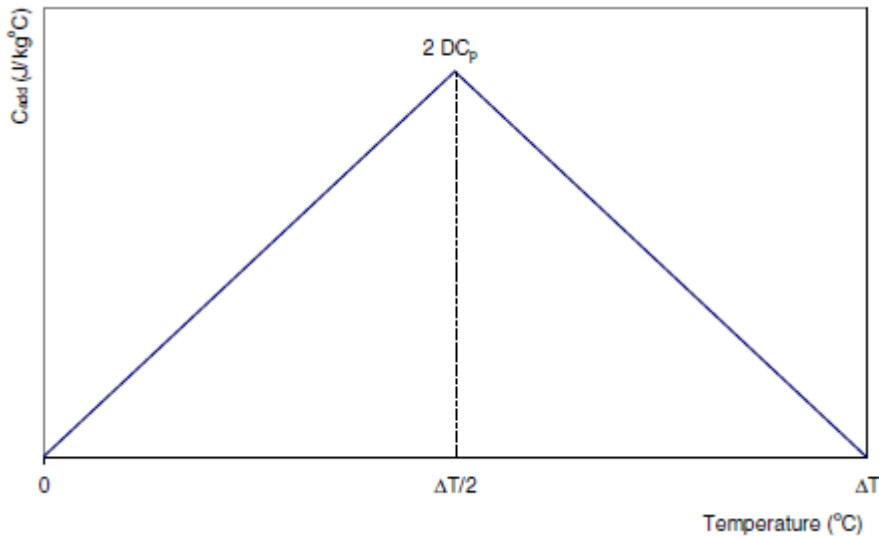
το πέρας της αφυδάτωσης η τιμή αυτή μειώθηκε σε 600 J/kgK.



**Εικόνα 2-3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ειδικής θερμοχωρητικότητας-χρόνου 4 ερευνητών**

Από την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την αφυδάτωση της γύψου, καθώς και για την διαδικασία της αποσύνθεσης του ανθρακικού μαγνήσιου και ασβεστίου. Το ολοκλήρωμα της επιπρόσθετης ειδικής θερμοχωρητικότητας ισούται με το άθροισμα των ενεργειών των δυο σταδίων αφυδάτωσης. Ολοκληρώνοντας την επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας μπορούν να υπολογιστούν οι ενέργειες που απορροφώνται ή εκλύονται μετά το πέρας κάθε μίας από τις φυσικό-χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση της γυψοσανίδας.

Σε περιπτώσεις όπου το δοκίμιο είναι πολύ μεγάλο, όπου δεν μπορεί να αμεληθεί η μεταφορά μάζας κατά την διαδικασία αφυδάτωσης, εισάγεται ένας συντελεστής διόρθωσης  $f_i$ . Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιάζει την επιπρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_{add,i}$  και με αυτόν τον τρόπο συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς εμμέσως η μεταφορά μάζας.



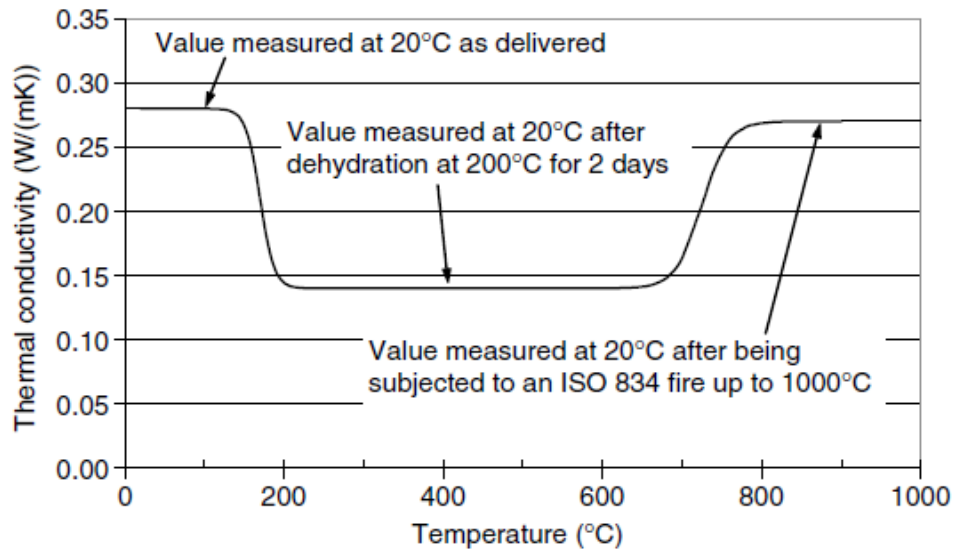
**Εικόνα 2-4 Απεικόνιση της ειδικής πρόσθετης θερμοχωρητικότητας για την εξαέρωση του ελεύθερου νερού, την αφυδάτωση, την κίνηση του νερού και την εκ νέου συμπύκνωση του νερού**

#### 2.3.4 Θερμική αγωγιμότητα

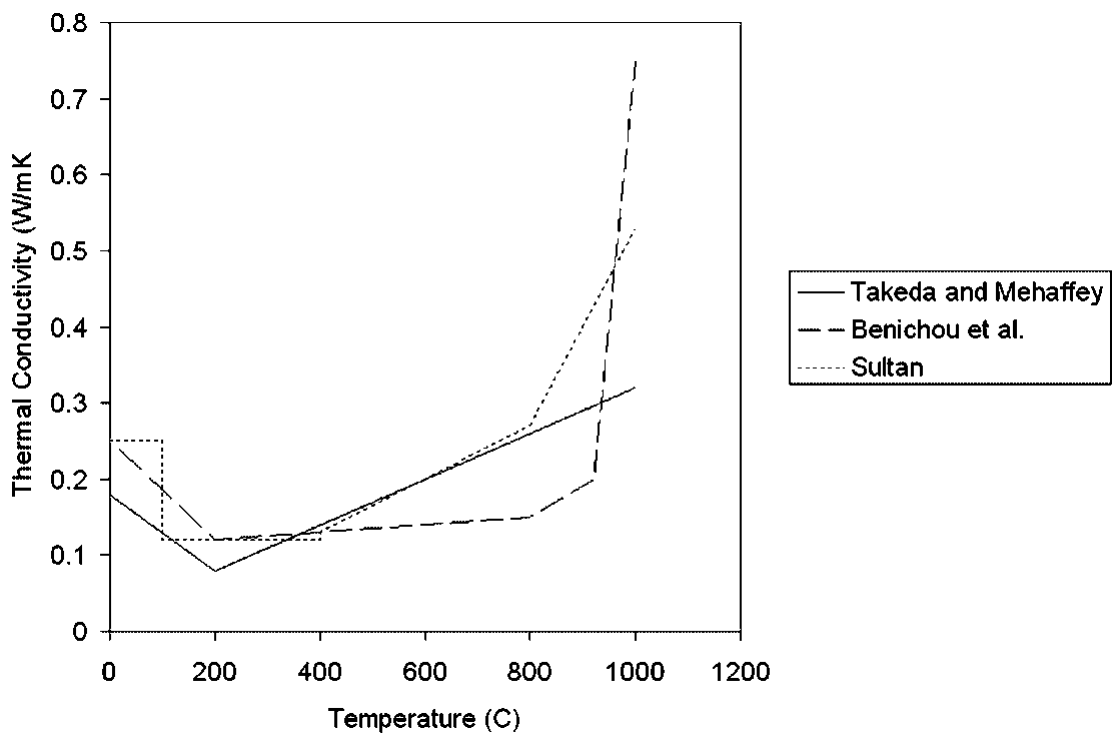
Η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) μιας γυψοσανίδας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των γυψοσανίδων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην μικροδομή του υλικού. Έτσι, η σύστασή της, ο βαθμός κρυσταλλικότητας, οι προσμίξεις από κρύσταλλο στη δομή, το μέσο μέγεθος κόκκου, το πορώδες και το μέγεθος πόρων είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα της γυψοσανίδας.

Λόγω της έλλειψης κάποιας εξειδικευμένης συσκευής για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας ενός δοκιμίου γύψου σε υψηλές θερμοκρασίες, ακολουθήθηκε από τους G.Wakili et al. (G.Wakili et al., 2007 και G.Wakili et al., 2008) η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω για να μετρήσουν τη θερμική αγωγιμότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αρχικά, η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας προσδιορίστηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε σε έναν φούρνο και διατηρήθηκε εκεί στους 200 °C για διάστημα 2 ημερών. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η πλήρης αφυδάτωση της γύψου. Το δείγμα ψύχεται σε ξηρό αέρα έως τη θερμοκρασία δωματίου και η θερμική αγωγιμότητα μετρείται για δεύτερη φορά. Στη συνέχεια, το δείγμα υποβλήθηκε σε συνθήκες φωτιάς κατά το πρότυπο ISO 834. Και πάλι, το δείγμα ψύχεται σε ρεύμα ξηρού αέρα έως τη θερμοκρασία δωματίου και τότε γίνεται η τρίτη μέτρηση για την θερμική αγωγιμότητα. Στην Εικόνα 2-5 παρουσιάζεται η καμπύλη της θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας που μετρήθηκε

από τους Ghazi Wakili et al., (Ghazi Wakili et al., 2007).



**Εικόνα 2-5** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας του γύψου συναρτήσει της θερμοκρασίας (Ghazi Wakili et al., 2007)



**Εικόνα 2-6** Συγκριτικό διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας-θερμοκρασίας τριών ερευνητών

Οι Wang et al., (Wang et al., 2003) με τη βοήθεια μιας γραμμικής σχέσης συναρτήσει της θερμοκρασίας (Εξίσωση 2-9), υπολογίζουν την θερμική αγωγιμότητα της γύψου.

$$k(\theta) = k(\theta_0) + 1.1 \times 10^{-4} \times (\theta - \theta_0)$$

### Εξίσωση 2-9

Στην Εικόνα 2-6 παρουσιάζονται οι καμπύλες της θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων γυψοσανίδων όπως μετρήθηκε από τους Takeda και Mehaffey (Takeda H. and Mehaffey J.R.1998), Benichou et al., ( Benichou N. et al.,2005) και Sultan(Sultan M.A.,1996).

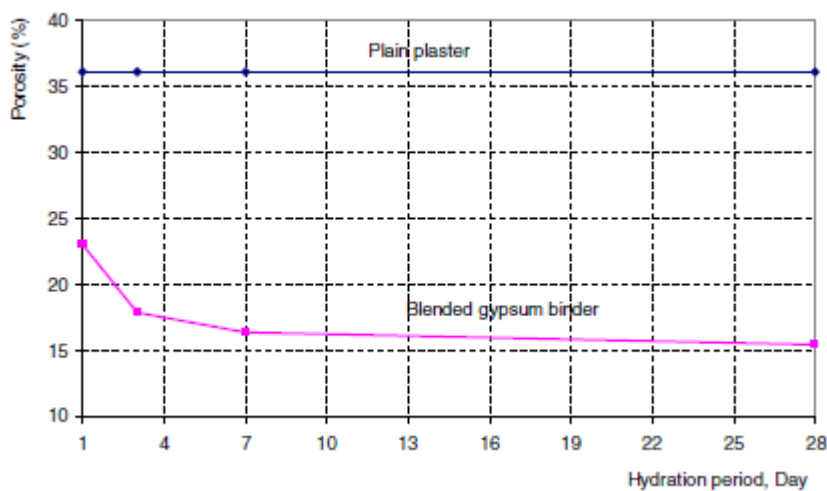
### 2.3.5 Πορώδες

Το πορώδες (porosity) ενός υλικού ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου που καταλαμβάνει ένα ρευστό μέσα σε ένα υλικό,  $V_f$ , προς τον συνολικό όγκο του στερεού  $V_t$ . Υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\phi = \frac{V_f}{V_t}$$

### Εξίσωση 2-10

Σύμφωνα με τους Ang και Wang (Ang και Wang ,2004 και Ang και Wang ,2009), το πορώδες της καθαρής γύψου και της γύψου με προσμίξεις είναι περίπου 0.36 και 0.15, αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2-7.



**Εικόνα 2-7 Πορώδες του συνδετικού υλικού για αναμεμειγμένο γύψο και απλό γύψο ως συνάρτηση της περιόδου ενυδάτωσης**

### 2.3.6 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα (permeability) μιας γυψοσανίδας είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την ικανότητα ενός ρευστού να κινηθεί μέσα στην πορώδη δομή ενός

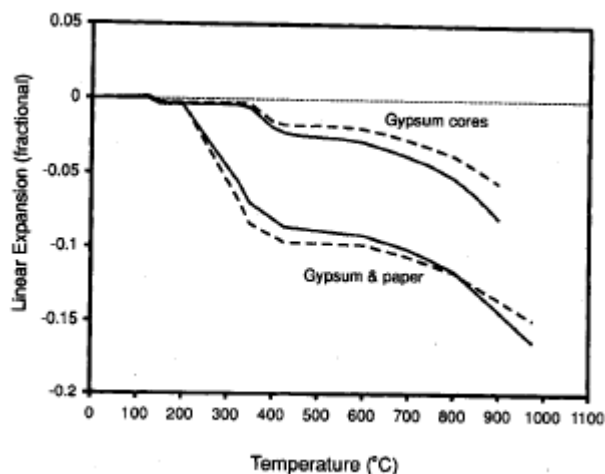


πορώδους υλικού. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν δίνεται κάποια συγκεκριμένη τιμή για την διαπερατότητα της γύψου. Από τους Wilson et al., (1995) μετρήθηκε η υδραυλική αγωγιμότητα της γύψου, που είναι πολύ κοντά αριθμητικά στο συντελεστή διαπερατότητας. Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, ο συντελεστής διαπερατότητας είναι ίσος με  $1.5 \times 10^{-8}$  m/s. Οι Ang και Wang (2004),(2009) προτείνουν ένα συντελεστή διαπερατότητας της γυψοσανίδας ίσο με  $5 \times 10^{-9}$  m/s.

## 2.4 Μηχανικές ιδιότητες

### 2.4.1 Συρρίκνωση

Στην Εικόνα 2-8 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή εξάρτηση της συρρίκνωσης δύο γυψοσανίδων, όπως καθορίζεται από το εθνικό συμβούλιο ερευνών του Καναδά (National Research Council of Canada – NRCC) ( Mehaffey et al.,1994).



**Εικόνα 2-8 Διάγραμμα συρρίκνωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας**

Η γυψοσανίδα τύπου C παρουσιάζει μικρότερη συρρίκνωση από την γυψοσανίδα τύπου X σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που έχει πραγματοποιηθεί η μελέτη. Πέρα από την συρρίκνωση του πυρήνα, το πάχος της γυψοσανίδας είναι επίσης μειωμένο όταν τα φύλλα χαρτιού στην κάθε πλευρά (με συνολικό πάχος περίπου 1 mm) καίγονται σε θερμοκρασίες 200-350 °C. Και για τους δύο τύπους γυψοσανίδας (C και X), η συρρίκνωση γίνεται αισθητά μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Λόγω αυτής, δημιουργούνται ρωγμές στις γυψοσανίδες, καθώς επίσης ανοίγουν οι ενώσεις μεταξύ των γυψοσανίδων σε δοκίμια αρκετά μεγάλα. Οι επιπτώσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους μελετητές, καθώς

επηρεάζουν τη μετάδοση θερμότητας μέσα στα δοκίμια.

## Κεφάλαιο 3

### 3 Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών

#### 3.1 Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα έχει μελετηθεί ευρέως η συμπεριφορά της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς από πολλούς επιστήμονες, οι οποίοι έχουν κάνει χρήση διαφόρων υπολογιστικών εργαλείων. Στην εργασία των Feng et al., (Feng et al., 2002) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, όπως επίσης και στην εργασία του Thomas (Thomas G., 2002) σε συνδυασμό με τα υπολογιστικά προγράμματα TASEF και COMPF-2. Στην εργασία των Ghazi Wakili και E. Hugi (Ghazi Wakili K. and Hugi E., 2009) και στην εργασία των Wullschleger et al., (Wullschleger L. and Ghazi Wakili K., 2007) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα VOLTRA. Στην εργασία των Mehaffey et al., (Mehaffey et al., 2008) χρησιμοποιήθηκε η σύστημα πεπερασμένων στοιχείων Condur, το οποίο αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Carleton για την επίλυση των χρονικά εξαρτημένων εγγενών προβλημάτων του τομέα, όπως η διάχυση-μεταφοράς θερμότητας, οι εξισώσεις Poisson και Helmholtz. Το Condur έχει έναν ενσωματωμένο αλγόριθμο που παράγει το πλέγμα, και μπορεί να αποδώσει πλέγματα 1-D, 2-D και 3-D. Επιπλέον, το πρόγραμμα επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει τα μεταβατικά στοιχεία για να τελειοποιήσει το πλέγμα στις ζώνες όπου η κλίση των μεταβλητών του πεδίου μπορεί να είναι βαθμωτή. Στην εργασία των C.N. Ang και Y.C. Wang (Ang C.N. and Wang Y.C., 2004 και Ang C.N. and Wang Y.C., 2009) για τις διάφορες μελέτες δημιουργήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα HEATMASS. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόζεται σε υδροσκοπικά υλικά για την ανάλυση συνδυασμένης μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Τέλος, για την εργασία των Mehaffey et al., (Mehaffey et al., 1994) γράφτηκε το υπολογιστικό μοντέλο σε FORTRAN, τέτοιο ώστε να επιλύει 2-διάστατες μερικές διαφορικές εξισώσεις.

Στην παρούσα εργασία η υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος μετάδοσης θερμότητας HETRAN (Heat Transfer Analysis, Version 3.0). Ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN (HEat TRansfer ANalysis) είναι ένας αριθμητικός κώδικας για τη προσομοίωση

Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών

μονοδιάστατων προβλημάτων ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πορώδη δομικά υλικά, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, ΕΜΠ. Ο κώδικας HERTRAN στους υπολογισμούς του μπορεί να λάβει υπόψη μεταβλητές ιδιότητες των υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας και μεταβλητές οριακές συνθήκες συναρτήσει του χρόνου. Επιπλέον χαρακτηριστικά του κώδικα είναι ότι λαμβάνει υπόψη ευρύ φάσμα ιδιοτήτων των υλικών, σταθερές ή χρονικά εξαρτώμενες οριακές συνθήκες για κάθε τύπο προβλήματος μεταφοράς θερμότητας, μεταφορά μάζας σε πορώδη υλικά αλλά και σε υλικά αλλαγής φάσης, καθώς και μεταφορά θερμότητας σε πολυστρωματικά υλικά.

### 3.2 Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί ο κώδικας HERTRAN για την επίλυση μεταφοράς θερμότητας σε μονοδιάστατη πλάκα ενός υλικού.

#### 3.2.1 Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \dot{Q}_T'''$$

#### Εξίσωση 3-1

#### 3.2.2 Οριακές συνθήκες

Όταν στο όριο έχουμε μηδενική ροή θερμότητας, αυτό αντιστοιχεί σε αδιαβατικές οριακές συνθήκες.

$$\mathbf{q}_{cond} = -k \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \Big|_{x=X_{BOUND}} = 0$$

#### Εξίσωση 3-2

Η επιφανειακή θερμοκρασία ενός τοιχώματος μπορεί να είναι χρονικά σταθερή ή μεταβαλλόμενη.

$$T(X_{BOUND}, t) = T_{USER}(t)$$

#### Εξίσωση 3-3

Όταν οριακή συνθήκη είναι μια σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη ροή θερμότητας τότε ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{q}'_{cond} = -k \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \big|_{x=X_{BOUND}} = \mathbf{q}'_{USER}(t)$$

### Εξίσωση 3-4

Η περίπτωση οριακών συνθηκών με συναγωγή και ακτινοβολία εφαρμόζεται όταν υπάρχει αλληλεπίδραση στερεού με ρευστό. Η ροή θερμότητας λόγω αγωγής είναι άθροισμα των θερμοροών λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας.

$$\mathbf{q}'_{cond} = -k \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \big|_{x=X_{BOUND}} = \mathbf{q}'_{conv} + \mathbf{q}'_{rad}$$

### Εξίσωση 3-5

Όπου οι μηχανισμοί συναγωγής, εξωτερικής και εσωτερικής ακτινοβολίας εκφράζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$\mathbf{q}''_{conv} = h_c \cdot (T_f - T_w)$$

### Εξίσωση 3-6

$$\mathbf{q}''_{rad}^{ext} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_w^4)$$

### Εξίσωση 3-7

$$\mathbf{q}''_{rad}^{int} = \frac{\sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{S^{(k)}}} + \frac{1}{\varepsilon_{S^{(n)}}} - 1}$$

### Εξίσωση 3-8

Στην περίπτωση που έχουμε στο όριο θερμοροή και συναγωγή-ακτινοβολία συνδυασμό των παραπάνω οριακών συνθηκών, αριθμητικά ίσο με το άθροισμά τους, που περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\mathbf{q}'_{cond} = -k \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \big|_{x=X_{BOUND}} = \mathbf{q}'_{conv} + \mathbf{q}'_{rad} + \mathbf{q}'_{USER}(t)$$

### Εξίσωση 3-9

Όσον αφορά στην οριακή συνθήκη που περιγράφει τη σύνδεση ανάμεσα σε δύο στερεά υλικά, η θερμοροή, η οφειλόμενη στην μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής στην διεπιφάνεια των δυο υλικών, πρέπει να είναι συνεχής εκατέρωθεν του ορίου.

$$-k_{solid,i} \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \big|_{x=X_{BOUND}} = -k_{solid,j} \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} \big|_{x=X_{BOUND}^+}$$

### Εξίσωση 3-10

### 3.2.3 Πορώδη υλικά

Ο κώδικας HERTRAN μπορεί να προσομοιώσει τη μεταφορά θερμότητας σε πορώδη υλικά. Θεωρώντας ότι ένα πορώδες υλικό περιέχει  $N^g$  υλικά σε αέρια φάση η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας δίνεται από την Εξίσωση 3-11.

$$(\rho \cdot C_p)_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - \nabla \cdot (C_T \cdot T) + \phi \cdot \frac{\partial P_g}{\partial t} + \dot{Q}_T^m$$

#### Εξίσωση 3-11

Η συνολική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου δίνεται από την Εξίσωση 3-12.

$$(\rho \cdot C_p)_{eff} = (1 - \phi) \cdot \rho_s \cdot C_{p,s} + \phi \cdot (\rho \cdot C_p)_g$$

$$(\rho \cdot C_p)_g = \sum_{i_g=1}^{N^g} \rho_g^{i_g} \cdot C_{p,s}$$

#### Εξίσωση 3-12

Ο όρος της ροής  $C_T$  που φαίνεται στην Εξίσωση 3-13 υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση.

$$C_T = C_{T,diff} + C_{T,adv}$$

$$C_{T,diff} = \sum_{i_g=1}^{N^g} \{C_{p,g}^{i_g} \cdot (-D_{eff} \cdot \nabla \rho_p^{i_g})\} = \sum_{i_g=1}^{N^g} \{C_{p,g}^{i_g} \cdot j_{diff}^{i_g}\}$$

$$C_{T,adv} = \sum_{i_g=1}^{N^g} \{C_{p,g}^{i_g} \cdot (-D_{eff} \cdot U_g^D)\} = \sum_{i_g=1}^{N^g} \{C_{p,g}^{i_g} \cdot j_{conv}^{i_g}\}$$

#### Εξίσωση 3-13

## 3.3 Μεταφοράς μάζας και θερμότητας

### 3.3.1 Εξίσωση διατήρησης μάζας

Η εξίσωση διατήρησης καθενός από τα  $N^g$  αέρια συστατικά μέσα σε ένα πορώδη υλικό περιγράφεται από την Εξίσωση 3-14, η οποία λαμβάνει υπόψη της μεταφορά μάζας λόγω διάχυσης (νόμος του Fick) και λόγω κλίσης πίεσης (νόμος Darcy).

$$\phi \frac{\partial \rho_g^{i_g}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \cdot \nabla \rho_g^{i_g}) - \nabla \cdot (C_{p_g} \cdot \rho_g^{i_g}) + \dot{Q}_M^{i_g}$$

#### Εξίσωση 3-14

### 3.3.2 Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας μέσα σε ένα πορώδη υλικό περιγράφεται από την Εξίσωση 3-15, η οποία περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής (νόμος Fourier) και λόγω της μεταφοράς του αερίου μίγματος (διάχυση και κλίση πίεσης) μέσα στην πορώδη δομή του υλικού.

$$\left( (1-\phi)\rho_s C_s + \phi \sum_{k=1}^{N_g} C_g^{(k)} C_{p,g}^{(k)} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{q}_{cond} + \mathbf{q}_{diff} + \mathbf{q}_{pres}) + \phi \frac{\partial P_g}{\partial t} + \dot{Q}_T'''$$

#### Εξίσωση 3-15

### 3.3.3 Εξίσωση πίεσης

Η ολική πίεση του αερίου μίγματος είναι το άθροισμα των μερικών πιέσεων των συστατικών του μίγματος, όπως φαίνεται και από την Εξίσωση 3-16.

$$P_g = \sum_{i_g=1}^{N_g} P_g^{i_g}$$

#### Εξίσωση 3-16

Η μερική πίεση κάθε αερίου συστατικού υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-17.

$$P_g^{i_g} = \frac{\rho_g^{i_g} R_g T}{MW_g^{i_g}}$$

#### Εξίσωση 3-17

### 3.3.4 Οριακές συνθήκες

Η ολική πίεση του αερίου μίγματος στα όρια θεωρείται ίση με την πίεση του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα η ροή μάζας λόγω κλίσης πίεσης στα όρια να είναι μηδενική, όπως περιγράφεται στην Εξίσωση 3-18.

$$U_g^D \Big|_{x=X_{BOUND}} = 0 \Rightarrow j_{conv}^{i_g} \Big|_{x=X_{BOUND}} = 0$$

#### Εξίσωση 3-18

Στις περιπτώσεις όπου ο κόμβος του ορίου και του περιβάλλοντος έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις μάζας, τότε η ροή διάχυσης της μάζας υπολογίζεται από την Εξίσωση 3-19.

Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών

$$m_g^{i_g} = -D_{eff} \nabla \rho_g^{i_g} \cdot \mathbf{n} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_B} = h_m (\rho_{g,f}^{i_g} - \rho_{g,w}^{i_g})$$

### Εξίσωση 3-19

Σε αυτό το είδος οριακών συνθηκών και πάλι η ολική πίεση στο όριο υπολογίζεται σαν άθροισμα των μερικών πιέσεων, όπως υπαγορεύει η Εξίσωση 3-20.

$$P_{i_B} = \sum_{i_g=1}^{N^g} p_g^{i_g}$$

### Εξίσωση 3-20

Η πυκνότητα στο όριο υπολογίζεται από την Εξίσωση 3-21.

$$\rho_{g,i_B}^{i_g} = MW_g^{j_g} \left\{ \frac{P_{i_B}}{RT} - \sum_{\substack{i_g=1 \\ i_g \neq j_g}}^{N^g} \frac{\rho_{g,i_B}^{i_g}}{MW_g^{(k)}} \right\}$$

### Εξίσωση 3-21

## 3.4 Πολυβηματικές αντιδράσεις

Στην περίπτωση που  $N^s$  είδη συμμετέχουν σε  $N^R$  αντιδράσεις, η εξίσωση ενέργειας δίνεται από την Εξίσωση 3-22.

$$(\rho \cdot C_p)_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T) - \nabla \cdot (C_T \cdot T) + \phi \frac{\partial P_g}{\partial t} + Q_T^m + Q_R^m$$

### Εξίσωση 3-22

Ο όρος της ενέργειας στο μοντέλο αντίδρασης που λαμβάνει υπόψη την κλίση της πυκνότητας δίνεται από την Εξίσωση 3-23, ενώ στην περίπτωση της μεταφοράς μάζας χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3-24.

$$\dot{Q}_{T,R-DD,i_R}^m = \left( Q_R \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{i_R} \frac{\partial T}{\partial t}$$

### Εξίσωση 3-23

$$\dot{Q}_{M,R-DD,i_R}^m = \left( C^{i_g} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{i_R} \frac{\partial T}{\partial t}$$

### Εξίσωση 3-24



### 3.5 Διακριτοποίηση των εξισώσεων

Όλες οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3, μπορούν να συγκεντρωθούν και να γραφούν σε μία γενικευμένη εξίσωση, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3-25.

$$A_f \frac{\partial f}{\partial t} = \nabla \cdot (B_f \nabla f) - \nabla \cdot (\mathbf{C}_f f) + Q_f$$

#### Εξίσωση 3-25

**Πίνακας 3-1 Μεταβλητές της γενικευμένης εξίσωσης (Εξίσωση 3-25)**

$f$	$A_f$	$B_f$	$\mathbf{C}_f$	$Q_f$
$C_g^{(k)}$	$\phi$	$D_{eff}$	$\mathbf{U}_g^D$	$\dot{Q}_M^{(i_g)}$
$T$	$\left( (1 - \phi) \rho_s C_s + \phi \sum_{k=1}^{N_g} C_g^{(k)} C_{p,g}^{(k)} \right)$	$k_{eff}$	$\sum_{k=1}^{N_g} \left\{ C_{p,g}^{(k)} (\mathbf{j}_{diff}^{(k)} + \mathbf{j}_{pres}^{(k)}) \right\}$	$\dot{Q}_T$

Για την επίλυση της μονοδιάστατης γενικευμένης εξίσωσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (Patankar, 1980), όπου η Εξίσωση 3-25 ολοκληρώνεται πάνω σε έναν όγκο ελέγχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1. Το χωρίο επίλυσης σε  $N$  το πλήθος υπολογιστικούς κόμβους, δημιουργώντας, έτσι,  $N-1$  υπολογιστικά κελιά, των οποίων οι διεπιφάνειες κείτονται στο μέσο της απόστασης δύο υπολογιστικών κόμβων. Όλες μεταβλητές υπολογίζονται και αποθηκεύονται στους κόμβους, εκτός από τις ροές μάζας και θερμότητας, οι οποίες υπολογίζονται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων. Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση 3-25 σε έναν πεπερασμένο όγκο ελέγχου, προκύπτει το διακριτοποιημένο, προς επίλυση, σύστημα εξισώσεων, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-26, όπου οι συντελεστές της εξίσωσης υπολογίζονται από την Εξίσωση 3-27.

$$\frac{df_i}{dt} = \frac{C_{B,i}^f + C_{C,i}^f + C_{Q,i}^f}{C_{A,i}^f}$$

#### Εξίσωση 3-26

$$C_{B,i}^f = \left\{ B_{f,i+1/2} \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} - B_{f,i-1/2} \frac{f_i - f_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right\}$$

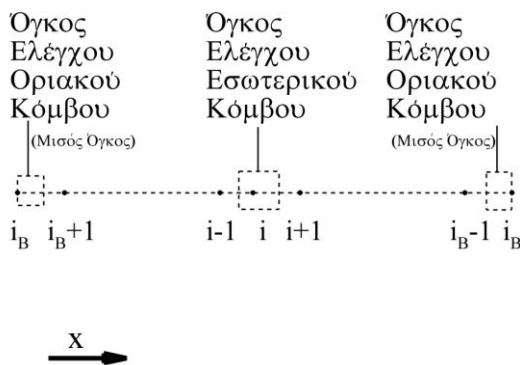
$$C_{C,i}^f = - \left\{ C_{f,x,i+1/2} \frac{f_{i+1} + f_i}{2} - C_{f,x,i-1/2} \frac{f_i + f_{i-1}}{2} \right\}$$

$$C_{Q,i}^f = \left\{ Q_{f,i+1/2} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + Q_{f,i-1/2} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right\}$$

$$C_{A,i}^f = \left\{ A_{f,i+1/2} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + A_{f,i-1/2} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right\}$$

### Εξίσωση 3-27

Στην Εικόνα 3-1 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού διαφορών μεγεθών και των κλίσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο υπολογιστικών κόμβων.



Εικόνα 3-1 Όγκος ελέγχου υπολογιστικού κελιού

#### 3.5.1.1 Διακριτοποίηση οριακών συνθηκών

Στην περίπτωση που η οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται επιβάλλει την τιμή της προς επίλυση μεταβλητής στο όριο – συνθήκη Dirichlet (Cheng & Cheng, 2005) – τότε ισχύει η Εξίσωση 3-28.

$$f|_{i_B} = f(t)$$

$$\frac{df}{dt}|_{i_B} = 0$$

### Εξίσωση 3-28

Στην περίπτωση που η οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται επιβάλλει την ροή της τιμής της προς επίλυση μεταβλητής στο όριο – συνθήκη Neumann (Cheng & Cheng, 2005) – τότε ισχύει η Εξίσωση 3-29.

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{i_B} = \frac{C_{B,i_B}^f + C_{C,i_B}^f + C_{Q,i_B}^f + F_f|_{i_B}}{C_{A,i_B}^f}$$

### Εξίσωση 3-29

Οι συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης διαφέρουν ανάλογα με το αν ο οριακός κόμβος είναι ανατολικός ή δυτικός. Έτσι, οι συντελεστές για ανατολικό οριακό κόμβο δίνονται από την Εξίσωση 3-30, ενώ για τον δυτικό οριακό κόμβο δίνονται από την Εξίσωση 3-31.

$$C_{B,i_B}^f = -B_{f,i_B-1/2} \frac{f_{i_B} - f_{i_B-1}}{x_{i_B} - x_{i_B-1}}$$

$$C_{C,i_B}^f = C_{f,x,i_B-1/2} \frac{f_{i_B} + f_{i_B-1}}{2}$$

$$C_{Q,i_B}^f = Q_{f,i_B-1/2} \frac{x_{i_B} - x_{i_B-1}}{2}$$

$$C_{A,i_B}^f = A_{f,i_B-1/2} \frac{x_{i_B} - x_{i_B-1}}{2}$$

### Εξίσωση 3-30

$$C_{B,i_B}^f = B_{f,i_B+1/2} \frac{f_{i_B+1} - f_{i_B}}{x_{i_B+1} - x_{i_B}}$$

$$C_{C,i_B}^f = -C_{f,x,i_B+1/2} \frac{f_{i_B+1} + f_{i_B}}{2}$$

$$C_{Q,i_B}^f = Q_{f,i_B+1/2} \frac{x_{i_B+1} - x_{i_B}}{2}$$

$$C_{A,i_B}^f = A_{f,i_B+1/2} \frac{x_{i_B+1} - x_{i_B}}{2}$$

### Εξίσωση 3-31

## 3.6 Γενικός αλγόριθμος επίλυσης

Το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει από την διακριτοποιημένη, ως προς το χώρο, Εξίσωση 3-25, μπορεί να συνοψισθεί σε ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων, γραμμένο σε μητρική μορφή, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-32.

$$\frac{d\mathbf{f}}{dt} = \mathbf{F}(t, \mathbf{f})$$

### Εξίσωση 3-32

Τα μητρώα του παραπάνω συστήματος δίνονται από την Εξίσωση 3-33, την

Εξίσωση 3-34 και την Εξίσωση 3-35, αντίστοιχα.

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{C}_g^{(k)} \end{Bmatrix}, \mathbf{F}(t, \mathbf{f}) = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_T \\ \mathbf{F}_M^{(k)} \end{Bmatrix}$$

### Εξίσωση 3-33

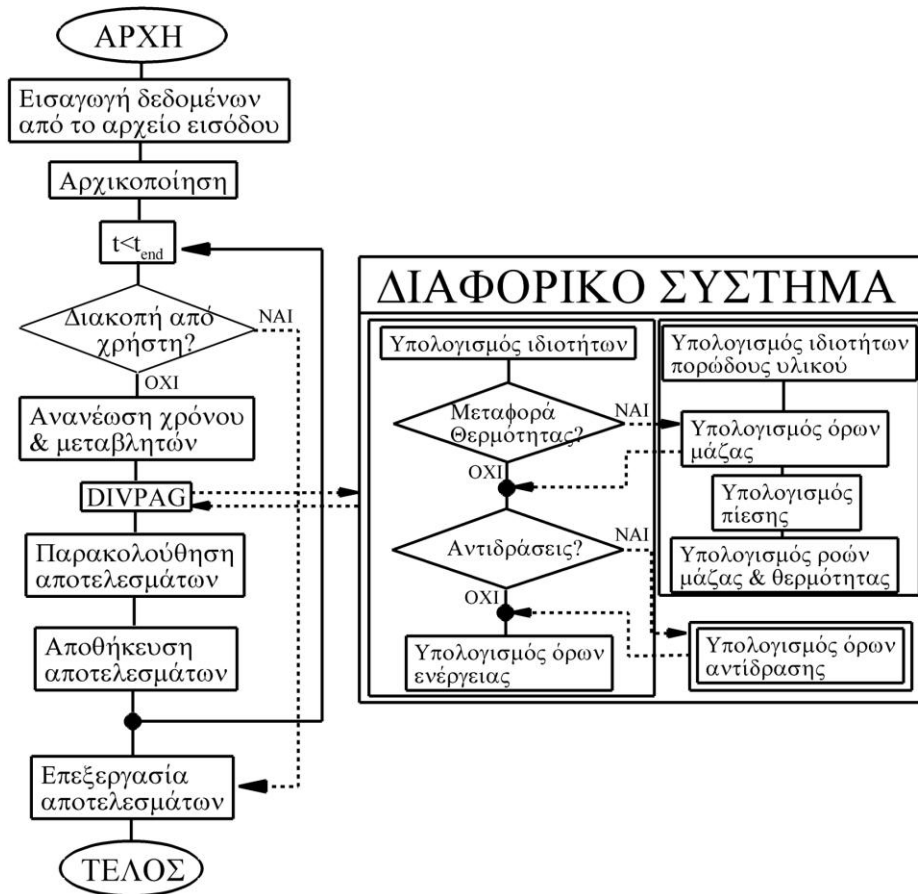
$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_N \end{Bmatrix}, \mathbf{F}_T = \begin{Bmatrix} \frac{C_{B,1}^T + C_{C,1}^T + C_{Q,1}^T}{C_{A,1}^T} \\ \vdots \\ \frac{C_{B,i}^T + C_{C,i}^T + C_{Q,i}^T}{C_{A,i}^T} \\ \vdots \\ \frac{C_{B,N}^T + C_{C,N}^T + C_{Q,N}^T}{C_{A,N}^T} \end{Bmatrix}$$

### Εξίσωση 3-34

$$\mathbf{C}_g^{(k)} = \begin{Bmatrix} C_{g,1}^{(k)} \\ \vdots \\ C_{g,i}^{(k)} \\ \vdots \\ C_{g,N}^{(k)} \end{Bmatrix}, \mathbf{F}_M^{(k)} = \begin{Bmatrix} \frac{C_{B,1}^{(k)} + C_{C,1}^{(k)} + C_{Q,1}^{(k)}}{C_{A,1}^{(k)}} \\ \vdots \\ \frac{C_{B,i}^{(k)} + C_{C,i}^{(k)} + C_{Q,i}^{(k)}}{C_{A,i}^{(k)}} \\ \vdots \\ \frac{C_{B,N}^{(k)} + C_{C,N}^{(k)} + C_{Q,N}^{(k)}}{C_{A,N}^{(k)}} \end{Bmatrix}$$

### Εξίσωση 3-35

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Εξίσωση 3-32) χρησιμοποιήθηκε η προς τα πίσω μέθοδος διαφόρισης του Gear – Backward Differentiation Formula (BDF) – (Gear, 1971) με αυτόματη προσαρμογή χρονικού βήματος και τάξης ακρίβειας, μέσω της υπορουτίνας DIVPAG της βιβλιοθήκης IMSL της FORTRAN (IMSL, 1997). Στην Εικόνα 3-2 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος επίλυσης του υπολογιστικού κώδικα HETRAN.



**Εικόνα 3-2** Αλγόριθμος επίλυσης του υπολογιστικού κώδικα HETRAN

Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών

## Κεφάλαιο 4

### 4 Υπολογιστικά αποτελέσματα

#### 4.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος μετάδοσης θερμότητας HETRAN. Με σημείο αναφοράς ορισμένες περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί πειραματικά, αλλά και υπολογιστικά από διάφορους ερευνητές, πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική μελέτη της επίδρασης των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας (πυκνότητα, φαινόμενη θερμοχωρητικότητα, φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα) στη εξέλιξη της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου σε διάφορα σημεία στο εσωτερικό και στην επιφάνεια των εκάστοτε διατάξεων. Παράλληλα, μελετήθηκαν σύνθετες διατάξεις, όπου έγινε φανερό ότι η μεταφορά θερμότητας επηρεάζεται από κάθε μία διάταξη, π.χ. γυψοσανίδα, ξύλο, ασάλι, μόνωση ή/και κενό (single ή multi domain). Επίσης, μελετήθηκε και ο ρόλος του συντελεστή διόρθωσης,  $f_i$ , με την χρήση του οποίου διαπιστώθηκε η επίδραση της μεταφοράς μάζας στα αποτελέσματα. Κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εκτελέστηκαν συνολικά 62 παραμετρικές μελέτες, προβαίνοντας σε συνδυασμούς των φυσικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων, αλλά και των άλλων υλικών, των οριακών συνθηκών και των θερμικών φορτίων που δέχονται τα δοκίμια για τη μελέτη της επίδρασής τους στα αποτελέσματα.

#### 4.2 Διάταξη απλής γυψοσανίδας

##### 4.2.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

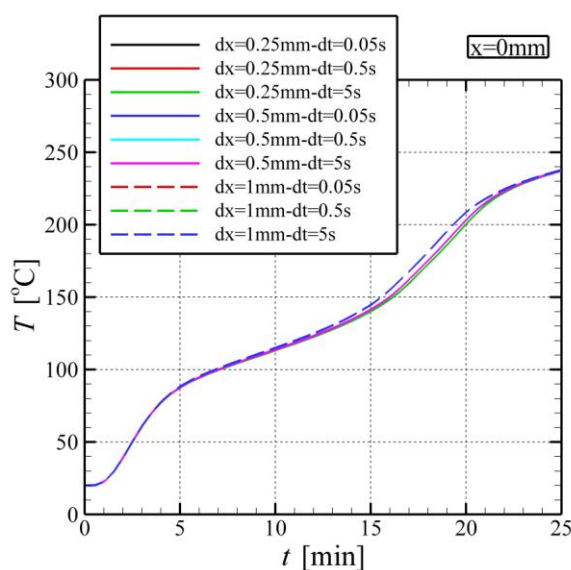
Η πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε ήταν μιας απλής γυψοσανίδας (single domain) διαστάσεων 1.25m x 1.05m x 0.012m, της οποίας η μία πλευρά εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς, σύμφωνα με την τυποποιημένη καμπύλη ISO 834, ενώ η άλλη πλευρά βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη, καθώς και οι πειραματικές μετρήσεις αναφέρονται στην εργασία των Ghazi Wakili et al., (Ghazi Wakili et al., 2007).

#### 4.2.2 Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μια πλευρά της γυψοσανίδας εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς, σύμφωνα με την τυποποιημένη καμπύλη ISO 834. Στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN χρησιμοποιήθηκαν οι μετρημένες πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας στη θερμή επιφάνεια ως οριακή συνθήκη. Από την άλλη πλευρά, στη μη εκτεθειμένη πλευρά, η οριακή συνθήκη που τέθηκε περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, με συντελεστή συναγωγής  $h_{con}=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , συντελεστή ακτινοβολίας  $\varepsilon=0.9$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{amb}=20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.3 Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Η συνολική διάσταση του δοκιμίου κατά τη διεύθυνση όπου μελετήθηκε η μεταφορά θερμότητας είναι 12 mm. Αρχικά ελέγχθηκε η ανεξαρτησία πλέγματος εκτελώντας 9 διαφορετικούς συνδυασμούς χωρικού ( $\delta x$ ) και χρονικού ( $\delta t$ ) βήματος. Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα της εξέλιξης της θερμοκρασίας στη μη εκτεθειμένη πλευρά της γυψοσανίδας για διάφορα μεγέθη πλέγματος και χρονικών βημάτων. Γίνεται φανερό ότι η ανεξαρτησία πλέγματος πραγματοποιείται για  $\delta x \leq 0.5 \text{ mm}$  και  $\delta t \leq 5 \text{ s}$ . Έτσι, λοιπόν, επιλέχθηκε για όλες τις παραμετρικές μελέτες χωρικό βήμα ίσο με  $\delta x=0.5 \text{ mm}$ , που σύμφωνα με την Εξίσωση 4-1 αντιστοιχεί σε 25 υπολογιστικούς κόμβους, και χρονικό βήμα ίσο με  $\delta t=5 \text{ s}$ .



