



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ**

ΔΗΜΟΣ Α. ΚΟΝΤΟΓΕΩΡΓΟΣ

Δρ. Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Αριθμός Μητρώου: 52117009

Επιβλέπων: καθ. Φούντη Μαρία



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ**

ΔΗΜΟΣ Α. ΚΟΝΤΟΓΕΩΡΓΟΣ

Δρ. Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Αριθμός Μητρώου: 52117009

Επιβλέπων: καθ. Φούντη Μαρία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το ακαδημαϊκό έτος 2017 - 2018, στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Υπολογιστική Μηχανική». Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Μαρία Φούντη, Καθηγήτρια της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά και για τη στήριξη και την καθοδήγησή της, τα οποία συνέβαλαν τα μέγιστα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Μανδηλαρά, μεταδιδακτορικό ερευνητή στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την πολύτιμη βοήθειά του στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και των προτάσεών του, αλλά και του Γεωργίου Σεμιτέλου, Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Δήμος Α. Κοντογεώργος

Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα ξηράς δόμησης αποτελούνται κυρίως από γυψοσανίδες ή/και τσιμεντοσανίδες, τα οποία λόγω της περιεκτικότητάς τους σε κρυσταλλικό νερό, έχουν αυξημένη αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνδυασμό με το χαμηλό τους βάρος τα καθιστά αρκετά ελκυστικά στις σύγχρονες κατασκευές. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας γίνεται για πρώτη φορά η υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Το πλαίσιο πάνω στο οποίο έγινε η υπολογιστική προσομοίωση βασίστηκε στη γενικότερη μεθοδολογία που ακολουθείται σε τέτοιες περιπτώσεις, σύμφωνα με την οποία η θερμική συμπεριφορά ενός υλικού όταν εκτίθεται σε μεταβαλλόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον μελετάται σε τρία στάδια: α) μελέτη της χημικής αντιδραστικότητας του υλικού (μικρό-κλίμακα), β) μελέτη και προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού (μικρό-κλίμακα ή/και μέσο-κλίμακα) και γ) μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενός υλικού ξεχωριστά (μέσο-κλίμακα) ή ως μέρος μιας κατασκευής (μακρό-κλίμακα).

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία εστίασε στα δύο πρώτα στάδια της γενικότερης μεθοδολογίας: α) στις φυσικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες που μελετήθηκαν (μικρό-κλίμακα) και β) τη θερμική συμπεριφορά των τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς (μέσο-κλίμακα). Στο πρώτο στάδιο, ο στόχος ήταν να αναδειχθεί η δυνατότητα μοντελοποίησης ενδόθερμων φυσικό-χημικών διεργασιών μέσω των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες ξηράς δόμησης, ενώ στο δεύτερο στάδιο ο στόχος ήταν να μελετηθεί η εισαγωγή όρων πηγών στην εξίσωση μετάδοσης θερμότητας για τη μοντελοποίηση εξώθερμων φυσικό-χημικών αντιδράσεων. Η μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των υλικών των συστημάτων ξηράς δόμησης που μελετήθηκαν έγινε κυρίως μέσω θεωρητικής ανάλυσης και χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό κώδικα HETRAN. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν κατάλληλα πειραματικά δεδομένα για την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης των φυσικό-χημικών διεργασιών στο εσωτερικό των υλικών, αλλά και πιστοποίησης της ακρίβειας των υπολογισμών.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορούσε δύο τοιχοποιίες ξηράς δόμησης, οι οποίες αποτελούνταν από πέντε διαφορετικές στρώσεις: 1) γυψοσανίδα με υλικά αλλαγής φάσης, 2) διάκενο αέρος στη μια τοιχοποιία και μονωτικό πάνελ κενού στην άλλη τοιχοποιία, 3) απλή γυψοσανίδα, 4) διογκωμένη πολυστερίνη και 5) θερμομονωτικός σοβάς. Αφού προσδιορίστηκαν οι φαινόμενες θερμικές φυσικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες, ενσωματώθηκαν στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα για την αξιολόγηση της ακρίβειας των υπολογισμών. Η σύγκριση έδειξε ότι λαμβάνοντας υπόψη τις ενδόθερμες φυσικό-χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των υλικών είναι δυνατή η ακριβής προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των τοιχοποιιών, μέχρι το σημείο που αρχίζουν να λαμβάνουν χώρα εξώθερμες διεργασίες. Από εκεί και πέρα, οι υπολογισμοί υποεκτιμούν τα πειραματικά δεδομένα, αφού η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα λόγω των εξώθερμων αντιδράσεων δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό, εισήχθησαν όροι πηγής μέσα στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN οι οποίοι προσομοιώνουν τις εξώθερμες αντιδράσεις, όπως είναι η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας της απλής γυψοσανίδας και η οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης. Εισάγοντας στο σύστημα την ενέργεια που εκλύεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις, τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν βελτιώθηκαν σημαντικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί την πρώτη προσπάθεια που γίνεται για την προσομοίωση ενός τόσο πολύπλοκου φυσικού προβλήματος και έχει ως επί μέρους στόχο να αναδείξει τις δυσκολίες που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι φανερό ότι η ολοκληρωμένη προσέγγιση τόσο πολύπλοκων προβλημάτων πρέπει να γίνεται συνδυαστικά τόσο με πειράματα όσο και με υπολογισμούς. Τέλος, η παρούσα εργασία αποδεικνύει τη σημασία του να γίνεται ακριβής υπολογισμός τέτοιων προβλημάτων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η ύπαρξη πειραματικών δεδομένων δεν είναι εφικτή.

ABSTRACT

Drywall systems mainly consist of gypsum boards and/or cement boards, which contain chemically bonded water in their crystal lattice, and thus they have increased fire resistance capability. The latter, in conjunction with the low weight makes drywall systems attractive in modern construction. For that reason, the current thesis studies for the first time the numerical simulation of the thermal behavior of multilayer drywall systems under fire conditions. The study was based on the general methodology followed for studying the thermal behavior of a material under varying temperature conditions, which consist of three basic steps: a) studying the chemical reactivity of the material (micro-scale), b) determination of the effective thermal physical properties of the material (meso-scale), and c) study of the thermal behavior of the material individually (meso-scale) or as part of an overall construction (macro-scale).

The current analysis was focused on the two first steps of the general methodology: a) determination of the effective thermal physical properties of the materials that consist the examined multilayer drywall systems (micro-scale), and b) study of the thermal behavior of the drywall systems under fire conditions (meso-scale). Within the first step, the main target was to prove the capability of modeling endothermic physical-chemical processes through effective physical properties, while the target of the second step was to identify whether the incorporation of different source terms in the heat transfer equation is able to model exothermic physical-chemical properties. In order to study the different phenomena occurring inside the examined multilayer drywall systems when exposed to fire conditions, the computational code HETRAN was used. In addition, several experimental data was used for modelling the physical-chemical processes occurring inside the drywall systems, as well as to assess the accuracy of the predictions.

Two different drywall systems were used in this study for modeling their fire behavior, which comprised five layers: 1) gypsum board incorporating phase change materials, 2) cavity for the first drywall system and vacuum insulation panel for the second drywall system, 3) standard gypsum board, 4) expanded polystyrene, and 5) thermal insulation render (incorporating expanded polystyrene). After the determination of the effective thermal properties for each of the materials, they were incorporated inside the numerical code HETRAN. The predictions were compared with respective experimental data for assessing their accuracy. The comparison revealed that taking into account the endothermic physical-chemical properties through effective thermal properties the accuracy of the predictions were in sound agreement with the experimental results, up to the point where exothermic processes begun to occur. When the exothermic reactions started, the predictions were under estimating the experimental results due to the fact that the incoming energy from the reactions were not taken into consideration in the computational results. Hence, different source terms were incorporated inside the HETRAN code in order to model the exothermic reactions, such as the oxidation of the external paper of the standard gypsum board and the oxidation of the expanded polystyrene. The source terms supplied the overall system with the necessary energy from the exothermic reactions and the predictions were in sound agreement with the experimental results for the overall time evolution.

It should be noted that the current thesis is the first attempt for simulating such a complex physical problem and tries to identify and indicate the computational difficulties that occur. Taking into account the conclusions of this study it is obvious that the overall approach of such difficult problems should be performed both experimentally

and computationally. Finally, this study points out the importance of accurate predictions, especially in cases where there are no experimental data.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΦΩΤΙΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ	1
1.2 ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	3
1.2.1 <i>Ενεργητική πυροπροστασία</i>	4
1.2.2 <i>Παθητική πυροπροστασία</i>	5
1.2.2.1 Προδιαγραφές πυροπροστασίας.....	7
1.3 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	9
1.3.1 <i>Κώδικας κανονιστικού τύπου και κανονισμός σχεδιαστικής απόδοσης</i>	10
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
1.5 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	11
2 ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	13
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
2.2 ΜΙΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ	14
2.2.1 <i>Αρχές θερμικής ανάλυσης και θερμοδομετρίας</i>	15
2.2.2 <i>Φυσικές ιδιότητες υλικού</i>	16
2.3 ΜΕΣΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ	16
2.3.1 <i>Πειραματική διερεύνηση</i>	17
2.3.2 <i>Υπολογιστική προσομοίωση</i>	17
2.4 ΜΑΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ	18
3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	20
3.2.1 <i>Μέθοδος του μετώπου αντίδρασης</i>	20
3.2.2 <i>Μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας</i>	22
3.2.3 <i>Μέθοδος της ενθαλπίας</i>	24

3.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
3.3.1	<i>Ροή μάζας αερίου συστατικού</i>	25
3.3.2	<i>Εξίσωση διατήρησης μάζας</i>	26
3.3.3	<i>Εξίσωση διατήρησης ενέργειας</i>	26
3.4	ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	26
3.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ HETRAN.....	28
3.5.1	<i>Γενικευμένη εξίσωση</i>	29
3.5.2	<i>Διακριτοποίηση φυσικού χώρου και διαφορικών εξισώσεων</i>	29
3.5.3	<i>Διακριτοποίηση οριακών συνθηκών</i>	30
3.5.4	<i>Γενικός αλγόριθμος επίλυσης</i>	31
4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ	
	ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ	33
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	33
4.2.1	<i>Πειράματα χημικής αντιδραστικότητας</i>	34
4.2.2	<i>Πειράματα φούρνου μικρής κλίμακας</i>	36
4.3	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	40
4.3.1	<i>Φυσικές ιδιότητες</i>	40
4.3.1.1	<i>Διάκενο</i>	40
4.3.1.2	<i>Υλικά ξηράς δόμησης</i>	41
4.3.1.3	<i>Συμβατικά μονωτικά υλικά</i>	44
4.3.1.4	<i>Μονωτικά πάνελ κενού</i>	45
4.3.1.5	<i>Θερμομονωτικός σοβάς</i>	46
4.3.2	<i>Οριακές συνθήκες</i>	46
4.3.3	<i>Χημικές αντιδράσεις</i>	47
4.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	47
4.4.1	<i>Ανεξαρτησία πλέγματος</i>	47
4.4.2	<i>Προσομοίωση πειράματος 1</i>	48
4.4.2.1	<i>Οξείδωση ΥΑΦ</i>	49
4.4.2.2	<i>Οξείδωση χάρτινης επιφάνειας γυψοσανίδας</i>	51
4.4.2.3	<i>Οξείδωση διογκωμένης πολυστερίνης και θερμομονωτικού σοβά</i>	55
4.4.3	<i>Προσομοίωση πειράματος 4</i>	56
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
5.1.1	<i>Στοιχεία πρωτοτυπίας</i>	62
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1-1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 2010 ΣΕ: Α) ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ [KARTER M.J., 2011] ΚΑΙ Β) ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΕΤΑΝΙΑ [FIRE STATISTICS GREAT BRITAIN, 2011].	2
ΕΙΚΟΝΑ 2-1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΜΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.	14
ΕΙΚΟΝΑ 2-2 ΜΙΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ: Α) ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ Β) ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑΣ. ..	15
ΕΙΚΟΝΑ 2-3 ΜΕΣΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ (ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΛΙΚΩΝ).	17
ΕΙΚΟΝΑ 2-4 ΜΑΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.	18
ΕΙΚΟΝΑ 3-1 ΜΕΤΩΠΙΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ.	21
ΕΙΚΟΝΑ 3-2 ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ ΣΤΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΟΛΙΚΗ ΠΙΕΣΗ.	27
ΕΙΚΟΝΑ 3-3 ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ ΣΤΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 3-4 ΌΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ.	30
ΕΙΚΟΝΑ 3-5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ HETRAN.	32
ΕΙΚΟΝΑ 4-1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΔΡΑΝΕΣ ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΩΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: (Α) ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ ΜΕ ΥΑΦ, (Β) ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ, (C) ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑΣ, (D) ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ, (Ε) ΘΕΡΜΟΣΟΒΑΣ ΚΑΙ (F) ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΠΑΝΕΛ ΚΕΝΟΥ.	35
ΕΙΚΟΝΑ 4-2. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.	36
ΕΙΚΟΝΑ 4-3. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.	37
ΕΙΚΟΝΑ 4-4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.	38
ΕΙΚΟΝΑ 4-5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: (Α) ΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΦΟΥΡΝΟ, (Β) ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΗ ΠΛΕΥΡΑ, (C) ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΜΕ ΥΑΦ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ, (D) ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ, (Ε) ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ, (F) ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΣΟΒΑ, (G) ΤΗΣ ΜΗ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΚΑΙ (H) ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.	39
ΕΙΚΟΝΑ 4-6. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 4-7. ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.	48
ΕΙΚΟΝΑ 4-8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).	49
ΕΙΚΟΝΑ 4-9. ΟΡΟΣ ΠΗΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ.	49
ΕΙΚΟΝΑ 4-10. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΟΥ ΥΑΦ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).	50
ΕΙΚΟΝΑ 4-11. ΟΡΟΣ ΠΗΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΤΙΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.	51
ΕΙΚΟΝΑ 4-12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΧΑΡΤΙΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).	52
ΕΙΚΟΝΑ 4-13. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΗΣ ΜΙΑΣ ΧΑΡΤΙΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ (ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΗ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΗ ΠΛΕΥΡΑ) ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).	53
ΕΙΚΟΝΑ 4-14. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΟΣ ΟΡΟΣ ΠΗΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΤΙΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΗ ΠΛΕΥΡΑ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ.	54

ΕΙΚΟΝΑ 4-15. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΧΑΡΤΙΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΗΣ ΣΤΑΝΤΑΡΝΤ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).....	55
ΕΙΚΟΝΑ 4-16. ΌΡΟΣ ΠΗΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ, ΤΟΣΟ ΩΣ ΞΕΧΩΡΙΣΤΟ ΣΤΡΩΜΑ, ΟΣΟ ΚΑΙ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟ ΣΟΒΑ.	55
ΕΙΚΟΝΑ 4-17. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 1).	56
ΕΙΚΟΝΑ 4-18. ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΠΑΝΕΛ ΚΕΝΟΥ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 4-19. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 4).....	57
ΕΙΚΟΝΑ 4-20. ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΠΑΝΕΛ ΚΕΝΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	58
ΕΙΚΟΝΑ 4-21. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (HETRAN) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΠΑΝΕΛ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ (ΠΕΙΡΑΜΑ 4).....	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΙΣ ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΤΗΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΕΤΑΝΙΑ ΓΙΑ ΤΟ 2010.	2
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2. ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ – ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΚΛΑΣΕΩΝ.	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-3. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.	8
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ.	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΙΚΩΝ.	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2. ΛΙΣΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.	37
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3. ΧΡΟΝΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΠΙΝΑΚΑ.	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ.	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ (ΕΞΙΣΩΣΗ 4-10).	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΩΝ.	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ.	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-8. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΣΟΒΑ.	46

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικά Σύμβολα

A_f	Συντελεστής γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
B_i	Σταθερά της γραμμικοποιημένης ολοκληρωτικής εξίσωσης	
B_f	Συντελεστής γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
C	Θερμική μάζα	$J m^{-3} K^{-1}$
c	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$J kg^{-1} K^{-1}$
C_f	Συντελεστής γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
$C^{(g)}$	Κατά μάζα συγκέντρωση αερίου συστατικού g	$kg m^3$
C_i	Σταθερά της γραμμικοποιημένης ολοκληρωτικής εξίσωσης	
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση	$J kg^{-1} K^{-1}$
d	Απόσταση	m
D	Συντελεστής διάχυσης	$m^2 s^{-1}$
E	Ενέργεια ανά μονάδα όγκου	$J m^{-3}$
f	Μεταβλητή γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
f	Διάνυσμα μεταβλητών γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
F	Ρυθμός διανύσματος μεταβλητών γενικευμένης εξίσωσης	μ.π. s^{-1}
f_c	Συντελεστής διόρθωσης	
h	Ενθαλπία	$J kg^{-1}$
h_{conv}	Συντελεστής συναγωγής θερμότητας	$W m^{-2} K^{-1}$
h_{rad}	Συντελεστής ακτινοβολίας θερμότητας	$W m^{-2} K^{-1}$
h_m	Συντελεστής συναγωγής μάζας	$m s^{-1}$
j	Διάνυσμα ροής μάζας ανά μονάδα επιφάνειας	$kg s^{-1} m^{-2}$
k	Θερμική αγωγιμότητα	$W m^{-1} K^{-1}$
K	Διαπερατότητα	m^2
L	Μήκος	m

m	Μάζα	kg
\dot{m}''	Ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης μάζας	kg s ⁻¹
MW	Μοριακό βάρος	kg kmol ⁻¹
\mathbf{n}	Κάθετο διάνυσμα	
N_F	Αριθμός ρευστών συστατικών	
N_G	Αριθμός αερίων συστατικών	
N_L	Αριθμός υγρών συστατικών	
N_p	Αριθμός πόρων ανά μονάδα όγκου	m ⁻³
N_R	Αριθμός αντιδράσεων	
N_S	Αριθμός στερεών συστατικών	
p	Μερική πίεση	Pa
P	Ολική πίεση	Pa
Pr	Αριθμός Prandtl	
\mathbf{q}	Διάνυσμα ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας	W m ⁻²
\dot{Q}''	Ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης μιας ποσότητας ανά μονάδα όγκου	μ.π. m ⁻³
Q_f	Όρος πηγής γενικευμένης εξίσωσης	μ.π.
r	Ρυθμός αντίδρασης	s ⁻¹
R	Θερμική αντίσταση	m ² K W ⁻¹
R_g	Παγκόσμια σταθερά αερίων, 8314	J kmol ⁻¹ K ⁻¹
s_r	Ποσοστό συρρίκνωσης	
Sc	Αριθμός Schmidt	
t	Χρόνος	s
T	Θερμοκρασία	K
\mathbf{x}	Διάνυσμα θέσης	m
\mathbf{X}_B	Διάνυσμα θέσης οριακού κόμβου	m

Ελληνικά Σύμβολα

β	Ρυθμός θέρμανσης	$K \text{ min}^{-1}$
ΔH	Ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απορροφάται ή εκλύεται από μια διαδικασία	$J \text{ kg}^{-1}$
δm	Ποσοστό απώλειας μάζας	
δt	Χρονικό βήμα	s
ε	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας τοιχώματος	
μ	Δυναμική συνεκτικότητα	Pa s
ρ	Πυκνότητα	kg m^{-3}
σ	Σταθερά Stefan – Boltzmann, 5.669×10^{-8}	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
ϕ	Πορώδες	
Εκθέτες		
δ	Εκθέτης αερίου συστατικού	
Δείκτες		
0	Αρχική κατάσταση	
<i>air</i>	Αέρας	
<i>amb</i>	Περιβάλλον	
<i>cond</i>	Αγωγή	
<i>conv</i>	Συναγωγή	
<i>cav</i>	Διάκενο	
<i>diff</i>	Διάχυση	
<i>ES</i>	Εξωτερική πηγή	
<i>eff</i>	Φαινόμενος	
δ	Δείκτης αερίου συστατικού	
<i>G</i>	Αέριο συστατικό	
<i>i</i>	Δείκτης υπολογιστικού κόμβου	
<i>in</i>	Είσοδος	
<i>j</i>	Δείκτης κλάσματος μετατροπής ή ρυθμού αντίδρασης	

<i>l</i>	Δείκτης για υγρά συστατικά
<i>L</i>	Υγρό συστατικό
<i>M</i>	Μάζα
<i>out</i>	Έξοδος
<i>pres</i>	Πίεση
<i>r</i>	Δείκτης αντίδρασης
<i>rad</i>	Ακτινοβολία
<i>ref</i>	Αναφορά
<i>s</i>	Δείκτης στερεού συστατικού
<i>S</i>	Στερεό συστατικό

Ειδικά Σύμβολα

<i>d</i>	Ολική παράγωγος
<i>δ</i>	Μερική παράγωγος
∇	Ανάδελτα

Αρτικόλεξα

<i>HETRAN</i>	HEat TRansfer ANalysis
<i>ΑΕΠ</i>	Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν
<i>ΑΘΕ</i>	Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας
<i>ΑΠΕ</i>	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
<i>ΔΘΣ</i>	Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης
<i>ΜΘ</i>	Μέθοδος Θερμιδομετρίας
<i>ΜΘΑ</i>	Μέθοδος Θερμικής Ανάλυσης
<i>ΥΑΦ</i>	Υλικά Αλλαγής Φάσης
<i>ΥΡΔ</i>	Υπολογιστική Ρευστό-Δυναμική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιστορικά, η φωτιά είναι μια από τις αρχαιότερες ανακαλύψεις που έκανε ο άνθρωπος. Τα αρχαιότερα ίχνη της είναι εκείνα που βρέθηκαν στο σπήλαιο Πετραλώνων της Χαλκιδικής, τα οποία χρονολογούνται περίπου 1050000 χρόνια πριν [Παπαϊωάννου, 2006]. Έκτοτε, ο ρόλος που κατείχε και κατέχει στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων είναι ιδιαίτερα σημαντικός, έως απαραίτητος. Για το λόγο αυτό, η ανθρωπότητα έχει επενδύσει πάρα πολλά στην τεχνολογική εφαρμογή της φωτιάς μέσω της ελεγχόμενης καύσης. Από την άλλη μεριά, όμως, δεν έχει γίνει η απαραίτητη επένδυση όσον αφορά την αντιμετώπιση της σε περιπτώσεις όπου μπορεί να γίνει καταστροφική [Quintiere, 2006].

Η μη ελεγχόμενη φωτιά μπορεί να έχει καταστροφικές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον του. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το συνολικό κόστος των πυρκαγιών των προηγμένων κρατών κυμαίνεται περίπου στο 1% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος (ΑΕΠ) [Founti & Cox, 2000, Παπαϊωάννου, 2006, Quintiere, 2006]. Το κόστος μιας πυρκαγιάς μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες: τις ζημιές και τις απώλειες, εξαιτίας της πυρκαγιάς, και τις δαπάνες πρόληψης και περιορισμού των παραπάνω ζημιών. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι άμεσες και έμμεσες ζημιές των κατασκευών ή των φυσικών πόρων (π.χ. δάσος), αλλά και η αποτίμηση του κόστους αποζημίωσης των θυμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πυρκαγιές που ξέσπασαν στον Ελληνικό χώρο το καλοκαίρι του 2007, όπου κήκαν περίπου 2688340 στρέμματα γης¹, με αποτέλεσμα το θάνατο τουλάχιστον 63 ανθρώπων², ενώ το συνολικό κόστος των καταστροφών έφτασε τα 5 εκατομμύρια ευρώ³. Στην δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται οι δαπάνες πυροπροστασίας, οι δημόσιες δαπάνες για τις πυροσβεστικές υπηρεσίες, τα ασφαλιστικά έξοδα και οι δαπάνες για την επιστημονική έρευνα των προβλημάτων πυροπροστασίας.

1.1 Φωτιές σε κτίρια

Ανάμεσα στο σύνολο των συμβάντων που σχετίζονται με τις μη ελεγχόμενες πυρκαγιές, οι φωτιές σε κτίρια είναι από τα πιο συχνά [Yeoh & Yuen, 2009]. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει τα στατιστικά στοιχεία τριών βασικών ειδών πυρκαγιών, όπως είναι οι φωτιές σε κτίρια (δομικές πυρκαγιές), οι φωτιές σε οχήματα και οι εξωτερικές πυρκαγιές (π.χ. φωτιές σε δάση), για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [Karter, 2011] και τη Μεγάλη Βρετανία [Fire Statistics Great Britain, 2011], για το 2010. Για καλύτερη εποπτεία, τα στοιχεία του Πίνακα 1-1, απεικονίζονται σε ποσοστιαία βάση στην Εικόνα 1-1. Είναι φανερό ότι οι φωτιές σε κλειστούς χώρους αποτελούν τη μεγαλύτερη αιτία θανάτων και τραυματισμών, σε περιπτώσεις πυρκαγιών, παρά το γεγονός ότι δεν είναι πρώτες σε συχνότητα. Ο περιορισμένος χώρος μέσα σε ένα κτίριο, σε συνδυασμό με τα τέσσερα βασικά παράγωγα μιας πυρκαγιάς, που είναι τα καυσαέρια,

¹ "Συνεχίζεται η μάχη με τις φλόγες σε Ηλεία και Εύβοια". Ναυτεμπορική on Line. 28/08/2007.

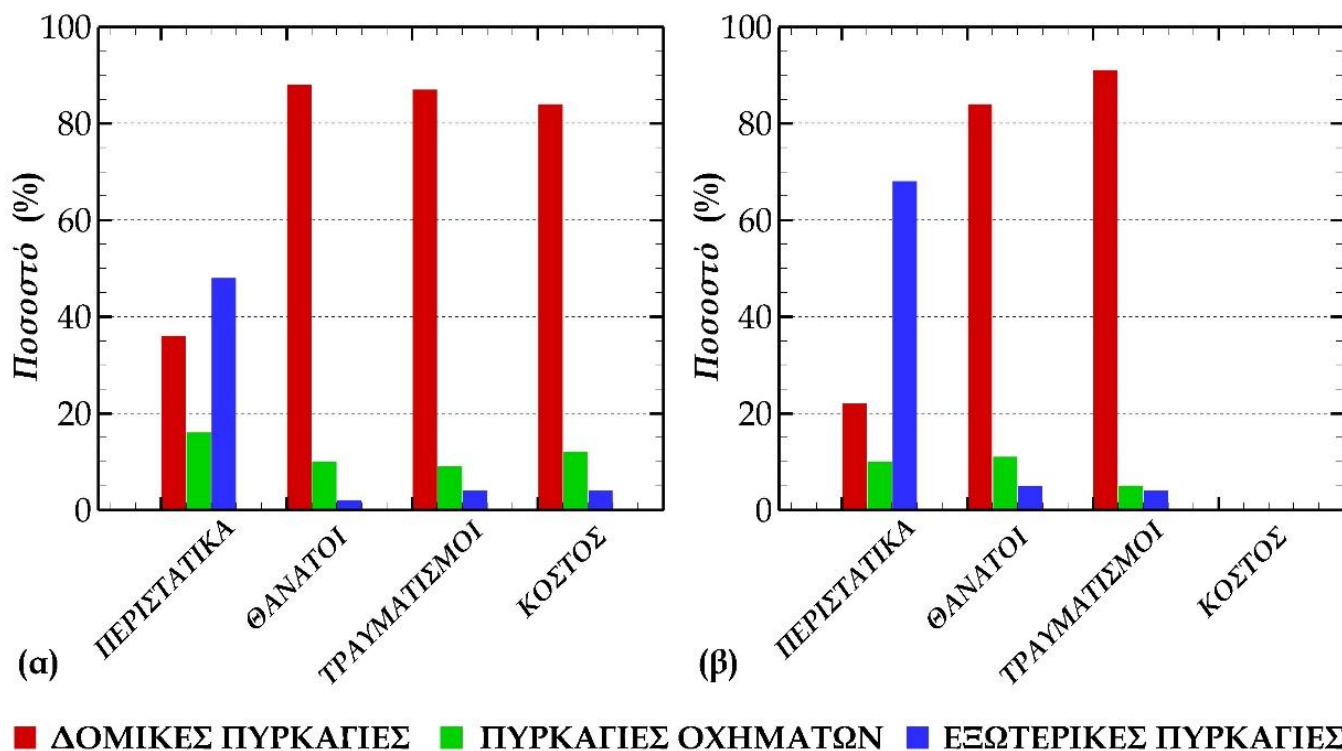
² "Για πέμπτη ημέρα παραδομένες στις φλόγες Πελοπόννησος και Εύβοια". in.gr. Ανακτήθηκε την 27^η Αυγούστου 2007.

³ "Griechenland atmet auf". n-tv.de. 28/08/2007. Ανακτήθηκε την 28 Αυγούστου 2007.

ο καπνός, οι φλόγες και η θερμότητα, επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στη φυσιολογία και τη συμπεριφορά των ανθρώπων κατά τη διάρκεια και μετά την πυρκαγιά. Έτσι, η εισπνοή των καυσαερίων και του θερμού αέρα μπορεί να έχει σοβαρές τοξικολογικές συνέπειες για τον οργανισμό, ενώ η έλλειψη ορατότητας εξαιτίας του καπνού και των φλογών οδηγεί συχνά σε απώλεια των φυσικών ικανοτήτων και της ψυχραιμίας ενός ατόμου, με αποτέλεσμα να μη λειτουργεί σωστά κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς [Παπαϊωάννου, 2006].

Πίνακας 1-1 Στατιστικά πυρκαγιών στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και τη Μεγάλη Βρετανία για το 2010.

Είδος Πυρκαγιάς	Περιστατικά	Θάνατοι	Τραυματισμοί	Κόστος (×10 ⁹)
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής				
Δομικές	482000	2755	15420	9.7\$
Οχήματα	215500	310	1590	1.4\$
Εξωτερικές	634000	55	710	0.5\$
Σύνολο	1331500	3120	17720	11.6\$
Μεγάλη Βρετανία				
Δομικές	69600	325	10142	-
Οχήματα	32500	44	520	-
Εξωτερικές	216900	19	472	-
Σύνολο	319000	388	11134	-



Εικόνα 1-1 Στατιστικά πυρκαγιών για το 2010 σε: α) Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [Karter M.J., 2011] και β) Μεγάλη Βρετανία [Fire Statistics Great Britain, 2011].

1.2 Πυροπροστασία

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται ιδιαίτερα εμφανής η αναγκαιότητα που υπάρχει για τον έλεγχο και την πρόληψη της διάδοσης μιας πυρκαγιάς μέσα σε κλειστούς χώρους (πυροπροστασία). Για το λόγο αυτό, κάθε κράτος θεσπίζει διάφορους κανόνες πυροπροστασίας, με στόχο την αντιμετώπιση του κινδύνου μιας πυρκαγιάς, πρωτίστως για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, αλλά και για την ασφάλεια της κατασκευής. Στη συνέχεια, αναφέρεται ενδεικτικά η νομοθεσία πυροπροστασίας που ισχύει στην Ελλάδα:

- Π.Δ. 41 (ΦΕΚ 80Α' /07.05.2018) «Κανονισμός Πυροπροστασίας κτιρίων» (νέος κανονισμός).
- Π.Δ. 71/88 (ΦΕΚ 32Α' /17.2.1988) «Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων».
- 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».
- Π.Δ. 6/96 (ΦΕΚ 150Β 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 τροποποιήσεως της υπ' αριθμόν 3/19.1.1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού».
- Π.Δ. 36/95 «Περί τροποποιήσεως και συμπληρώσεως της υπ' αριθμό 3/1981 Πυροσβεστικής Διατάξεως περί λήψεως βασικών μέτρων πυροπροστασίας σε αίθουσες συγκέντρωσης κοινού».

Τα βασικά στοιχεία της μελέτης της πυροπροστασίας μιας κατασκευής, με βάση τους κανονισμούς πυροπροστασίας, συνοψίζονται στην επίλυση πέντε βασικών θεμάτων [Purkiss, 1996, Παπαϊωάννου, 2006]:

- Πρόληψη έναρξης πυρκαγιάς: Αφορά τον έλεγχο της ευφλεκτότητας των υλικών της κατασκευής, τη συντήρηση των επιχρισμάτων και, από τη νομοθετική πλευρά, την επιβολή απαγόρευσης του καπνίσματος και γενικά ελεύθερων φλογών.
- Περιορισμός ανάπτυξης και διάδοσης πυρκαγιάς: Αφορά το ίδιο το κτίριο (διαμερισματοποίηση), αλλά και γειτονικά, μέσω ελέγχου της απόστασης μεταξύ των κτιρίων.
- Παρεμπόδιση της κατάρρευσης της κατασκευής: Επιβάλλεται η σταθερότητα (stability) και η ακεραιότητα (integrity) όλης της κατασκευής ή μέρος της κατά τη διάρκεια της φωτιάς.
- Οδεύσεις διαφυγής: Επιβάλλονται, νομοθετικά, συγκεκριμένες ρυθμίσεις που αφορούν τις οδεύσεις διαφυγής και την ενημέρωση των ενοίκων.
- Έλεγχος φωτιάς και κατάσβεση: Αφορά την εγκατάσταση συγκεκριμένων συστημάτων μέσα στο κτίριο για τον έλεγχο και για την κατάσβεση της πυρκαγιάς

Η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων πραγματοποιείται μέσω δύο βασικών μέτρων πυροπροστασίας: **τα ενεργητικά και τα παθητικά (πυρασφάλεια) μέτρα πυρασφάλειας**. Τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας, τα οποία αφορούν κυρίως τον έλεγχο και την κατάσβεση (πυρόσβεση) της φωτιάς, ενεργοποιούνται κατά την έναρξη ή τη διάρκεια της πυρκαγιάς, ενώ τα παθητικά, είναι προβλεπόμενα και ενσωματωμένα στη κατασκευή.

1.2.1 Ενεργητική πυροπροστασία

Η ενεργητική πυροπροστασία αφορά το σύνολο των μέτρων με τα οποία εξασφαλίζεται η έγκαιρη-αυτόματη ανίχνευση και ο εντοπισμός των σημείων που εκδηλώθηκε πυρκαγιά, η σήμανση συναγερμού, καθώς και η αυτόματη ή χειροκίνητη κατάσβεση. Τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας, που είτε είναι εγκατεστημένα μέσα στο κτίριο είτε φορητά, ενεργοποιούνται με την εμφάνιση της πυρκαγιάς και αποτελούν σημαντικά μέτρα ασφάλειας τόσο για τα άτομα, μέσω της έγκαιρης προειδοποίησης τους, όσο και για την κατασκευή, μέσω της έγκαιρης «επίθεσης» στη φωτιά και ελέγχου της από το πρώτο στάδιο. Συνοπτικά μερικά από τα μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

Συστήματα ανίχνευσης και έγκαιρης ειδοποίησης

- αυτόματη πυρανίχνευση (ανιχνευτές, πίνακας πυρανίχνευσης, καλωδιώσεις κ.α.)
- σήμανση συναγερμού
 - σειρήνες για ηχητική ειδοποίηση
 - φλας για οπτική ειδοποίηση
 - μέσα ενεργοποίησης του συστήματος (κομβία χειροκίνητης αναγγελίας πυρκαγιάς, όργανα διαπιστώσεως λειτουργίας αυτόματων συστημάτων πυρόσβεσης κ.α.)
 - διακόπτης ροής νερού σε υδροδοτικό δίκτυο με πυροσβεστικές φωλιές ή σε δίκτυο καταιονητήρων (sprinklers)
 - όργανα ενδείξεως αντλιών πυρόσβεσης
 - όργανα ενδείξεως λειτουργίας συστημάτων διοξειδίου του άνθρακα, αδρανών αερίων (αζώτου, ηλίου κ.α.) κ.α.
- αυτόματη ειδοποίηση της πυροσβεστικής υπηρεσίας

Συστήματα πυρόσβεσης/κατάσβεσης

- 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, όπως διοξείδιο του άνθρακα, αλογονομένους υδρογονάνθρακες (halon), αδρανή αέρια κ.α.
- αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με ξηρές σκόνες
- υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (πυροσβεστικές φωλιές) – χειροκίνητο
- φορητοί πυροσβεστήρες και άλλα μέσα (αντιπυρικές κουβέρτες, άμμος κ.α.)

Συστήματα εξαερισμού καπνού από πυρκαγιά

- αυτόματη ενεργοποίηση με την πρώτη εμφάνιση της πυρκαγιάς

Σήμανση οδεύσεων διαφυγής

- φωτισμός ασφαλείας (δεν αποτελεί αντικείμενο της ενεργητικής πυροπροστασίας, αλλά μπαίνει στα σχέδια που κατατίθενται στη πυροσβεστική για την άδεια)

1.2.2 Παθητική πυροπροστασία

Η παθητική πυροπροστασία, ή αλλιώς δομική πυροπροστασία ή πυρασφάλεια, αφορά το σύνολο των μέτρων που είναι ενσωματωμένα στην κατασκευή με στόχο την έμμεση προστασία της κατασκευής και κατά επέκταση την ασφάλεια των κατοίκων. Αποτελεί την πλέον σύγχρονη, αλλά και απαραίτητη, μορφή πυροπροστασίας, η οποία έχει άμεση σχέση με το βαθμό επικινδυνότητας της κατασκευής. Με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά της κατασκευής, ο βαθμός επικινδυνότητάς της διακρίνεται σε χαμηλός, μέσος και υψηλός. Η παθητική πυροπροστασία ενός κτιρίου μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες: *την περίπτωση της φωτιάς από και προς ένα κτίριο* και *την περίπτωση ανάπτυξης της φωτιάς μέσα σε ένα κτίριο*. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών παθητικής πυροπροστασίας, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ή να συνεκτιμούνται κατά την κατασκευή ενός κτιρίου.

Φωτιά από και προς ένα κτίριο

- **Χωροθέτηση κτιρίου:** Το σημείο κατασκευής ενός κτιρίου προφανώς δεν αποτελεί απαίτηση πυροπροστασίας, αλλά θα πρέπει να συνεκτιμάται από την πλευρά της πυρασφάλειας, γιατί ένα οικόπεδο με πρόσθετους περιορισμούς αυξάνει την ανάγκη για μέτρα πυροπροστασίας, με συνέπεια την αύξηση και του κόστους κατασκευής. Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να συνεκτιμώνται, όσον αφορά τη χωροθέτηση ενός κτιρίου, είναι:
 - συνθήκες κυκλοφορίας γύρω από το οικόπεδο
 - απόσταση πλησιέστερου πυροσβεστικού σταθμού από το οικόπεδο
 - υδάτινο δυναμικό της περιοχής
 - διεύθυνση και ένταση κύριων ανέμων της περιοχής
- **Διευκολύνσεις για την πυροσβεστική υπηρεσία:** Η διευκόλυνση της διέλευσης των πυροσβεστικών οχημάτων και γενικά των πυροσβεστών, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, είναι ζωτικής σημασίας. Τα βασικά στοιχεία που επηρεάζουν (θετικά ή αρνητικά) τη διευκόλυνση της πυροσβεστικής υπηρεσίας, είναι:
 - μορφή, ύψος και όγκος κτιρίου
 - σύστημα δόμησης (συνεχές, πανταχόθεν ελεύθερο κ.α.)
 - είδος, θέση και πλήθος υδροδοτικών σημείων μέσα στο κτίριο
 - τύπος πυροσβεστικών αντλιών
- **Εξάπλωση φωτιάς από κτίριο σε κτίριο:** Η εξάπλωση της φωτιάς από ένα κτίριο σε ένα άλλο γίνεται κυρίως μέσω της ακτινοβολίας. Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων είναι δύο (μπορούν να εφαρμοστούν είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό):
 - αύξηση της απόστασης μεταξύ των κτιρίων, ώστε η ένταση της ακτινοβολούμενης θερμότητας από το φλεγόμενο κτίριο να μην ξεπεράσει τα όρια ανάφλεξης των υλικών του μη φλεγόμενου κτιρίου

- δημιουργία πυροφραγμών μεταξύ των κτιρίων είτε με αύξηση της πυραντίστασης των υλικών της εξωτερικής τοιχοποιίας είτε με την κατασκευή ιδιαίτερων φραγμών, όπως π.χ. η κατασκευή ενός υψηλού τοιχίου ανάμεσα στα κτίρια

Φωτιά μέσα στο κτίριο

- **Πυραντίσταση στοιχείου:** Η πυραντίσταση ενός στοιχείου μιας κατασκευής είναι μια από τις βασικότερες έννοιες της παθητικής πυροπροστασίας. Ο βαθμός (ή δείκτης) πυραντίστασης καθορίζεται όταν ένα δομικό στοιχείο συγκεκριμένης σύνθεσης και καθορισμένης λειτουργίας στην κατασκευή, εισέρχεται σε πειραματικό φούρνο, ο οποίος προσομοιώνει, όσο είναι δυνατό, τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου, και εκφράζεται με τη χρονική διάρκεια που το δοκίμιο ικανοποιεί τα τρία παρακάτω βασικά κριτήρια:
 - *ευστάθεια:* Το κριτήριο της ευστάθειας σηματοδοτεί την οριακή κατάσταση, όπου το δομικό στοιχείο αστοχεί ή παρουσιάζει μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Για ελαστικά δομικά στοιχεία, κυμαίνεται στο ένα τριακοστό του ανοίγματος του στοιχείου.
 - *ακεραιότητα:* Το κριτήριο της ακεραιότητας σηματοδοτεί την οριακή κατάσταση, όπου το δομικό στοιχείο εμφανίζει ρωγματώσεις ή κενά, από όπου μπορούν οι φλόγες ή τα καυσάερια να περάσουν στη μη εκτεθειμένη στη φωτιά πλευρά του στοιχείου και να αναφλέξουν εύλεκτα υλικά. Οριακή συνθήκη είναι η ανάφλεξη ενός βαμβακερού υφάσματος το οποίο βρίσκεται κοντά στο άνοιγμα για δέκα δευτερόλεπτα.
 - *θερμομόνωση:* Το κριτήριο της θερμομόνωσης σηματοδοτεί την οριακή κατάσταση, όπου η θερμοκρασία στη μη εκτιθέμενη στη φωτιά πλευρά του δομικού στοιχείου ξεπερνάει προκαθορισμένα όρια. Συνήθως, με μια αύξηση κατά μέσο όρο 140 °C ή περισσότερο από 180 °C σε κάθε σημείο του δοκιμίου θεωρείται ότι το συγκεκριμένο κριτήριο δεν ικανοποιείται.
- **Διαμερισματοποίηση:** Η διαμερισματοποίηση ενός κτιρίου είναι η οριζόντια ή κατακόρυφη υποδιαίρεση του κτιρίου σε διαμερίσματα, τα οποία έχουν υψηλό βαθμό πυραντίστασης (πυροδιαμερίσματα). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποτραπεί η διάδοση της φωτιάς μέσα στο κτίριο, εξασφαλίζοντας τον απαραίτητο χρόνο για την εκκένωση του κτιρίου. Τα βασικά στοιχεία από τα οποία εξαρτάται η διαμερισματοποίηση ενός κτιρίου είναι:
 - το είδος και η χρήση του κτιρίου
 - η πυραντίσταση της κατασκευής και των πυροδιαμερισμάτων
 - το ύψος του κτιρίου
- **Οδεύσεις διαφυγής:** Οι οδεύσεις διαφυγής αφορούν τους τρόπους και τα μέσα διαφυγής από το κτίριο προς άλλους ασφαλής χώρους μέσα στο κτίριο ή στον υπαίθρο χώρο, έξω από το φλεγόμενο κτίριο. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των οδεύσεων διαφυγής είναι:
 - επαρκής αριθμός εξόδων κινδύνου χωρίς εμπόδια και με πρόβλεψη άνετης προσπέλασης
 - προστασία εξόδων κινδύνου από φωτιά και καπνό για όλη τη χρονική διάρκεια χρησιμοποίησής τους
 - ύπαρξη εναλλακτικής εξόδου με αντίστοιχη όδευση διαφυγής σε περίπτωση αποκλεισμού της υπάρχουσας
 - διαμερισματοποίηση και ύπαρξη προσωρινών χώρων διαφυγής
 - προστασία κατακόρυφων οπών και ανοιγμάτων για τον περιορισμό της φωτιάς σε ένα όροφο

- συστήματα συναγερμού
- επαρκής φωτισμός για τις εξόδους κινδύνου και τις οδεύσεις διαφυγής
- ενδεικτικά σημεία των οδεύσεων διαφυγής για την ανεύρεση των εξόδων κινδύνου
- προστασία εγκαταστάσεων και περιοχών που μπορεί να δημιουργήσουν πυρκαγιά ικανή να αποκλείσει τις οδεύσεις διαφυγής
- δοκιμαστικές εκκενώσεις του κτιρίου για ενημέρωση και εξάσκηση των κατοίκων
- έρευνα και έλεγχο των ψυχολογικών παραγόντων που οδηγούν σε πανικό για τους ενοίκους του κτιρίου
- μέτρα προστασία εύφλεκτων εσωτερικών τελειωμάτων, που μεταδίδουν με ταχύτητα τη φλόγα και μπορούν να παγιδεύσουν τους κατοίκους

1.2.2.1 Προδιαγραφές πυροπροστασίας

Οι προδιαγραφές πυροπροστασίας των δομικών προϊόντων και δομικών στοιχείων διαχωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις:

- **Αντίδραση στη φωτιά (reaction to fire):** Η συμπεριφορά ως προς την «αντίδραση στη φωτιά» αφορά δομικά προϊόντα, όπως εσωτερικά τελειώματα, τα οποία αναμένεται να εκτεθούν άμεσα στη φωτιά, κατά τα αρχικά της στάδια. Στην περίπτωση αυτή, ο βασικός στόχος πυροπροστασίας είναι ο περιορισμός της εξάπλωσης της φωτιάς και του καπνού, καθώς και η αποτροπή ή καθυστέρηση της εμφάνισης του φαινομένου της καθολικής ανάφλεξης (flashover). Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει τον τρόπο ταξινόμησης των δομικών προϊόντων στο σύστημα των Ευρωπαϊκών κλάσεων και τις δοκιμές αντίδρασης στη φωτιά.
- **Πυραντίσταση (fire resistance):** Η συμπεριφορά ως προς την «πυραντίσταση» αφορά φέροντα και μη- φέροντα δομικά στοιχεία, καθώς και διαχωριστικά στοιχεία πυροδιαμερισμάτων, τα οποία αναμένεται να εκτεθούν στη φωτιά κατά το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς, το οποίο έπεται του φαινομένου της καθολικής ανάφλεξης. Στην περίπτωση αυτή, ο βασικός στόχος πυροπροστασίας είναι ο περιορισμός της φωτιάς στον χώρο (ή το κτίριο) από το οποίο αυτή ξεκίνησε, καθώς επίσης και η αποτροπή φαινομένων δομικής αστοχίας. Ο Πίνακας 1-3 παρουσιάζει τον τρόπο προσδιορισμού του δείκτη πυραντίστασης των δομικών στοιχείων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης πυραντίστασης ενός δομικού στοιχείου εκφράζεται μέσω ενός συνδυασμού συμβόλων της μορφής XX tt, όπου το πρώτο μέρος (XX) αντιστοιχεί στον συμβολισμό του κριτηρίου πυραντίστασης (Πίνακας 1-3), ενώ το δεύτερο μέρος (tt) αντιστοιχεί στο μέγιστο χρόνο (σε λεπτά) για τον οποίο ικανοποιείται το κριτήριο αυτό.

Πίνακας 1-2. Αντίδραση στη Φωτιά – Σύστημα Ευρωπαϊκών Κλάσεων.

Κριτήριο ταξινόμησης δομικού προϊόντος ως προς την αντίδραση στη φωτιά	Περιγραφή
Συμβολή στην Ανάφλεξη και Καύση	Ταξινόμηση ανάλογα με το βαθμό που τα προϊόντα συμβάλλουν στην ανάφλεξη και εξάπλωση της φωτιάς. Επτά (7) κατηγορίες ταξινόμησης: A1, A2, B, C, D, E και F . Οι κλάσεις A1 και A2 χαρακτηρίζουν υλικά με

	μικρότερη δυνατή συμβολή στην καύση, τα οποία αντιστοιχούν σε πρακτικά «άκαυστα υλικά», ενώ η κλάση F χαρακτηρίζει τα υλικά που συμβάλλουν στην καύση σε μεγάλο βαθμό.
Συμβολή στην Παραγωγή Καπνού	Ταξινόμηση με βάση το βαθμό που ένα προϊόν συμβάλλει στην παραγωγή καπνού: s1 (μηδενική ή πολύ μικρή παραγωγή καπνού), s2 (μέτρια παραγωγή καπνού) και s3 (σημαντική παραγωγή καπνού)
Συμβολή στην Παραγωγή Φλεγόμενων Σωματιδίων ή Σταγονιδίων	Ταξινόμηση ανάλογα με το βαθμό που τα προϊόντα συμβάλλουν στην παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων: d0 (μηδενική παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων), d1 (μικρή παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων), d2 (σημαντική παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων).

Πίνακας 1-3. Ενδεικτικά κριτήρια αξιολόγησης για τον καθορισμό του δείκτη πυραντίστασης.