**Εικόνα 4-1 Διαγράμματα ανεξαρτησίας πλέγματος**



$$\delta x = \frac{X_{start} - X_{end}}{N - 1}$$

#### Εξίσωση 4-1

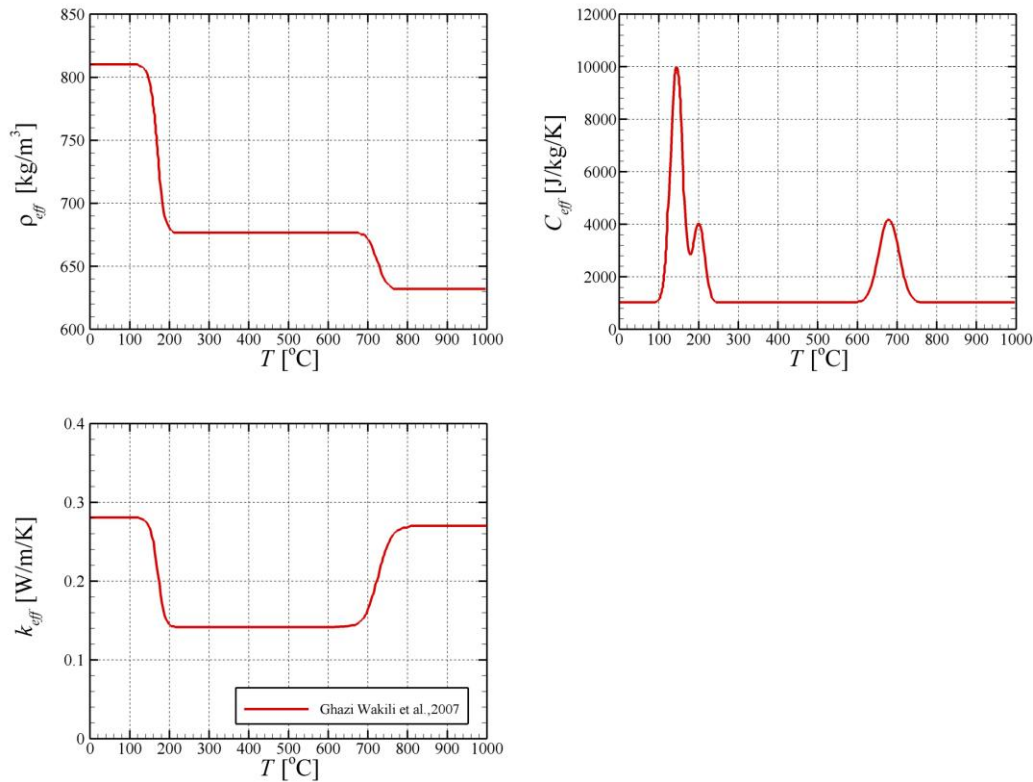
Τέλος, ορίστηκαν, στον υπολογιστικό κώδικα, οι θέσεις εξαγωγής των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, οι οποίες ήταν ίδιες με τις θέσεις που ήταν τοποθετημένα τα θερμοστοιχεία κατά την εκτέλεση του πειράματος. Έτσι, λοιπόν, εκτός από τα τις δυο εξωτερικές επιφάνειες του δοκιμίου, την εκτεθειμένη και την μη-εκτεθειμένη στη φωτιά, στις θέσεις  $x=0$  mm και  $x=12$  mm, αντίστοιχα, αποτελέσματα ελήφθησαν και σε δύο εσωτερικά σημεία, στις θέσεις  $x=4$  mm και  $x=8$  mm.

#### 4.2.4 Επίδραση μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων

Στο αρχείο εισόδου του προγράμματος, εκτός από τις οριακές συνθήκες και τα στοιχεία διακριτοποίησης, εισήχθησαν και οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας, δηλαδή της πυκνότητας, της φαινόμενης θερμοχωρητικότητας και της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας. Για να γίνει κατανοητή η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας στα αποτελέσματα έγιναν δύο προσομοιώσεις: η μία με σταθερές φυσικές ιδιότητες και η άλλη με μεταβλητές φυσικές ιδιότητες, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Και στις δύο περιπτώσεις οι τιμές ελήφθησαν από την εργασία των Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al., 2007).

Έτσι, λοιπόν, οι σταθερές φυσικές ιδιότητες ήταν για την πυκνότητα  $\rho=810$  kg/m<sup>3</sup>, για την φαινόμενη θερμοχωρητικότητα  $C_p=1000$  J/kgK, και για την φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα  $k=0.28$  W/mK. Όσον αφορά τις μεταβλητές φυσικές ιδιότητες, συναρτήσει της θερμοκρασίας, ελήφθησαν από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην εργασία των Ghazi Wakili et al., ψηφιοποιώντας τα δεδομένα με τη χρήση του προγράμματος Windig, δημιουργώντας, έτσι, την κατάλληλη βάση δεδομένων ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα (Variable Properties - VP).

Στην Εικόνα 4-2 παρουσιάζονται οι μεταβλητές φυσικές ιδιότητες (πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) της υπό εξέτασης γυψοσανίδας. Όπως φαίνεται, οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση μιας γυψοσανίδας (π.χ. αφυδάτωση), έχουν μεγάλη επίδραση στις φυσικές ιδιότητες.

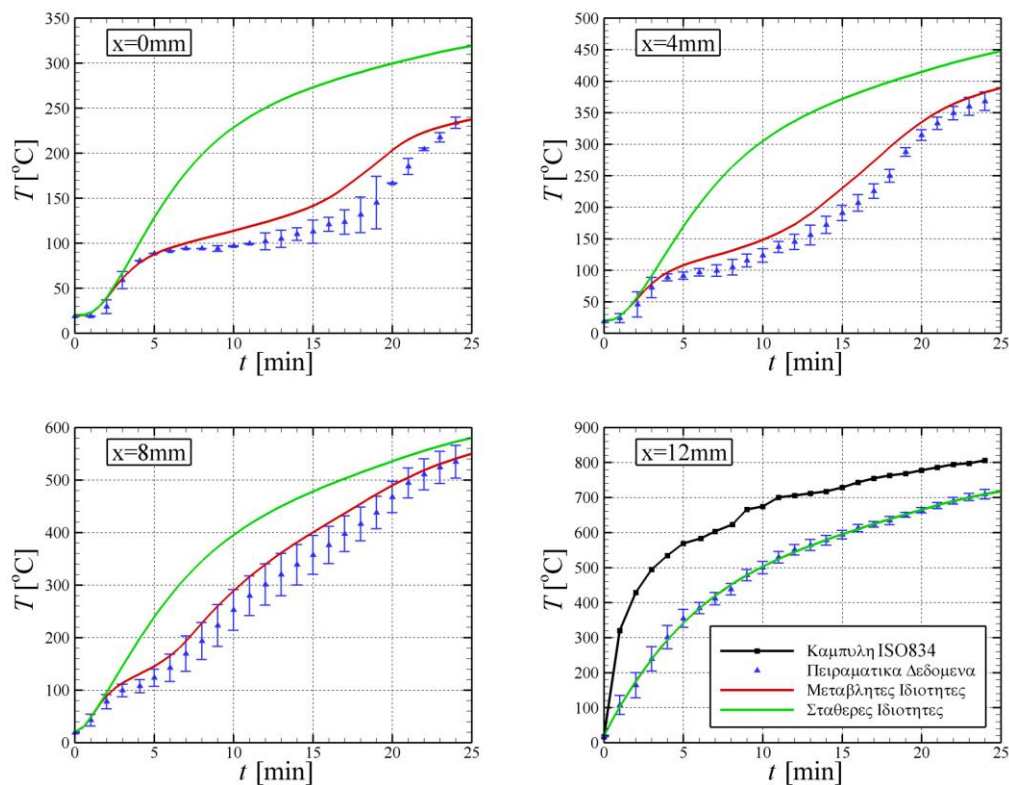


**Εικόνα 4-2 Διαγράμματα ψηφιοποιημένων ιδιοτήτων (Ghazi Wakili et al., 2007)**

Στην Εικόνα 4-3 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, με σταθερές και μεταβλητές φυσικές ιδιότητες, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της γυψοσανίδας με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως παρατηρείται, η προσομοίωση του εν λόγω φυσικού προβλήματος χρησιμοποιώντας μεταβλητές φυσικές ιδιότητες, δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα (θερμοκρασίες πολύ κοντά στις πειραματικές τιμές). Επιπλέον, η κλίση της καμπύλης των αποτελεσμάτων με μεταβλητές ιδιότητες σε κάθε θέση ακολουθεί αυτή των πειραματικών τιμών, ενώ σε πολλά σημεία ταυτίζεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι χρησιμοποιώντας μεταβλητές φυσικές ιδιότητες μπορεί να προσομοιωθεί, με σχετικά καλή ακρίβεια, το φαινόμενο της αφυδάτωσης της γύψου. Από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιώντας σταθερές φυσικές ιδιότητες, πέρα από τη θέση  $x=12$  mm, όπου ταυτίζεται πλήρως με τα πειραματικά δεδομένα λόγω των οριακών συνθηκών που έχουν επιλεγεί για την πλευρά που εκτίθεται στη φωτιά, στις άλλες τρεις θέσεις δίνει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει γιατί στους υπολογισμούς με σταθερές φυσικές ιδιότητες αγνοούνται οι μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων, οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της αφυδάτωσης της γύψου με κανέναν άλλο τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι τα πρώτα 5 λεπτά που θερμαίνεται η

γυφωσανίδα, η άνοδος της θερμοκρασίας είναι ραγδαία και φτάνει μέχρι τους 80°C στη θέση  $x=0$  mm. Στη θερμοκρασία αυτή, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων (Εικόνα 4-2), αρχίζει να συμβαίνει το φαινόμενο της αφυδάτωσης της γύψου. Στη συνέχεια, σχηματίζεται μια περιοχή κατά την οποία η θερμοκρασία αυξάνει με πολύ μικρό ρυθμό (temperature plateau). Αυτό συμβαίνει γιατί μεγάλα ποσά ενέργειας καταναλώνονται από τα δύο στάδια της αντίδρασης της αφυδάτωσης. Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της αφυδάτωσης η θερμοκρασία αυξάνει ξανά με μεγάλους ρυθμούς.



**Εικόνα 4-3 Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων, με σταθερές και μεταβλητές φυσικές ιδιότητες, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γυφωσανίδα, και πειραματικών δεδομένων**

#### 4.2.5 Προσέγγιση μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων με καμπύλες Gauss και επίδραση στα αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μεταβλητές φυσικές ιδιότητες ελήφθησαν από την εργασία των Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al., 2007). Κάθε μία, όμως, από τις φυσικές ιδιότητες μετρήθηκε σε διαφορετικό όργανο και όχι ακριβώς με τις ίδιες συνθήκες. Έτσι, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-2, το φαινόμενο της

αφυδάτωσης λαμβάνει χώρα σε διαφορεικό θερμικό εύρος σε κάθε μία από τις καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων. Για τον λόγο αυτό, οι καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων προσεγγίστηκαν με καμπύλες Gauss, ώστε τα θερμοκρασιακά εύρη που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης να είναι ίδια σε κάθε μία από τις καμπύλες. Οι καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων προσεγγίστηκαν με 3 καμπύλες Gauss, όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 4-2, στην Εξίσωση 4-3 και στην Εξίσωση 4-4.

$$C_{p,Gaussian}(T) = C_{p,0} + \sum_{i=1}^3 DC_{pi}$$

$$DC_{pi} = k_{Hi} G_i$$

#### Εξίσωση 4-2

$$\rho = \int \frac{d\rho}{dT} dT + \rho_0$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \sum_{i=1}^3 k_{mi} G_i$$

$$k_{mi} = \frac{k_{Hi}}{k_{H1}} k_{m1}$$

#### Εξίσωση 4-3

$$k = \int \frac{dk}{dT} dT + k_0$$

$$\frac{dk}{dT} = \sum_{i=1}^3 k_{ki} G_i$$

#### Εξίσωση 4-4

Η καμπύλη Gauss δίνεται από την Εξίσωση 4-5.

$$G_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T_i - T_{mi})^2}{2\sigma_i^2}}$$

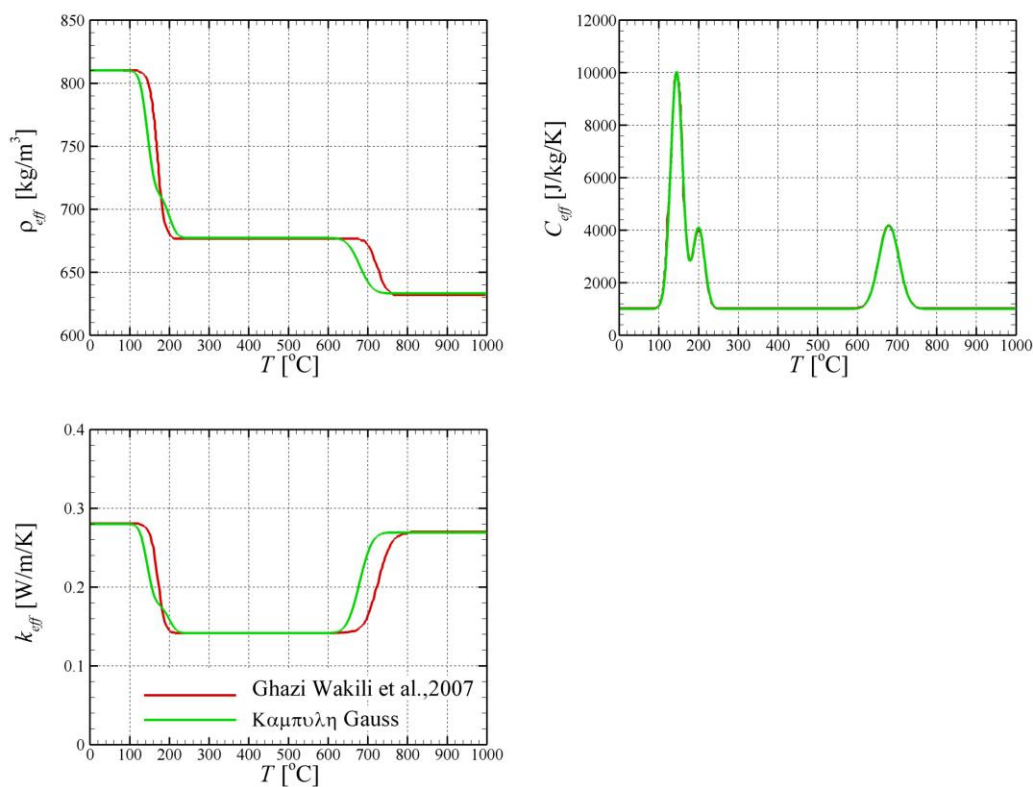
#### Εξίσωση 4-5

Ο Πίνακας 4-1 αναγράφει όλους τους συντελεστές των καμπυλών Gauss που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση των φυσικών ιδιοτήτων. Επίσης, αναγράφεται και η ενέργεια των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση της γύψου, η οποία ισούται με το εμβαδόν της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας,  $C_p$ , και υπολογίζεται με την ολοκλήρωση αυτής. Οι συντελεστές  $k_{Hi}$ ,  $k_{mi}$  και  $k_{ki}$  έχουν επιλεγεί έτσι ώστε οι καμπύλες που προκύπτουν να συμβαδίζουν με τις καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων μετά το πέρας κάθε μίας από τις αντιδράσεις.

**Πίνακας 4-1 Συντελεστές καμπυλών Gauss για τις φυσικές ιδιότητες**

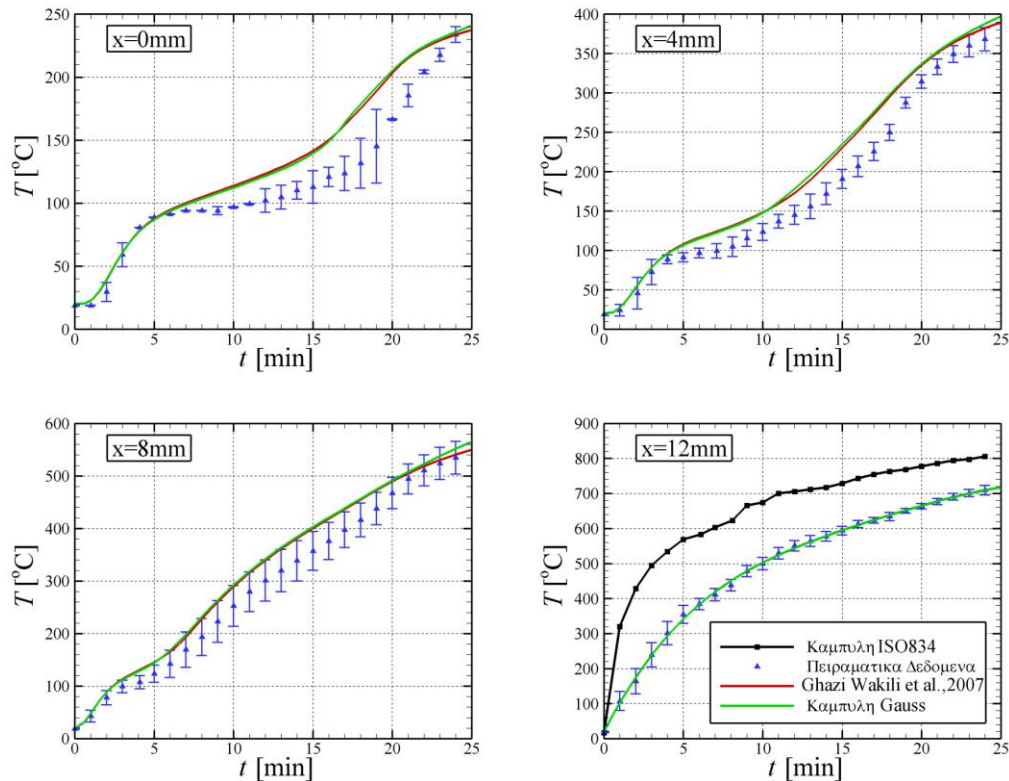
i	1	2	3
$T_m$	145	200.45	680
$\Delta T$	45	45	75
$\sigma$	15	15	25
$k_H$	340000	117000	200000
$k_m$	-98.8034188	-34	-44
$k_k$	-0.103162393	-0.0355	0.1278
$E$ [kJ/kg]	340	117	200
$C_{p0}$ [J/kg/K]	1000		
$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	810		
$k_0$ [W/m/K]	0.28		

Στην Εικόνα 4-4 απεικονίζονται οι φυσικές ιδιότητες που προκύπτουν μέσω της προσέγγισής τους με καμπύλες Gauss.

**Εικόνα 4-4 Προσέγγιση μεταβλητών φυσικών ιδιοτήτων με καμπύλες Gauss**

Στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές φυσικές ιδιότητες που προσεγγίστηκαν με τις

καμπύλες Gauss, οι οποίες συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Είναι εμφανές ότι οι προλέξεις με τις προσεγγίσεις των φυσικών ιδιοτήτων μέσω καμπυλών Gauss είναι αρκετά ικανοποιητικές, ενώ σχεδόν ταυτίζονται με τις προλέξεις που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές φυσικές ιδιότητες των Ghazi Wakili et al.



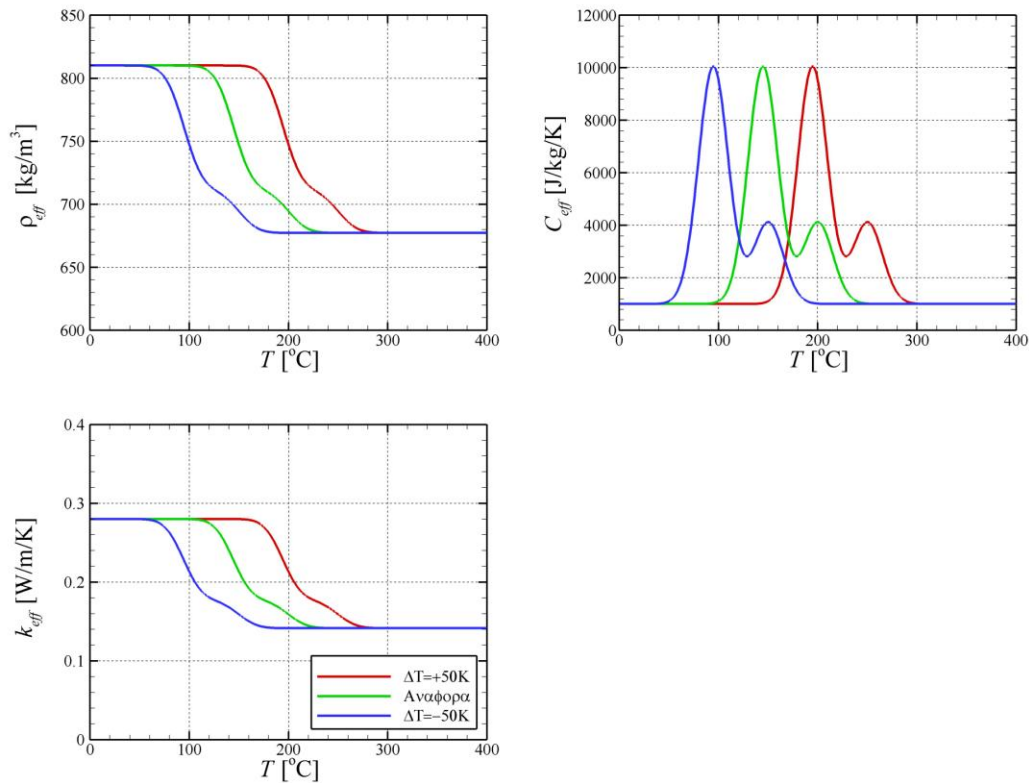
**Εικόνα 4-5 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των φυσικών ιδιοτήτων με καμπύλες Gauss, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας, με τα πειραματικά δεδομένα**

#### 4.2.6 Επίδραση θερμοκρασιακής αιχμής και εύρους των αντιδράσεων

Από τις προσεγγιστικές καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων που κατασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική μελέτη σε σχέση με τη θερμοκρασιακή αιχμή (Peak Temperature) και το θερμοκρασιακό εύρος (Peak Width) των αντιδράσεων.

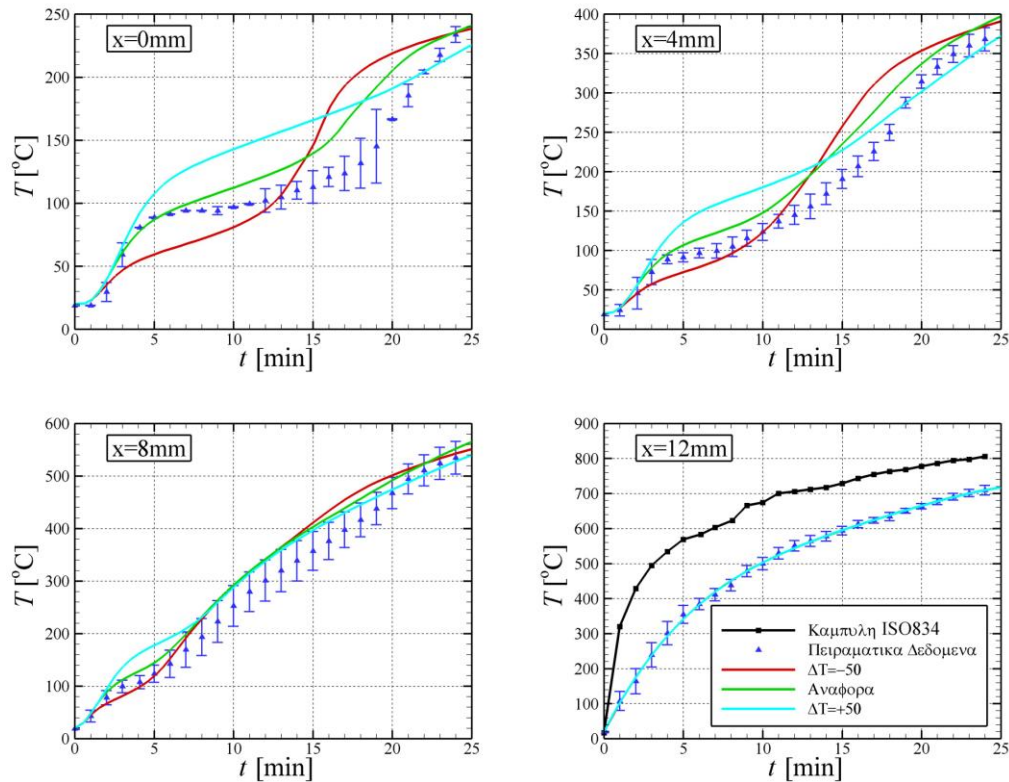
Στην πρώτη περίπτωση οι καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων μετατοπίστηκαν προς μικρότερες και μεγαλύτερες θερμοκρασίες, μεταβάλλοντας με τον τρόπο αυτό το σημείο που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης της γύψου. Έτσι, λοιπόν, δημιουργήθηκαν δυο νέες καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων μετατοπισμένες εκατέρωθεν των προσεγγιστικών καμπυλών αναφοράς Gauss,

σύμφωνα με την Εικόνα 4-6.