Συμβολισμός	Κριτήριο	Περιγραφή
R	Ευστάθεια ή φέρουσα ικανότητα (load bearing capacity)	Ικανότητα ενός φέροντος δομικού στοιχείου να αντέχει μηχανικές δράσεις, ενώ είναι εκτεθειμένο σε φωτιά σε μία ή περισσότερες πλευρές, χωρίς απώλεια της δομικής του ευστάθειας - ικανότητας
E	Ακεραιότητα (integrity)	Ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, όταν εκτίθεται σε φωτιά στη μία του πλευρά, να μην επιτρέπει τη διέλευση φλογών, θερμών αερίων και καπνού, αποτρέποντας την εμφάνισή τους στη μη εκτεθειμένη του πλευρά
I	Θερμομονωτική ικανότητα (thermal insulation)	Ικανότητα ενός διαχωριστικού δομικού στοιχείου, όταν εκτίθεται σε φωτιά στη μία του πλευρά, να περιορίζει την άνοδο της θερμοκρασίας τη μη εκτεθειμένης πλευράς εντός καθορισμένων ορίων
W	Περιορισμός θερμικής ακτινοβολίας (limitation of radiation)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου όταν εκτίθεται στη φωτιά στη μία του πλευρά να περιορίζει την πιθανότητα μετάδοσης της θερμικής ακτινοβολίας, είτε διαμέσου του ίδιου του στοιχείου είτε από τη μη εκτεθειμένη του επιφάνεια στα γειτονικά υλικά

M	Μηχανική αντοχή (mechanical resistance)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να αντιστέκεται στην επιρροή μιας προκαθορισμένης δύναμης πρόσκρουσης λόγω δομικής αστοχίας ενός άλλου στοιχείου
C	Ικανότητα αυτοσφράγισης (self-closure)	Ικανότητα δομικών στοιχείων (θυρών ή ρολών) να κλείνουν πλήρως και αυτόματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, ανεξαρτήτως διαθεσιμότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
S	Διαρροή καπνού (smoke leakage)	Ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μειώνει ή να περιορίζει τη δίοδο θερμών αερίων ή καπνού από τη μία του πλευρά στην άλλη

1.3 Η έννοια της μοντελοποίησης και της υπολογιστικής προσομοίωσης

Η αριθμητική προσομοίωση (numerical simulation) χρησιμοποιείται για τη μελέτη της συμπεριφοράς πολύπλοκων φυσικών συστημάτων και επιδιώκει τη «μίμηση» της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος, καθώς και την πρόβλεψη ή τον υπολογισμό διαδοχικών γεγονότων. Από την άλλη μεριά, η έννοια της «μοντελοποίησης» (modeling) είναι ευρύτερη από αυτή της υπολογιστικής προσομοίωσης. Έτσι, ένα μοντέλο μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα δυναμικό φαινόμενο, χωρίς να προσδιορίζει την εξέλιξή του, όπως π.χ. ένας τύπος, μια ποιοτική σχέση, μια συλλογή από εμπειρικά δεδομένα κ.α. Το αντικείμενο, λοιπόν, της μοντελοποίησης δεν είναι να παράγει ένα ακριβές αντίγραφο ενός συστήματος, αλλά περιγράφει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του [Κεραμίδα, 2000].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι φωτιές σε κτίρια είναι η κυριότερη αιτία θανάτων σε πυρκαγιές, κάτι που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή συγκεκριμένων προδιαγραφών πυροπροστασίας. Ιστορικά, η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός κατάλληλων συστημάτων πυροπροστασίας ξεκίνησε με τη χρήση εμπειρικών μεθοδολογιών, οι οποίες βασιζόνταν κυρίως σε πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Η επιβολή, όμως, ολοένα και αυστηρότερων προδιαγραφών ασφάλειας σε περίπτωση πυρκαγιάς μέσα σε ένα κτίριο, είχε ως αποτέλεσμα την αναζήτηση περισσότερο εξελιγμένων εργαλείων, όπως η υπολογιστική προσομοίωση. Δεδομένου της ραγδαίας αύξησης, που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, στην επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η χρήση των μεθόδων υπολογιστικής προσομοίωσης έχει αυξηθεί σημαντικά. Απώτερος σκοπός της χρήσης αυτών των μεθόδων είναι η σχεδίαση κτιρίων μεγαλύτερης ασφάλειας, καθώς και η ανάπτυξη νέων συστημάτων εντοπισμού και κατάσβεσης φωτιάς, αλλά και υλικών με αυξημένη αντοχή σε φωτιά. Έτσι, παρά το γεγονός ότι αρχικά οι μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης χρησιμοποιούνταν σε βασικές εφαρμογές, κυρίως για την κατανόηση κάποιων φυσικών φαινομένων, με την πάροδο των χρόνων χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε σύνθετες εφαρμογές με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής τους [Μπεργελές, 2000].

Η βάση της υπολογιστικής προσομοίωσης στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το προς επίλυση πρόβλημα σε ένα συγκεκριμένο φυσικό χώρο [Μπεργελές, 2000, Κολαίτης, 2005]. Η φωτιά, είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο, το οποίο ενσωματώνει πλήθος φαινομένων, όπως είναι η καύση, η μεταφορά θερμότητας και μάζας κ.α. Από την άλλη μεριά, τα συστήματα και οι τεχνικές πυροπροστασίας ενσωματώνουν, επίσης, πλήθος φαινομένων, όπως είναι διασκορπισμός σωματιδίων, η σβέση, η μεταφορά

θερμότητας και μάζας μέσα σε δομικά υλικά και στοιχεία κ.α. Έτσι, η διαμόρφωση των προς επίλυση διαφορικών εξισώσεων απαιτεί τη χρήση θεωρητικών γνώσεων από πλήθος επιστημονικών τομέων, όπως είναι η θερμοδυναμική, η χημεία, η μηχανική των ρευστών, η αριθμητική ανάλυση, ο προγραμματισμός κ.α. [Κολαΐτης, 2005]. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (ΥΡΔ) αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης και προσδιορισμού των παραπάνω φυσικών φαινομένων τα οποία εμφανίζονται όταν μια πυρκαγιά λαμβάνει χώρα σε ένα κτίριο.

1.3.1 Κώδικας κανονιστικού τύπου και κανονισμός σχεδιαστικής απόδοσης

Είναι ιδιαίτερα γνωστό ότι οι κώδικες κανονιστικού τύπου (prescriptive-based building codes) έχουν συγκεκριμένους περιορισμούς: η ταξινόμηση της πυραντίστασης ενός δομικού υλικού ή στοιχείου που βασίζεται σε μετρήσεις σε φούρνους δεν ταυτίζεται με την πραγματική πυρασφάλεια ενός κτιρίου, ενώ επιπλέον είναι κάτι χρονοβόρο, κοστοβόρο και καθόλου ευέλικτο [Manzello et al., 2007, Cheng & Hadjisophocleous, 2011]. Από την άλλη μεριά, οι κανονισμοί σχεδιαστικής απόδοσης (performance-based building codes), δηλαδή κανονισμοί σχεδιασμού που σχετίζονται κυρίως με υπολογισμούς και προσομοιώσεις, έχουν γίνει ιδιαίτερα ελκυστικοί τις τελευταίες δεκαετίες. Ο κυριότερος λόγος που συμβαίνει αυτό, σχετίζεται με την καλύτερη κατανόηση της φυσικής της φωτιάς, της δομικής συμπεριφοράς των κατασκευών, των φαινομένων ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό των δομικών υλικών, που μαζί με την σημερινή ισχύ των υπολογιστών, έχουν δημιουργήσει αρκετά ακριβή υπολογιστικά εργαλεία προσομοίωσης φωτιάς. Η ανάπτυξη εξειδικευμένων εργαλείων προσομοίωσης φαινομένων φωτιάς, και κατά συνέπεια οι κανονισμοί σχεδιαστικής απόδοσης, δίνουν τη δυνατότητα διερεύνησης και μελέτης νέων κτιριακών σχεδιασμών, αλλά και καινούργιων υλικών, αξιολόγηση των κινδύνων που ελλοχεύουν σε περιπτώσεις φωτιάς και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να μειώσουν το κόστος μιας κατασκευής, σε σύγκριση με τις λύσεις που προκύπτουν από τους κώδικες κανονιστικού τύπου [Srinardi, 2016]. Για το λόγο αυτό, όλο και περισσότερες χώρες (π.χ. Αυστραλία, ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς, Ιαπωνία κ.α.) έχουν αρχίσει να ενσωματώνουν και να εφαρμόζουν κανονισμούς σχεδιαστικής απόδοσης [Tavares, 2003]. Λεπτομερής περιγραφή των διαφορών μεταξύ του κώδικα κανονιστικού τύπου (prescriptive-based code) και του κανονισμού σχεδιαστικής απόδοσης (performance-based code) δίνεται στην εργασία του Tavares [Tavares, 2003].

1.4 Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Ο στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Η συγκεκριμένη προσπάθεια αποτελεί την πρώτη προσπάθεια⁴ που γίνεται για την προσομοίωση ενός τόσο πολύπλοκου φυσικού προβλήματος και έχει ως επί μέρους στόχο να αναδείξει τις δυσκολίες που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Η ανάλυση που γίνεται λαμβάνει χώρα σε δύο άξονες. Ο πρώτος άξονας έχει ως στόχο να αναδείξει τη δυνατότητα μοντελοποίησης ενδόθερμων φυσικό-χημικών διεργασιών μέσω των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες ξηράς δόμησης. Ο δεύτερος άξονας στοχεύει στη μελέτη της εισαγωγής όρων πηγής στην εξίσωση

⁴ Σύμφωνα με τις γνώσεις του συγγραφέα.

μετάδοσης θερμότητας για τη μοντελοποίηση εξώθερμων φυσικό-χημικών αντιδράσεων. Συνδυαστικά οι δύο άξονες οδηγούν στην επίτευξη του βασικού στόχου της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή στην υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς.

1.5 Διάρθρωση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία απαρτίζεται από πέντε (5) κεφάλαια. Η παρούσα εισαγωγή αποτελεί το πρώτο κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των επιπτώσεων που έχει η φωτιά σε κλειστούς χώρους και τα κατάλληλα μέτρα πυροπροστασίας που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Επιπλέον, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του στόχου και του αντικειμένου της εργασίας. Στα κεφάλαια 2 και 3 παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα εργασία, ενώ στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα της παρούσης μελέτης, που έχουν ως στόχο να πιστοποιήσουν την ακριβή προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς τοιχοποιιών ξηράς δόμησης όταν εκτίθενται σε συνθήκες φωτιάς, με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βάση της μεθοδολογίας για μια ολοκληρωμένη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και στοιχείων, όταν αυτά εκτίθενται σε μεταβαλλόμενες θερμοκρασιακές συνθήκες. Αναφέρονται οι τρεις βασικές κλίμακες στις οποίες μελετάται ένα υλικό (μικρό-, μέσο- και μακρό-κλίμακα), καθώς και τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται σε κάθε μια από αυτές. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι διάφορες μεθοδολογίες υπολογιστικής προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και στοιχείων, τόσο για την απλή μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα υλικό, όσον και για την ταυτόχρονη μεταφοράς θερμότητας και μάζας μέσα σε πορώδη δομικά υλικά. Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN (HEat TRansfer ANalysis), που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, ΕΜΠ, και που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα, από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, ΕΜΠ. Με βάση τη σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών τιμών γίνεται μια εκτίμηση της ακρίβειας των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά ταυτόχρονα μελετώνται και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των τοιχοποιιών. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν, καθώς και μια σειρά από προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Η ολοένα και αυξανόμενη εξέλιξη της επιστήμης των υλικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη καινούργιων υλικών, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία των κτιρίων, εξυπηρετώντας συγκεκριμένους σκοπούς. Το βασικό πλαίσιο πάνω στο οποίο κινείται η ανάπτυξη ενός δομικού υλικού, όσον αφορά τη θερμική του συμπεριφορά, χωρίζεται σε δύο κατευθύνσεις: τη μελέτη της θερμικής του συμπεριφοράς σε συνθήκες χαμηλών⁵ και υψηλών θερμοκρασιών.

Κινούμενοι προς την πρώτη κατεύθυνση, μελετάται η θερμική απόδοση ενός δομικού υλικού, με απώτερο στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, στο οποίο τοποθετείται. Η συγκεκριμένη κατεύθυνση αποτελεί τμήμα μιας γενικότερης περιοχής έρευνας, η οποία αφορά τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, γνωστή και ως Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας (ΑΘΕ) σε κτίρια. Η ΑΘΕ σε κτίρια ασχολείται, κυρίως με την αποθήκευση ενέργειας, την αποδοτική και λογική χρήση των διαθέσιμων πόρων, αλλά και με τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) [Zalba et al., 2003]. Όσον αφορά τα δομικά υλικά, η βασική στρατηγική και αρχή λειτουργίας της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου και τη δημιουργία ενός «ενεργειακά αποδοτικού κτιρίου», στηρίζεται είτε στη λογική της μείωσης της θερμικής αγωγιμότητας του δομικού υλικού είτε στη λογική της ενσωμάτωσης της λανθάνουσας θερμότητας μέσα σε αυτό. Το τελευταίο, βασίζεται στην ενσωμάτωση μέσα στο δομικό υλικό, διάφορων άλλων υλικών, τα οποία θα μπορούν να αλλάζουν φάση⁶ (στερεό σε υγρό και αντίστροφα), χωρίς να επηρεάζεται η ακεραιότητα του συνολικού υλικού, απορροφώντας ή εκλύοντας θερμότητα, αυξάνοντας, τελικά, τη θερμική αδράνεια του κτιρίου [Kaasinen, 1992]. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να μειωθούν σημαντικά τα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία ενός κτιρίου, τόσο σε μέγεθος όσο και σε διάρκεια [Peippo et al., 1991].

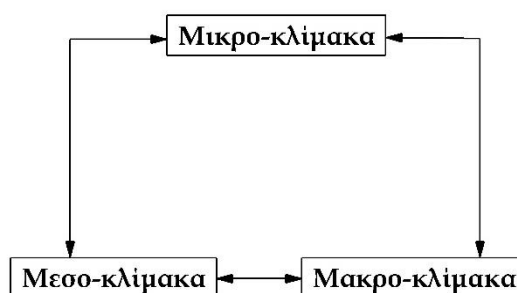
Από την άλλη μεριά, ένα δομικό υλικό ή στοιχείο μιας κατασκευής που εκτίθεται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, όπως π.χ. σε συνθήκες φωτιάς, έχει μεγάλες πιθανότητες να αστοχήσει μετά από ένα χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός της ικανότητας ενός στοιχείου να ανθίσταται στη φωτιά, τόσο όσον αφορά την ασφάλεια της ζωής, όσο και την αποτίμηση της ζημιάς της κατασκευής [Novozhilov, 2001]. Το θερμοκρασιακό πεδίο, αλλά και τα πεδία των τάσεων και των παραμορφώσεων, που αναπτύσσονται σε ένα δομικό στοιχείο μιας κατασκευής, η οποία υπόκειται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, μπορούν να οδηγήσουν στην αστοχία του υλικού ή του στοιχείου, με άσχημες συνέπειες για την κατασκευή και κατ' επέκταση για τη ζωή. Το μέγεθος της ανάπτυξης των παραπάνω πεδίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών που το συνθέτουν [Feng et al., 2003α και β, Παπαϊωάννου, 2006].

⁵ Οι συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών αφορούν τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

⁶ Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ).

Ο κοινός παρονομαστής των δύο παραπάνω κατευθύνσεων είναι, όπως αναφέρθηκε, η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του εκάστοτε δομικού υλικού. Για την ολοκληρωμένη, όμως, ανάλυση αυτής της θερμικής συμπεριφοράς, απαιτείται γνώση διάφορων παραμέτρων, όπως είναι η χημική κινητική των διάφορων φυσικό-χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του υλικού, οι φυσικές του ιδιότητες, η συμπεριφορά του σαν ξεχωριστό υλικό, αλλά και η συμπεριφορά του όντας μέρος μιας συνολικής κατασκευής. Για το λόγο αυτό, η ολοκληρωμένη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού, απαιτεί τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του σε τρεις βασικές κλίμακες μεγέθους: *τη μικρό-κλίμακα, τη μέσο-κλίμακα και τη μακρό-κλίμακα* [Κοντογεώργος, 2012]. Αυτές οι τρεις κλίμακες συσχετίζονται άμεσα μεταξύ τους λαμβάνοντας και παρέχοντας πληροφορίες η μια στην άλλη (Εικόνα 2-1).

Βασικός στόχος αυτής της ολοκληρωμένης μελέτης είναι να αποκτηθεί μια σαφή εικόνα της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού, το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένη εφαρμογή, και εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την καταλληλότητά του για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά και τρόποι για να βελτιωθεί με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής.



Εικόνα 2-1 Αλληλεπίδραση κλιμάκων μεγέθους.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών και στοιχείων που μπορεί να περιλαμβάνονται σε κάθε μία κλίμακα μεγέθους και τα οποία οδηγούν σε μια ολοκληρωμένη άποψη για τη θερμική συμπεριφορά του δομικού υλικού.

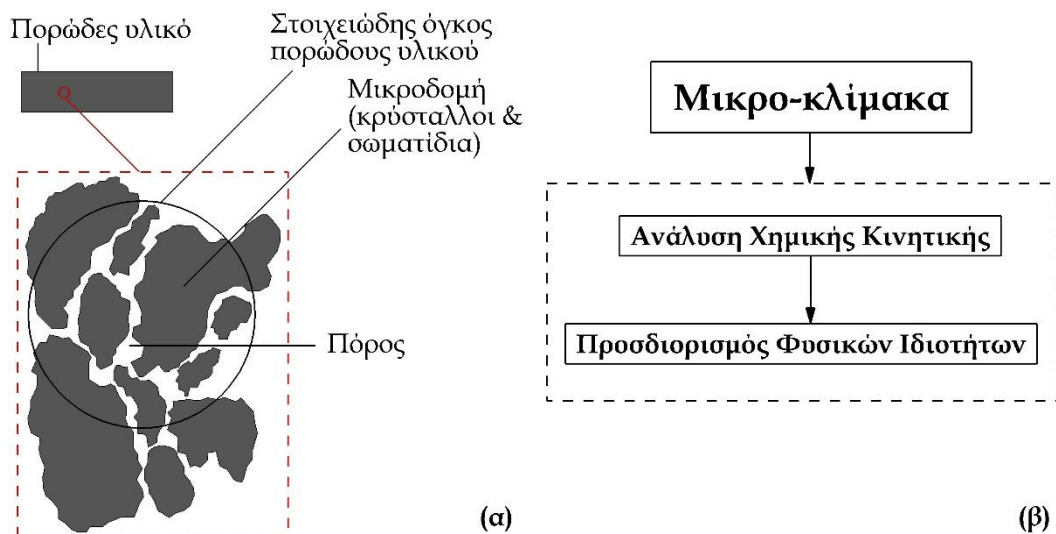
2.2 Μικρό-κλίμακα

Η μικρό-κλίμακα (micro-scale), είναι η κλίμακα τάξης μεγέθους nm ή μm, που μελετά τη θερμική συμπεριφορά του υλικού σε επίπεδο μικροδομής (Εικόνα 2-2α). Τα βασικά χαρακτηριστικά που μελετώνται σε αυτήν την κλίμακα είναι δύο:

- Μελέτη των διάφορων φυσικό-χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του υλικού και ανάλυση της χημικής τους κινητικής.
- Προσδιορισμός των απαραίτητων φυσικών ιδιοτήτων του υλικού, για την πλήρη περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας μέσα σε αυτό.

Η μελέτη των παραπάνω χαρακτηριστικών ενίοτε γίνεται αναλυτικά, μέσω της χρήσης διάφορων υπολογιστικών μεθόδων, ή χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις ή και με τα δύο. Η συσχέτιση τους είναι άμεση, καθώς σε περιπτώσεις όπου ένα υλικό υφίσταται διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες, επηρεάζονται σημαντικά οι φυσικές του ιδιότητες. Έτσι, η ανάλυση και ο προσδιορισμός των παραμέτρων της χημικής κινητικής των διεργασιών, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται κατά τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού (Εικόνα 2-2β). Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η ύπαρξη κατάλληλων εργαλείων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της χημικής κινητικής των αντιδράσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική

περιγραφή ορισμένων αρχών, πάνω στις οποίες στηρίζονται διάφορες μέθοδοι, για τη μελέτη των φυσικό-χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη μικροδομή ενός υλικού.



Εικόνα 2-2 Μικρο-κλίμακα μεγέθους: α) Μικροδομή υλικού και β) συσχέτιση χαρακτηριστικών μικρο-κλίμακας.

2.2.1 Αρχές θερμικής ανάλυσης και θερμιδομετρίας

Ένας από τους πιο εύκολους τρόπους να μελετηθεί η φύση ενός υλικού είναι να εκτεθεί σε ένα μεταβαλλόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον. Παρατηρώντας τη συμπεριφορά ενός υλικού κατά τη θέρμανση ή/και την ψύξη του, αλλά και μετρώντας ποσοτικά τις διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες που μπορεί να λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για το υλικό. Μερικές από τις ιδιότητες ενός υλικού, όπως το χρώμα και το σχήμα του, είναι προφανείς, ενώ κάποιες άλλες, όπως οι διαστάσεις, η μάζα και η ποκνότητά του, μπορούν πολύ εύκολα να μετρηθούν. Υπάρχουν, όμως, και κάποιες ιδιότητες, που εξαρτώνται από τους χημικούς δεσμούς και την κρυσταλλική δομή του υλικού, όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ενθαλπία, οι οποίες είναι πιο δύσκολο να μετρηθούν. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες στο εσωτερικό ενός υλικού, οι φυσικές του ιδιότητες εξαρτώνται έντονα από τη χημική κινητική των διεργασιών και μεταβάλλονται σημαντικά. Έτσι, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της χημικής κινητικής αυτών των διεργασιών. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι θερμικής ανάλυσης (thermal analysis) και θερμιδομετρίας (calorimetry), που έχουν ως στόχο τη μελέτη των αλλαγών της χημικής κινητικής των διάφορων διεργασιών, που υφίσταται ένα υλικό όταν εκτίθεται σε μεταβαλλόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον [Haines, 2002]. Δεν υπάρχει κάποιος επίσημος ορισμός για κάθε μία από τις μεθόδους θερμικής ανάλυσης και θερμιδομετρίας, αλλά σε μια προσπάθεια ορισμού τους ισχύει [Mackenzie, 1983, Hemminger & Sarge, 1998]:

- Η Μέθοδος Θερμικής Ανάλυσης (ΜΘΑ) είναι ένα σύνολο τεχνικών κατά τις οποίες μπορούν να μελετηθούν και να μετρηθούν μια ή περισσότερες ιδιότητες ενός υλικού, καθώς το υλικό εκτίθεται σε ελεγχόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον.

- Η Μέθοδος Θερμιδομετρίας (ΜΘ) είναι η μέθοδος κατά την οποία μπορούν να μετρηθούν ποσά θερμότητας που μπορεί να εκλύονται ή να απορροφώνται κατά τη διάρκεια μίας φυσικό-χημικής διεργασίας, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, όπως π.χ. σε σταθερό όγκο ή σε σταθερή θερμοκρασία.

2.2.2 Φυσικές ιδιότητες υλικού

Ένας πολύ απλός τρόπος χαρακτηρισμού ενός υλικού είναι οι φυσικές του ιδιότητες. Έτσι, π.χ. με βάση τη πυκνότητά του, ένα υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαφρύ ή βαρύ, με βάση της θερμική του αγωγιμότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως μονωτικό ή καλός αγωγός θερμότητας κ.α. Η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων ενός υλικού μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά τη θερμική του συμπεριφορά. Όταν, όμως, ένα υλικό υφίσταται διάφορες διεργασίες στο εσωτερικό του, οι φυσικές του ιδιότητες μπορεί μεταβληθούν σημαντικά επηρεάζοντας τη γενικότερη συμπεριφορά του. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι φυσικές ιδιότητες ενός υλικού σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται άμεσα από τη χημική κινητική των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του. Στο σημείο αυτό υπάρχει η συσχέτιση της χημικής κινητικής με τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού. Για τον προσδιορισμό αυτής της συσχέτισης υπάρχουν δύο κατευθύνσεις:

- άμεση μέτρηση της τιμής της εκάστοτε ιδιότητας συναρτήσει των διεργασιών
- προσδιορισμός, μέσω κατάλληλων υπολογιστικών μεθόδων και μοντέλων, της τιμής της εκάστοτε ιδιότητας, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση της χημικής κινητικής των διεργασιών

Τις περισσότερες φορές η άμεση μέτρηση της τιμής μιας φυσικής ιδιότητας δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η διεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, τα μετρητικά που χρησιμοποιούνται δεν είναι σε θέση να κάνουν τη μέτρηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα δείγματα που χρησιμοποιούνται ψύχονται φυσικά μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπου η μέτρηση είναι εφικτή. Από την άλλη μεριά, η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων ενός υλικού, είναι σε θέση να προσδιορίσει τις φυσικές ιδιότητες του υλικού για οποιοδήποτε θερμοκρασιακές συνθήκες. Παράλληλα, είναι σε θέση να δώσει ιδέες για τη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού και κατ' επέκταση του ίδιου του υλικού, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής του. Και στις δύο κατευθύνσεις που περιγράφηκαν είναι αναγκαία η γνώση της χημικής κινητικής των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του υλικού, ώστε να είναι σε θέση ο ερευνητής να εξηγήσει τις πειραματικές μετρήσεις, αλλά και να βελτιώσει τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιεί.

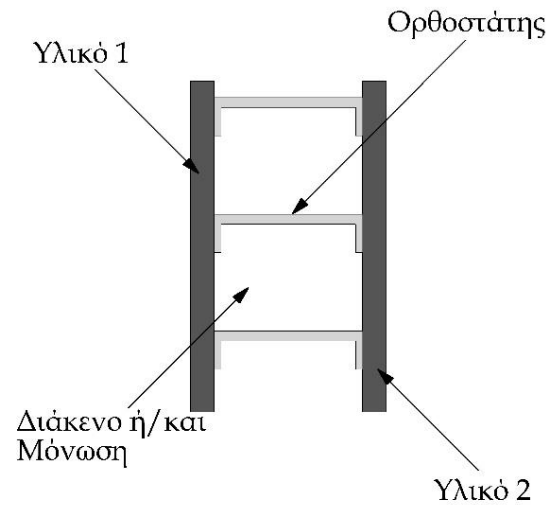
2.3 Μέσο-κλίμακα

Η μέσο-κλίμακα (meso-scale), είναι η κλίμακα μεγέθους που μελετά τη θερμική συμπεριφορά ενός υλικού ή ενός συστήματος υλικών, μεγέθους μερικών χιλιοστών ή εκατοστών, δηλαδή ορατά με το γυμνό μάτι (Εικόνα 2-3). Το βασικό χαρακτηριστικό της μελέτης σε αυτήν την κλίμακα είναι, κυρίως, ο προσδιορισμός της θερμοκρασιακής κατανομής στο εσωτερικό του υλικού⁷, το οποίο εκτίθεται σε ένα μεταβαλλόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον. Στόχος

⁷ Το ενδιαφέρον συνήθως επικεντρώνεται κατά το πάχος του υλικού, αφού στις περιπτώσεις των δομικών υλικών οι άλλες δύο διαστάσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα η κύρια ροή θερμότητας να είναι κατά το πάχος του υλικού.

είναι η εκτίμηση της απόδοσης του υλικού (ενεργειακή απόδοση ή/και αντίσταση στη φωτιά), ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής του.

Και σε αυτήν την περίπτωση το πλαίσιο μελέτης κινείται σε δύο βασικές κατευθύνσεις: *στην πειραματική μέτρηση και την υπολογιστική προσομοίωση*. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του υλικού σε επίπεδο μικροκλίμακας. Από την άλλη μεριά, η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του υλικού σε επίπεδο μέσο-κλίμακας, μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη βελτίωση του υλικού. Το τελευταίο, στην ουσία, ερμηνεύεται στο πως θα μπορούσαν να μεταβληθούν οι φυσικές ιδιότητες του υλικού, ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής του.



Εικόνα 2-3 Μέσο-κλίμακα μεγέθους (σύστημα υλικών).

2.3.1 Πειραματική διερεύνηση

Η πειραματική διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού σε επίπεδο μέσο-κλίμακας συνήθως ακολουθεί μια συγκεκριμένη λογική. Δείγματα του υπό μελέτη δομικού υλικού, συγκεκριμένων διαστάσεων (επιπέδου μέσο-κλίμακας), υποβάλλονται σε διάφορες θερμοκρασιακές συνθήκες, οι οποίες προσομοιώνουν, όσο αυτό είναι εφικτό, τις πραγματικές θερμοκρασιακές συνθήκες που πρόκειται να εκτεθεί το υλικό. Για παράδειγμα, όταν ένα δομικό υλικό μελετάται ως προς την ενεργειακή του απόδοση, συνήθως η μια του πλευρά εκτίθεται σε θερμοκρασιακές συνθήκες που προσομοιώνουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος για μια συγκεκριμένη μέρα, ενώ η άλλη εκτίθεται σε θερμοκρασιακές συνθήκες που προσομοιώνουν τις συνθήκες ενός δωματίου, μέσα σε ένα κτίριο. Επίσης, όταν ένα δομικό υλικό μελετάται ως προς την αντίστασή του στη φωτιά και γενικά σε υψηλές θερμοκρασίες, τότε η μια του πλευρά εκτίθεται σε θερμοκρασιακές συνθήκες που προσομοιώνουν τη φωτιά, ενώ η άλλη σε θερμοκρασιακές συνθήκες που προσομοιώνουν τις συνθήκες ενός δωματίου το οποίο δεν έχει εκτεθεί στη φωτιά.

2.3.2 Υπολογιστική προσομοίωση

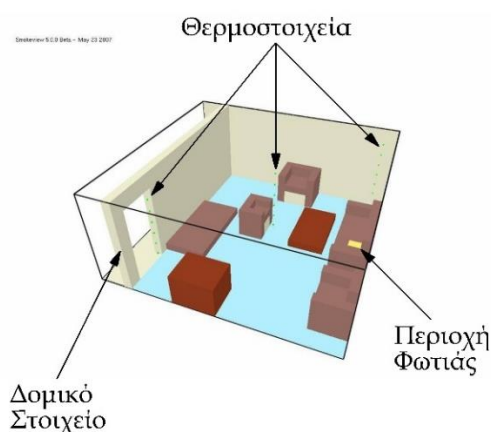
Από την άλλη μεριά, η υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού σε επίπεδο μέσο-κλίμακας, βασίζεται σε μια σειρά από εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, οι οποίες περιγράφουν το φυσικό πρόβλημα. Οι εν λόγω εξισώσεις ενσωματώνουν εξειδικευμένα μοντέλα τα οποία μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του υλικού. Ανάμεσα σε αυτά τα μοντέλα, εκτός από τους γνωστούς νόμους μεταφοράς θερμότητας και μάζας, περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα της μικρο-κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ανάλυση της χημικής κινητικής των

αντιδράσεων όσο και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Έτσι, είναι άμεση η συσχέτιση μεταξύ της μικρό-κλίμακας και της μέσο-κλίμακας.

Η υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού σε επίπεδο μέσο-κλίμακας αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο και ευέλικτο εργαλείο. Η αναλυτική περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού θα απαιτούσε την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε επίπεδο μικρό-κλίμακας, κάτι το οποίο είναι απαγορευτικό από άποψης υπολογιστικού κόστους. Έτσι, προσδιορίζοντας ορισμένα χαρακτηριστικά του υλικού σε επίπεδο μικροδομής, όπως είναι η χημική κινητική και οι φυσικές ιδιότητες, και εισάγοντάς τα στα υπολογιστικά εργαλεία της μέσο-κλίμακας, η μικρό-κλίμακα λαμβάνεται, εμμέσως, υπόψη, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικό βαθμό ακρίβειας με χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

2.4 Μακρό-κλίμακα

Η μακρό-κλίμακα (macro-scale), είναι η κλίμακα τάξης μεγέθους μερικών μέτρων, η οποία μελετά τη θερμική συμπεριφορά ενός δομικού υλικού ή ενός συστήματος υλικών, όντας μέρος ενός κτιρίου (Εικόνα 2-4). Όπως είναι φανερό, η μελέτη σε επίπεδο μακρό-κλίμακας αποτελεί το τελευταίο στάδιο μελέτης ενός δομικού υλικού ή στοιχείου και το πιο πρακτικό, αφού εξετάζεται, ακριβώς, πώς το υλικό ή το στοιχείο που μελετάται, επηρεάζει τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.



Εικόνα 2-4 Μακρό-κλίμακα μεγέθους.

Και σε αυτήν την περίπτωση το πλαίσιο μελέτης που ακολουθείται αφορά τόσο τις πειραματικές μετρήσεις όσο και την υπολογιστική προσομοίωση. Θα πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι οι πειραματικές μετρήσεις σε επίπεδο μακρό-κλίμακας έχουν μεγάλο οικονομικό κόστος, αλλά και εξαιρετικές δυσκολίες. Για παράδειγμα, η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού, σε επίπεδο μακρό-κλίμακας, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ένα κτίριο, για συνθήκες φωτιάς, θα απαιτούσε την πυρκαγιά του κτιρίου, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο έως ανέφικτο. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί πλήθος υπολογιστικών εργαλείων τα οποία μπορούν με ευκολία να προσδιορίσουν την επίδραση ενός δομικού υλικού ή στοιχείου στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, στο οποίο είναι εγκατεστημένο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών, ή και των στοιχείων μιας κατασκευής έχει απασχολήσει ευρύτατα την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία τριάντα, ίσως και παραπάνω, χρόνια. Στόχος της είναι η δημιουργία αξιόπιστων υπολογιστικών μοντέλων, και κατά συνέπεια εργαλείων, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί, με σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια, η συμπεριφορά των δομικών υλικών, κάτω από ένα σύνολο διαφορετικών θερμοκρασιακών συνθηκών. Για παράδειγμα, ένα δομικό υλικό που χρησιμοποιείται σε μια κατασκευή, όπως είναι η γυψοσανίδα, ο οπτόπλινθος κ.α., καλείται να μελετηθεί, τόσο όσον αφορά τη θερμική-ενεργειακή⁸ του απόδοση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όσο και τη θερμική του συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες και περιβάλλον φωτιάς, ώστε να κριθεί η ακεραιότητα και καταλληλότητά του. Δεδομένου ότι η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, η οποία απαιτεί τη δαπάνη αρκετών χρημάτων, η ύπαρξη αξιόπιστων υπολογιστικών εργαλείων λειτουργεί καταλυτικά στην πραγματοποίηση, κυρίως παραμετρικών μελετών, με στόχο τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης του υλικού, αλλά και της συνολικής κατασκευής.

Η μαθηματική μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς (θερμότητας και μάζας) μέσα σε πορώδη δομικά υλικά αποτελεί μια ιδιαίτερη πρόκληση. Οι διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες, που μπορεί να λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση/ψύξη ενός υλικού, επηρεάζουν σημαντικά τις φυσικές ιδιότητές του, οδηγώντας σε έντονη μη γραμμικότητα των διαφορικών εξισώσεων και δυσκολία επίλυσής τους [Pham, 2006]. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων επίλυσης των εν λόγω εξισώσεων. Οι μέθοδοι προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και στοιχείων μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: *την απλή επίλυση της μεταφοράς θερμότητας και την ταυτόχρονη επίλυση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας μέσα στο υλικό*. Κατά την πρώτη περίπτωση επιλύεται η απλή αγωγή θερμότητας μέσα στο υλικό, ενώ στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη και η μεταφορά της μάζας των συστατικών (υγρών και αερίων), που υπάρχουν μέσα στους πόρους του υλικού. Το βασικό πλεονέκτημα της πρώτης κατηγορίας είναι ότι απαιτεί αρκετά μικρό υπολογιστικό χρόνο, σε σχέση με τη δεύτερη κατηγορία, η οποία απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο⁹. Από την άλλη μεριά, όμως, η προσομοίωση της απλής μετάδοσης θερμότητας μέσα σε ένα υλικό, στο οποίο λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες, αλλά και φαινόμενα μεταφοράς μάζας συστατικών, υστερεί σε ακρίβεια, σε σχέση με την ταυτόχρονη

⁸ Σε πολλές περιπτώσεις η μελέτη ενός δομικού υλικού σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έγκειται στην προσφορά του, όσον αφορά τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κτίριο.

⁹ Για την επίλυση της απλής εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας συνήθως απαιτείται υπολογιστικός χρόνος λίγων δευτερολέπτων ή λεπτών, ενώ για την ταυτόχρονη επίλυση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας απαιτείται υπολογιστικός χρόνος αρκετών ωρών ή ακόμα και ημερών, ανάλογα με την ισχύ του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

επίλυση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο εσωτερικό του υλικού. Ακόμα και όταν ορισμένα από αυτά τα φαινόμενα συμπεριληφθούν, εμμέσως, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, στο μοντέλο απλής μετάδοσης θερμότητας, μπορεί να δώσει πληροφορίες μόνο όσον αφορά το θερμικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού. Αδυνατεί, όμως, να δώσει πληροφορίες όσον αφορά το πεδίο των συγκεντρώσεων των συστατικών μέσα στο υλικό, αλλά και πως η μικροδομή επηρεάζει τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού, με στόχο τη βελτίωσή του.

Στο παρών κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα διάφορα μοντέλα απλής μετάδοσης θερμότητας και ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας, καθώς και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να ληφθούν υπόψη οι διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες που υφίσταται ένα θερμαινόμενο δομικό υλικό. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά ο υπολογιστικός κώδικας **HETTRAN** [Kontogeorgos & Founti, 2010, Κοντογεώργος, 2012], ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας, για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών και στοιχείων.

3.2 Υπολογιστική προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας σε δομικά υλικά και στοιχεία

Η απλή μετάδοση θερμότητας μέσα ένα δομικό υλικό ή/και στοιχείο μιας κατασκευής αποτελεί ένα μη μόνιμο και μη γραμμικό πρόβλημα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα δομικό υλικό, το οποίο θερμαίνεται ή ψύχεται, υφίσταται διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες στο εσωτερικό του. Όταν μια διεργασία λαμβάνει χώρα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, τότε το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί ένα πρόβλημα μιας συνεχώς μετακινούμενης επιφάνειας διαφορετικών φάσεων, γνωστό και ως πρόβλημα μετακινούμενου ορίου (moving boundary problem) ή πρόβλημα Stefan [Lane, 1983, Alexiades & Solomon, 1993, Lamberg et al., 2004, Pham, 2006]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η διεπιφάνεια στερεού-υγρού ενός Υλικού Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ, Phase Change Materials) ή το μέτωπο της αφυδάτωσης του κρυσταλλικού νερού (dehydration front), τα οποία περιέχονται σε ένα δομικό υλικό. Οι κυριότερες δυσκολίες που παρουσιάζονται στα συγκεκριμένα προβλήματα, οφείλονται στη μη γραμμικότητά τους, κυρίως πάνω στο μετακινούμενο όριο [Mayers, 1971, Alexiades & Solomon, 1993]. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν ελάχιστες αναλυτικές λύσεις, οι οποίες αφορούν απλές περιπτώσεις, όπως απλή γεωμετρία και οριακές συνθήκες [Riley et al., 1974, Pham, 1986, McNabb et al., 1990α και β]. Από την άλλη μεριά, όμως, και εξαιτίας της πολυπλοκότητας αυτών των προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί αρκετές υπολογιστικές μέθοδοι, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις μεθόδους κινούμενου πλέγματος (moving grid) και σταθερού πλέγματος (fixed grid) [Crank, 1984, Voller, 1996]. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η μέθοδος του μετώπου αντίδρασης (reaction front), ενώ στη δεύτερη οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας (effective specific heat method) και της ενθαλπίας (enthalpy method).

3.2.1 Μέθοδος του μετώπου αντίδρασης

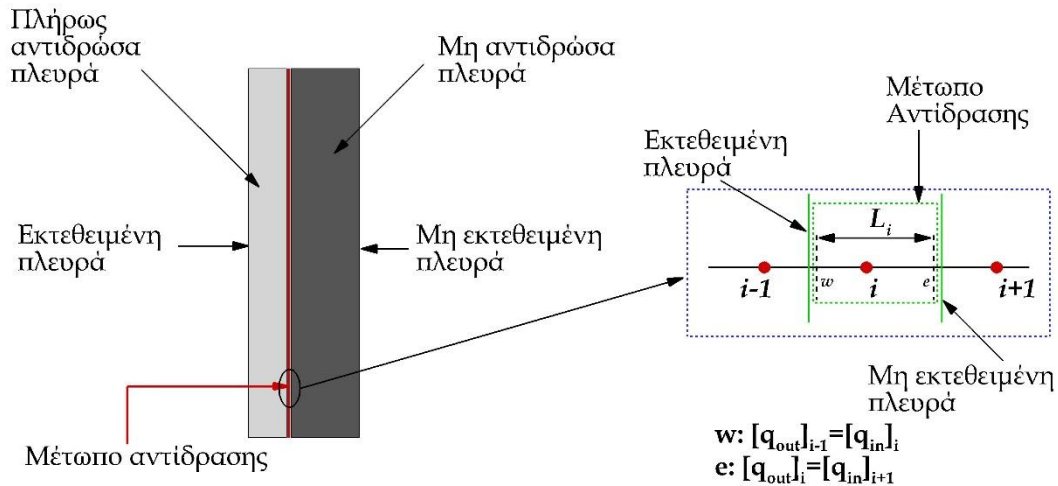
Η μέθοδος του μετώπου αντίδρασης [Axenenko & Thorpe, 1996, McGraw & Mowrer, 1999], που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός δομικού υλικού, στο οποίο λαμβάνουν χώρα ενδόθερμες φυσικό-χημικές διεργασίες, προϋποθέτει ότι η κάθε διεργασία λαμβάνει χώρα σε μία λεπτή ζώνη αντίδρασης (μέτωπο αντίδρασης), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-1. Εκατέρωθεν του μετώπου της αντίδρασης υπάρχει η περιοχή του υλικού στο

οποίο η διεργασία έχει ολοκληρωθεί (πλήρως αντιδρώσα πλευρά - fully reactive region) και η πλευρά του υλικού όπου η διεργασία δεν έχει ακόμα ξεκινήσει (μη αντιδρώσα πλευρά - non-reactive region). Το μέτωπο της αντίδρασης, κινείται με την πάροδο του χρόνου, από τις περιοχές υψηλών θερμοκρασιών προς τις περιοχές χαμηλών θερμοκρασιών. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, η ενέργεια που απορροφάται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, απορροφάται μόνο μέσα στα όρια του μετώπου αντίδρασης, ενώ στις δύο ξεχωριστές περιοχές, της πλήρους αντιδρώσας και της μη αντιδρώσας πλευράς, αντίστοιχα, επιλύεται η απλή μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας (Εξίσωση 3-1) [Carslaw & Jaeger, 1959, Incropera & DeWitt, 1985].

$$\rho_{eff}c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Εξίσωση 3-1

Όπου ρ_{eff} και k_{eff} είναι η φαινόμενη πυκνότητα και η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του υλικού, ενώ C είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του.



Εικόνα 3-1 Μέτωπο αντίδρασης.

Η λογική αυτής της μεθόδου είναι η εξής: αρχικά επιλύεται η απλή αγωγή θερμότητας μέσα στο υλικό (Εξίσωση 3-1), μέχρι η θερμοκρασία σε κάποια περιοχή του, να φτάσει τη θερμοκρασία που ξεκινά η εκάστοτε ενδόθερμη αντίδραση. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία της περιοχής αυτής παραμένει σταθερή, μέχρι η συνολική ενέργεια που θα απορροφηθεί στην περιοχή αυτή, να ισούται με την ενέργεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της αντίδρασης. Αν υποθεθεί, λοιπόν, ότι σε κάποια χρονική στιγμή το μέτωπο της αντίδρασης βρίσκεται στη θέση i , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1, τότε η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται σε αυτήν τη θέση, κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος Δt , μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά των θερμορικών αγωγής εισόδου ($q_{cond,in}$) - εξόδου ($q_{cond,out}$) από τη θέση αυτή, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-2, όπου L_i είναι το πάχος του μετώπου της αντίδρασης. Η ολοκλήρωση της αντίδρασης στη συγκεκριμένη περιοχή λαμβάνει χώρα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν η συνολική ενέργεια που έχει απορροφηθεί στην εν λόγω περιοχή του υλικού (Εξίσωση 3-3), ισούται με την ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Μόλις η αντίδραση σε μια συγκεκριμένη θέση ολοκληρωθεί,

τότε η διαδικασία που αναφέρθηκε συνεχίζεται στην περιοχή του υλικού, όπου η θερμοκρασία φτάνει τη θερμοκρασία έναρξης της εκάστοτε αντίδρασης.

$$dE_i = \left\{ q_{cond,in}|_i - q_{cond,out}|_i \right\} \frac{\delta t}{L_i}$$

Εξίσωση 3-2

$$E_i(t + \delta t) = E_i(t) + dE_i$$

Εξίσωση 3-3

Η μέθοδος του μετώπου αντίδρασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις τρεις διαστάσεις, με τη διαφορά, όμως, ότι στην Εξίσωση 3-2 λαμβάνονται υπόψη οι θερμοροές αγωγής και από τις τρεις διαστάσεις, ενώ χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3-1 γραμμένη στις τρεις διαστάσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ακριβής όσον αφορά τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού, αλλά και του μετώπου αντίδρασης. Παρόλα αυτά, όμως, δεν είναι ιδιαίτερα εύχρηστη γιατί προϋποθέτει ότι υπάρχει διακριτή διεπιφάνεια μεταξύ των εκάστοτε διαφορετικών φάσεων, κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Σε περιπτώσεις, όμως, όπου η εκάστοτε διεργασία λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος και όχι σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, ο προσδιορισμός της διεπιφάνειας ή του μετώπου αντίδρασης είναι εξαιρετικά δύσκολος, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακατόρθωτος [Lamberg et al., 2004, Pham, 2006]. Για το λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα προβλήματα έχουν αναδιατυπωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται να ισχύουν σε οποιοδήποτε σημείο του υπολογιστικού χωρίου, είτε λαμβάνει χώρα κάποια διεργασία είτε όχι.

3.2.2 Μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας

Η μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και στοιχείων κατά το παρελθόν [Sultan, 1996, Feng et al., 2003α, Ang & Wang, 2004, Ghazi Wakili et al., 2007, Wullschleger & Ghazi Wakili, 2007, Ang & Wang, 2009, Yang & He, 2010, Kontogeorgos et al., 2012, Mandilaras et al., 2015]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια διάφορων φυσικό-χημικών αντιδράσεων λαμβάνεται υπόψη μέσω της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, η οποία προκύπτει είτε θεωρητικά είτε από μετρήσεις Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (ΔΘΣ).

Έτσι, λοιπόν, στη συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνεται υπόψη η γενική εξίσωση αγωγής θερμότητας (Εξίσωση 3-4), όπου H είναι η ενθαλπία ανά μονάδα όγκου και \dot{Q}_E''' είναι όρος πηγής/καταβόθρας ενέργειας λόγω εξώθερμων/ενδόθερμων αντιδράσεων ή αλλαγών φάσης.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}_E''' \Rightarrow \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}_E'''$$

Εξίσωση 3-4

Επιπλέον, η φαινόμενη θερμική μάζα ενός υλικού, C_{eff} , είναι μια ιδιότητα που εκφράζει την ισοδύναμη θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια διάφορων θερμοκρασιακών μεταβολών και η οποία συνδυάζει την αισθητή θερμότητα (δηλ. την ειδική θερμοχωρητικότητα) και την ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια διάφορων θερμο-χημικών διεργασιών ή/και μεταβολών φάσης. Η μαθηματική διατύπωση της φαινόμενης

θερμικής μάζας δίνεται από την Εξίσωση 3-5, όπου ρ_{eff} και c_{eff} είναι η φαινόμενη πυκνότητα και η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα, αντίστοιχα.

$$C_{eff} = \frac{\partial H}{\partial T} \Rightarrow (\rho \cdot c)_{eff} = \frac{\partial H}{\partial T} \Rightarrow \rho_{eff} \cdot c_{eff} = \frac{\partial H}{\partial T}$$

Εξίσωση 3-5

Συνδυάζοντας την Εξίσωση 3-4 με την Εξίσωση 3-5 προκύπτει η τελική εξίσωση μετάδοσης θερμότητας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3-6.

$$\rho_{eff} c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}_E'''$$

Εξίσωση 3-6

Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται ότι ο ρυθμός θέρμανσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των φαινόμενων φυσικών ιδιοτήτων και των όρων πηγής είναι σταθερός. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκύπτει από αυτήν τη θεώρηση μια συνήθης πρακτική είναι να παράγονται καμπύλες φαινόμενων φυσικών ιδιοτήτων με ρυθμό θέρμανσης αρκετά κοντά στον μέσο ρυθμό θέρμανσης του προβλήματος που πρόκειται να προσομοιωθεί.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, εκτός από την ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης, μπορούν να ληφθούν υπόψη έμμεσα και άλλα φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με την κάθε αντίδραση, όπως π.χ. η μεταφορά μάζας ενός μίγματος συστατικών. Το παραπάνω μπορεί να γίνει με την εισαγωγή ενός συντελεστή διόρθωσης, f_c , όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 3-7 [Ang & Wang, 2004, Ang & Wang, 2009, Kontogeorgos et al., 2012].

$$c_{eff} = c_{ref} + \sum_{r=1}^{N_k} f_{c,r} c_r$$

Εξίσωση 3-7

Ο συντελεστής διόρθωσης προσδιορίζεται επιλύοντας το συνολικό πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα φαινόμενα, και με βάση ένα σύνολο αριθμητικών πειραμάτων, προσδιορίζεται το ποσοστό επίδρασης όλων των φαινομένων, εκτός από την αγωγή θερμότητας. Δηλαδή, αυξάνεται τεχνητά ο συντελεστής διόρθωσης έως ότου τα αποτελέσματα με τη μέθοδο της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας να ταυτιστούν με τα αποτελέσματα της επίλυσης όλων των φαινομένων.

Το μόνο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η παραπάνω μέθοδος είναι η πιθανότητα να υποεκτιμηθεί η ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης, κυρίως, όταν η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας είναι αρκετά απότομη, δηλαδή παρουσιάζει μεγάλες κλίσεις. Το παραπάνω, αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη ευκολία πυκνώνοντας το χωρικό πλέγμα.