#### Εικόνα 4-6 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων μετατοπισμένες εκατέρωθεν της καμπύλης αναφοράς (καμπύλη Gauss)

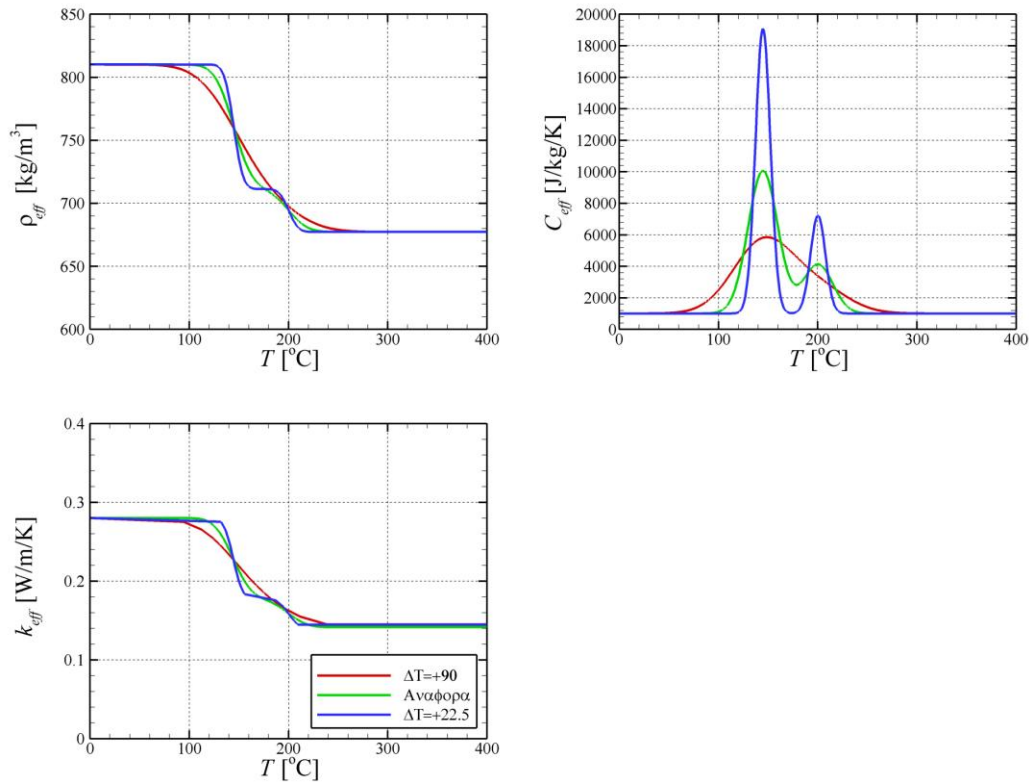
Εν συνεχεία, τα δεδομένα των νέων φυσικών ιδιοτήτων εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις. Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες με διαφορετικές θερμοκρασίες αιχμής, οι οποίες συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως φαίνεται, καμιά από τις δυο καμπύλες της παραμετρικής ανάλυσης δεν μπορεί να προσομοιώσει με απόλυτη επιτυχία το φαινόμενο της αφυδάτωσης. Η καμπύλη  $\Delta T = -50^\circ\text{C}$  έχει στα πρώτα λεπτά της θέρμανσης μικρό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Αυτό είναι εμφανές, για παράδειγμα στη θέση  $x=0$  mm, όπου μέχρι τα 12 λεπτά το φαινόμενο της αφυδάτωσης δείχνει να συμβαίνει σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις θερμοκρασίες που φαίνονται στα πειραματικά δεδομένα, ενώ από το σημείο αυτό και μετά η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει για την καμπύλη  $\Delta T = +50^\circ\text{C}$ , η οποία φτάνει γρήγορα σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η έναρξη της αφυδάτωσης γίνεται σε αρκετά μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι συμβαίνει στο πείραμα.



**Εικόνα 4-7 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων με διαφορετικές θερμοκρασίες αιχμής, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας, με τα πειραματικά δεδομένα**

Για τη μελέτη της επίδρασης του θερμοκρασιακού εύρου των αντιδράσεων, διπλασιάστηκε και υποδιπλασιάστηκε το θερμοκρασιακό εύρος της προσεγγιστικής καμπύλης Gauss, που είναι και η καμπύλη αναφοράς των ιδιοτήτων της γύψου, ενώ η θερμοκρασία αιχμής παρέμεινε σταθερή. Παρόλα αυτά, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, που αντιστοιχεί στην ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης, παρέμεινε σταθερό. Στην Εικόνα 4-8 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας με διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης.

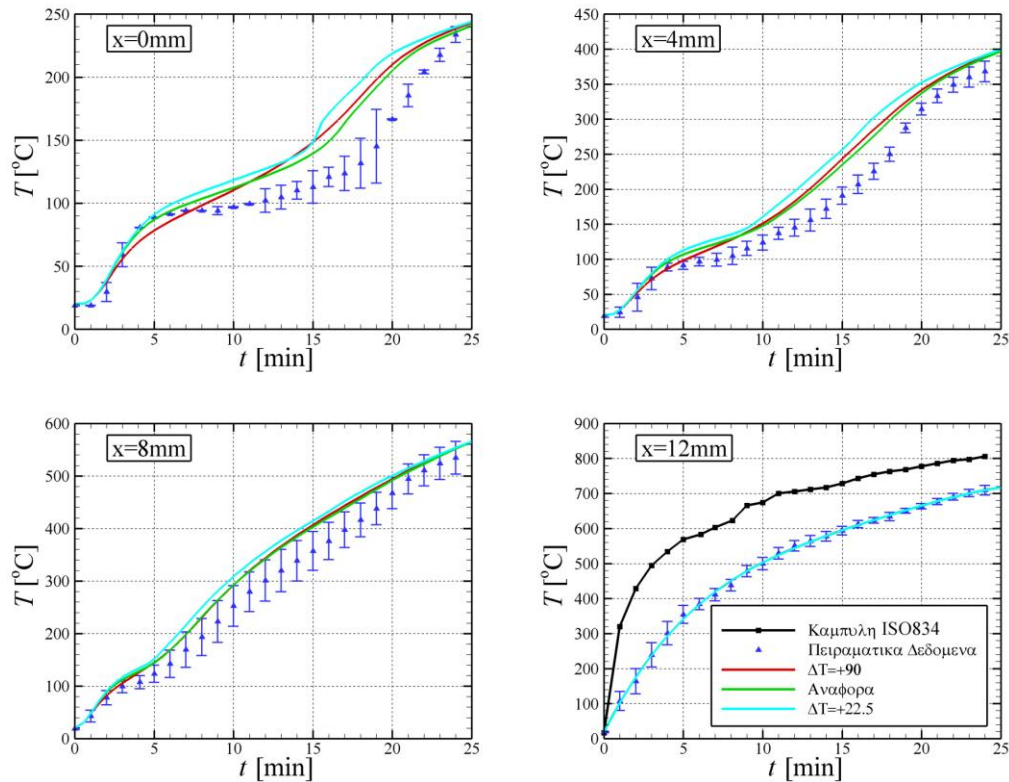




**Εικόνα 4-8 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων με διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης, αλλά με σταθερή θερμοκρασία αιχμής**

Στην Εικόνα 4-9 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, που προέκυψαν χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες με διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος, αλλά ίδια θερμοκρασία αιχμής, με τα πειραματικά δεδομένα. Παρατηρείται ότι και το θερμοκρασιακό εύρος  $\Delta T$  επηρεάζει σημαντικά τα υπολογιστικά αποτελέσματα, κάτι που γίνεται ιδιαίτερα αισθητό στην Εικόνα 4-9,  $x=0\text{mm}$ . Όταν το  $\Delta T$  είναι μικρό έχει ως άμεση συνέπεια την καθυστέρηση της έναρξης του φαινομένου της αφυδάτωσης, κάτι που γίνεται ιδιαίτερα ορατό στην Εικόνα 4-9 ( $\Delta T=22.5\text{K}$ ). Από την άλλη, όσο μικρότερο είναι το  $\Delta T$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αφυδάτωσης της γύψου. Αυτό συμβαίνει γιατί θα πρέπει να απορροφηθεί το ίδιο ποσό ενέργειας (αφού η ενέργεια αφυδάτωσης είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις) μέσα σε μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος.

Συμπερασματικά παρατηρείται ότι η επίδραση του θερμοκρασιακού εύρους που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης είναι μικρότερη σε σύγκριση με την επίδραση που έχει θερμοκρασία αιχμής.



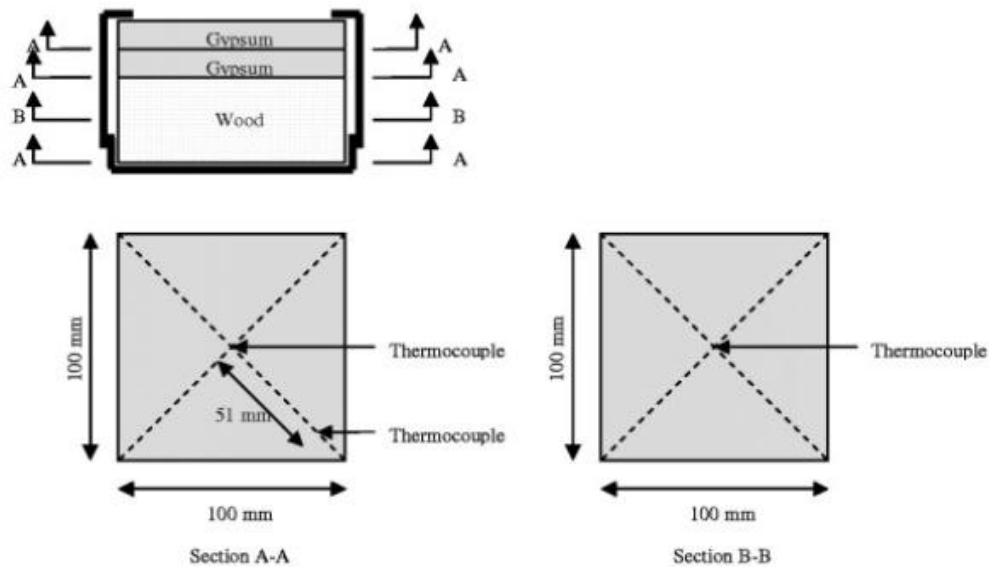
**Εικόνα 4-9 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων με διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος και σταθερή θερμοκρασία αιχμής, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας, με τα πειραματικά δεδομένα**

### 4.3 Διάταξη διπλής γυψοσανίδας και ξύλου

#### 4.3.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε αφορούσε τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου δύο στρωμάτων γυψοσανίδας, πάχους 12.7 mm έκαστο, τα οποία προστατεύουν ένα κομμάτι ξύλου πάχους 38 mm. Εκτεταμένη περιγραφή της πειραματικής διάταξης, καθώς και των πειραματικών αποτελεσμάτων, αναφέρεται στην εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008). Πρόκειται για γυψοσανίδες τύπου C και το ξύλο μαύρο, καναδέζικο έλατο. Με τη βοήθεια θερμοστοιχείων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία σε όλο το πλάτος του δοκιμίου, μετρήθηκε η θερμοκρασία στο εσωτερικό και στην επιφάνειά του. Πιο συγκεκριμένα, τα πειραματικά δεδομένα των θερμοκρασιών αφορούν την εκτεθειμένη επιφάνεια της γυψοσανίδας, το σημείο όπου ενώνονται οι δυο γυψοσανίδες, όπως και την ένωση μεταξύ της γυψοσανίδας και του ξύλου, αλλά

και την μη-εκτεθειμένη επιφάνεια του ξύλου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-10. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 90 λεπτά.



**Εικόνα 4-10 Διάταξη δοκιμίου και θέση των θερμοστοιχείων**

#### 4.3.2 Οριακές συνθήκες

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, η μία πλευρά του δοκιμίου (η πλευρά της γυψοσανίδας), εκτέθηκε σε ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ίση με  $q=35, 50$  και  $65 \text{ kW/m}^2$ , αντίστοιχα. Κατά την υπολογιστική προσομοίωση που έγινε στο εργαστήριο οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ροή θερμότητας στην εκτεθειμένη πλευρά, ίση με τις τιμές που αναφέρθηκαν. Θέτουμε συντελεστής συναγωγής  $h_{\text{con}}=9 \text{ W/m}^2\text{K}$ , συντελεστή ακτινοβολίας  $\varepsilon=0,9$  και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{\text{amb}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$  (293 K). Για την μη εκτεθειμένη πλευρά, 'Room', ισχύουν αδιαβατικές συνθήκες.

Ο κώδικας HETRAN αντιλαμβάνεται τα δύο φύλλα γυψοσανίδας ως ένα ενιαίο, επομένως δεν χρειάζεται να οριστούν ειδικές οριακές συνθήκες για το σημείο ένωσής τους. Αντίθετα, για την ένωση γυψοσανίδας-ξύλου, ορίζεται οριακή συνθήκη ίσης θερμοκρασίας και θερμοροής.

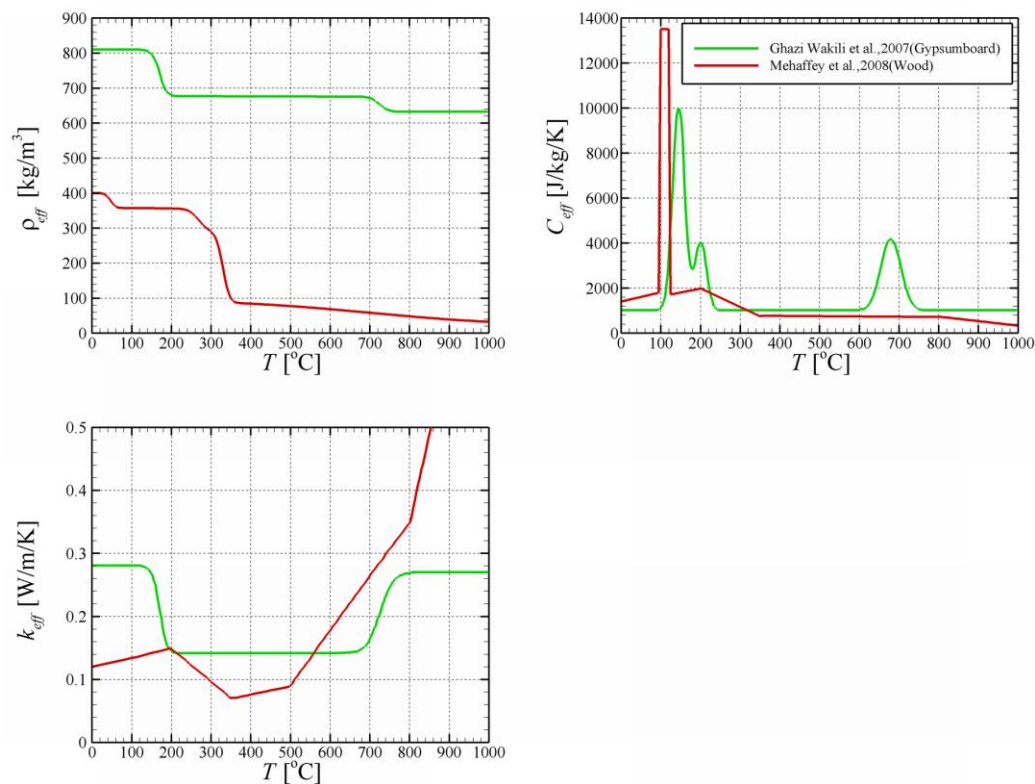
#### 4.3.3 Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Το δοκίμιο αποτελείται, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.1, από δυο φύλλα γυψοσανίδας και ένα ξύλου. Το συνολικό μήκος είναι 63.4 mm. Στο αρχείο εισόδου του κώδικα HETRAN ορίζονται δύο τομείς (DOMAIN) για τα υλικά. Στον πρώτο περιέχονται τα δυο φύλλα γυψοσανίδας, συνολικού πάχους 25.4 mm (=2 x

12,7mm), ενώ ο δεύτερος τομέας αναφέρεται στο ξύλο και έχει πάχος 38 mm. Για την διακριτοποίηση και την κατασκευή του πλέγματος, θεωρήθηκε χωρικό βήμα 0.2 mm, που αντιστοιχεί σε 318 κόμβους, και χρονικό βήμα 0.05 sec. Η θεώρηση πολλών κόμβων καθυστέρησε λίγο τους υπολογισμούς, αλλά ήταν απαραίτητο, καθώς έπρεπε να σχηματίζονται κόμβοι στα σημεία όπου ενώνονται τα υλικά, όπου ήταν τοποθετημένα και τα θερμοστοιχεία ( $x=0$  mm, 12.7 mm , 25.4 mm, 63.4 mm).

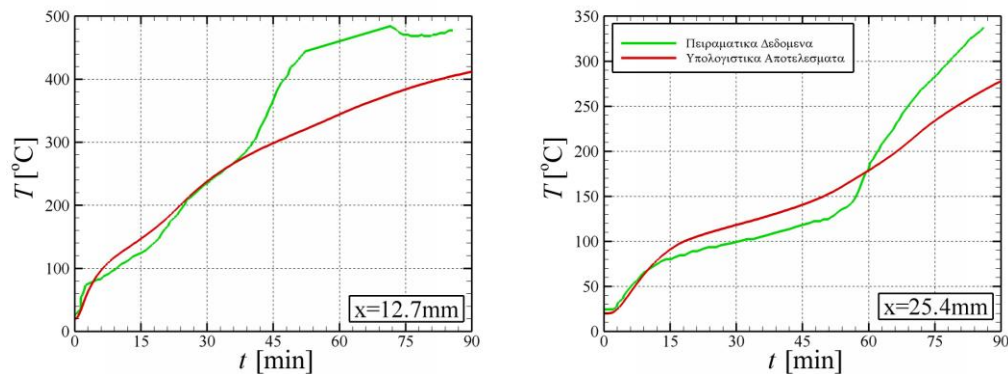
#### 4.3.4 Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου

Στην πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε, μελετήθηκε η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων (πυκνότητα, φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα και φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα) στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, οι φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας ελήφθησαν από την εργασία των Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al., 2007), ενώ του ξύλου από την εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008). Η πυκνότητα του ξύλου υπολογίστηκε από το διάγραμμα απώλειας μάζας μέσω της σχέσης  $m/m_0 = \rho/\rho_0$ , υποθέτοντας ότι ο όγκος του παρέμεινε σταθερός. Όπου  $\rho_0$  είναι η αρχική τιμή της πυκνότητας του ξύλου, ίση με  $400 \text{ kg/m}^3$ . Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζονται οι καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας και του ξύλου συναρτήσει της θερμοκρασίας.



**Εικόνα 4-11 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου**

Με βάση αυτές τις μεταβλητές ιδιότητες πραγματοποιήθηκαν οι πρώτοι υπολογισμοί της εν λόγω διάταξης. Στην Εικόνα 4-12 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση της γυψοσανίδας με το ξύλο ( $x=25.4\text{mm}$ ), με τα πειραματικά δεδομένα.



**Εικόνα 4-12 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

Όπως διαπιστώνεται, στη θέση  $x=12.7\text{ mm}$  (ένωση μεταξύ των δύο γυψοσανίδων) τα 40 πρώτα λεπτά τα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά με τα πειραματικά δεδομένα. Όμως, από το σημείο αυτό και μέχρι το τέλος του πειράματος, παρατηρείται σημαντική υποεκτίμηση των προλέξεων σε σχέση με τα πειράματα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι μεταξύ του χρονικού εύρους 50-70min πειραματική καμπύλη είναι μια ευθεία γραμμή. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα μέτρησης των θερμοστοιχείων. Παράλληλα, η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, που παρατηρείται λίγο πριν τα 45min από την έναρξη του πειράματος, πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόβλημα μετά τους  $300^{\circ}\text{C}$  χάνει τη μονοδιάστατη μορφή του, κάτι το οποίο αναφέρεται και στην εργασία των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διάταξη που συγκρατούσε το δοκίμιο θερμάνθηκε και συμμετείχε κι αυτή στη μετάδοση θερμότητας. Μια επιπλέον εξήγηση, είναι η πιθανή οξειδωση του χαρτιού που μπορεί να συνέβη στην επιφάνεια των γυψοσανίδων, στην θέση επαφής τους. Στο συμπέρασμα αυτό συνηγορεί και το γεγονός ότι το αυτή η απότομη αύξηση παρουσιάζεται στη θέση  $x=12.7\text{ mm}$ .

Για τη θέση  $x=25.4\text{ mm}$  παρατηρείται πως η πρόλεξη της περιοχής, όπου η θερμοκρασία αυξάνει με χαμηλό ρυθμό (temperature plateau), είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς υψηλότερες θερμοκρασίες, έως και  $20^{\circ}\text{C}$ . Από τους  $170^{\circ}\text{C}$  και

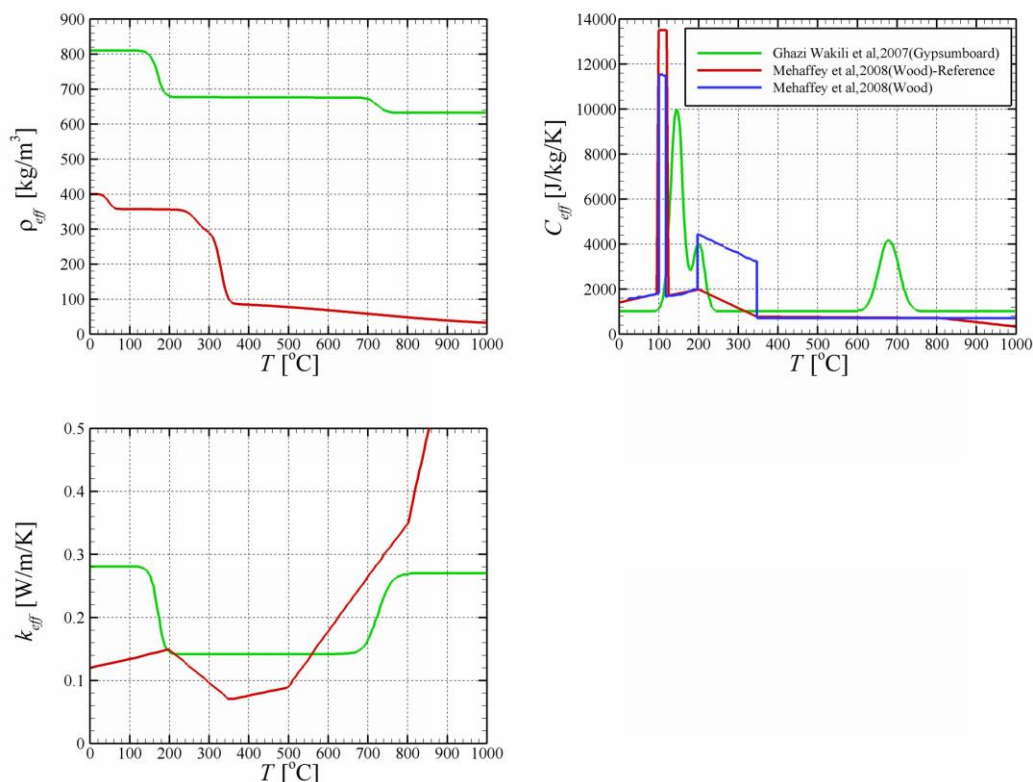
πέρα οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα υποεκτιμούν τις πειραματικές τιμές, κάτι το οποίο πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόβλημα παύει να είναι μονοδιάστατο και υπάρχει ροή θερμότητας και από τις άλλες κατευθύνσεις.