3.2.3 Μέθοδος της ενθαλπίας

Η μέθοδος της ενθαλπίας [Mehaffey et al., 1994, Fikiin, 1996, Gerlich et al., 1996, Takeda & Mehaffey, 1998, Clancy, 2001, Thomas, 2002, Takeda, 2003, Thomas, 2010] εκφράζει την απλή εξίσωση αγωγής θερμότητας ως προς την ενθαλπία και τη θερμοκρασία (Εξίσωση 3-8). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το ολοκλήρωμα, ως προς τη θερμοκρασία, της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, το οποίο στην ουσία είναι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3-9.

$$\rho_{eff} \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$$

Εξίσωση 3-8

$$h(T) = \int_{T_{amb}}^T C_{eff}(T) dT$$

Εξίσωση 3-9

3.3 Υπολογιστική προσομοίωση ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε δομικά υλικά και στοιχεία

Η υπολογιστική προσομοίωση της ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας, σε συνδυασμό με αλλαγή φάσης και παραγωγή/απορρόφηση ενέργειας, μέσα σε πορώδη υλικά είναι ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο προς μελέτη, το οποίο έχει απασχολήσει εκτενώς την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Εφαρμογές με ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας συναντώνται έντονα στη βιομηχανία, όπως σε διαδικασίες ξήρασης [Chang & Weng, 2000, Foss et al., 2003, Fo et al., 2004, Lu & Shen, 2007], σε διαδικασίες ψύξης [Andoh & Lips, 2003], στη βιομηχανία τροφίμων [Pham & Karuri, 1999, Dincov et al., 2004, Handami et al., 2004], στη μηχανική των ορυκτών [Rutqvist et al., 2002] κ.α. Όσον αφορά τα δομικά υλικά, οι μελέτες που έχουν γίνει αφορούν τη συμπεριφορά τους είτε σε συνθήκες περιβάλλοντος¹⁰ [Mendes et al., 2002, Gaur & Bansal, 2002, Wyrwal & Marynowicz, 2002, Chen & Shi, 2005, Dos Santos & Mendes, 2006, Qin et al., 2006, Hu et al., 2007, Nguyen et al., 2008, Qin et al., 2009], είτε σε συνθήκες φωτιάς¹¹, κυρίως για τσιμέντο [Bazant & Thonguthai, 1978, Bazant & Thonguthai, 1979, Huang, 1979, Huang et al., 1979, Bazant et al., 1981, Dayan, 1982α και β, Ahmed & Hurst, 1995, Abedl-Rahman & Ahmed, 1996, Ahmed & Hurst, 1997, Ahmed & Hurst, 1999, Tenchev et al., 2001α και β, Schrefler & Pesavento, 2004, Stakulcharoen et al., 2006] και λιγότερο για γυψοσανίδα [Ang & Wang, 2004, Manzello et al., 2007β, Craft et al., 2008, Ang & Wang, 2009, Shepel et al., 2010, Weber, 2012].

Σε όλες αυτές τις μελέτες γίνονται διάφορες παραδοχές, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Το υλικό θεωρείται ένα συνεχές πολυφασικό πορώδες σύστημα.
- Οι πόροι του υλικού μπορούν να καταλαμβάνονται ταυτόχρονα και από υγρά και από αέρια μίγματα, καθιστώντας το σύστημα ως τριφασικό (στερεό, υγρό και αέριο), ενώ κάθε φάση μπορεί να αποτελείται από διάφορα συστατικά.

¹⁰ Παράδειγμα αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της υγρασίας μέσα σε μια τοιχοποιία.

¹¹ Παράδειγμα αποτελεί η εξάτμιση του κρυσταλλικού νερού, που υπάρχει μέσα σε ένα δομικό υλικό, ή η πυρόλυση ενός υλικού, με αποτέλεσμα τη μεταφορά αερίων συστατικών στο εσωτερικό του υλικού.

- Επικρατούν συνθήκες τοπικής θερμοδυναμικής ισορροπίας μεταξύ του στερεού και του ρευστού σε κάθε σημείο, δηλαδή σε κάθε σημείο του χωρίου οι θερμοκρασίες τους είναι ίδιες.
- Η μεταφορά της μάζας των συστατικών λαμβάνει χώρα μέσω συναγωγής και διάχυσης, ενώ η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.
- Η επίδραση της κλίσης της θερμοκρασίας στη μεταφορά μάζας (φαινόμενο Soret) και της κλίσης της συγκέντρωσης στη μεταφορά θερμότητας (φαινόμενο Dufour) θεωρείται αμελητέα.
- Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις, η κίνηση της υγρής φάσης θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με την κίνηση της αέριας.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή βασικών μεγεθών, καθώς και οι εξισώσεις διατήρησης για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας μέσα σε πορώδη υλικά, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κίνηση της υγρής φάσης, αλλά μόνο της αέριας.

3.3.1 Ροή μάζας αερίου συστατικού

Η μεταφορά της μάζας ενός αερίου συστατικού g λαμβάνει χώρα μέσω της συναγωγής και της διάχυσης. Η ροή μάζας λόγω συναγωγής, σύμφωνα με το νόμο του Darcy, μπορεί να συσχετιστεί με την κλίση της πίεσης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3-10.

$$\mathbf{j}_{pres}^{(g)} = -C^{(g)} \frac{K}{\mu_G} \nabla P_G$$

Εξίσωση 3-10

Όπου $C^{(g)}$ είναι η συγκέντρωση κατά μάζα του αερίου συστατικού g , K η διαπερατότητα, μ_G και P_G η δυναμική συνεκτικότητα και ολική πίεση του αερίου μίγματος, αντίστοιχα. Η δυναμική συνεκτικότητα ενός αερίου μίγματος μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξίσωση 3-11 [Παπαγεωργίου, 1991], όπου $\mu^{(g)}$ και $MW^{(g)}$ είναι η δυναμική συνεκτικότητα και το μοριακό βάρος του συστατικού g . Η ολική πίεση, P_G , προκύπτει από το άθροισμα των μερικών πιέσεων, $p^{(g)}$, των αερίων συστατικών του μίγματος (νόμος Dalton), όπως φαίνεται και από την Εξίσωση 3-12.

$$\mu_G = \frac{\sum_{g=1}^{N_G} \frac{C^{(g)}}{\sqrt{MW^{(g)}}} \mu^{(g)}}{\sum_{g=1}^{N_G} \frac{C^{(g)}}{\sqrt{MW^{(g)}}}}$$

Εξίσωση 3-11

$$P_G = \sum_{g=1}^{N_G} p^{(g)}$$

Εξίσωση 3-12

Η μερική πίεση κάθε αερίου συστατικού υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-13.

$$p^{(g)} = \frac{C^{(g)} R_g T}{MW^{(g)}}$$

Εξίσωση 3-13

Όπου R_g είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων.

Η ροή μάζας λόγω διάχυσης, σύμφωνα με τον νόμο του Fick, μπορεί να συσχετιστεί με την κλίση της συγκέντρωσης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3-14.

$$\mathbf{j}_{diff}^{(g)} = -D_{eff} \nabla C^{(g)}$$

Εξίσωση 3-14

Όπου D_{eff} είναι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης.

3.3.2 Εξίσωση διατήρησης μάζας

Η εξίσωση διατήρησης καθενός από τα N_G αέρια συστατικά μέσα σε ένα πορώδη υλικό περιγράφεται από την Εξίσωση 3-15, η οποία λαμβάνει υπόψη της μεταφορά μάζας λόγω διάχυσης και λόγω κλίσης πίεσης:

$$\phi \frac{\partial C^{(g)}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{j}_{diff}^{(g)} + \mathbf{j}_{pres}^{(g)}) + \dot{Q}_M^{(g)}$$

Εξίσωση 3-15

Ο τελευταίος όρος του δεξιού σκέλους αντιστοιχεί στον όρο πηγής ή κατανάλωσης μάζας του συστατικού g .

3.3.3 Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας μέσα σε ένα πορώδη υλικό περιγράφεται από την Εξίσωση 3-16, 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.

$$\left((1-\phi)\rho_s C_s + \phi \sum_{g=1}^{N_G} C_p^{(g)} C_p^{(g)} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{q}_{cond} + \mathbf{q}_{diff} + \mathbf{q}_{pres}) + \phi \frac{\partial P_G}{\partial t} + \dot{Q}_E$$

Εξίσωση 3-16

Όπου οι ροές θερμότητας λόγω αγωγής (νόμος Fourier) και μεταφοράς μάζας προσδιορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\mathbf{q}_{cond} = -k_{eff} \nabla T$$

Εξίσωση 3-17

$$\mathbf{q}_{diff} = \left(\sum_{g=1}^{N_G} C_p^{(g)} \mathbf{j}_{diff}^{(g)} \right) T$$

Εξίσωση 3-18

$$\mathbf{q}_{pres} = \left(\sum_{g=1}^{N_G} C_p^{(g)} \mathbf{j}_{pres}^{(g)} \right) T$$

Εξίσωση 3-19

Όπου k_{eff} είναι η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα και $C_p^{(g)}$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου συστατικού g . Τέλος, ο τελευταίος όρος του δεξιού σκέλους αντιστοιχεί στον όρο πηγής ή κατανάλωσης ενέργειας.

3.4 Οριακές συνθήκες

Η ολική πίεση του αερίου μίγματος στα όρια θεωρείται ότι είναι ίδια με την πίεση του περιβάλλοντος (Εξίσωση 3-20) (συνθήκη Dirichlet), που έχει ως συνέπεια η συνολική ροή μάζας στα όρια να οφείλεται μόνο στο μηχανισμό της

διάχυσης με το περιβάλλον (Εξίσωση 3-21) (συνθήκη Neumann) (Εικόνα 3-2) [Ahmed & Hurst, 1997, Ang & Wang, 2004, Ang & Wang, 2009].

$$P_G|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B} = P_{G,amb}$$

Εξίσωση 3-20

$$\mathbf{j}_{diff}^{(g)} \cdot \mathbf{n}|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B} = h_m \left\{ C_{amb}^{(g)} - C^{(g)}|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B} \right\}$$

Εξίσωση 3-21

Όπου \mathbf{X}_B είναι το διάνυσμα θέσης στο όριο, \mathbf{n} το κάθετο διάνυσμα στο όριο και h_m ο συντελεστής συναγωγής μάζας. Ο συντελεστής συναγωγής μάζας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση που δίνουν οι Ahmed και Hurst [Ahmed & Hurst, 1997], η οποία δίνεται από την Εξίσωση 3-22, όπου ρ_{air} και $C_{p,air}$ είναι η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, Pr και Sc είναι οι αριθμοί Prandtl και Schmidt και h_c είναι ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας.

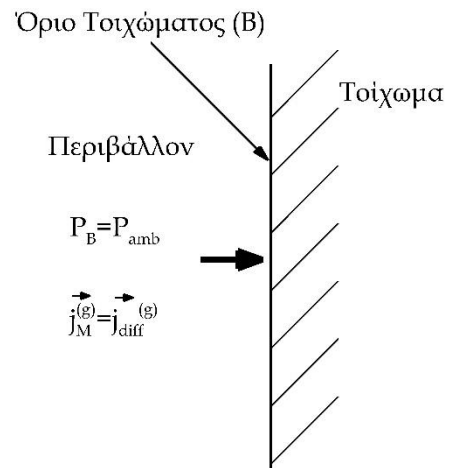
$$h_m = \frac{1}{\rho_{air} C_{p,air}} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} h_c$$

Εξίσωση 3-22

Επειδή η ολική πίεση στα όρια θεωρείται ότι είναι ίση με την πίεση του περιβάλλοντος, τότε η κατά μάζα συγκέντρωση ενός αερίου συστατικού j στο όριο υπολογίζεται από την Εξίσωση 3-23 (συνθήκη Dirichlet), ενώ για όλα τα άλλα συστατικά χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3-21.

$$C^{(j)}|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B} = \frac{MW^{(j)}}{R_g T|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B}} \left\{ P_{G,amb} - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq j}}^{N_G} \frac{C^{(g)}|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B} R_g T|_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_B}}{MW^{(g)}} \right\}$$

Εξίσωση 3-23



Εικόνα 3-2 Οριακή συνθήκη στο τοίχωμα για τη μεταφορά μάζας και την ολική πίεση

Όσον αφορά τις θερμικές οριακές συνθήκες στο όριο του τοιχώματος, διαχωρίζονται δύο κατηγορίες οριακών συνθηκών (Εικόνα 3-3):

Η θερμοκρασία του τοιχώματος συναρτήσει του χρόνου είναι δεδομένη (Εξίσωση 3-24) (συνθήκη Dirichlet).

Η ροή θερμότητας λόγω αγωγής (\mathbf{q}_{cond}), στο όριο του τοιχώματος, ισούται με το άθροισμα της ροής θερμότητας λόγω συναγωγής (\mathbf{q}_{conv}), λόγω ακτινοβολίας (\mathbf{q}_{rad}), λόγω δεδομένης ροής θερμότητας από εξωτερική πηγή (\mathbf{q}_{ES}) και λόγω μεταφοράς μάζας από/προς το τοίχωμα (\mathbf{q}_M) (Εξίσωση 3-25) (συνθήκη Neumann).

$$T|_{x=X_B} = T(t)$$

Εξίσωση 3-24

$$\mathbf{q}_{cond} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} = \mathbf{q}_{conv} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} + \mathbf{q}_{rad} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} + \mathbf{q}_{ES} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} + \mathbf{q}_M \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B}$$

Εξίσωση 3-25

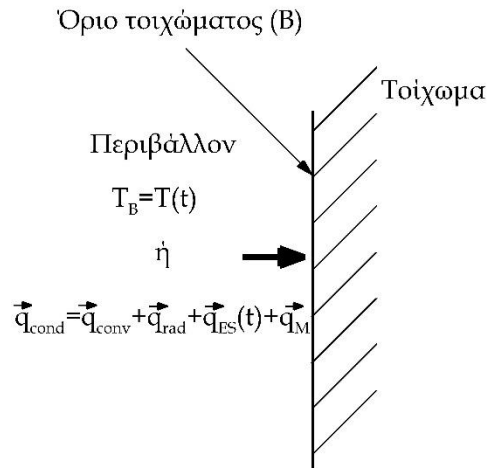
Η ροή θερμότητας, στο όριο του τοιχώματος, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας υπολογίζονται από την Εξίσωση 3-26 και την Εξίσωση 3-27, αντίστοιχα [Incropera & DeWitt, 1985].

$$\mathbf{q}_{conv} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} = h_{conv} (T_{amb} - T|_{x=X_B})$$

Εξίσωση 3-26

$$\mathbf{q}_{rad} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4|_{x=X_B})$$

Εξίσωση 3-27



Εικόνα 3-3 Οριακή συνθήκη στο τοίχωμα για τη μεταφορά θερμότητας

Όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του τοιχώματος και σ η σταθερά Stefan-Boltzmann. Η συνολική ροή θερμότητας λόγω μεταφοράς μάζας ισούται με το άθροισμα των επί μέρους ροών θερμότητας λόγω μεταφοράς μάζας με διάχυση και κλίση πίεσης, όπως φαίνεται και από την Εξίσωση 3-28.

$$\mathbf{q}_M \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} = \mathbf{q}_{diff} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B} + \mathbf{q}_{pres} \cdot \mathbf{n}|_{x=X_B}$$

Εξίσωση 3-28

3.5 Υπολογιστικός κώδικας HETRAN

Για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικής τοιχοποιίας σε συνθήκες φωτιάς χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN (HEat TRansfer ANalysis), ο οποίο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, ΕΜΠ, με στόχο την προσομοίωση της ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πορώδη δομικά υλικά [Kontogeorgos & Founti, 2010]. Τα κύρια χαρακτηριστικά του υπολογιστικού κώδικα HETRAN είναι ότι μπορεί να λάβει υπόψη του μεταβλητές ιδιότητες υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας, μεταβλητές οριακές συνθήκες συναρτήσει του χρόνου, μετάδοση θερμότητας σε πολυστρωματικά υλικά¹², προσομοίωση αντιδράσεων κατά τη θέρμανση δομικών υλικών και, τέλος, προσομοίωση ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πορώδη δομικά υλικά κτιρίων (π.χ. τοιμέντο, γυψοσανίδα κ.α.). Από την άλλη μεριά, ο μονοδιάστατος υπολογιστικός κώδικας HETRAN, επιλύει ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας σε πολυστρωματικά υλικά ίδιας φάσης¹³, η μεταφοράς θερμότητας μέσα σε διάκενα

¹² Τα πολυστρωματικά υλικά μπορεί να είναι υλικά ίδιας φάσης, π.χ. στρώματα από διαφορετικά στερεά υλικά, ή διαφορετικής φάσης, π.χ. δύο στερεά υλικά, όπου ανάμεσά τους υπάρχει κενό αέρος.

¹³ Δεν μπορεί να επιλύσει ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας σε περίπτωση όπου υπάρχει διάκενο ανάμεσα από δύο πορώδη υλικά.

γίνεται μόνο με αγωγή και δεν λαμβάνεται υπόψη η σμίκρυνση ή η μερική καταστροφή που μπορεί να υποστούν δομικά υλικά κτιρίων κατά τη θέρμανσή τους σε συνθήκες φωτιάς.

3.5.1 Γενικευμένη εξίσωση

Όλες οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μπορούν να συγκεντρωθούν και να γραφούν σε μία γενικευμένη εξίσωση¹⁴, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3-29.

Πίνακας 3-1 Μεταβλητές και συντελεστές της γενικευμένης εξίσωσης

\mathbf{f}	\mathbf{A}_f	\mathbf{B}_f	\mathbf{C}_f	\mathbf{Q}_f
$C^{(g)}$	ϕ	D_{eff}	$-\frac{K}{\mu_G} \nabla P_G$	$\dot{Q}_M^{(g)}$
T	$\left((1-\phi)\rho_S C_S + \phi \sum_{g=1}^{N_G} C^{(g)} C_p^{(g)} \right)$	k_{eff}	$\sum_{g=1}^{N_G} \left\{ C_p^{(g)} (\mathbf{j}_{diff}^{(g)} + \mathbf{j}_{pres}^{(g)}) \right\}$	\dot{Q}_E

$$\mathbf{A}_f \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{B}_f \nabla \mathbf{f}) - \nabla \cdot (\mathbf{C}_f \mathbf{f}) + \mathbf{Q}_f$$

Εξίσωση 3-29

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει τις μεταβλητές και τους συντελεστές της παραπάνω γενικευμένης εξίσωσης.

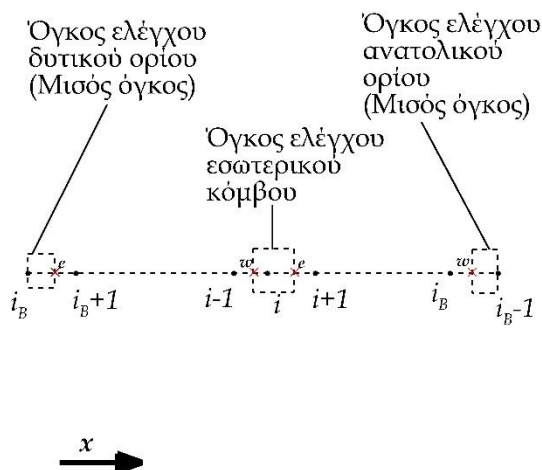
3.5.2 Διακριτοποίηση φυσικού χώρου και διαφορικών εξισώσεων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN είναι μονοδιάστατος. Για την επίλυση της μονοδιάστατης γενικευμένης εξίσωσης (Εξίσωση 3-29), χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων [Patankar, 1980]. Έτσι, η Εξίσωση 3-29 ολοκληρώνεται πάνω σε έναν όγκο ελέγχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4.

Το χωρίο επίλυσης χωρίζεται σε N το πλήθος υπολογιστικούς κόμβους, i , δημιουργώντας, έτσι, $N-1$ υπολογιστικά κελιά, των οποίων οι διεπιφάνειες, w και e , κείτονται στο μέσο της απόστασης δύο υπολογιστικών κόμβων. Οι δύο οριακοί κόμβοι (δυτικός και ανατολικός) είναι μισοί, αφού η μια διεπιφάνειά τους περνάει από τον οριακό κόμβο. Όλες μεταβλητές υπολογίζονται και αποθηκεύονται στους κόμβους, εκτός από τις ροές μάζας και θερμότητας, οι οποίες υπολογίζονται στις διεπιφάνειες του όγκου ελέγχου.

Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση 3-29 σε έναν πεπερασμένο όγκο ελέγχου και εφαρμόζοντας το θεώρημα του Gauss [Καδιανάκης κ.α., 2000], προκύπτει το διακριτοποιημένο, προς επίλυση, σύστημα εξισώσεων [Trelles & Lattimer, 2007], σύμφωνα με την Εξίσωση 3-30, όπου οι συντελεστές της εξίσωσης υπολογίζονται από την Εξίσωση 3-31. Όπου $C_{f,x}$ είναι η συνιστώσα στην κατεύθυνση x του διανύσματος \mathbf{C}_f .

¹⁴ Η γενικευμένη εξίσωση είναι γραμμένη σε διανυσματική μορφή και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις διαστάσεις.



Εικόνα 3-4 Όγκος ελέγχου εσωτερικού και οριακού κόμβου.

3.5.3 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 3-32.

$$\begin{aligned} f|_{i_B} &= f(t) \\ \frac{df}{dt}|_{i_B} &= 0 \end{aligned}$$

Εξίσωση 3-32

Στην περίπτωση που η οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται επιβάλλει τη ροή¹⁵, F_f , της προς επίλυσης μεταβλητής στο όριο (συνθήκη Neumann) [Cheng & Cheng, 2005], τότε ισχύει η Εξίσωση 3-33.

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

Εξίσωση 3-33

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 3-34, ενώ για τον δυτικό οριακό κόμβο δίνονται από την Εξίσωση 3-35.

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

Εξίσωση 3-30

$$\begin{aligned} C_{B,i}^f &= \left\{ B_{f,e} \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} - B_{f,w} \frac{f_i - f_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right\} \\ C_{C,i}^f &= - \left\{ C_{f,x,e} \frac{f_{i+1} + f_i}{2} - C_{f,w} \frac{f_i + f_{i-1}}{2} \right\} \\ C_{Q,i}^f &= \left\{ Q_{f,e} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + Q_{f,w} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right\} \\ C_{A,i}^f &= \left\{ A_{f,e} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + A_{f,w} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right\} \end{aligned}$$

Εξίσωση 3-31

¹⁵ Η ροή μιας μεταβλητής εξαρτάται από το είδος της οριακή συνθήκης, (παράγραφος 3.4)

$$\begin{aligned}
 C_{B,i_B}^f &= -B_{f,w} \frac{f_{i_B} - f_{i_B-1}}{x_{i_B} - x_{i_B-1}} \\
 C_{C,i_B}^f &= C_{f,x,w} \frac{f_{i_B} + f_{i_B-1}}{2} \\
 C_{Q,i_B}^f &= Q_{f,w} \frac{x_{i_B} - x_{i_B-1}}{2} \\
 C_{A,i_B}^f &= A_{f,w} \frac{x_{i_B} - x_{i_B-1}}{2}
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 3-34

$$\begin{aligned}
 C_{B,i_B}^f &= B_{f,e} \frac{f_{i_B+1} - f_{i_B}}{x_{i_B+1} - x_{i_B}} \\
 C_{C,i_B}^f &= -C_{f,x,e} \frac{f_{i_B+1} + f_{i_B}}{2} \\
 C_{Q,i_B}^f &= Q_{f,e} \frac{x_{i_B+1} - x_{i_B}}{2} \\
 C_{A,i_B}^f &= A_{f,e} \frac{x_{i_B+1} - x_{i_B}}{2}
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 3-35

3.5.4 Γενικός αλγόριθμος επίλυσης

Το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει μετά τη διακριτοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (Εξίσωση 3-30, Εξίσωση 3-32 και Εξίσωση 3-33), μπορεί να συνοψισθεί σε ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων, γραμμένο σε μητρική μορφή, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-36.

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

Εξίσωση 3-36

Τα μητρώα του παραπάνω συστήματος δίνονται από την Εξίσωση 3-37, την Εξίσωση 3-38 και την Εξίσωση 3-39, αντίστοιχα.

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

Εξίσωση 3-37

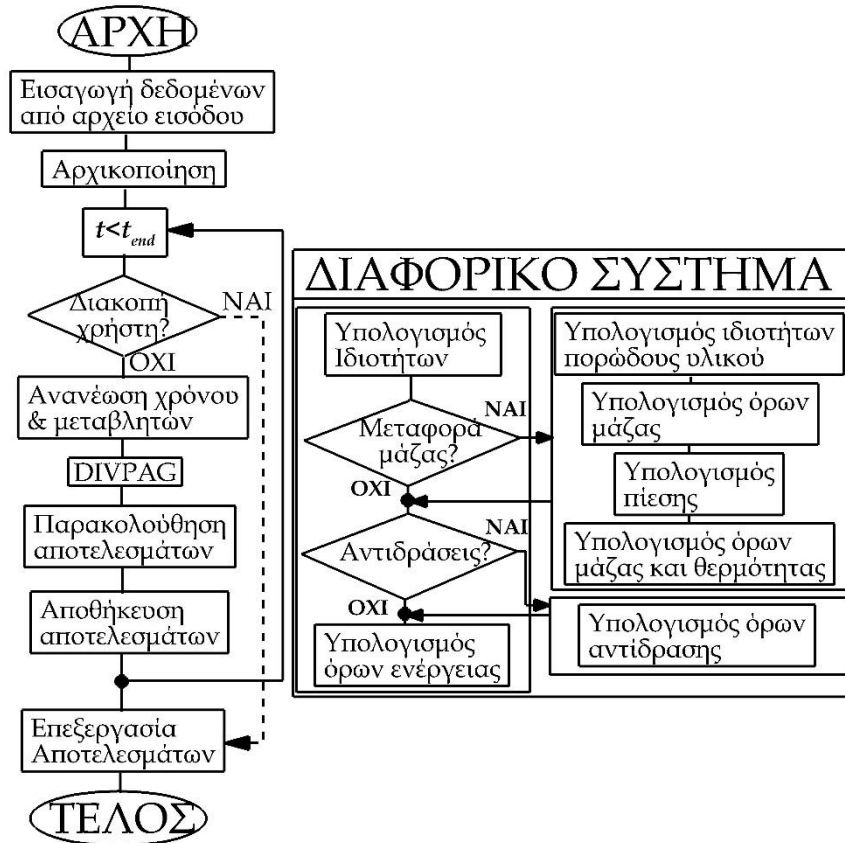
Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Εξίσωση 3-36) χρησιμοποιήθηκε η προς τα πίσω μέθοδος διαφόρισης (Backward Differentiation Formula) του Gear [Gear, 1971] με αυτόματη προσαρμογή χρονικού βήματος και τάξης ακρίβειας, μέσω της υπορουτίνας DIVPAG της βιβλιοθήκης IMSL της FORTRAN [IMSL, 1997]. Στην Εικόνα 3-5 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος επίλυσης του υπολογιστικού κώδικα HETRAN.