#### 4.3.5 Παραμετρική μελέτη επίδρασης φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου

Επειδή η σύσταση της γυψοσανίδα και του ξύλου δεν είναι γνωστή, δεν είναι σίγουρο ότι οι φυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς ήταν σωστές. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας και του ξύλου στα αποτελέσματα.

##### 4.3.5.1 Φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα του ξύλου

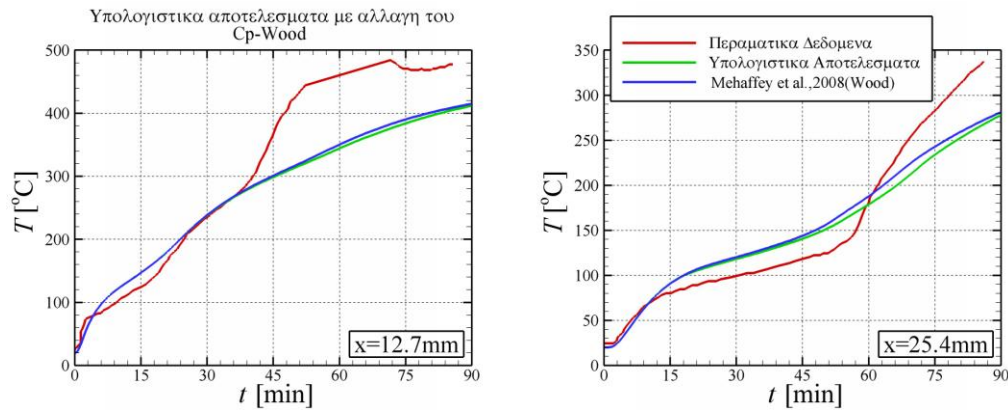
Για τη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα του ξύλου ελήφθησαν διάφορες τιμές από τη βιβλιογραφία (Mehaffey et al., 2008). Στην Εικόνα 4-13 απεικονίζονται διάφορες καμπύλες της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας.



**Εικόνα 4-13 Φυσικές ιδιότητες γυψοσανίδας και ξύλου**

Στην Εικόνα 4-14 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας του

ξύλου, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση της γυψοσανίδας με το ξύλο με τα πειραματικά δεδομένα.



**Εικόνα 4-14 Σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας του ξύλου, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

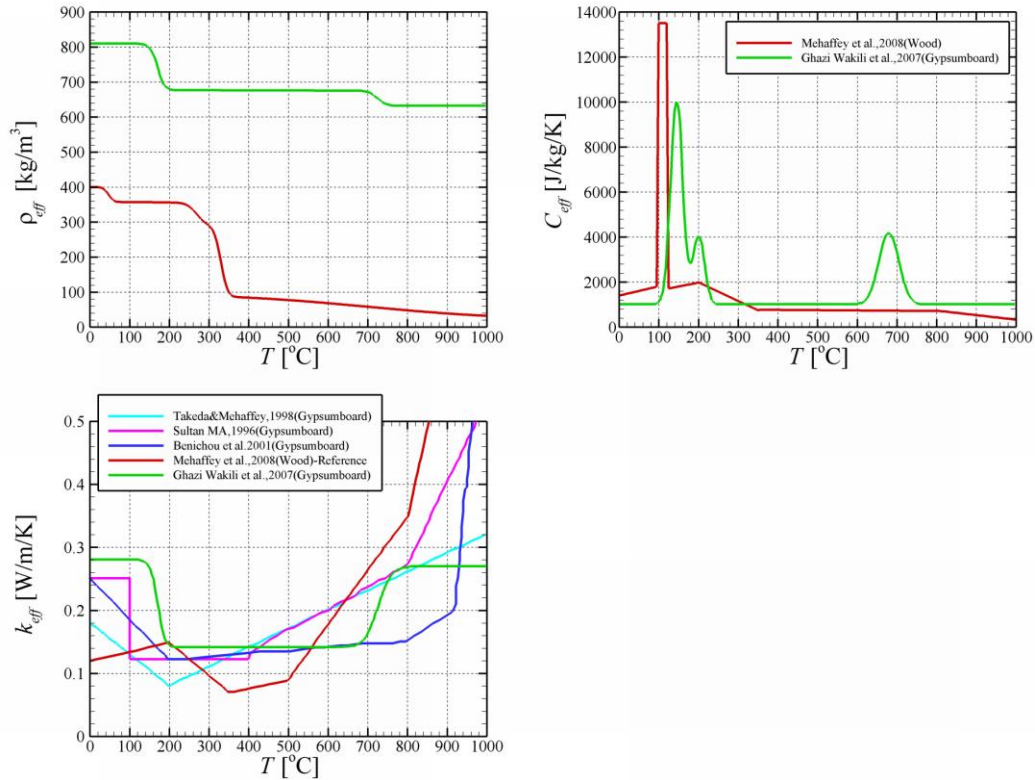
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου τα υπολογιστικά αποτελέσματα, που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, τόσο στη θέση  $x=12.7\text{ mm}$ , όσο και στη θέση  $x=25.4\text{ mm}$  δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους.

#### 4.3.5.2 Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα της γυψοσανίδας

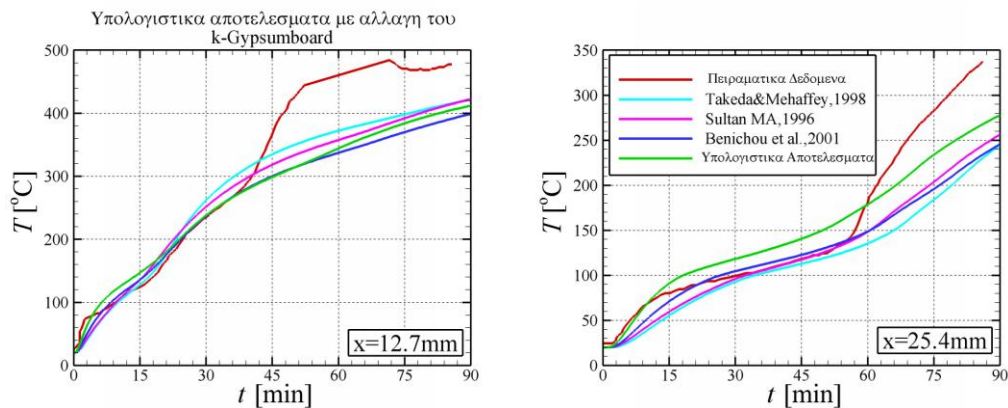
Η επόμενη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν αυτή της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές από τη βιβλιογραφία (Takeda και Mehaffey, 1998, Benichou και Sultan, 2005), οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-15.

Στην Εικόνα 4-16 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση της γυψοσανίδας με το ξύλο, με τα πειραματικά δεδομένα. Και στις δυο θέσεις παρατηρείται ότι οι καμπύλες έχουν ανάλογες κλίσεις. Στη θέση  $x=12.7\text{mm}$  φαίνεται ότι ενώ στην αρχή και οι τρεις παραμετρικές καμπύλες έχουν ταυτόσημη πορεία, από τους  $200^{\circ}\text{C}$  και μετά οι ιδιότητες των Takeda and Mehaffey (Takeda and Mehaffey, 1998) δίνουν υψηλότερες τιμές. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι μελετώντας την καμπύλη της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις εν λόγω τιμές, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση από τους  $200^{\circ}\text{C}$  και έπειτα,

κάτι που συνεπάγεται και την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας.



**Εικόνα 4-15 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας για γυψοσανίδα και ξύλο (παρλλαγές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας)**

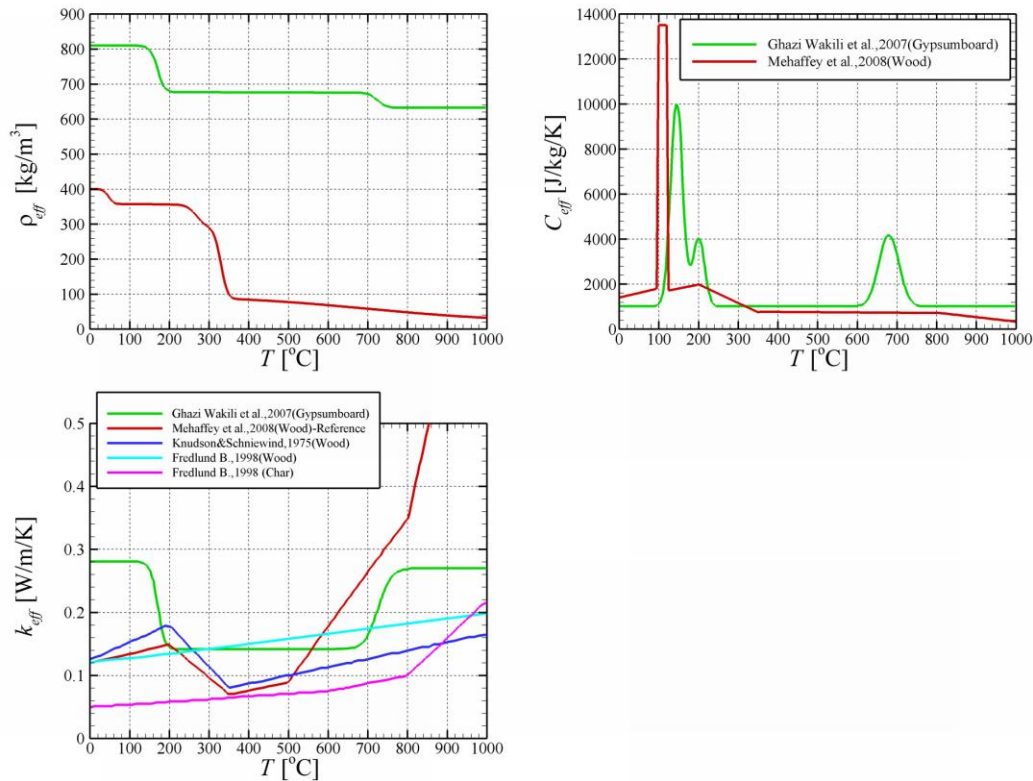


**Εικόνα 4-16 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**



#### 4.3.5.3 Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του ξύλου

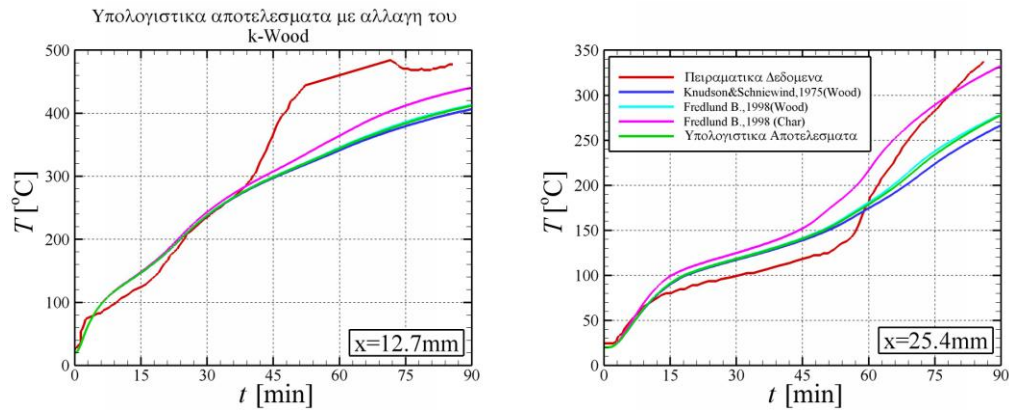
Η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν αυτή της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές από τη βιβλιογραφία, όπως αυτές των Knudson και Schniewind, (Knudson & Schniewind, 1975) και Fredlund, (Fredlund B., 1998) για δυο διαφορετικά είδη ξύλου (wood, char), οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-17.



**Εικόνα 4-17 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας για γυψοσανίδα και ξύλο (παραλλαγές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου)**

Στην Εικόνα 4-18 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση μεταξύ της γυψοσανίδας και του ξύλου, με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις καμπύλες του Fredlund (char) είναι αυτά που δίνουν τις μεγαλύτερες τιμές για την θερμοκρασία και στις δυο θέσεις. Ιδιαίτερα στη θέση  $x=25.4$  mm, οι προλέξεις ακολουθούν την τάση των πειραματικών δεδομένων, ενώ παρατηρείται η καλύτερη προσέγγιση των πειραμάτων μετά τα 60min. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου που χρησιμοποιήθηκαν

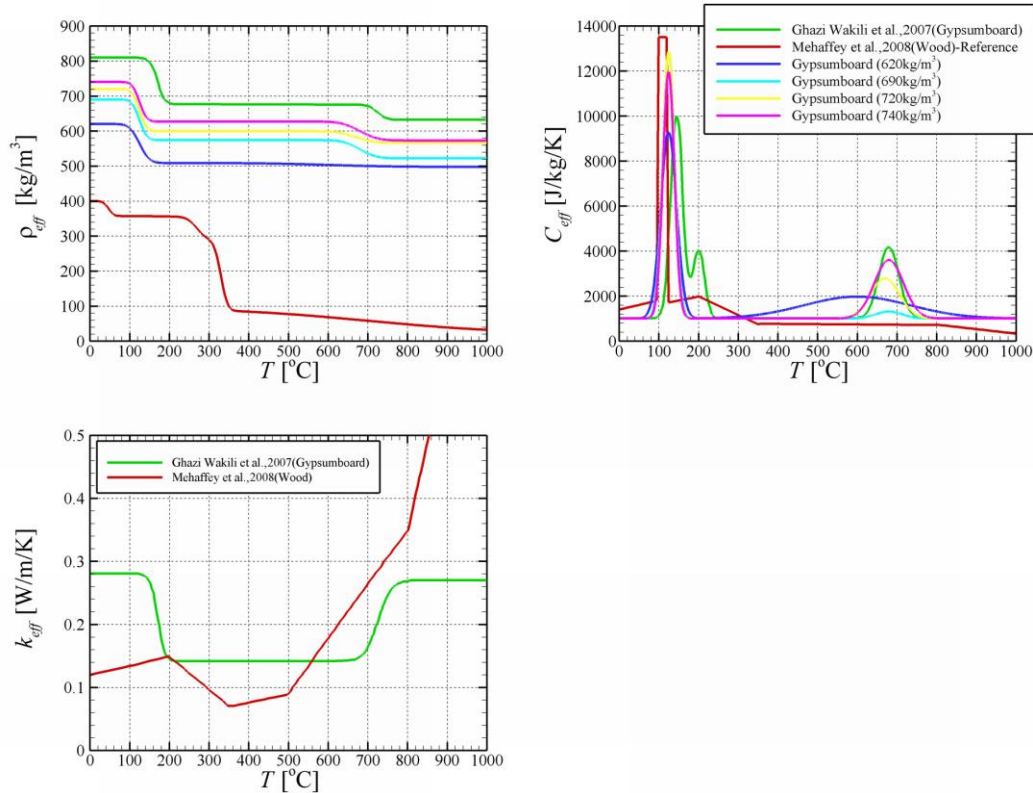
ήταν ιδιαίτερα μικρές με αποτέλεσμα το ξύλο να λειτουργεί ως μονωτικό. Έτσι, η ροή θερμότητας στην ένωση μεταξύ της γυψοσανίδας και του ξύλου είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό. Για τα υπόλοιπα είδη ξύλου, δεν παρατηρούμε έντονες διαφορές μεταξύ τους, ούτε και από την καμπύλη αναφοράς.



**Εικόνα 4-18 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

#### 4.3.5.4 Φαινόμενη πυκνότητα γυψοσανίδας

Στην επόμενη σειρά υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες τεσσάρων διαφορετικών γυψοσανίδων με αρχικές πυκνότητες  $620\text{ kg/m}^3$ ,  $690\text{ kg/m}^3$ ,  $720\text{ kg/m}^3$  και  $740\text{ kg/m}^3$ , αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, από τα διαγράμματα των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008) για την απώλεια μάζας της γυψοσανίδας συναρτήσει του χρόνου, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι ενέργειες των αντιδράσεων αφυδάτωσης και αποσύνθεσης του ασβεστίου των εν λόγω γυψοσανίδων και κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας. Στην Εικόνα 4-19 παρουσιάζονται οι καμπύλες των φυσικών ιδιοτήτων για τις τέσσερις διαφορετικές γυψοσανίδες.



**Εικόνα 4-19 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας για γυψοσανίδα και ξύλο (παραλλαγές της πυκνότητας και της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας)**

Ο Πίνακας 4-2 αναγράφει μερικά από τα χαρακτηριστικά των γυψοσανίδων που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 4-2 Χαρακτηριστικά των γυψοσανίδων**

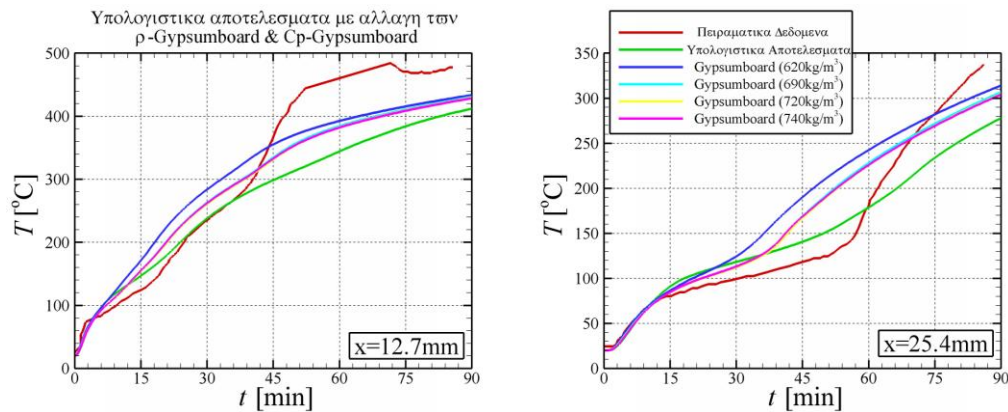
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Delta m_{dh}$ (%)	$\gamma_s$ (%)	$E_{dh}$ (kJ/kg)	$\delta m_{Ca}$ (%)	$\gamma_{Ca}$ (%)	$E_{Ca}$ (kJ/kg)
620	15.65	74.52	415.89	7.16	16.26	325.27
690	16.79	79.97	446.32	0.57	1.30	26.05
720	16.03	76.34	426.04	3.63	8.24	164.82
740	14.83	70.63	394.18	5.26	11.96	239.14

Στην Εικόνα 4-20 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες πέντε διαφορετικών γυψοσανίδων, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου, με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως είναι φανερό, τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύψαν από τις γυψοσανίδες με πυκνότητες 720 kg/m<sup>3</sup> και 740 kg/m<sup>3</sup>, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές στη

θερμοκρασιακή κατανομή συναρτησει του χρόνου. Στη ταύτιση αυτή συμβάλλει και το γεγονός ότι και οι ενέργειες αφυδάτωσής τους εμφανίζουν μικρή διαφορά (Πίνακας 4-2), και κατά συνέπεια οι φαινόμενες ειδικές θερμοχωρητικότητές τους δεν διαφέρουν σημαντικά, κάτι που αποδεικνύεται από την Εικόνα 4-19. Οι διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα μεταξύ των διαφορετικών γυψοσανίδα, οφείλεται στο συνδυασμό των φυσικών ιδιοτήτων, που ορίζουν τον συντελεστή θερμικής διάχυσης,  $\alpha$  (Εξίσωση 4-6), ο οποίος καθορίζει το πόσο γρήγορα ή αργά μεταβάλλεται η θερμοκρασία.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

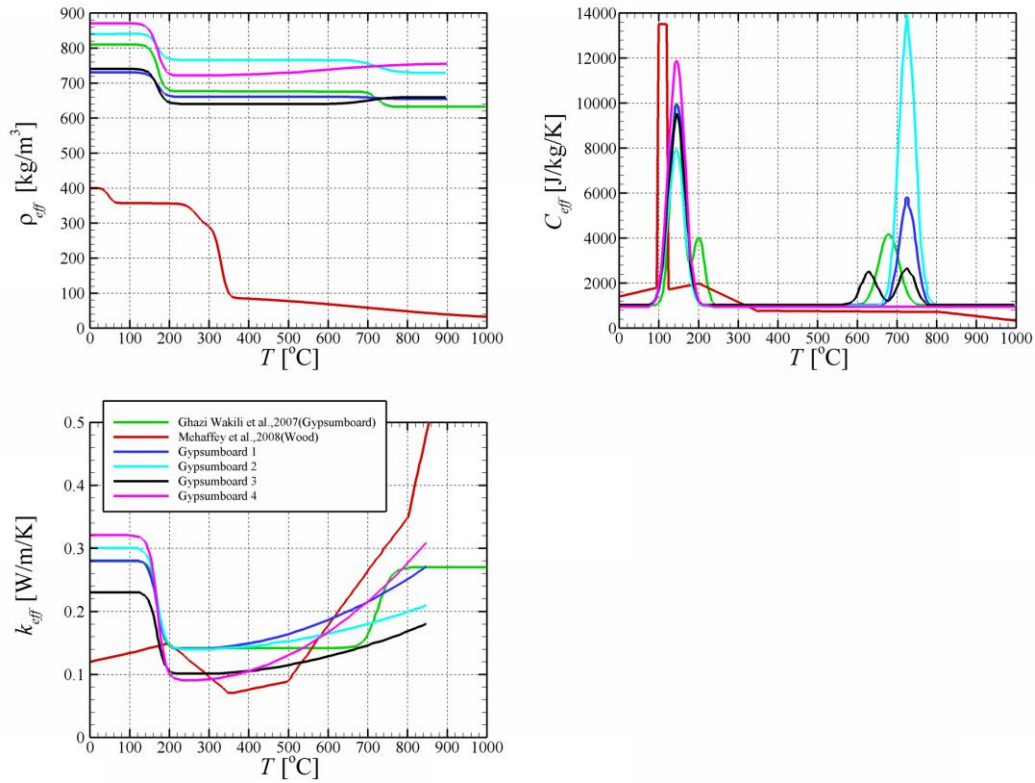
#### Εξίσωση 4-6



**Εικόνα 4-20 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες πέντε διαφορετικών γυψοσανίδων, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδα και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

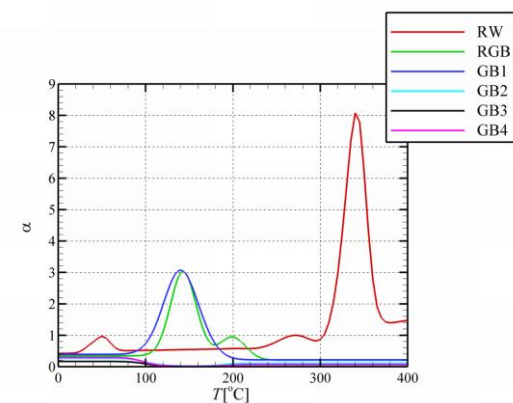
#### 4.3.5.5 Παραμετρική μελέτη ιδιοτήτων γυψοσανίδα

Στην ακόλουθη σειρά υπολογισμών επιλέχθηκαν τέσσερα είδη γυψοσανίδα και πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί αλλάζοντας κάθε φορά και τις τρεις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδα (φαινόμενη πυκνότητα, φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα). Τα νέα δεδομένα ελήφθησαν από καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων που παρουσιάζονται στην εργασία Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi, 2009), οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-21.