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

Εξίσωση 3-38

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

Εξίσωση 3-39



Εικόνα 3-5 Αλγόριθμος επίλυσης του υπολογιστικού κώδικα HETRAN.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συνοπτικά οι πειραματικές μετρήσεις της συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν. Οι πειραματικές μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης και έχουν δημοσιευτεί σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό [Kontogeorgos et al., 2016]. Οι πειραματικές μετρήσεις παρόλο που δεν είναι αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται ώστε να μπορέσει ο χρήστης να κατανοήσει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και κατά επέκταση τη μοντελοποίησή τους.

4.2 Περιγραφή πειραματικών μετρήσεων

Οι πειραματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση της ορθότητας της υπολογιστικής προσομοίωσης έγιναν στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης και παρουσιάζονται με λεπτομέρειες στην εργασία των Kontogeorgos et al. [Kontogeorgos et al., 2016].

Πίνακας 4-1. Γενικές πληροφορίες των υπό μελέτη υλικών.

Υλικό	k ($W m^{-1} K^{-1}$)	ρ ($kg m^{-3}$)	C_p ($J kg^{-1} K^{-1}$)	Σύσταση
Στάνταρντ Γυψοσανίδα	0.25	820	1000	-
Γυψοσανίδα με Υλικά Αλλαγής Φάσης ¹⁶ (ΥΑΦ)	0.28	790	1000	19.1% ΥΑΦ (78% n-heptadecane με σημείο τήξης 22 °C, 22% PMMA ¹⁷)
Πετροβάμβακας	0.035	35	850	-
Διογκωμένη Πολυστερίνη	0.032	40	1300	-
Μονωτικά πάνελ κενού ή αλλιώς vacuum insulation panels (VIP) ¹⁸	0.007	195	800	98% fumed silica (οξειδία του πυριτίου), 2% (cellulose fibers) ίνες κυτταρίνης, organic binders (οργανικά πρόσθετα) και γραφίτης

¹⁶ Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης είναι υλικά που αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα, χρησιμοποιώντας χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση θερμότητας συμβαίνει, όταν ένα υλικό μεταπίπτει από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό αντίστοιχα.

¹⁷ Poly(methyl methacrylate) (PMMA): Πλεξίγκλας

¹⁸ Τα μονωτικά πάνελ κενού είναι υλικά τα οποία αποτελούνται από νανο-πορώδες υλικό του πυρήνα, το οποίο περικλείεται από ένα αεροστεγώς σφραγισμένο, αλουμινένιο ή πολυμερές περίβλημα και τα οποία με την εφαρμογή συνθηκών κενού στον πυρήνα και τη μείωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, επιτυγχάνεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας περίπου 0,003-0,005 W/(m·K) στην αρχική τους κατάσταση και έως 0,008 W/(m·K) μετά από 25 χρόνια ζωής, τιμές 5- 12 φορές μικρότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών θερμομονωτικών υλικών.]

Η συνολική πειραματική διαδικασία ακολούθησε δύο διαδρομές: αρχικά, προσδιορίστηκε η χημική αντιδραστικότητα των υλικών που εξετάστηκαν κάτω από αδρανείς συνθήκες και συνθήκες οξείδωσης, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα μικρής κλίμακας, στα οποία τοιχοποιίες διαφόρων υλικών εκτέθηκαν σε συνθήκες φωτιάς. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει κάποιες γενικές πληροφορίες των υπό μελέτη υλικών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πειράματα της εν λόγω εργασίας.

4.2.1 Πειράματα χημικής αντιδραστικότητας

Προκειμένου να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά διαφόρων τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς θα πρέπει να είναι γνωστό ή να μελετηθεί το πώς συμπεριφέρονται τα υλικά που απαρτίζουν την εκάστοτε τοιχοποιία ξεχωριστά το καθένα. Για το λόγο αυτό, στην εργασία των Kontogeorgos et al., για τη μελέτη της χημικής αντιδραστικότητας των υπό μελέτη υλικών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης¹⁹ (ΔΘΣ) με τη συσκευή Star^e SW 8.10, Mettler Toledo με ακρίβεια $\pm 2\%$. Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 25 °C και 600 °C, χρησιμοποιώντας σταθερούς ρυθμούς θέρμανσης, 10 °C/min και 20 °C/min, σε αδρανές (άζωτο) και οξειδωμένο (αέρα) περιβάλλον. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις μετρήσεις της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης μπορούν να ληφθούν από την συγκεκριμένη εργασία.

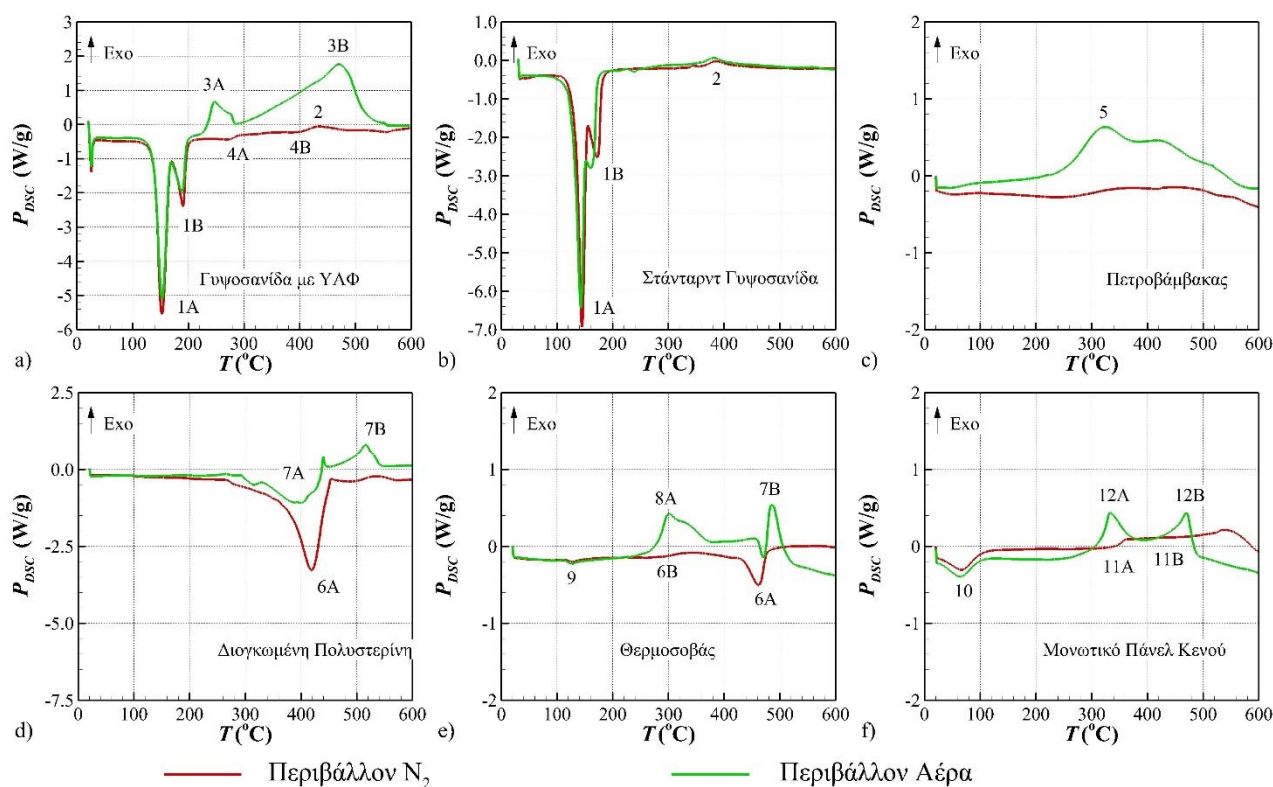
Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ΔΘΣ για τα υπό μελέτη υλικά σε αδρανές (N₂) και οξειδωμένο (air) περιβάλλον. Στην Εικόνα 4-1a παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΔΘΣ για τη γυψοσανίδα με ΥΑΦ, όπου οι κορυφές 1A και 1B απεικονίζουν τις γνωστές αντιδράσεις αφυδάτωσης της γυψοσανίδας [Kontogeorgos & Founti, 2012a & β] που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 100 °C και 250 °C, ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης. Η συγκεκριμένη χημική διεργασία είναι ενδόθερμη και απορροφά σημαντικά ποσά ενέργειας, για αυτό και η αφυδάτωση της γυψοσανίδας είναι μια διαδικασία που μπορεί να καθυστερήσει την εξάπλωση της φωτιάς. Εκτός, όμως, από την αφυδάτωση της γυψοσανίδας, παρατηρούνται και άλλες κορυφές, οι οποίες σχετίζονται με τη χημική αντιδραστικότητα των ΥΑΦ. Σε αδρανές περιβάλλον, παρατηρείται η εξάτμιση της παραφίνης και του PMMA (κορυφές 4A και 4B) σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 °C και 500 °C (ενδόθερμες αντιδράσεις με απορρόφηση θερμότητας), ενώ σε περιβάλλον αέρα παρατηρείται η οξείδωση των παραπάνω συστατικών στο ίδιο θερμοκρασιακό εύρος (κορυφές 3A και 3B, εξώθερμες αντιδράσεις). Η Εικόνα 4-1b παρουσιάζει τις μετρήσεις ΔΘΣ για τη σάνταρντ γυψοσανίδα, όπου οι κλασσικές αντιδράσεις αφυδάτωσης είναι εμφανείς και σε αυτήν την περίπτωση (κορυφές 1A και 1B). Επιπλέον, σε θερμοκρασία περίπου 380 °C, παρατηρείται μια μικρή κορυφή (κορυφή 2) η οποία αντιστοιχεί στη αντίδραση αλλαγής της κρυσταλλικής δομής της γυψοσανίδας ή οποία είναι μια εξώθερμη διαδικασία.

Στην Εικόνα 4-1c παρουσιάζονται οι μετρήσεις ΔΘΣ για τα δείγματα του πετροβάμβακα, όπου όπως είναι φανερό, σε αδρανές περιβάλλον παρατηρείται μια ελαφρώς ενδόθερμη αντίδραση σε θερμοκρασία περίπου 265 °C. Η συγκεκριμένη αντίδραση σχετίζεται με την εξάτμιση της ρητίνης που υπάρχει μέσα στον πετροβάμβακα και η οποία αποτελεί συνδετικό συστατικό του υλικού. Σε περιβάλλον αέρα, παρατηρείται ότι τα πηκτικά της ρητίνης

¹⁹ Η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης είναι μια πειραματική διαδικασία κατά την οποία ένα δείγμα εκτίθεται σε συγκεκριμένη θέρμανση ή ψύξη και στην οποία παρακολουθείται/μετρείται η ενέργεια που απορροφάται ή ελκύεται στην περίπτωση που λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις κατά τη συγκεκριμένη θέρμανση ή ψύξη.

οξειδώνονται, όπως φαίνεται από την κορυφή 5. Τέλος, σε θερμοκρασία περίπου 500 °C, σύμφωνα και με τις προδιαγραφές του υλικού, ξεκινάει η διαδικασία τήξης του υλικού [Jansson, 1992].

Στην Εικόνα 4-1d παρουσιάζονται οι μετρήσεις ΔΘΣ για τη διογκωμένη πολυστερίνη, όπου σε αδρανές περιβάλλον παρατηρείται μια ενδόθερμη διαδικασία (κορυφή 6A) η οποία αντιστοιχεί στη διάσπαση των χημικών δεσμών του πολυστυρενίου. Όταν το δείγμα θερμαίνεται σε θερμοκρασίες περίπου 160 °C, αρχίζει και λιώνει. Σε αδρανείς συνθήκες και σε θερμοκρασίες περίπου 275 °C ξεκινά η εξάτμιση του πολυμερούς, ενώ σε θερμοκρασίες μεταξύ 420 °C και 450 °C το πολυμερές έχει σχεδόν πλήρως εξατμιστεί. Τα πηκτικά που απελευθερώνονται κατά την εξάτμιση οξειδώνονται με την παρουσία του αέρα (κορυφή 7A). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενέργεια που εκλύεται από την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 275 °C και 450 °C είναι μικρότερη από την ενέργεια που απορροφάται κατά την εξάτμιση και για αυτό η διαδικασία οξείδωσης παραμένει μια «ενδόθερμη» διαδικασία. Στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 450 °C και 550 °C, όμως, η οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης είναι μια καθαρά εξώθερμη διαδικασία, όπως προκύπτει από την κορυφή 7B.



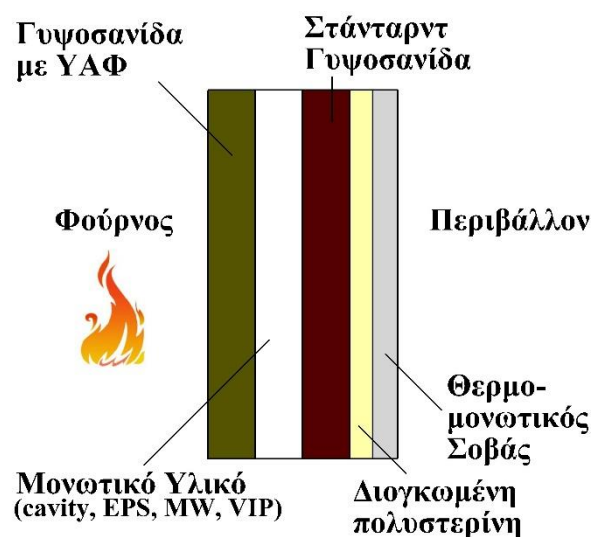
Εικόνα 4-1. Μετρήσεις Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης σε αδρανές και οξειδωμένο περιβάλλον: (a) γυψοσανίδα με ΥΑΦ, (b) στάνταρντ γυψοσανίδα, (c) πετροβάμβακας, (d) διογκωμένη πολυστερίνη, (e) θερμοσοβάς και (f) μονωτικό πάνελ κενού.

Στην Εικόνα 4-1e παρουσιάζονται οι μετρήσεις ΔΘΣ για τον θερμοσοβά. Ο συγκεκριμένος σοβάς είναι ένα μίγμα τοιμέντου και διογκωμένης πολυστερίνης. Για το λόγο αυτό, στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 50 °C και 200 °C, παρατηρείται μια ενδόθερμη αντίδραση, η οποία αντιστοιχεί στην αφυδάτωση του χημικά δεσμευμένου νερού του τοιμέντου (κορυφή 9) [Sha et al., 1999]. Οι κορυφές που παρατηρούνται σε θερμοκρασίες μεταξύ 300 °C και 450 °C σχετίζονται με την εξάτμιση της διογκωμένης πολυστερίνης (κορυφές 6A και 6B) και την οξείδωση των πηκτικών που εκλύονται από την εξάτμιση της διογκωμένης πολυστερίνης (κορυφές 8A και 8B).

Τέλος, στην Εικόνα 4-1f παρουσιάζονται οι μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$ για το μονωτικό πάνελ κενού, όπου παρατηρείται μια ενδόθερμη διαδικασία στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 20 °C και 100 °C (κορυφή 10), ανεξάρτητα από το περιβάλλον, το οποίο σχετίζεται με την εξάτμιση του νερού που υπάρχει μέσα στις ίνες της κυτταρίνης [Miranda et al., 2013]. Επιπλέον, σε θερμοκρασίες περίπου 320 °C και 480 °C, αντίστοιχα, παρατηρούνται οι κορυφές 11A και 11B, τόσο σε αδρανές περιβάλλον, όσο και σε περιβάλλον αέρα, οι οποίες σχετίζονται με την έκλυση των πιητικών από την εξάτμιση των ινών κυτταρίνης (ενδόθερμη διαδικασία), ενώ οι κορυφές 12A και 12B, αντιστοιχούν στις αντιδράσεις οξείδωσης των πιητικών [Miranda et al., 2013].

4.2.2 Πειράματα φούρνου μικρής κλίμακας

Τα πειράματα σχεδιάστηκαν με στόχο τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς σε φωτιά διάφορων κτιριακών υλικών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ξηράς δόμησης, καθώς και της αλληλεπίδρασής τους, αλλά και για να χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για την ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, τέσσερις διαφορετικές πολυστρωματικές τοιχοποιίες ξηράς δόμησης, αποτελούμενη η κάθε μία από πέντε διαφορετικές στρώσεις υλικών, εκτέθηκαν σε συνθήκες φωτιάς από τη μία μεριά (είσοδος φούρνου), ενώ η άλλη πλευρά ήταν εκτεθειμένη σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.



Εικόνα 4-2. Σχηματικό διάγραμμα πολυστρωματικής τοιχοποιίας.

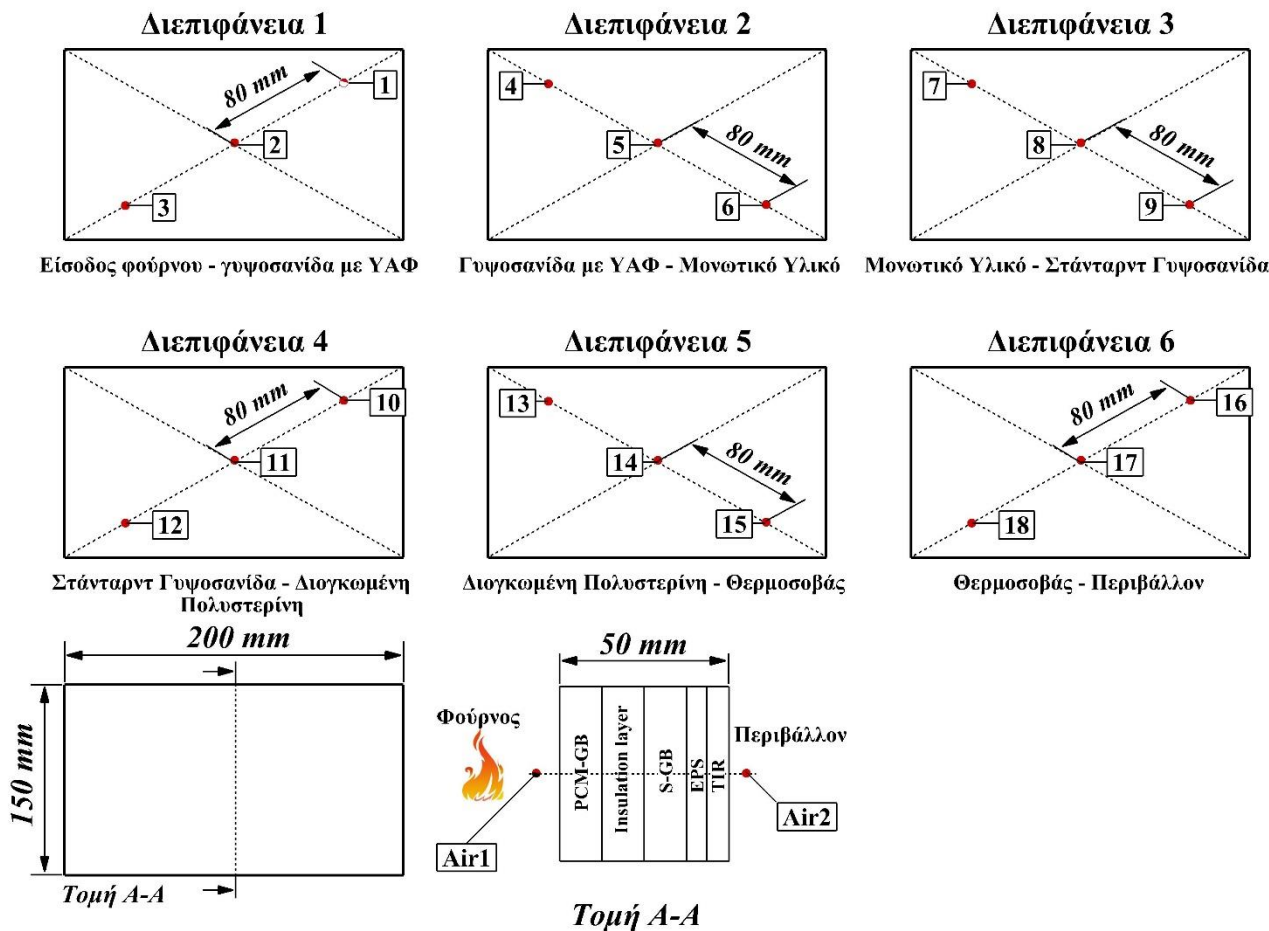
Η Εικόνα 4-2, παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα της κάθε τοιχοποιίας που χρησιμοποιήθηκε. Όπως φαίνεται, ξεκινώντας από την αριστερή πλευρά της τοιχοποιίας, η οποία είναι η πλευρά που εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς, το πρώτο υλικό είναι μια γυψοσανίδα με ΥΑΦ (PCM-GB), το τρίτο υλικό είναι μια συνήθης γυψοσανίδα (S-GB), το τέταρτο υλικό είναι διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και το πέμπτο υλικό είναι θερμομονωτικός σοβάς (ή αλλιώς θερμοσοβάς) (TIR), ο οποίος περιέχει σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης. Η διαφορά μεταξύ των τεσσάρων πειραμάτων είχε να κάνει με το δεύτερο υλικό, το οποίο ήταν διαφορετικό σε κάθε πείραμα. Έτσι, λοιπόν, στο πρώτο πείραμα, η δεύτερη στρώση της πολυστρωματικής τοιχοποιίας ήταν το διάκενο (cavity), στο δεύτερο πείραμα ήταν διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), στο τρίτο πετροβάμβακας (MW), ενώ στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα ήταν Μονωτικά πάνελ κενού (VIP). Το συνολικό πάχος κάθε τοιχοποιίας ήταν ίσο με 50 mm. Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει τη λίστα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πειραματική τοιχοποιία.

Στην Εικόνα 4-3 παρουσιάζονται οι θέσεις των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό (διεπιφάνεια μεταξύ των διαφορετικών υλικών) και τις εξωτερικές επιφάνειες της κάθε τοιχοποιίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα θερμοστοιχεία στην εξωτερική πλευρά του θερμομονωτικού σοβά (μη εκτεθειμένη πλευρά) επειδή τοποθετήθηκαν όταν ακόμα ο θερμομονωτικός σοβάς ήταν υγρός, «βυθιστήκαν»

ελαφρώς κατά 2 mm. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία να μετριέται σε απόσταση 48 mm από την εκτεθειμένη πλευρά και όχι 50 mm που ήταν το συνολικό πάχος της τοιχοποιίας. Για την καταγραφή των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκε η μονάδα καταγραφής δεδομένων Agilent ακριβείας ±2% και χρονικής απόκρισης 2 δευτερολέπτων (αυτό σημαίνει ότι η συσκευή λάμβανε μετρήσεις ανά δύο δευτερόλεπτα).

Πίνακας 4-2. Λίστα των πειραμάτων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

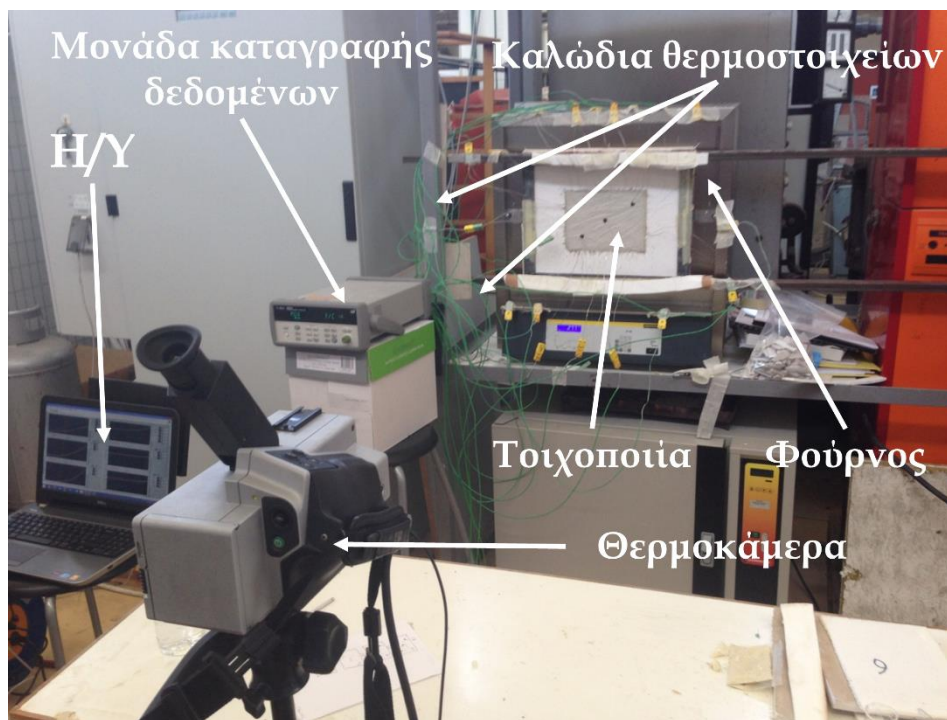
Αριθμός Πειράματος	Στρώση 1	Στρώση 2	Στρώση 3	Στρώση 4	Στρώση 5
Πείραμα 1	Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (12.5 mm)	Διάκενο (12.5 mm)	Στάνταρντ Γυψοσανίδα (12.5 mm)	Διογκωμένη Πολυστερίνη (6.0 mm)	Θερμοσοβάς (6.5 mm)
Πείραμα 2	Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (12.5 mm)	Διογκωμένη Πολυστερίνη (12.0 mm)	Στάνταρντ Γυψοσανίδα (12.5 mm)	Διογκωμένη Πολυστερίνη (6.0 mm)	Θερμοσοβάς (7.0 mm)
Πείραμα 3	Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (12.5 mm)	Πετροβάμβακας (12.5 mm)	Στάνταρντ Γυψοσανίδα (12.5 mm)	Διογκωμένη Πολυστερίνη (6.0 mm)	Θερμοσοβάς (6.5 mm)
Πείραμα 4	Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (12.5 mm)	Μονωτικό Πάnel Κενού (10.0 mm)	Στάνταρντ Γυψοσανίδα (12.5 mm)	Διογκωμένη Πολυστερίνη (6.0 mm)	Θερμοσοβάς (6.5 mm)



Εικόνα 4-3. Σχηματικό διάγραμμα της τοποθεσίας των θερμοστοιχείων σε κάθε διεπιφάνεια της πολυστρωματικής τοιχοποιίας.

Κάθε πειραματική τοιχοποιία τοποθετούταν στην είσοδο ενός φούρνου ακτινοβολίας Nabertherm® B180 (250 mm ύψος, 320 mm πλάτος και 550 mm βάθος) με τέτοιο τρόπο, ώστε η πλευρά της τοιχοποιίας με τη γυψοσανίδα με ΥΑΦ

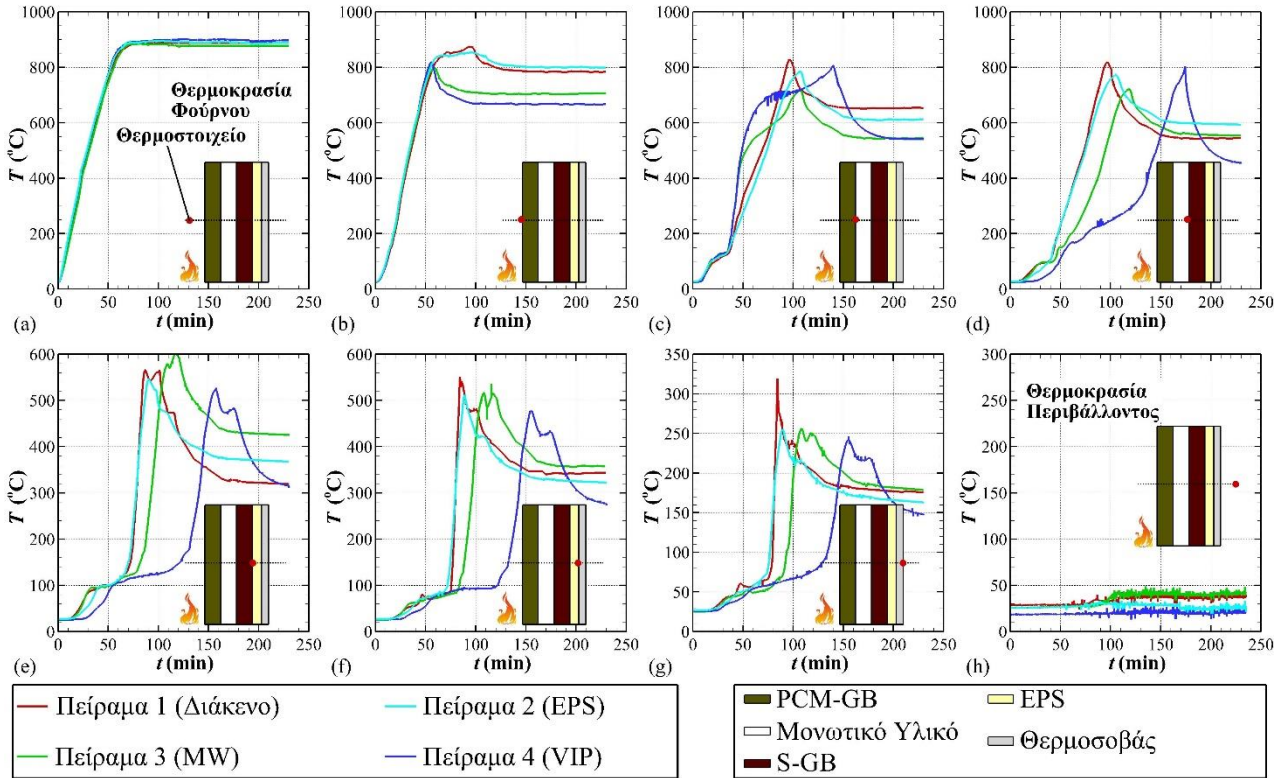
να εκτίθετο στο θερμικό φορτίο του φούρνου. Μετά την τοποθέτηση της τοιχοποιίας στην είσοδο του φούρνου, οριζόταν η θερμοκρασία του στους 900 °C. Κάθε πείραμα τερματιζόταν όταν οι καταγεγραμμένες θερμοκρασίες σταθεροποιούνταν, κάτι που σήμαινε ότι η διαδικασία έφτανε σε μόνιμες συνθήκες. Στην Εικόνα 4-4 παρουσιάζεται ολόκληρη η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και η τοιχοποιία τοποθετημένη στην είσοδο του φούρνου ακτινοβολίας.



Εικόνα 4-4. Πειραματική διάταξη.

Στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή του κεντρικού θερμοστοιχείου κάθε διεπιφάνειας, αλλά και στις εξωτερικές επιφάνειες των τοιχοποιιών, καθώς και στο εσωτερικό του φούρνου και στην πλευρά όπου επικρατούν θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όπως προέκυψε από την καταγραφή των θερμοκρασιών με την χρησιμοποίηση των θερμοστοιχείων. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η αφυδάτωση της γυψοσανίδας, δηλ. του κρυσταλλικού νερού που υπάρχει στην κρυσταλλική της δομή, καθυστερεί σημαντικά την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και κατά το πάχος της, τόσο στη γυψοσανίδα με ΥΑΦ, όσο και στην απλή γυψοσανίδα. Η διαδικασία αυτή είναι φανερή από το παρατηρούμενο θερμοκρασιακό πλατό στις διεπιφάνειες των υλικών (Εικόνα 4-5c έως Εικόνα 4-5g), το οποίο είναι πιο ξεκάθαρο στην μη εκτιθέμενη πλευρά (Εικόνα 4-5g), όπου η θερμοκρασιακή αύξηση μειώνεται σημαντικά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 30 min για το πρώτο πείραμα με το διάκενο μέχρι περίπου 70 min για το τέταρτο πείραμα με τα μονωτικά πάνελ κενού). Μόλις η διαδικασία της αφυδάτωσης ολοκληρώνεται, παρουσιάζεται μια απότομη θερμοκρασιακή αύξηση στις διεπιφάνειες πίσω από την στάνταρντ γυψοσανίδα και μέχρι τη μη εκτιθέμενη πλευρά (Εικόνα 4-5e έως Εικόνα 4-5g). Το παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της αφυδάτωσης, οι αφυδατωμένες περιοχές (πίσω από το μέτωπο της αφυδάτωσης), έχουν πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τις περιοχές μπροστά από το μέτωπο της αφυδάτωσης. Έτσι, μόλις ολοκληρωθεί η αφυδάτωση, οι περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες προστατεύονται από το μέτωπο της αφυδάτωσης, ξαφνικά υπόκεινται σε σημαντικά υψηλά θερμοκρασιακά πεδία.

Οι κορυφές που φαίνονται στην Εικόνα 4-5ε έως την Εικόνα 4-5g σχετίζονται με την οξείδωση των πηκτικών που εκλύονται από την εξάτμιση της διογκωμένης πολυστερίνης, η οποία λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ της διογκωμένης πολυστερίνης και του θερμοσοβά και στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 300 °C και 550 °C, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της ΔΘΣ (Εικόνα 4-1d και Εικόνα 4-1e). Η θερμοκρασιακή αύξηση που προκύπτει από αυτήν την οξείδωση επηρεάζει τη θερμοκρασιακή μεταβολή στις διεπιφάνειες της τοιχοποιίας προς την εκτεθειμένη πλευρά (Εικόνα 4-5b έως την Εικόνα 4-5d).



Εικόνα 4-5. Θερμοκρασιακή κατανομή: (a) μέσα στον φούρνο, (b) πάνω στην εκτεθειμένη πλευρά, (c) στη διεπιφάνεια μεταξύ της γυψοσανίδας με ΥΑΦ και του μονωτικού υλικού, (d) στη διεπιφάνεια μεταξύ του μονωτικού υλικού και της στάνταρντ γυψοσανίδας, (e) στη διεπιφάνεια μεταξύ της στάνταρντ γυψοσανίδας και της διογκωμένης πολυστερίνης, (f) στη διεπιφάνεια μεταξύ της διογκωμένης πολυστερίνης και του θερμοσοβά, (g) της μη εκτεθειμένης πλευράς και (h) της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Συγκρίνοντας τις τοιχοποιίες μεταξύ τους είναι φανερό ότι η τοιχοποιία με το μονωτικό πάνελ κενού (πείραμα 4) παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε φωτιά σε σχέση με τις υπόλοιπες τοιχοποιίες, όπου χρησιμοποιούνται συμβατικά μονωτικά ή το διάκενο. Η χρησιμοποίηση των μονωτικών πάνελ κενού οδηγεί σε μεγάλη καθυστέρηση της διάδοσης της θερμότητας μέσα από το πάχος των υλικών, κάτι το οποίο είναι ευδιάκριτο από το θερμοκρασιακό πλατό του πειράματος 4 (Εικόνα 4-5), το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα πλατό των υπολοίπων πειραμάτων. Η εφαρμογή του πετροβάμβακα ως μονωτικό υλικό (πείραμα 3) καθυστερεί τη μετάδοση της θερμότητας μέχρι τη θερμοκρασία των 500 °C όπου ξεκινάει να λιώνει. Όσον αφορά την εφαρμογή της διογκωμένης πολυστερίνης (πείραμα 2) ως μονωτικό υλικό, είναι φανερό ότι δεν προσφέρει μεγαλύτερη προστασία από την περίπτωση του διακένου (πείραμα 1) γιατί σε θερμοκρασία περίπου 200 °C, με αποτέλεσμα η τοιχοποιία με τη διογκωμένη πολυστερίνη να συμπεριφέρεται όπως η τοιχοποιία με το διάκενο. Τέλος, ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει τους χρόνους αστοχίας της κάθε τοιχοποιίας, όπως προέκυψαν σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας της μη εκτεθειμένης

πλευράς [EN 1995-1-2, 2004], όπου το κριτήριο ισχύει όταν η μέγιστη ή η μέση θερμοκρασιακή αύξηση στη μη εκτιθέμενη πλευρά είναι 180 °C ή 140 °C, αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η χρησιμοποίηση του μονωτικού πάνελ κενού οδηγεί σε σημαντική αύξηση του χρόνου αστοχίας.

Πίνακας 4-3. Χρόνος αστοχίας σε κάθε πίνακα.

Πείραμα	Χρόνος Αστοχίας (min)	Αύξηση (%)
Πείραμα 1	80.1	-
Πείραμα 2	81.6	2
Πείραμα 3	95.2	19
Πείραμα 4	134.9	68

4.3 Γενικά στοιχεία υπολογιστικής προσομοίωσης

Για την προσομοίωση του συγκεκριμένου πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας (βλ. παράγραφο 3.2.2). Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλων φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν την υπό μελέτη γεωμετρία.

4.3.1 Φυσικές ιδιότητες

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζονται και οι μεθοδολογίες μοντελοποίησης των φυσικών ιδιοτήτων, όπου αυτό είναι απαραίτητο.

4.3.1.1 Διάκενο

Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δύο τοιχώματα κάνει τον αέρα που υπάρχει στο διάκενο ανάμεσα να κινείται λόγω συναγωγής [ISO 6946, 2007, Kontogeorgos et al., 2012], το οποίο επηρεάζει σημαντικά τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας. Θεωρώντας, λοιπόν, στο διάκενο, ακίνητο αέρα προκύπτει σημαντικό σφάλμα, καθώς ο ακίνητος αέρας έχει πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου $0.03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), με αποτέλεσμα το διάκενο να λειτουργούσε ως ένα πάρα πολύ καλό μονωτικό υλικό, κάτι το οποίο δεν είναι αληθές στην πράξη. Για το λόγο αυτό, οι φυσικές ιδιότητες του αέρα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας μέσα στο διάκενο θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα συναγωγής που προκύπτουν από τη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο τοιχωμάτων. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από το ISO 6946 [ISO 6946, 2007], σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιείται μια φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του αέρα, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 4-1, όπου d είναι το πάχος του διακένου κατά την κύρια κατεύθυνση της μετάδοσης θερμότητας και R είναι η θερμική αντίσταση του διακένου.

$$k_{eff,cav}(T) = \frac{d}{R(T)}$$

Εξίσωση 4-1

Η θερμική αντίσταση του διακένου δίνεται από την Εξίσωση 4-2, όπου h_{conv} και h_{rad} είναι οι συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας, αντίστοιχα.

$$R(T) = \frac{1}{h_{conv}(T) + h_{rad}(T)}$$

Εξίσωση 4-2

Ο συντελεστής συναγωγής, h_{conv} , δίνεται από την Εξίσωση 4-3, όπου ο Πίνακας 4-4 δίνει τις τιμές της παραμέτρου $h^*_{conv}(T)$, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας.

$$h_{conv}(T) = \max\left(\frac{0.025}{d}, h^*_{conv}(T)\right)$$

Εξίσωση 4-3

Πίνακας 4-4. Συντελεστής συναγωγής.

Κατεύθυνση ροής θερμότητας	$h^*_{conv}(T)$	
	$\Delta T \leq 5$ K	$\Delta T > 5$ K
Οριζόντια	1.25	$0.73 \times (\Delta T)^{1/3}$
Προς τα πάνω	1.95	$1.14 \times (\Delta T)^{1/3}$
Προς τα κάτω	$0.12 \times d^{-0.44}$	$0.09 \times (\Delta T)^{0.87} \times d^{-0.44}$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας, h_{rad} , δίνεται από την Εξίσωση 4-4, όπου ϵ_1 και ϵ_2 είναι οι συντελεστές εκπομπής των δύο τοιχωμάτων²⁰, αντίστοιχα, ενώ T_m είναι η μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, η οποία δίνεται από την Εξίσωση 4-5, με $T_{surface,1}$ και $T_{surface,2}$ να είναι οι θερμοκρασίες των δύο τοιχωμάτων.

$$h_r(T) = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (4\sigma T_m^3)$$

Εξίσωση 4-4

$$T_m = \frac{T_{surface,1} + T_{surface,2}}{2}$$

Εξίσωση 4-5

4.3.1.2 Υλικά ξηράς δόμησης

Για τις φυσικές ιδιότητες των υλικών ξηράς δόμησης που υπάρχουν στις τοιχοποιίες χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στην εργασία των Semitelos et al. [Semitelos et al., 2016]. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία η φαινόμενη πυκνότητα δίνεται από την Εξίσωση 4-6, όπου ρ_0 είναι η αρχική πυκνότητα του υλικού, s_r είναι το ποσοστό συρρικνώσεως, N_R είναι ο αριθμός των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα στη γυψοσανίδα όταν εκτίθεται σε φωτιά. Τέλος, δm_r είναι το ποσοστό απώλειας μάζας (σε σχέση με την αρχική μάζα του υλικού) που λαμβάνει χώρα μετά το πέρας της r -οστής αντίδρασης, το οποίο δίνεται από την Εξίσωση 4-7, όπου $T_{onset,r}$ και $T_{endset,r}$ είναι οι θερμοκρασίες εκκίνησης και τερματισμού της r -οστής αντίδρασης, αντίστοιχα, και $\delta m_{tot,r}$ είναι το συνολικό ποσοστό απώλειας μάζας που υφίσταται το υλικό μετά το πέρας της r -οστής αντίδρασης.

²⁰ Για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές εκπομπής των δύο τοιχωμάτων θεωρήθηκαν ίσοι με 0.9.

$$\rho_{eff}(T) = \rho_0 \frac{1 - \sum_{r=1}^{N_k} \delta m_r(T)}{(1 - s_r(T))}$$

Εξίσωση 4-6

$$\delta m_r(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{onset,r} \\ \delta m_{tot,r} \frac{T - T_{onset,r}}{T_{endset,r} - T_{onset,r}}, & T_{onset,r} \leq T \leq T_{endset,r} \\ 0, & T > T_{endset,r} \end{cases}$$

Εξίσωση 4-7

Η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα δίνεται από την Εξίσωση 3-7, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, με c_{ref} να είναι η καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας που αντιστοιχεί στη λανθάνουσα θερμότητα του υλικού και c_r να είναι η επιπρόσθετη καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που εκλύεται ή απορροφάται κατά την r -οστή αντίδραση. Τέλος, f_r είναι ένας εμπειρικός συντελεστής με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη λοιπές θερμικές διεργασίες, όπως είναι η μεταφορά ή η επανασυμπύκνωση των υδρατμών στο εσωτερικό των γυψοσανίδων. Η πιο συνηθισμένη μαθηματική διατύπωση για την επιπρόσθετη ειδική θερμοχωρητικότητα, c_r , είναι η τριγωνική διατύπωση, η οποία δίνεται από την Εξίσωση 4-8, όπου $T_{peak,r}$ είναι η θερμοκρασία στην οποία η r -οστή αντίδραση λαμβάνει τον υψηλότερο ρυθμό και ΔH_r είναι η συνολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας που παράγεται ή καταναλώνεται μετά το πέρας της r -οστής αντίδρασης. Οι θερμοκρασίες έναρξης, $T_{onset,r}$ μέγιστου ρυθμού, $T_{peak,r}$ και τερματισμού, $T_{endset,r}$ μιας χημικής διαδικασίας μπορούν να εκφραστούν σε σχέση με τον ρυθμό θέρμανσης [Semitelos et al., 2016], σύμφωνα με την Εξίσωση 4-9, όπου β είναι ο ρυθμός θέρμανσης.

$$c_r = \begin{cases} 0, & T \leq T_{onset,r} \\ c_{r,max} = \frac{2\Delta H_r}{T_{endset,r} - T_{onset,r}}, & T = T_{peak,r} \\ 0, & T \geq T_{endset,r} \end{cases}$$

Εξίσωση 4-8

$$T_r = a \times \ln\left(\frac{\beta}{[K/min]}\right) + b$$

Εξίσωση 4-9

Τέλος, ο φαινόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, k_{eff} , των υλικών ξηράς δόμησης που υπάρχουν στις υπό μελέτη τοιχοποιίες μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξίσωση 4-10, όπου $k_{eff,0}$ είναι ο φαινόμενος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ ο Πίνακας 4-5 δίνει τους συντελεστές a και b της εξίσωσης.

$$\frac{k_{eff}(T)}{k_{eff,0}} = a \times T + b$$

Εξίσωση 4-10

Πίνακας 4-5. Συντελεστής της εξίσωσης φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας γυψοσανίδας (Εξίσωση 4-10).

Θερμοκρασιακό Εύρος	a ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	b (-)
0 $^{\circ}\text{C}$ - 57.27 $^{\circ}\text{C}$	0.0000	1.0000
57.27 $^{\circ}\text{C}$ - 255.97 $^{\circ}\text{C}$	-0.0028	1.1665
255.97 $^{\circ}\text{C}$ - 982.58 $^{\circ}\text{C}$	0.0008	0.0224
982.58 $^{\circ}\text{C}$ - 1100 $^{\circ}\text{C}$	0.0572	-55.2137

Ο Πίνακας 4-6 συνοψίζει όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων που υπάρχουν στις υπό μελέτη τοιχοποιίες [Kontogeorgos et al., 2015, Semitelos et al., 2016].

Πίνακας 4-6. Παράμετροι καθορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων.

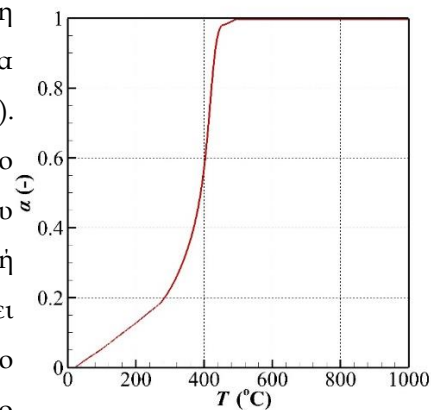
	Στάνταρντ Γυψοσανίδα	Γυψοσανίδα με ΥΑΦ
$\rho_{eff,0}$ (kg m ⁻³)	820	790
$k_{eff,0}$ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.25	0.28
c_{ref} (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1000	1000
β (K min ⁻¹)		15
Αντίδραση 1: Εξάτμιση ελεύθερης υγρασίας		
δm_{fm} (%)		2.70
ΔH_{fm} (kJ kg ⁻¹)		70.2
f_{fm} (-)		1.8
Onset	$a = 18.120610$ (°C), $b = 51.783779$ (°C)	
Peak	$a = 11.407974$ (°C), $b = 75.834414$ (°C)	
Endset	$a = 16.653303$ (°C), $b = 75.880979$ (°C)	
Αντίδραση 2: 1^ο στάδιο αφυδάτωσης (μετατροπή δι-υδρίτη θειικού ασβεστίου σε ημι-υδρίτη)		
$\delta m_{dh-CS,1}$ (%)		10.73
$\Delta H_{dh-CS,1}$ (kJ kg ⁻¹)		517.23
$f_{dh-CS,1}$ (-)		1.8
Onset	$a = 6.907757$ (°C), $b = 116.598370$ (°C)	
Peak	$a = 8.973302$ (°C), $b = 129.498081$ (°C)	
Endset	$a = 11.760922$ (°C), $b = 137.835414$ (°C)	
Αντίδραση 3: 2^ο στάδιο αφυδάτωσης (μετατροπή ημι-υδρίτη θειικού ασβεστίου σε ανυδρίτη)		
$\delta m_{dh-CS,2}$ (%)		3.58
$\Delta H_{dh-CS,2}$ (kJ kg ⁻¹)		172.41
$f_{dh-CS,2}$ (-)		1.8
Onset	$a = 14.516526$ (°C), $b = 145.248105$ (°C)	
Peak	$a = 18.865447$ (°C), $b = 146.409683$ (°C)	
Endset	$a = 22.045092$ (°C), $b = 149.373022$ (°C)	
Αντίδραση 4: Αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του ανυδρίτη θειικού ασβεστίου		
δm_{cr-CS} (%)		0.00
ΔH_{cr-CS} (kJ kg ⁻¹)		-18.23
f_{cr-CS} (-)		1.00
Onset	$a = 12.669244$ (°C), $b = 326.999962$ (°C)	
Peak	$a = 14.4187114$ (°C), $b = 348.255437$ (°C)	
Endset	$a = 13.8538903$ (°C), $b = 377.803377$ (°C)	
Αντίδραση 5: Αποσύνθεση ανθρακικού μαγνησίου		
δm_{dc-CC} (%)	6.10	0.00

ΔH_{dc-CC} (kJ kg ⁻¹)	291.06	0.00
f_{dc-CC} (-)	1.00	
Onset	$a = 0$ (°C), $b = 600$ (°C)	
Peak	$a = 0$ (°C), $b = 650$ (°C)	
Endset	$a = 0$ (°C), $b = 700$ (°C)	
Αντίδραση 6: Αποσύνθεση ανθρακικού ασβεστίου		
δm_{dc-CC} (%)	1.00	0.00
ΔH_{dc-CC} (kJ kg ⁻¹)	45.55	0.00
f_{dc-CC} (-)	1.00	
Onset	$a = 0$ (°C), $b = 700$ (°C)	
Peak	$a = 0$ (°C), $b = 750$ (°C)	
Endset	$a = 0$ (°C), $b = 800$ (°C)	
Αντίδραση 7: Εξάτμιση παραφίνης		
δm_{par} (%)	0.00	8.40
ΔH_{par} (kJ kg ⁻¹)	0.00	25.00
f_{par} (-)	1.00	
Onset	$a = 0$ (°C), $b = 230$ (°C)	
Peak	$a = 0$ (°C), $b = 280$ (°C)	
Endset	$a = 0$ (°C), $b = 300$ (°C)	
Αντίδραση 8: Εξάτμιση PMMA		
δm_{PMMA} (%)	0.00	6.60
ΔH_{PMMA} (kJ kg ⁻¹)	0.00	20.00
f_{PMMA} (-)	1.00	
Onset	$a = 0$ (°C), $b = 400$ (°C)	
Peak	$a = 0$ (°C), $b = 415.32$ (°C)	
Endset	$a = 0$ (°C), $b = 430$ (°C)	

4.3.1.3 Συμβατικά μονωτικά υλικά

Τα συμβατικά μονωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις υπό μελέτη τοιχοποιίες (διογκωμένη πολυστερίνη και πετροβάμβακας) μετά από κάποια θερμοκρασία λιώνουν, όπως φάνηκε και από τα πειράματα (βλ. παράγραφο 4.2).