**Εικόνα 4-21 Διαγράμματα φυσικών ιδιοτήτων πέντε διαφορετικών γυψοσανίδων (Ghazi Wakili & Hugi, 2009)**

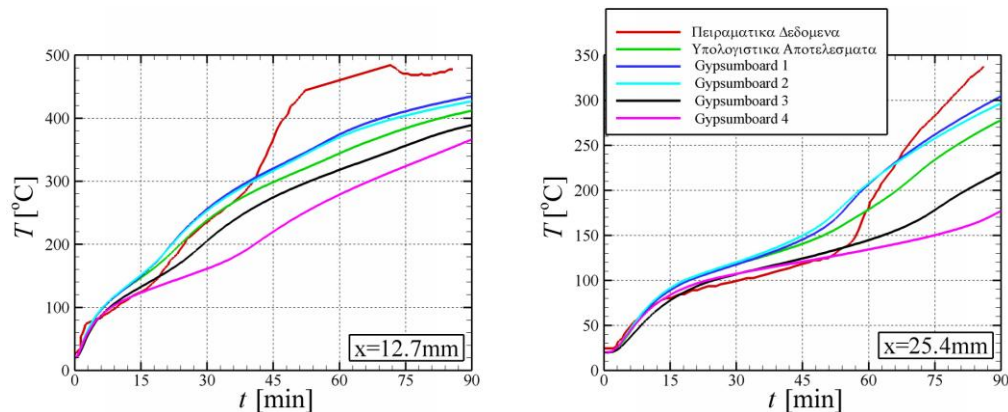
Για τις πέντε αυτές γυψοσανίδες, αλλά και για το ξύλο, υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμικής διάχυσης και εν συνεχεία δημιουργήθηκε το συγκριτικό διάγραμμα του συντελεστή συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-22.



**Εικόνα 4-22 Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή θερμικής διάχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας (RW: ξύλο, RG: γυψοσανίδα αναφοράς, GB<sub>i</sub>: είδη γυψοσανίδας)**

Στην Εικόνα 4-23 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα,

χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες πέντε διαφορετικών γυψοσανίδων από τη βιβλιογραφία, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου, με τα πειραματικά δεδομένα. Είναι εμφανές ότι τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν χρησιμοποιούνται οι φυσικές ιδιότητες των γυψοσανίδων (1) και (2), οι οποίες προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα από την αρχική γυψοσανίδα αναφοράς.



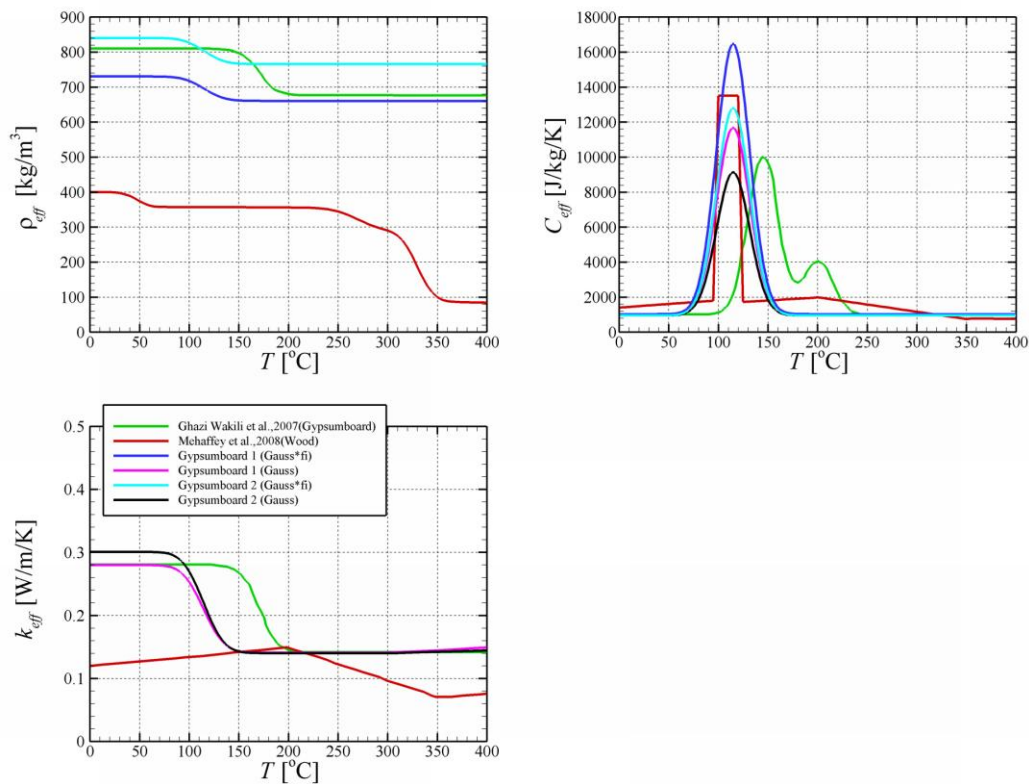
**Εικόνα 4-23 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες πέντε διαφορετικών γυψοσανίδων από τη βιβλιογραφία, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

#### 4.3.6 Συντελεστής διόρθωσης, $f_i$ , λόγω μεταφοράς μάζας

Εφόσον έχουμε μελετήσει όλες τις παραμέτρους των φυσικών ιδιοτήτων της γυψοσανίδας και του ξύλου, για την πλήρη διερεύνηση του φαινομένου, πρέπει να ελεγχθεί και η επίδραση της μεταφοράς μάζας, που προκύπτει κατά την θέρμανση της γυψοσανίδας και την εξάτμιση της ελεύθερης υγρασίας και του κρυσταλλικού νερού. Η επίδραση αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη έμμεσα μέσω του συντελεστή διόρθωσης  $f_i$ . Συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, πολλαπλασιάζοντας την φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα με τον συντελεστή διόρθωσης  $f_i$ , εισάγεται η επίδραση της μεταφοράς του υδρατμού μέσα στη γυψοσανίδα.

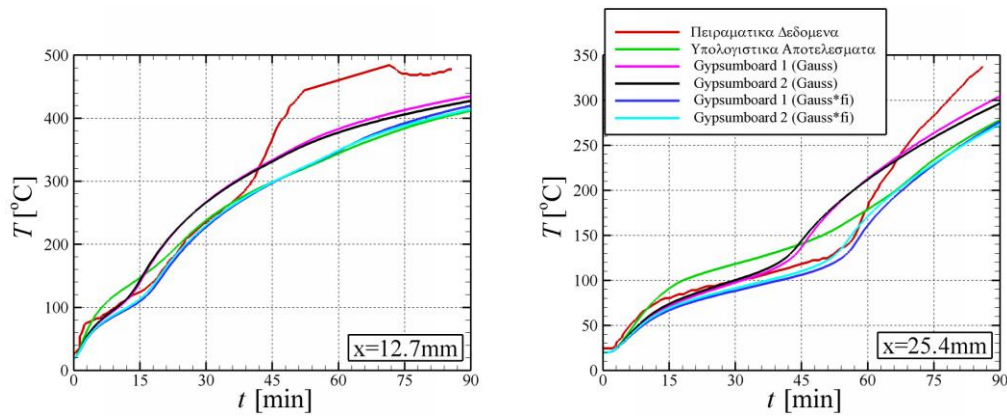
Στην Εικόνα 4-24, φαίνεται πως επηρεάζει ο συντελεστής  $f_i$  την φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα. Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές της γυψοσανίδας και του ξύλου αναφοράς, των δύο γυψοσανίδων της παραγράφου 4.3.5.5, που έδωσαν τα καλύτερα υπολογιστικά αποτελέσματα, και οι ιδιότητες των τελευταίων με την προσαύξηση του

συντελεστή  $f_i$ , ο οποίος τέθηκε ίσος με 1.45, σύμφωνα με την εργασία των Kontogeorgos και Founti (Kontogeorgos και Founti, 2010).



**Εικόνα 4-24 Επίδραση του συντελεστή διόρθωσης,  $f_i$ , λόγω μεταφοράς μάζας στις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας**

Στην Εικόνα 4-25 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες αυξημένες σύμφωνα με τον συντελεστή διόρθωσης μεταφοράς μάζας, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου, με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως είναι φανερό, η εισαγωγή του συντελεστή διόρθωσης,  $f_i$ , λόγω μεταφοράς του υδρατμού οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα, κυρίως κατά τη διάρκεια της αφυδάτωσης της γύψου. Πιο αναλυτικά, τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τη διόρθωση  $f_i$ , βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, κυρίως στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αφυδάτωσης. Μετά το πέρας της αφυδάτωσης, και μέχρι τη λήξη της διαδικασίας, όπως έχει αναφερθεί και στο σχολιασμό προηγούμενων αποτελεσμάτων, δεν μπορεί να προσομοιωθεί η απότομη θερμοκρασιακή άνοδο που παρατηρείται στα πειραματικά δεδομένα, αφού το πρόβλημα παύει να είναι μονοδιάστατο.



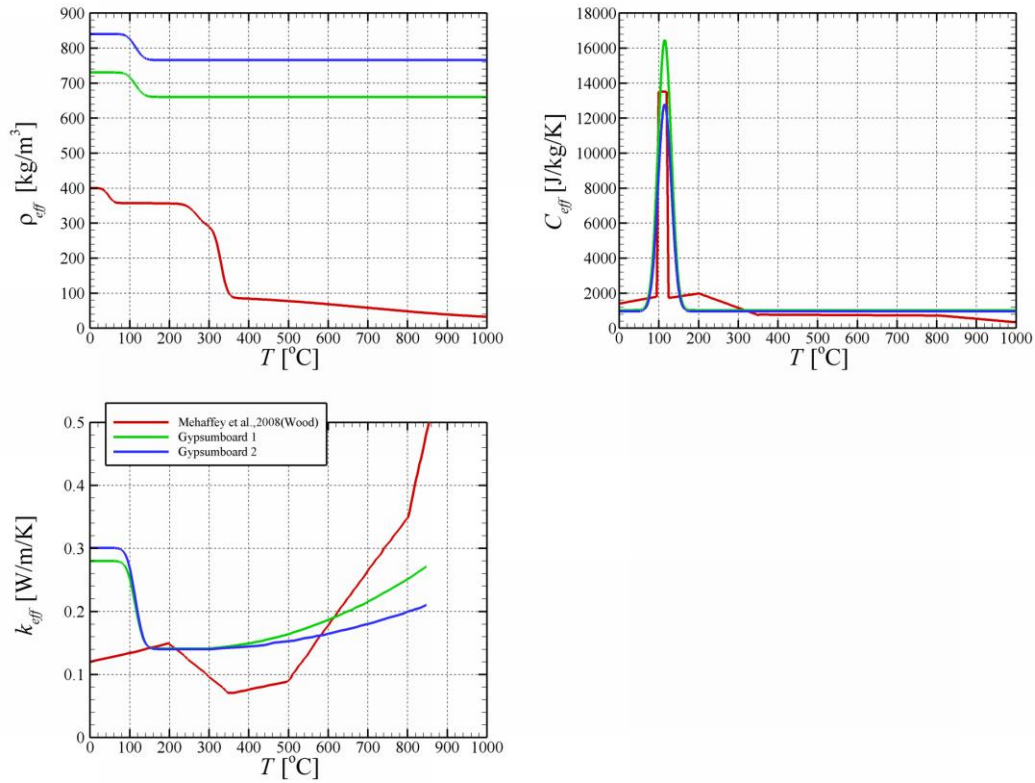
**Εικόνα 4-25 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας φυσικές ιδιότητες αυξημένες σύμφωνα με τον συντελεστή διόρθωσης μεταφοράς μάζας, της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα**

#### 4.3.7 Μελέτη επίδρασης θερμοροής

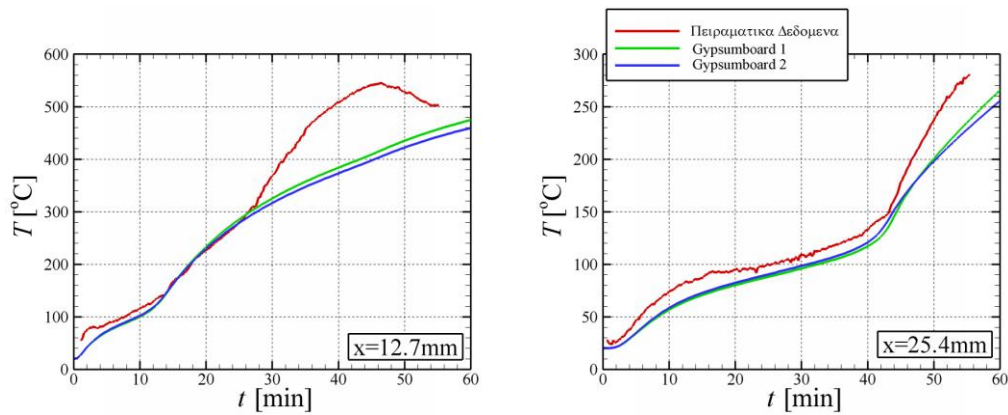
Τέλος, στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκε η επίδραση της θερμοροής στην οποία εκτίθονταν τα δοκίμια. Έτσι, λοιπόν, εκτός από τη θερμοροή  $q=35\text{ kW/m}^2$ , μελετήθηκαν και οι θερμοροές  $q=50\text{ kW/m}^2$  και  $q=65\text{ kW/m}^2$ , αντίστοιχα. Σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για τους ακόλουθους υπολογισμούς, για το ξύλο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των Mehaffey et al. (Mehaffey et al., 2008), ενώ για την γυψοσανίδα χρησιμοποιήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες με τον συντελεστή διόρθωσης που έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα, έχουμε δυο παραλλαγές. Στην Εικόνα 4-26 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Στην Εικόνα 4-27 και στην Εικόνα 4-28 συγκρίνονται οι προλέξεις της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου, με τα πειραματικά δεδομένα για θερμοροή  $q=50\text{ kW/m}^2$ . Όπως είναι φανερό, τα αποτελέσματα είναι σχετικά ικανοποιητικά. Στη θέση  $x=12.7\text{ mm}$  τα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά δεδομένα και μέχρι τη θερμοκρασία των  $300^\circ\text{C}$ . Στη θέση  $x=25.4\text{ mm}$ , παρατηρείται μια μικρή υποεκτίμηση των πειραματικών δεδομένων, ωστόσο οι προλέξεις καταφέρνουν να πετύχουν την άνοδο της θερμοκρασίας από τους  $150^\circ\text{C}$  και μέχρι το τέλος της διαδικασίας, ούτως ώστε να φτάσουν στα 90 λεπτά σε θερμοκρασιακές τιμές παραπλήσιες του πειράματος.

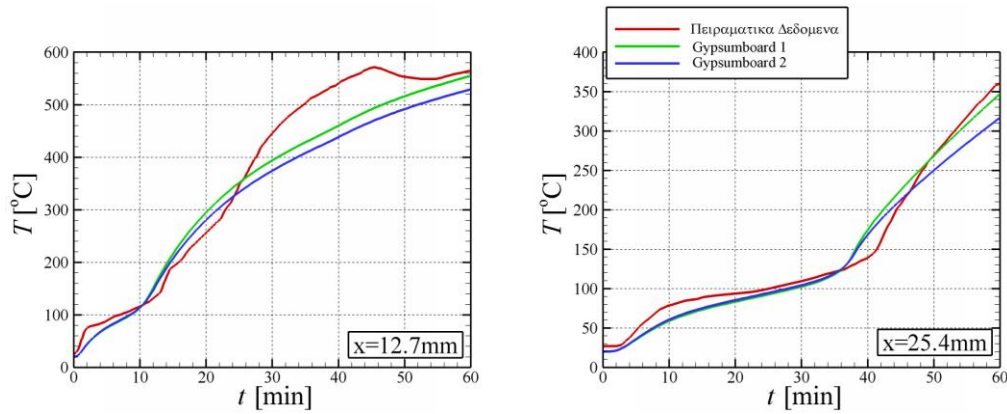




**Εικόνα 4-26 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας και ξύλου**



**Εικόνα 4-27 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα: θερμοροή  $q=50\text{kW/m}^2$**



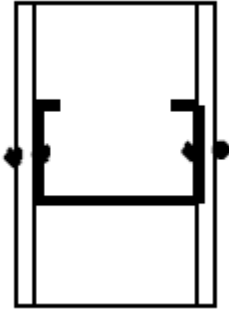
**Εικόνα 4-28 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας στην ένωση των δύο γυψοσανίδων ( $x=12.7\text{mm}$ ) και στην ένωση μεταξύ γυψοσανίδας και ξύλου ( $x=25.4\text{mm}$ ) με τα πειραματικά δεδομένα: θερμοροή  $q=65\text{kW/m}^2$**

#### **4.4 Σύνθετη διάταξη γυψοσανίδας με χαλύβδινους ορθοστάτες και ενδιάμεσο κενό**

Στις ακόλουθες σειρές υπολογισμών, εξετάστηκαν τρεις βασικές περιπτώσεις. Πρώτη είναι αυτήν του συστήματος δυο γυψοσανίδων που συγκρατούνται με χαλύβδινους ορθοστάτες και υπάρχει κενό ανάμεσά τους, αλλά τα στηρίγματα αγνοούνται ως προς την μεταφορά θερμότητας. Η δεύτερη περίπτωση αποτελείται από το ίδιο βασικό σύστημα γυψοσανίδας-χαλύβδινων ορθοστατών, όμως τα στηρίγματα συμμετέχουν στους υπολογισμούς για την μεταφορά θερμότητας. Και τέλος, η τρίτη περίπτωση είναι αυτή του ίδιου βασικού συστήματος, με τη διαφορά ότι έχει τοποθετεί μονωτικό υλικό ανάμεσα στις δυο γυψοσανίδες.

##### **4.4.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος**

Δύο φύλλα γυψοσανίδας συγκρατούνται από μια λεπτή χαλύβδινη κατασκευή. Στον εσωτερικό χώρο, μεταξύ των δύο γυψοσανίδων υπάρχει κενό/αέρας. Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι  $100 \times 54 \times 15$ , ενώ το πάχος του ορθοστάτη είναι  $1.2\text{mm}$ . Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη αναφέρονται στην εργασία των Feng et al. (Feng et al., 2003). Χρησιμοποιήθηκαν γυψοσανίδες πάχους  $12.5\text{mm}$ , τύπου Fireline Cyproc. Τα θερμοστοιχεία για την μέτρηση της θερμοκρασίας ήταν τοποθετημένα στην εκτεθειμένη επιφάνεια της γυψοσανίδας στα χαλύβδινα στηρίγματα κατά μήκος των επιφανειών των γυψοσανίδων και στην μη-εκτεθειμένη επιφάνεια της γυψοσανίδας (Εικόνα 4-29). Το δοκίμιο εκτέθηκε στην φωτιά για 120 λεπτά.



**Εικόνα 4-29 Διάταξη δοκιμίου και θέσεις θερμοστοιχείων**

#### 4.4.2 Οριακές συνθήκες

Στην πλευρά του δοκιμίου που εκτίθεται στη φωτιά χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές των θερμοκρασιών της επιφάνειάς του. Στο κενό, αλλά και στην μη-εκτεθειμένη πλευρά, ισχύει η οριακή συνθήκη μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Οι τιμές των συντελεστών, και για τις δυο περιπτώσεις, είναι  $h_{con}=10\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $\varepsilon=0.8$ , ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην μη εκτεθειμένη πλευρά είναι  $T_{amb}=20^\circ\text{C}$ .

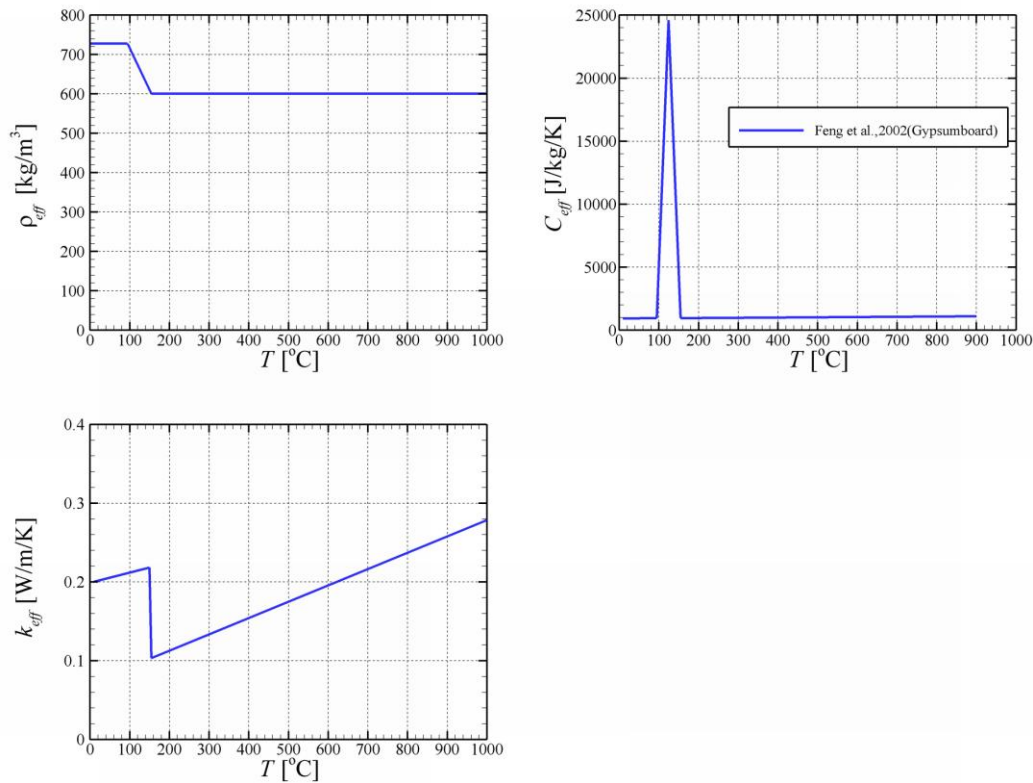
#### 4.4.3 Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Το συνολικό μήκος του δοκιμίου είναι 125 mm. Στο αρχείο εισόδου του κώδικα HETRAN ορίστηκαν τρεις τομείς (DOMAIN) των υλικών. Στον πρώτο περιέχεται η γυψοσανίδα πάχους 12.5mm, στον δεύτερο ανήκει το κενό ανάμεσα στις δυο γυψοσανίδες, με μήκος 100mm, και τέλος στον τρίτο ανήκει η μη εκτεθειμένη γυψοσανίδα πάχους 12.5mm. Για την διακριτοποίηση και την κατασκευή του πλέγματος, θεωρήθηκε χωρικό βήμα 0.5mm, που αντιστοιχεί σε 251 κόμβους, και χρονικό βήμα 0.05sec. Οι κόμβοι συμπίπτουν με τα σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί τα θερμοστοιχεία για την καταγραφή της θερμοκρασίας ( $x=0\text{mm}$ , 12.5mm, 112.5mm, 125mm).

#### 4.4.4 Σύγκριση προλέξεων με πειραματικά δεδομένα

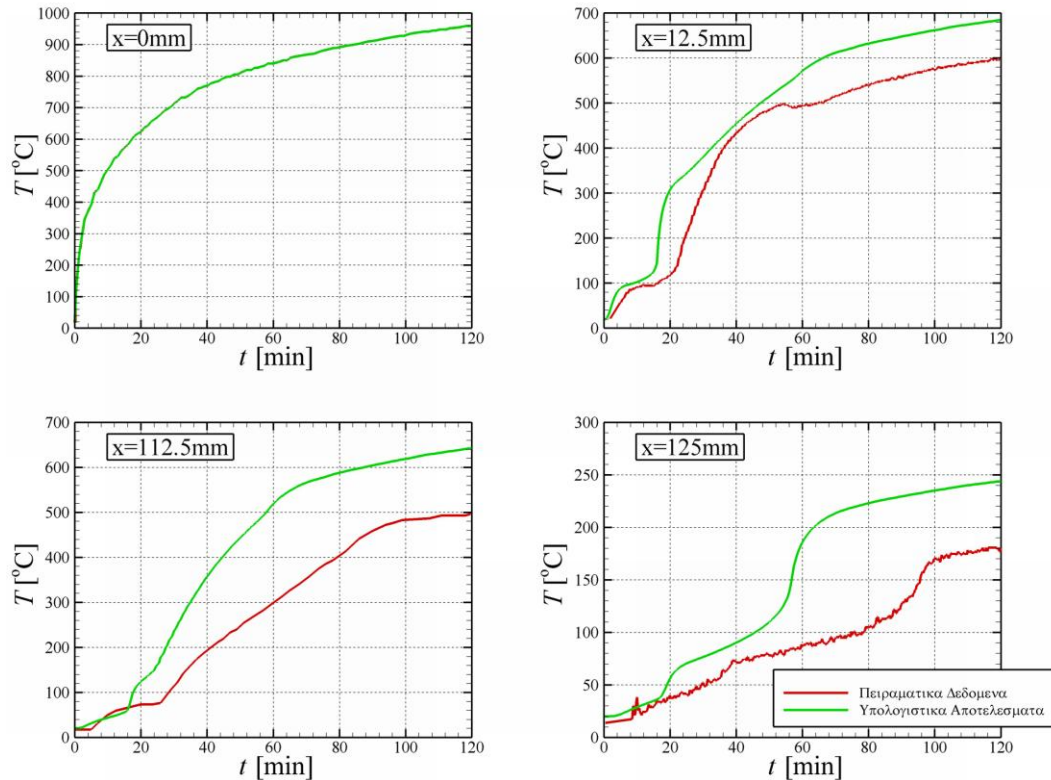
Στην πρώτη περίπτωση, οι φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα) ελήφθησαν από την εργασία των Feng et al. (Feng et al., 2003) (Εικόνα 4-30). Όμως, για την προσέγγιση της μεταβολής της πυκνότητας, σε αντίθεση με τους Feng et al. (Feng et al., 2003) που την θεώρησαν σταθερή, χρησιμοποιήθηκε μεταβλητή καμπύλη. Για τις ιδιότητες του αέρα (πυκνότητα, φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα, ιξώδες) κατόπιν έρευνας στο διαδίκτυο,

επιλέχθηκαν οι κατάλληλες τιμές.



**Εικόνα 4-30 Καμπύλες φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας (Feng et al., 2003)**

Στην Εικόνα 4-31 συγκρίνονται οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης με τα πειραματικά δεδομένα. Παρατηρείται ότι θέση  $x=0\text{mm}$ , οι προλέξεις ταυτίζονται με τα πειραματικά δεδομένα, γεγονός που είναι λογικό εφόσον τα πειραματικά δεδομένα στη θέση αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί ως οριακή συνθήκη. Παρατηρώντας συνολικά τα υπολογιστικά αποτελέσματα και στις τρεις θέσεις ( $x=12.5\text{mm}$ ,  $112.5\text{mm}$ ,  $125\text{mm}$ ), δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Και τούτο διότι η υπολογιζόμενη θερμοκρασιακή κατανομή είναι κατά πολύ αυξημένη σε σχέση με αυτή του πειράματος, και σε ορισμένα σημεία η μεταξύ τους διαφορά ξεπερνά τους  $100^\circ\text{C}$ . Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.



**Εικόνα 4-31 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης με τα πειραματικά δεδομένα**

Το γεγονός ότι οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα δεν προσομοίωσαν με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, μπορεί να οφείλεται σε ποικίλους λόγους. Οι πιο επικρατέστεροι από αυτούς είναι:

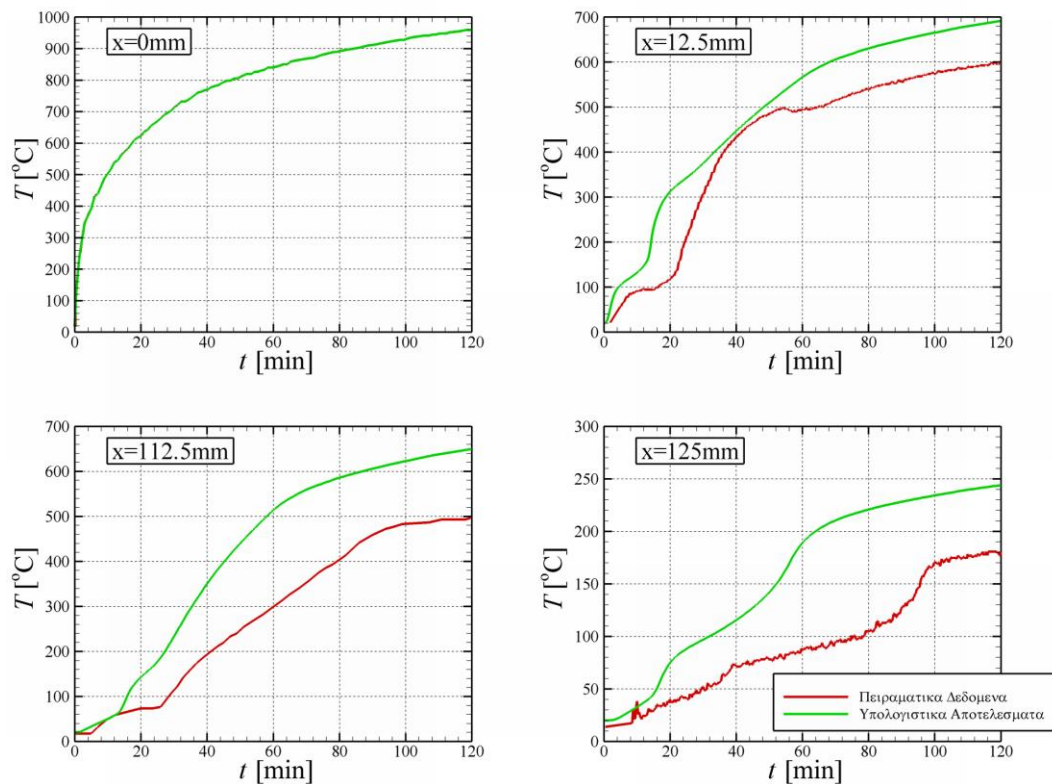
- Οι φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας να μην είναι οι σωστές
- Η μεταφορά του υδρατμού μέσα από τις γυψοσανίδες δεν έχει ληφθεί υπόψη
- Τα θερμοστοιχεία που είναι τοποθετημένα στην εσωτερική πλευρά των γυψοσανίδων (στο διάκενο) βρίσκονται κάτω από το μεταλλικό ορθοστάτη

Έτσι, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη με στόχο να ερευνηθεί η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στα αποτελέσματα.

#### 4.4.5 Επίδραση φυσικών ιδιοτήτων

Όπως φάνηκε και παραπάνω, οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα διέφεραν σε αρκετό βαθμό από τα πειραματικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των Feng et al. (Feng et al., 2003) Έτσι, λοιπόν, έγιναν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες των γυψοσανίδων (1) και (3) που αναφέρονται στην εργασία των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi, 2009)

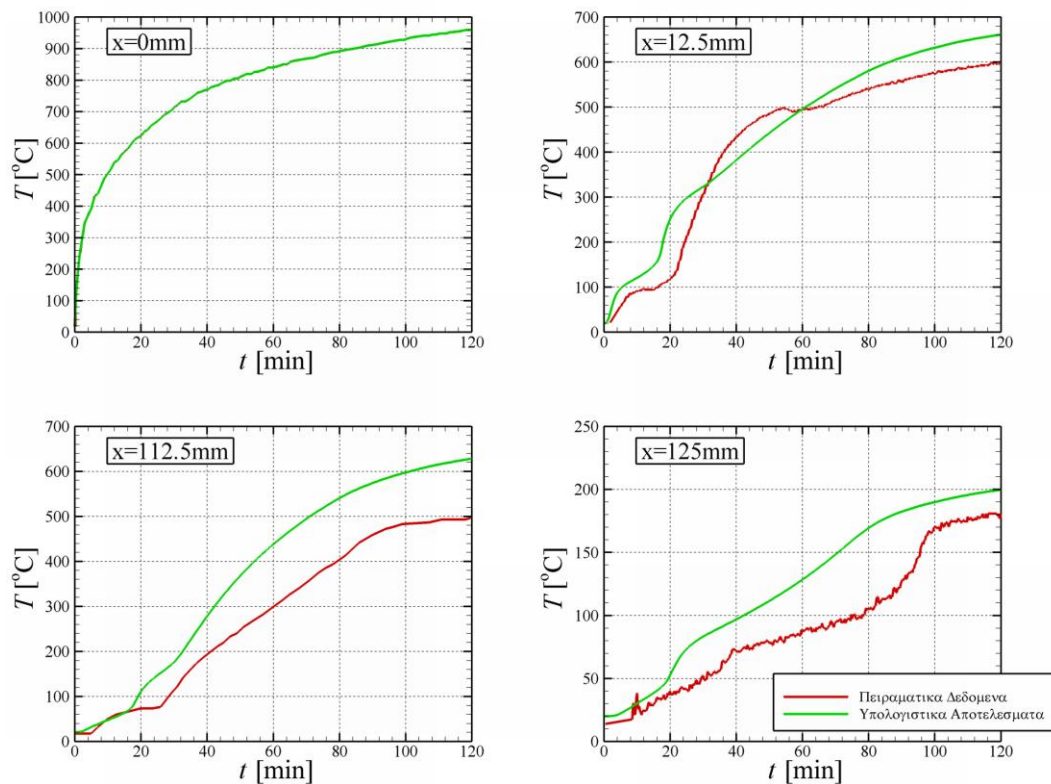
και απεικονίζονται στην Εικόνα 4-21. Οι ιδιότητες του αέρα, καθώς και οι οριακές συνθήκες παρέμειναν ίδιες με τις προηγούμενες προσομοιώσεις.



**Εικόνα 4-32 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (1), σύμφωνα με την Εικόνα 4-21, με τα πειραματικά δεδομένα**

Στην Εικόνα 4-32 και στην Εικόνα 4-33 συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (1) και (3), αντίστοιχα, με τα πειραματικά δεδομένα. Οι προλέξεις με τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (1) των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi , 2009) δεν διαφέρουν πολύ σε σύγκριση με τις προλέξεις με τις φυσικές ιδιότητες των Feng et al., (Feng et al., 2003). Και πάλι οι αποκλίσεις μεταξύ των προλέξεων και των πειραματικών δεδομένων είναι αρκετά μεγάλες. Από την άλλη, τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (3) των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi , 2009), είναι αισθητά βελτιωμένα σε σχέση με τα προηγούμενα. Η γυψοσανίδα (3) είναι ελαφρώς βαρύτερη από την γυψοσανίδα (1), έχει δηλαδή μεγαλύτερη πυκνότητα, ενώ έχει μικρότερη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα και φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα από την γυψοσανίδα (1). Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με πιο

αργό ρυθμό, αποτέλεσμα αναμενόμενο, δεδομένου ότι γυψοσανίδα (3) έχει μικρότερο συντελεστή θερμικής διάχυσης από την γυψοσανίδα (1).



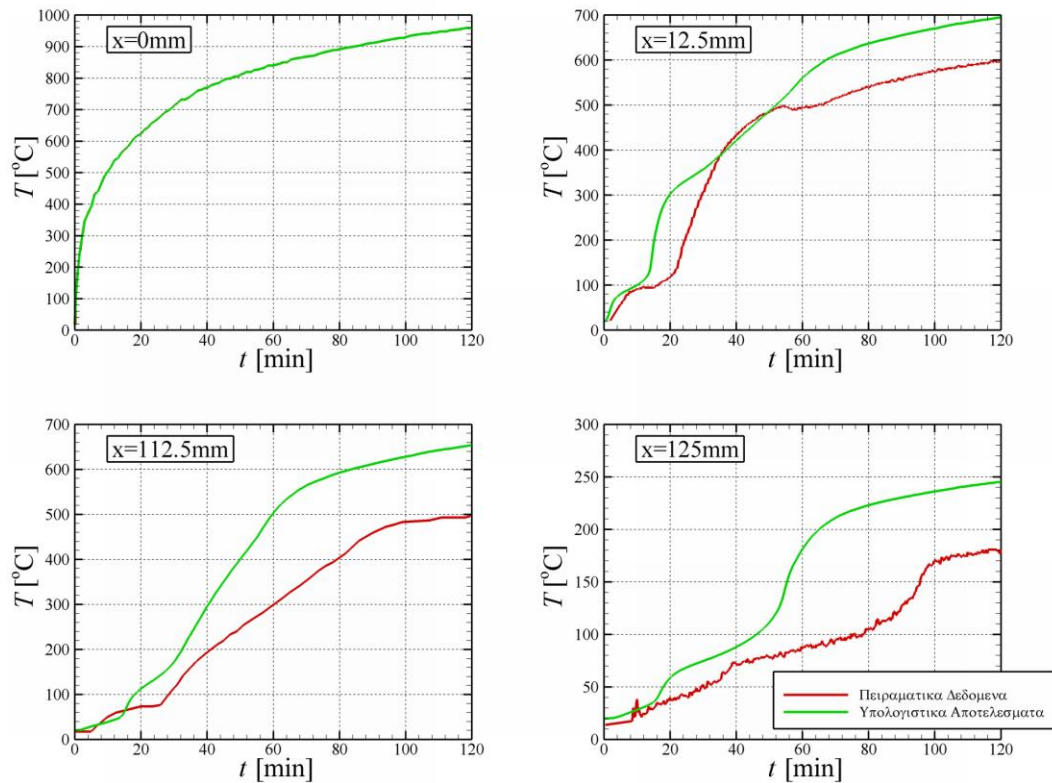
**Εικόνα 4-33 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (3), σύμφωνα με την Εικόνα 4-21, με τα πειραματικά δεδομένα**

#### 4.4.6 Επίδραση του συντελεστή διόρθωσης, $f_i$ , λόγω μεταφοράς μάζας

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή διόρθωσης μάζας  $f_i$  λόγω μεταφοράς μάζας στα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες των γυψοσανίδων (1) και (3) των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi, 2009), κρατώντας τις ιδιότητες του αέρα μέσα στο διάκενο και τις οριακές συνθήκες ίδιες με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Ο συντελεστής διόρθωσης λόγω μεταφοράς μάζας τέθηκε ίσος με  $f_i=1.45$ .

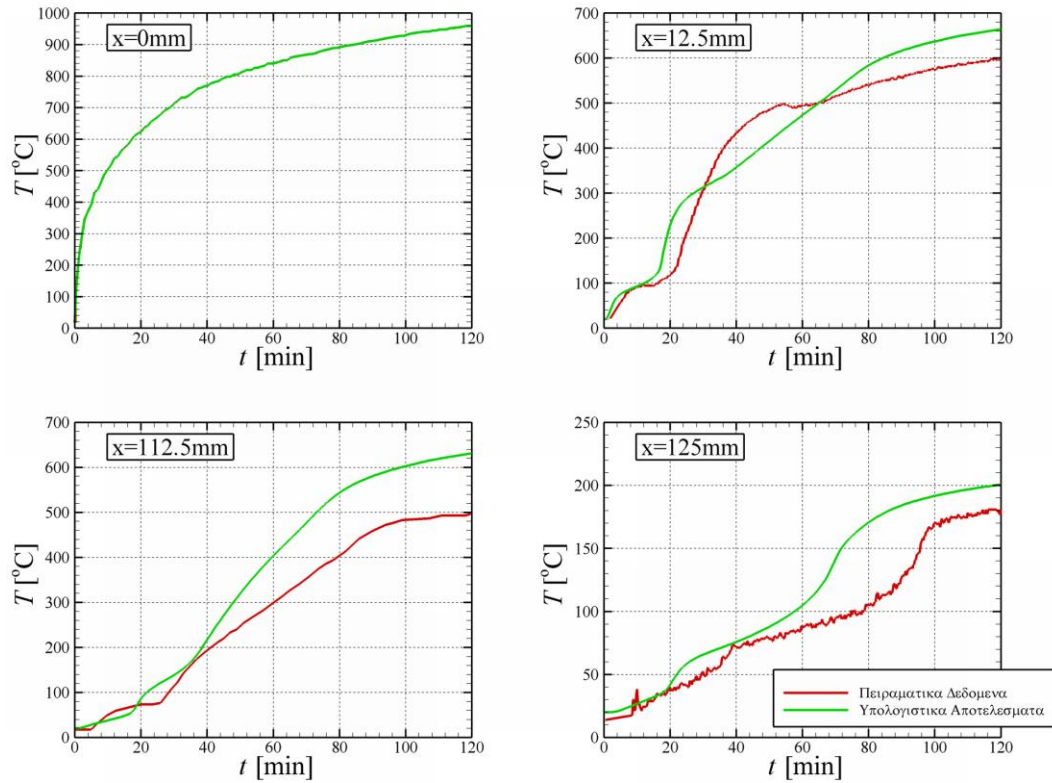
Στην Εικόνα 4-34 και την Εικόνα 4-35 συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (1) και της γυψοσανίδας (3), σύμφωνα με την Εικόνα 4-21, καθώς και τον συντελεστή διόρθωσης λόγω μεταφοράς μάζας, με τα πειραματικά δεδομένα. Οι προλέξεις που προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της μεταφοράς μάζας παρουσιάζουν

μια σχετική βελτίωση σε σύγκριση με αυτές που προέκυψαν χωρίς τον συνυπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης. Όπως παρατηρείται, και στις δύο περιπτώσεις, τα υπολογιστικά αποτελέσματα υποεκτιμούν, χρονικά, το φαινόμενο της αφυδάτωσης (εξελίσσεται ταχύτερα από ότι στα πειράματα), κάτι που σημαίνει ότι η ενέργεια που απορροφάει η γυψοσανίδα στους υπολογισμούς είναι μικρότερη από την πραγματική που απορροφάται στο πείραμα.



**Εικόνα 4-34 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (1) και τον συντελεστή διόρθωσης λόγω μεταφοράς μάζας, σύμφωνα με την Εικόνα 4-21, με τα πειραματικά δεδομένα**





**Εικόνα 4-35 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (3) και τον συντελεστή διόρθωσης λόγω μεταφοράς μάζας, σύμφωνα με την Εικόνα 4-21, με τα πειραματικά δεδομένα**

4.4.7 Επίδραση του μεταλλικού ορθοστάτη

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα θερμοστοιχεία που είναι τοποθετημένα πάνω στις γυψοσανίδες και βρίσκονται στο διάκενο, καλύπτονται από τους μεταλλικούς ορθοστάτες. Άρα, θα πρέπει να ερευνηθεί η επίδραση των μεταλλικών ορθοστατών στα αποτελέσματα, αφού στο σημείο που γίνεται η μέτρηση, μεταξύ της γυψοσανίδας και του διακένου παρεμβάλλεται άλλο υλικό. Ο Πίνακας 4-3 αναγράφει τις φυσικές ιδιότητες του μεταλλικού ορθοστάτη που χρησιμοποιηθήκαν στις προσομοιώσεις.

**Πίνακας 4-3 Φυσικές ιδιότητες του μεταλλικού ορθοστάτη**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$k$ [W/m/K]	$C_p$ [J/kg/K]
7850	$k = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \times t$ $20^\circ C \leq \theta \leq 800^\circ C$	$C_p = 425 + 7.733 \times 10^{-1} \theta - 1.69 \times 10^{-3} \theta^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta^3$ $20^\circ C \leq \theta \leq 600^\circ C$

---


$$k = 27.3,$$

$$800^{\circ} C \leq \theta \leq 1200^{\circ} C$$

$$C_p = 666 + \frac{13002}{738 - \theta},$$

$$600^{\circ} C \leq \theta \leq 735^{\circ} C$$

$$C_p = 545 + \frac{17820}{\theta - 731},$$

$$735^{\circ} C \leq \theta \leq 900^{\circ} C$$

$$C_p = 650,$$

$$900^{\circ} C \leq \theta \leq 1200^{\circ} C$$

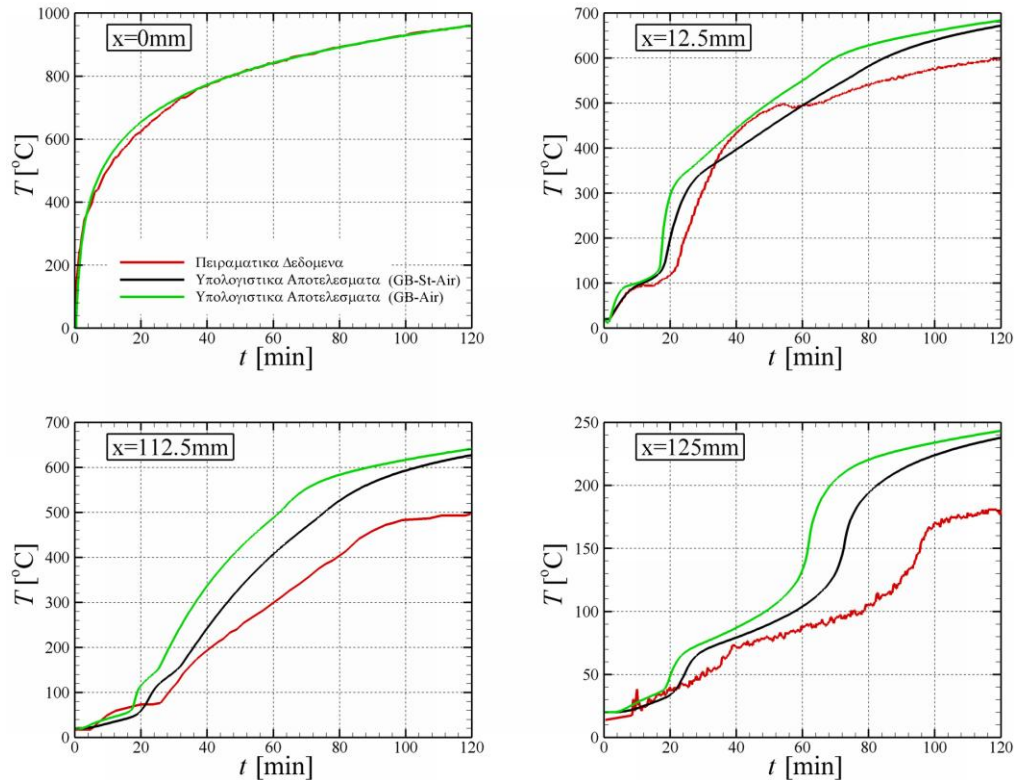

---

#### 4.4.7.1 Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Για να συμπεριληφθεί η επίδραση των χαλύβδινων στηριγμάτων θα πρέπει να αλλαχθούν οι τομείς, αλλά και ο αριθμός των κόμβων του πλέγματος. Έτσι, ορίζονται 5 τομείς, Οι δυο από τους οποίους ανήκουν στις γυψοσανίδες (0 – 12.5mm) και (112.5 – 125mm), οι άλλοι δυο στους χαλύβδινα ορθοστάτες (12.5 – 13.7mm) και (111.3 – 112.5 mm) και ο τελευταίος στο διάκενο, όπου υπάρχει αέρας (13.7 – 111.3mm). Για την διακριτοποίηση και την κατασκευή του πλέγματος, θεωρήθηκε χωρικό βήμα 0.1 mm, που αντιστοιχεί σε 1251 κόμβους, και χρονικό βήμα 0.05 sec.

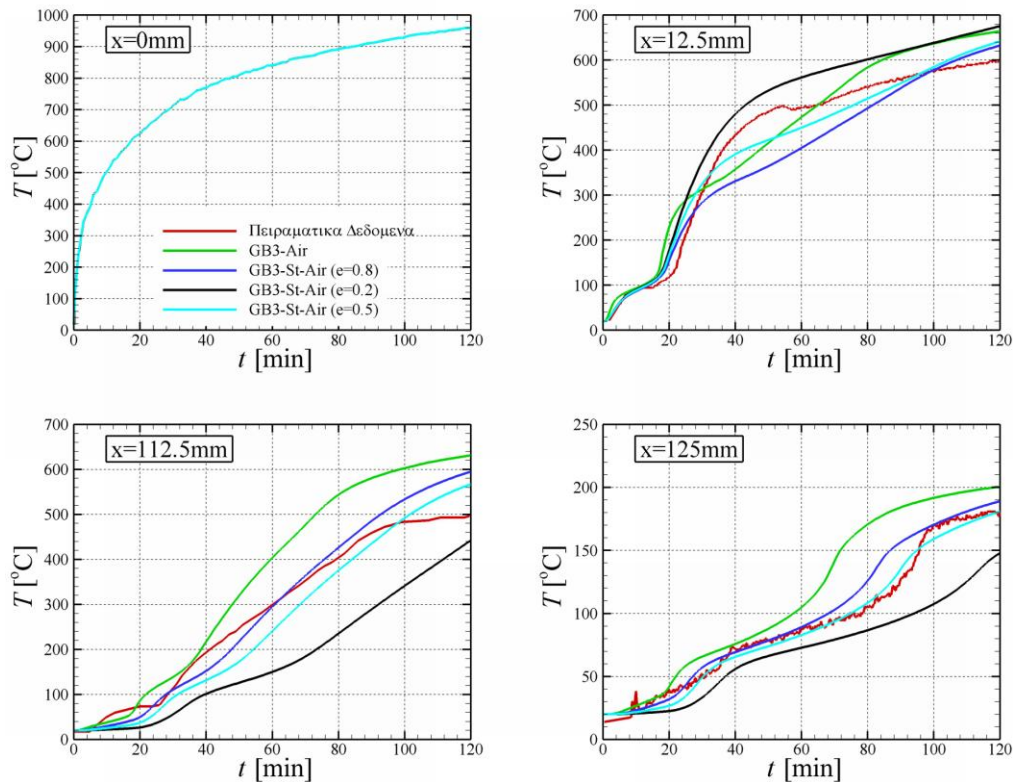
#### 4.4.7.2 Σύγκριση προλέξεων με τα πειραματικά δεδομένα

Στην Εικόνα 4-36 συγκρίνονται οι προλέξεις της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την επίδραση του μεταλλικού ορθοστάτη. Οι φυσικές ιδιότητες τόσο για τη γυψοσανίδα όσο και για το μεταλλικό ορθοστάτη ελήφθησαν υπόψη από την εργασία των Feng et al., (Feng et al., 2003). Όπως παρατηρείται, η επίδραση των μεταλλικών ορθοστατών στα αποτελέσματα είναι αρκετά σημαντική και οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα.



**Εικόνα 4-36 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, λαμβάνοντας (μαύρη γραμμή) ή όχι (πράσινη γραμμή) υπόψη το μεταλλικό ορθοστάτη, με τα πειραματικά δεδομένα**

Δεδομένου της επίδρασης του μεταλλικού ορθοστάτη, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (3) των Ghazi Wakili και Hugi, (Ghazi Wakili & Hugi, 2009) με την επίδραση του συντελεστή  $f_i$ , η οποία είχε δώσει τα βέλτιστα αποτελέσματα κατά τους προηγούμενους υπολογισμούς. Στην Εικόνα 4-37 συγκρίνονται οι προλέξεις της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη το μεταλλικό ορθοστάτη και με διαφορετικούς συντελεστές εκπομπής ακτινοβολίας για τον ορθοστάτη, με τα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας του ορθοστάτη που επιλέχθηκαν ήταν  $\varepsilon=0.8$ ,  $0.5$  και  $0.2$ , αντίστοιχα. Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται ότι η καλύτερη προσέγγιση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων και πειραματικών δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τους συντελεστές εκπομπής  $\varepsilon=0.5$  και  $\varepsilon=0.8$ . Συγκεκριμένα στις θέσεις  $x=112.5\text{mm}$  και  $x=125\text{mm}$ , η εν λόγω καμπύλες ακολουθούν την κλίση της καμπύλης των πειραματικών δεδομένων, ενώ οι τιμές της θερμοκρασίας τείνουν να παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση από όλους τους μέχρι τώρα υπολογισμούς.



**Εικόνα 4-37 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη το μεταλλικό ορθοστάτη και με διαφορετικούς συντελεστές εκπομπής ακτινοβολίας για τον ορθοστάτη, με τα πειραματικά δεδομένα**

Είναι φανερό ότι η επίδραση του μεταλλικού ορθοστάτη, αλλά και ο συντελεστής εκπομπής, είναι δύο παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τις προσομοιώσεις. Τελικά, τα βέλτιστα αποτελέσματα φαίνεται να προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της γυψοσανίδας (3) των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi, 2009), λαμβάνοντας υπόψη τη επίδραση του μεταλλικού ορθοστάτη και χρησιμοποιώντας συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon=0.8$ .

## 4.5 Σύνθετη διάταξη γυψοσανίδας με χαλύβδινους ορθοστάτες και ενδιάμεση μόνωση

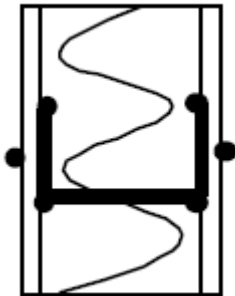
### 4.5.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος

Το δοκίμιο απαρτίζεται από δύο γυψοσανίδες που συγκροτούνται από χαλύβδινους ορθοστάτες, όπως και αυτό που μελετήθηκε στην παράγραφο 4.4, με τη διαφορά ότι το διάκενο είναι καλυμμένο με μονωτικό υλικό, συνολικού πάχους 129mm (Εικόνα 4-38). Οι γυψοσανίδα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις

ήταν η γυψοσανίδα (3) των Ghazi Wakili και Hugi (Ghazi Wakili & Hugi , 2009), ενώ όσον αφορά τη μόνωση, πρόκειται για πετροβάμβακα (Isowool 1000), χαρακτηριστικά  $\rho=25\text{kg/m}^3$ ,  $k=0.036\text{W/m/K}$  και  $C_p=840\text{J/kg/K}$  (Feng et al., 2003). Ύστερα από εκτεταμένη έρευνα στη βιβλιογραφία βρέθηκε συνάρτηση της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης με τη θερμοκρασίας σύμφωνα με την Εξίσωση 4-7.

$$k(\text{W / mK}) = 0.0333e^{0.0035T(^{\circ}\text{C})}$$

#### Εξίσωση 4-7



**Εικόνα 4-38 Διάταξη δοκιμίου με εσωτερική μόνωση και θέση των θερμοστοιχείων**

#### 4.5.2 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πρώτες δύο σειρές υπολογισμών είναι οι ίδιες με αυτές της προηγούμενης περίπτωσης της παραγράφου 4.4, όσον αφορά τις εξωτερικές επιφάνειες της γυψοσανίδας. Στην ένωση των γυψοσανίδων με τη μόνωση θεωρείται συνέχεια θερμοροής και κοινή θερμοκρασία. Για την τελευταία σειρά υπολογισμών θεωρήθηκε ότι το μονωτικό υλικό είναι διάφανο και ότι υπάρχει μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολίας μέσω του μονωτικού υλικού με συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon=0.5$ .

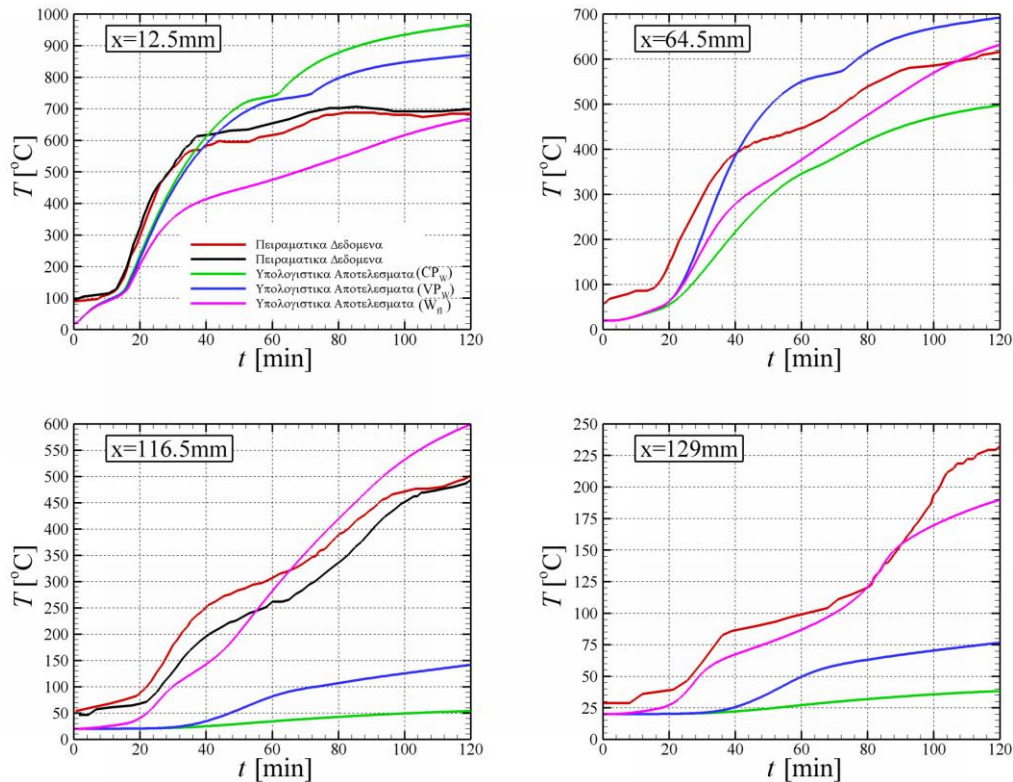
#### 4.5.3 Στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Ορίστηκαν και πάλι 5 τομείς, οι δυο από τους οποίους αφορούν τις γυψοσανίδες (0 – 12.5mm) και (116.5 – 129mm), οι άλλοι δυο τα χαλύβδινα στηρίγματα (12.5 – 14mm) και (115 – 116.5mm) και ο τελευταίος τον χώρο που καλύπτεται από το μονωτικό υλικό (14 – 115mm). Για την διακριτοποίηση και την κατασκευή του πλέγματος, διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στους υπολογισμούς με σταθερές ιδιότητες μονωτικού υλικού θεωρήθηκε χωρικό βήμα 0.5mm, που αντιστοιχεί σε 259 κόμβους, και χρονικό βήμα 0.005sec. Στους υπολογισμούς με μεταβλητές

ιδιότητες μονωτικού υλικού, αλλά και σε αυτούς που προσομοιώνεται το μονωτικό ως ρευστό, θεωρήθηκε χωρικό βήμα 0.1mm, που αντιστοιχεί σε 1291 κόμβους, και χρονικό βήμα 0.005 sec.

#### 4.5.4 Σύγκριση προλέξεων με τα πειραματικά δεδομένα

Στην Εικόνα 4-39 συγκρίνονται οι προλέξεις της χρονικής εξάρτησης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, με τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα οι προλέξεις που έγιναν αφορούσαν σταθερές και μεταβλητές ιδιότητες της μόνωσης, ενώ εξετάστηκε και η επίδραση της ακτινοβολίας μέσα από τη μόνωση. Επιλέχθηκε η γυψοσανίδα (3) των G.Wakili και Hugi, (Ghazi Wakili & Hugi, 2009) καθώς και η επίδραση της μεταφοράς μάζας του υδρατμού μέσω του συντελεστή διόρθωσης ( $f_i=1.45$ ).



**Εικόνα 4-39 Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διάταξης, με σταθερές ( $CP_w$ ) και μεταβλητές ( $VP_w$ ) φυσικές ιδιότητες της μόνωσης και λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία διαμέσου της μόνωσης, με τα πειραματικά δεδομένα**

Στη θέση  $x=12.5\text{mm}$  παρατηρείται ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τις μεταβλητές, αλλά και με τις σταθερές ιδιότητες, της μόνωσης μέχρι το 40<sup>ο</sup> λεπτό

από την αρχή είναι ικανοποιητικά. Από εκεί και μετά δίνουν πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας. Από την άλλη, λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία μέσα από τη μόνωση, στα πρώτα 24min τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια των με τους προηγούμενους υπολογισμούς. Παράλληλα, λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία μέσα από τη μόνωση, η τελική θερμοκρασία του πειράματος προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια. Στη θέση  $x=64.5\text{mm}$  καμία από τις υπολογιστικές προσεγγίσεις δεν καταφέρνει να προσομοιώσει με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα. Εν τούτοις, τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία μέσα από τη μόνωση ακολουθούν καλύτερα την τάση των πειραματικών δεδομένων από τις άλλες δύο προσεγγίσεις. Στη θέσεις  $x=116.5\text{mm}$  και  $x=129\text{mm}$  γίνεται ιδιαίτερα αισθητή η επίδραση της ακτινοβολίας μέσα από τη μόνωση. Ενώ, στις δύο πρώτες περιπτώσεις θερμοκρασία στη θέση  $x=116.5\text{mm}$  είναι αρκετά χαμηλή, στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία αυξάνεται αισθητά.





## Κεφάλαιο 5

### 5 Συμπεράσματα και προοπτικές

Κατόπιν ενδελεχούς μελέτης της συμπεριφοράς των γυψοσανίδων σε συνθήκες φωτιάς, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά εργαλεία, τα συμπεράσματα που προκύψαν είναι πολυάριθμα και ποικίλα. Κατά την σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με την χρήση διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων γυψοσανίδας, διαπιστώθηκε σε κάθε περίπτωση, πως επιδρούν στην πρόλεξη του φαινομένου αφυδάτωσης, καθώς και γενικότερα στη χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στο δοκίμιο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας και φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας μέσα στη γυψοσανίδα, ενώ αύξηση της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υπολογιστικά αποτελέσματα, στα οποία λήφθηκε υπόψη η επίδραση της μεταφοράς μάζας στην συνολική μεταφορά θερμότητας μέσα στην γυψοσανίδα. Ο συνυπολογισμός του φαινομένου της μεταφοράς μάζας έγινε, εμμέσως, μέσω του συντελεστή διόρθωσης,  $f_i$ , ο οποίος εισήχθη στους υπολογισμούς ως πολλαπλασιαστής της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας. Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών, έγινε φανερό ότι η μεταφορά της μάζας του νερού που εξατμίζεται και κυκλοφορεί μέσα στους πόρους της γυψοσανίδας, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην μεταφορά θερμότητας. Έτσι, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης αυτού του φαινομένου και των παραμέτρων του.

Επίσης, σε διατάξεις γυψοσανίδων οι οποίες συγκρατούνται με χαλύβδινους ορθοστάτες, διαπιστώθηκε πως είναι αναγκαία η εισαγωγή στους υπολογισμούς της επίδρασης του ορθοστάτη, στα σημεία εκείνα, όπου το θερμοστοιχείο βρίσκεται ανάμεσα στη γυψοσανίδα και τον ορθοστάτη. Επίσης, στην περίπτωση όπου στο διάκενο της διάταξης περιέχεται μονωτικό υλικό, είναι επιτακτική η ανάγκη χρησιμοποίησης μεταβαλλόμενων φυσικών ιδιοτήτων για τη μόνωση. Ωστόσο, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσίασαν τα αποτελέσματα των υπολογιστικών σειρών που θεωρήσαμε ότι το μονωτικό υλικό έχει ιδιότητες ρευστού και συμπεριλάβαμε μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής μέσω αυτού.

Εν κατακλείδι, η πλειοψηφία των υπολογισμών παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα και η μελέτη αρκετών παραμέτρων, οδήγησε στην βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση της

γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς. Ωστόσο, ευρύ πεδίο παραμένει εύφορο για περαιτέρω διεύρυνση, καθώς και για βελτιστοποίηση των υπολογιστικών/πειραματικών μεθόδων και αποτελεσμάτων.

## Βιβλιογραφία

- Andersson L. and Jansson B., Analytical fire design with gypsum – a theoretical and experiment study, Lund, Sweden: Institute of Fire Safety Design (1987).
- Ang C.N. and Wang Y.C., The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure, *Construction and Building Materials* 18 (2004) 505-515.
- Ang C.N. and Wang Y.C., Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 675-686.
- Axenenko O. and Thorpe G., The modelling of dehydration and stress analysis of gypsum plasterboards exposed to fire, *Computational Materials Science* 6 (1996) 281-294.
- Benichou N. and Sultan M.A., Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures, *Fire and Materials* 29 (2005) 165-179.
- Chang Win-Jin and Weng Cheng-I., An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials, *Int. J. Heat Mass Transfer* 43 (2000) 3621-3632.
- Cheng, A. and D. T. Cheng. Heritage and early history of the boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 29 (2005) 268–302.
- Clancy P., Advances in Modelling Heat Transfer Through Wood Framed Walls in Fire, *Fire and Materials* 25 (2001) 241-254.
- Craft S.T., Isgor B., Hadjisophocleous G. and Mehaffey J.R., Predicting the thermal response of gypsum board subjected to a constant heat flux, *Fire and Materials* 32 (2008) 333-355.
- Feng M., Y.C. Wang, J.M. Davies, Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. Manchester (2002).
- Fredlund B., Modelling of Heat and Mass Transfer in Wood Structures During Fire, *Fire Safety Journal* 20 (1993) 39-69.
- Fredlund B., A model for heat and mass transfer in timber structures during fire. Ph.D. Dissertation, Lund University, Sweden, 1998
- Ghazi Wakili K., Hugi E., Wullschleger L. and Frank T., Gypsum Board in Fire – Modeling and Experimental Validation, *Journal of Fire Sciences* 25 (2007) 267-282.
- Ghazi Wakili K. and Hugi E., Four Types of Gypsum Plaster Boards and their Thermophysical Properties Under Fire Condition, *Journal of Fire Sciences* 27 (2009) 27-43.
- Knudson RM, Schniewind AP. Performance of structural wood members exposed to fire. *Forest Products Journal* 1975; 25(2):23–32.

- Kontogeorgos D. and Founti M., Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1461-1469.
- Kontogeorgos D., HEat TRansfer Analysis (Version 3.0), Technical Reference Guide (2008)
- King G. A., Beretka J. and Ridge M.J., Chemical Changes in Slabs of Case Gypsum during Standard Tests of Resistance to Fire, *Journal of Applied Chemistry Biochemistry* 21 (1971) 159-162.
- Manzello S.L., Gann R.G., Kukuck S.R., Prasad K. and Jones W., Performance of a non-load-bearing steel stud gypsum board wall assembly: Experiments and modelling, *Fire and Materials* 31 (2007) 297-310.
- Manzello S.L., Gann R.G., Kukuck S.R. and David B.L., Influence of gypsum board type (X or C) on real fire performance of partition assemblies, *Fire and Materials* 31 (2007) 425-442.
- Mehaffey JR and Sultan MA., *Fire and Materials: First International Conference and Exhibition*, Washington National Airport, (1992) 247-251.
- Mehaffey J.R., Cuerrier P. and Carisse G., A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Exposed to Fire, *Fire and Materials* 18 (1994) 297-305.
- Mehaffey J.R., Cuerrier P. and Carisse G., A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Walls Exposed to Fire. Canada (2004)
- Novozhilov V., Computation fluid dynamics modelling of compartment fires. *Progress in energy and combustion science* 27 (2001) 611-666.
- Richardson L.R. and Batista M., Revisiting the Component Additive Method for Light-frame Walls Protected by Gypsum Board. Canada (1996)
- Sultan M.A., A Model for Predicting Heat Transfer Through Noninsulated Unloaded Steel-Stud Gypsum Board Wall Assemblies Exposed to Fire, *Fire Technology* 32 (1996) 239-259.
- Takeda H. and Mehaffey J.R., WALL2D: a Model for Predicting Heat Transfer through Wood-Stud Walls Exposed to Fire, *Fire and Materials* 22 (1998) 133-140.
- Thomas G., Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures, *Fire and Materials* 26 (2002) 37-45.
- Wullschleger L. and Ghazi Wakili K., Numerical parameter study of the thermal behavior of a gypsum plaster board at fire temperatures, *Fire and Materials* 32 (2007) 103-119.
- Κυριάκος Κ. Παπαϊωάννου, Εισαγωγή στην πυροπροστασία των κατασκευών. Θεσσαλονίκη (2006).
- Φούντη Μ., Θεωρία καύσης και συστήματα καύσης, Αθήνα (2005)

## Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

<http://www.fireservice.gr>

<http://www.infomaterial.gr>

<http://www.statistics.gr>

<http://www.usfa.dhs.gov/>