Ταυτόχρονα, λοιπόν, με την τήξη των υλικών αυτών, διαμορφώνεται διάκενο στη θέση τους, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του τη θερμική συμπεριφορά του χωρίου που καταλάμβανε το μονωτικό υλικό και κατά επέκταση τη θερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας. Για τη μοντελοποίηση ενός υλικού το οποίο λιώνει και στη θέση του διαμορφώνεται διάκενο θεωρείται ένα υποθετικό υλικό, το οποίο έχει φυσικές ιδιότητες που λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές ιδιότητες τόσο του μονωτικού υλικού όσο και του διακένου που δημιουργείται, σύμφωνα με την



Εικόνα 4-6. Συντελεστής μετατροπής εξάτμισης της διογκωμένης πολυστερίνης.

Εξίσωση 4-11, όπου η μεταβλητή $p_{final,eff}$ αντιστοιχεί στη φαινόμενη φυσική ιδιότητα του υποθετικού υλικού (δηλ. πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα), $p_{ins,eff}$ είναι η αντίστοιχη φαινόμενη φυσική ιδιότητα του μονωτικού υλικού που τήκεται και $p_{cav,eff}$ είναι η αντίστοιχη φαινόμενη φυσική ιδιότητα του διακένου που δημιουργείται. Τέλος, η μεταβλητή a είναι ο συντελεστής μετατροπής της αντίδρασης τήξης, ο οποίος αντιστοιχεί στο ποσοστό μάζας των αντιδρώντων και προϊόντων της αντίδρασης και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1²¹.

$$p_{final,eff}(T) = (1 - a(T)) \cdot p_{ins,eff}(T) + a(T) \cdot p_{cav,eff}(T)$$

Εξίσωση 4-11

Στην Εικόνα 4-6 παρουσιάζεται ο συντελεστής μετατροπής της εξάτμισης της διογκωμένης πολυστερίνης, όπως προέκυψε από μετρήσεις ΔΘΣ [Kontogeorgos et al., 2016]. Ο Πίνακας 4-7 παρουσιάζει τις φαινόμενες θερμικές φυσικές ιδιότητες, $p_{ins,eff}$, της διογκωμένης πολυστερίνης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς.

Πίνακας 4-7. Φαινόμενη θερμική φυσική ιδιότητα της διογκωμένης πολυστερίνης.

Φαινόμενη θερμική φυσική ιδιότητα	Διογκωμένη Πολυστερίνη
ρ_{eff} (kg m ⁻³)	18.66
k_{eff} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.035
C_{eff} (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1130

4.3.1.4 Μονωτικά πάνελ κενού

Στη συγκεκριμένη εργασία οι θερμικές φυσικές ιδιότητες για τα μονωτικά πάνελ κενού ελήφθησαν από την εργασία των Kontogeorgos et al. [Kontogeorgos et al., 2017]. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη εργασία, η φαινόμενη πυκνότητα και η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα θεωρήθηκε σταθερή σε σχέση με τη θερμοκρασία και ίσες με $\rho_{eff}=195$ kg m⁻³ και $c_{eff}=850$ J kg⁻¹ K⁻¹, αντίστοιχα. Όσον αφορά τη φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών πάνελ κενού, αυτή δίνεται από την Εξίσωση 4-12, όπου k_{solid} είναι αγωγιμότητα του στερεού υλικού, k_{gas} είναι η αγωγιμότητα του αερίου μέσα στους πόρους του υλικού, k_{conv} είναι η αγωγιμότητα που οφείλεται σε μηχανισμούς συναγωγής και k_{rad} είναι η αγωγιμότητα που οφείλεται σε μηχανισμούς ακτινοβολίας. Η αγωγιμότητα του στερεού υλικού συνήθως θεωρείται σταθερή, ενώ η αγωγιμότητα που οφείλεται σε μηχανισμούς συναγωγής μέσα στους πόρους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν οι πόροι έχουν διάμετρο μικρότερη από 1μm [Simmler et al., 2005]. Η αγωγιμότητα του αερίου στο εσωτερικό των πόρων δίνεται από την Εξίσωση 4-13 [Simmler et al., 2005]. Όπου $k_{gas,air}$ είναι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα, β είναι μια σταθερά που χαρακτηρίζει τον βαθμό μεταφοράς ενέργειας κατά τη σύγκρουση των αερίων μορίων με τα τοιχώματα των πόρων του υλικού, k_B είναι η σταθερά Boltzman (1.38066×10⁻²³ J.K⁻¹), d_g είναι η διάμετρος των αερίων μορίων (3.53×10⁻¹⁰ m), T είναι η θερμοκρασία, δ είναι μια χαρακτηριστική διάμετρος πόρων και P_g είναι η πίεση του αερίου μέσα στους πόρους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η πίεση στο εσωτερικό του μονωτικού πάνελ κενού είναι περίπου 10 mbar μέχρι τους 70 °C, ενώ στη συνέχεια γίνεται ατμοσφαιρική ($P_g=101325$ Pa) καθώς λιώνει το εξωτερικό περίβλημά του. Τέλος, η αγωγιμότητα που οφείλεται σε

²¹ Η τιμή $a=0$ αντιστοιχεί στην ύπαρξη μόνο αντιδρώντων, ενώ η τιμή $a=1$ αντιστοιχεί στην ύπαρξη μόνο προϊόντων. Οποιαδήποτε ενδιάμεση τιμή αντιστοιχεί στην ύπαρξη τόσο αντιδρώντων όσο και προϊόντων.

μηχανισμούς ακτινοβολίας δίνεται από την Εξίσωση 4-14, όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), n δείκτης διάθλασης και E συντελεστής απόσβεσης.

$$k_{eff} = k_{solid} + k_{gas} + k_{conv} + \lambda_{rad}$$

Εξίσωση 4-12

$$k_{gas} = \frac{k_{gas,air}(T)}{1 + \frac{2\beta k_B}{\sqrt{2\pi} l_{gas}^2} \frac{T}{\Delta P_{gas}}}$$

Εξίσωση 4-13

$$k_{rad} = \frac{16}{3} \frac{n^2 \sigma T^3}{E(T)}$$

Εξίσωση 4-14

Σύμφωνα με την εργασία των Kontogeorgos et al. [Kontogeorgos et al., 2017], λαμβάνονται οι τιμές $\beta=2.0$, $k_{solid}=2.1 \text{ mW} \cdot (\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ και $E=9305 \text{ m}^{-1}$.

4.3.1.5 Θερμομονωτικός σοβάς

Όσον αφορά τις τιμές των φυσικών ιδιοτήτων του θερμομονωτικού σοβά, αυτές ελήφθησαν από την διπλωματική εργασία του Σεμιτέλου Γεωργίου [Σεμιτέλος, 2013].

Πίνακας 4-8. Παράμετροι καθορισμού φαινομένων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων θερμομονωτικού σοβά.

δm (%)	19
ΔH (kJ kg ⁻¹)	85
f (-)	1.4
Onset	$a=11.62$ (°C), $b=92.75$
Peak	$a=14.53$ (°C), $b=216.35$
Endset	$a=27.36$ (°C), $b=-7.52$
k_{eff} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.0982 (@20 °C), 0.0858 (@120 °C), 0.0910 (@180 °C), 0.0690 (@ 300 °C), 0.0848 (@ 500 °C)

Πιο συγκεκριμένα, η φαινόμενη πυκνότητα και η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα προέκυψε από μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$ χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες εξισώσεις που περιγράφονται στην παράγραφο 4.3.1.2 (Εξίσωση 4-6, Εξίσωση 4-7, Εξίσωση 4-8 και Εξίσωση 4-9). Από την άλλη, οι τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας προέκυψαν από απευθείας μετρήσεις δοκιμίων θερμομονωτικού σοβά. Ο Πίνακας 4-8 παρουσιάζει τις παραμέτρους καθορισμού φαινομένων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων, αλλά και τις τιμές της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας.

4.3.2 Οριακές συνθήκες

Για τη μη εκτεθειμένη πλευρά της τοιχοποιίας θεωρήθηκε η οριακή συνθήκη συναγωγής και ακτινοβολίας, σύμφωνα με την Εξίσωση 4-15, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία του αέρα, T_{amb} , στη μη εκτεθειμένη πλευρά, που καταγράφηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ενώ οι συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας επιλέχθηκαν ίσοι με $h_{conv}=10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ και $\varepsilon=0.8$, αντίστοιχα [Ghazi Wakili et al., 2007, Kontogeorgos & Founti, 2010]. Για την εκτιθέμενη πλευρά θεωρήθηκε ως οριακή συνθήκη η πειραματική θερμοκρασιακή εξέλιξη πάνω στην επιφάνεια της εκτεθειμένης πλευράς (Εξίσωση 4-16). Όπου q_{cond} είναι η ροή θερμότητας λόγω αγωγής, x_{in} και x_{ex} είναι το διάλυσμα θέσης στη μη εκτεθειμένη και εκτεθειμένη πλευρά, αντίστοιχα, και σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.

$$q_{cond}(t, x_{in}) = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{in}} = h_{conv} (T_{amb}(t) - T(t, x_{in})) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4(t, x_{in}))$$

Εξίσωση 4-15

$$T(t, x_{ex}) = T_{measured}(t, x_{ex})$$

Εξίσωση 4-16

4.3.3 Χημικές αντιδράσεις

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η έκθεση ενός υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε ανάπτυξη εξώθερμων αντιδράσεων κατά τις οποίες εκλύονται ποσά θερμότητας, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν το συνολικό θερμοκρασιακό πεδίο. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να μοντελοποιηθεί αυτή η επίδραση των εξώθερμων αντιδράσεων. Ο πιο απλός τρόπος μοντελοποίησης, είναι η εισαγωγή ενός όρου πηγής στην εξίσωση μετάδοσης θερμότητας (Εξίσωση 3-6), ο οποίος ποσοτικοποιεί την έκλυση θερμότητας από την αντίδραση και ο οποίος δίνεται από την Εξίσωση 4-17, όπου \dot{m}'' είναι ο ρυθμός μεταβολής της μάζας του υλικού ανά μονάδα όγκου, ΔH είναι η συνολική ενέργεια που εκλύεται από την αντίδραση, ενώ dh/dt είναι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ανά μονάδα μάζας που εκλύεται κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης. Αναπτύσσοντας την Εξίσωση 4-17 προκύπτει η Εξίσωση 4-18, όπου β είναι ο ρυθμός θέρμανσης και a είναι το κλάσμα μετατροπής αντίδρασης, η οποία είναι μια πολύ χρήσιμη σχέση, καθώς μπορεί να αξιοποιήσει μετρήσεις $\Delta\Theta$, ώστε να προσδιοριστεί ο όρος πηγής μιας αντίδρασης.

$$\dot{Q}_E'' = \dot{m}'' \Delta H = \rho_0 \frac{dh}{dt}$$

Εξίσωση 4-17

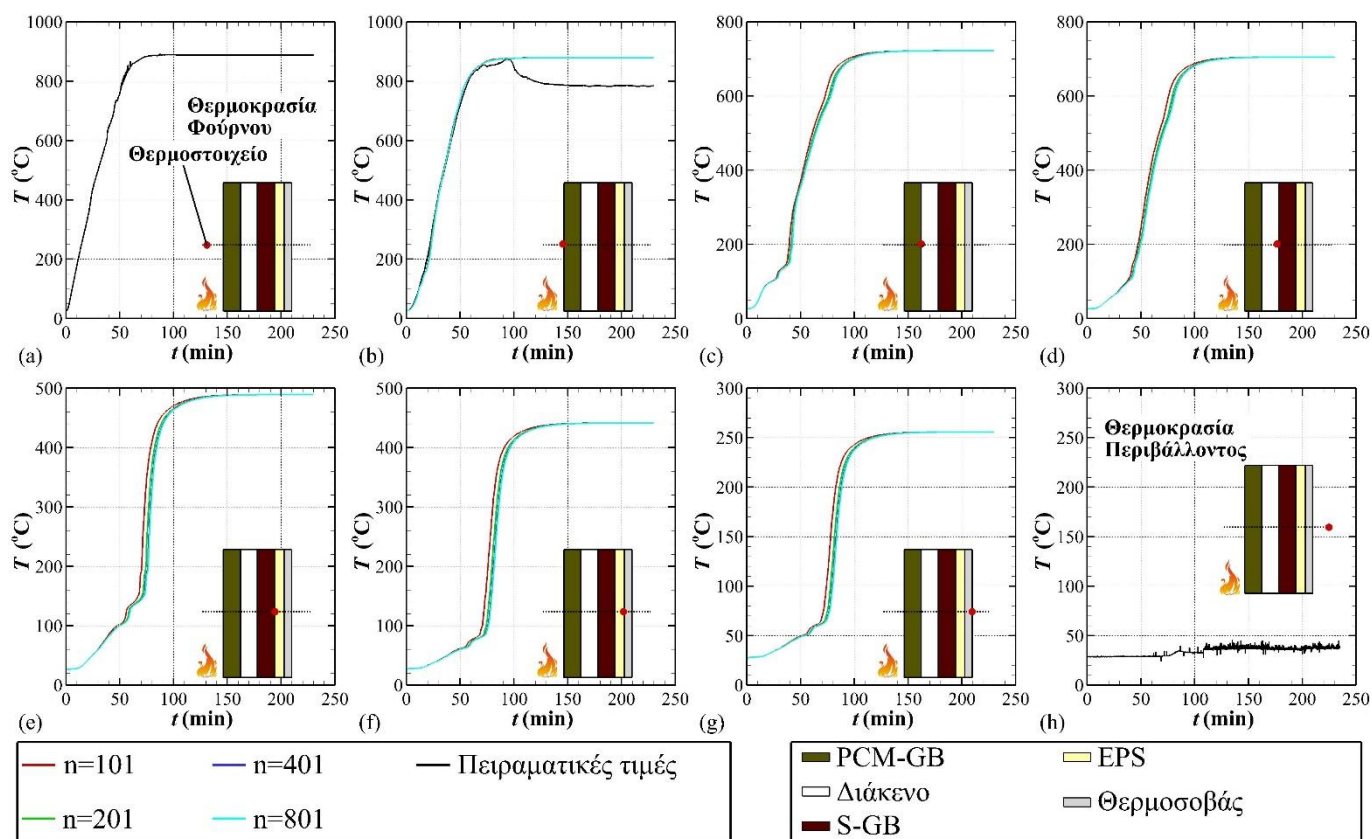
$$\dot{m}'' \Delta H = \rho_0 \frac{dh}{dt} \Leftrightarrow \frac{d\rho}{dt} \Delta H = \rho_0 \Delta H \frac{da}{dt} \Leftrightarrow \frac{d\rho}{dT} \frac{dT}{dt} = \rho_0 \frac{da}{dt} \Leftrightarrow \frac{d\rho}{dT} \beta = \rho_0 \frac{da}{dt}$$

Εξίσωση 4-18

4.4 Υπολογιστικά αποτελέσματα

4.4.1 Ανεξαρτησία πλέγματος

Για την ανεξαρτησία του πλέγματος επιλέχθηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά πλέγματα συνολικών κόμβων 101 ($\delta x=0.5$ mm), 201 ($\delta x=0.25$ mm), 401 ($\delta x=0.125$ mm) και 801 ($\delta x=0.0725$ mm). Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα HETRAN για τα τέσσερα διαφορετικά πλέγματα. Όπως είναι φανερό, αυξάνοντας τον αριθμό των κόμβων, η λύση που προκύπτει αρχίζει να μην μεταβάλλεται. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η λύση αρχίζει να είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των κόμβων όταν χρησιμοποιείται χωρικό βήμα $\delta x \leq 0.125$ mm (δηλ. για αριθμό κόμβων μεγαλύτερο του 401). Άρα, για τους υπολογισμούς που έγιναν στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε χωρικό βήμα $\delta x=0.125$ mm, δηλ. ο αριθμός των κόμβων ήταν 401.

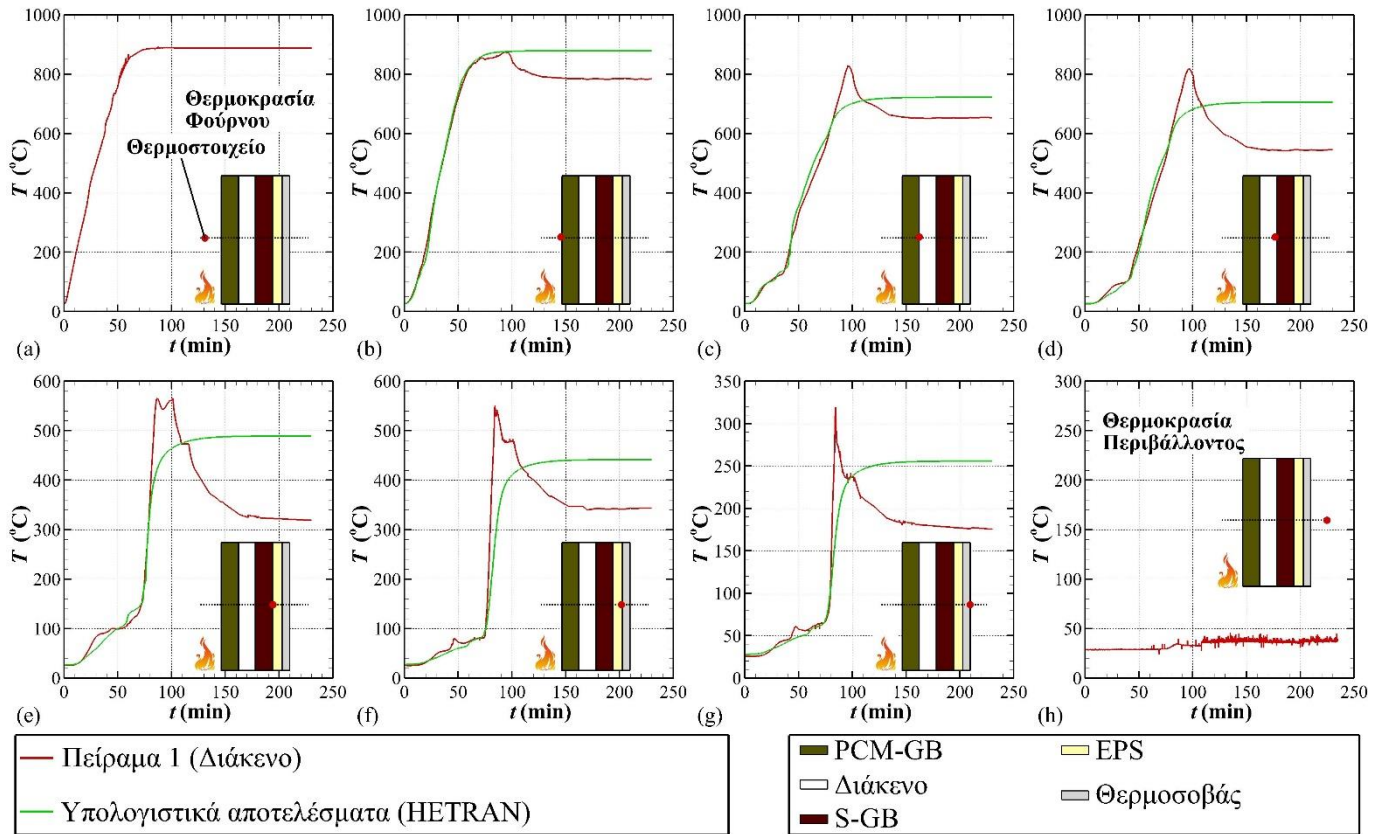


Εικόνα 4-7. Ανεξαρτησία πλέγματος.

4.4.2 Προσομοίωση πειράματος 1

Στην Εικόνα 4-8 γίνεται σύγκριση των πειραματικών τιμών με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα HETTRAN και με βάση τις φυσικές ιδιότητες και οριακές συνθήκες που περιγράφηκαν στις παραγράφους 4.3.1 και 4.3.2. Όπως είναι φανερό, οι προλέξεις βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα σε όλες τις θέσεις μέχρι μια χρονική στιγμή, ενώ στη συνέχεια γίνεται υποεκτίμησή τους. Πιο αναλυτικά, φαίνεται ότι το μοντέλο προλέγει εξαιρετικά τη διαδικασία της αφυδάτωσης της γυψοσανίδας, τόσο στις θέσεις της γυψοσανίδας με ΥΑΦ (Εικόνα 4-8b & c), όσο και στη στάνταρντ γυψοσανίδα (Εικόνα 4-8d & e). Οι μικρές αποκλίσεις που εμφανίζονται οφείλονται στο γεγονός ότι οι φυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για τις γυψοσανίδες προέκυψαν από απλές προσεγγίσεις λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές ιδιότητές τους σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (βλ. παράγραφο 4.3.1.2), αλλά και από τη μοντελοποίηση του διακένου (βλ. παράγραφο 4.3.1.1).

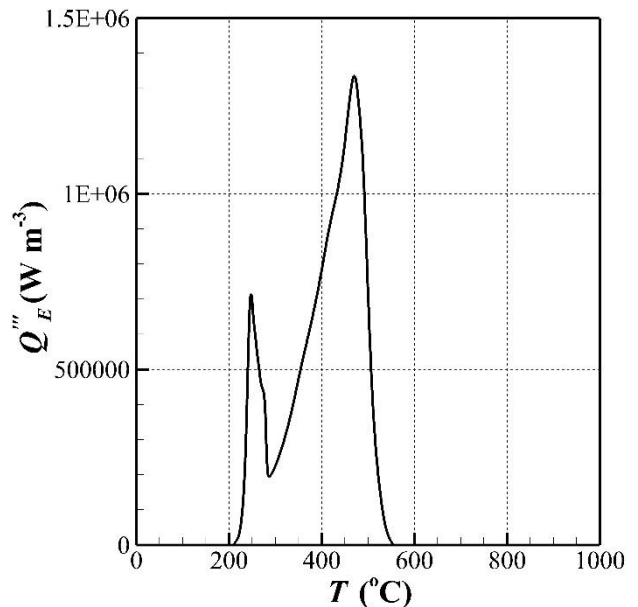
Παρόλα αυτά, όμως, είναι φανερό ότι από ένα χρονικό σημείο και μετά, τα υπολογιστικά αποτελέσματα υποεκτιμούν τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που υποδηλώνει ότι εκλύονται ποσά ενέργειας τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη στις προσομοιώσεις. Πράγματι, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$ (βλ. παράγραφο 4.2.1) είναι φανερό ότι λαμβάνουν χώρα διάφορες εξώθερμες αντιδράσεις οι οποίες προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα. Στη συνέχεια της μελέτης γίνεται προσπάθεια ποσοτικοποίησης όλων των αντιδράσεων που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε συνθήκες φωτιάς, εισαγωγή τους στον υπολογιστικό κώδικα HETTRAN και αξιολόγησή τους.



Εικόνα 4-8. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETRAN) και πειραματικών τιμών (πείραμα 1).

4.4.2.1 Οξείδωση ΥΑΦ

Η υπό μελέτη τοιχοποιία περιλαμβάνει μια γυψοσανίδα με ΥΑΦ. Τα ΥΑΦ είναι οργανικά υλικά και άρα είναι εν δυνάμει υλικά τα οποία μπορούν να οξειδωθούν και να οδηγήσουν σε εξώθερμες αντιδράσεις και άρα σε έκκληση θερμότητας. Έτσι, μελετήθηκε η επίδραση της οξείδωσης του ΥΑΦ που περιέχεται μέσα στη γυψοσανίδα. Για τη μοντελοποίηση της συγκεκριμένης αντίδρασης εισήχθη κατάλληλος όρος πηγής στην εξίσωση μετάδοσης θερμότητας (Εξίσωση 4-17). Τα δεδομένα για τον προσδιορισμό του όρου πηγής (Εξίσωση 4-18) ελήφθησαν από μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$ που παρουσιάζονται στην εργασία των Kontogeorgos et al. [Kontogeorgos et al., 2015]. Στην Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται ο όρος πηγής, έτσι όπως προέκυψε από τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας.

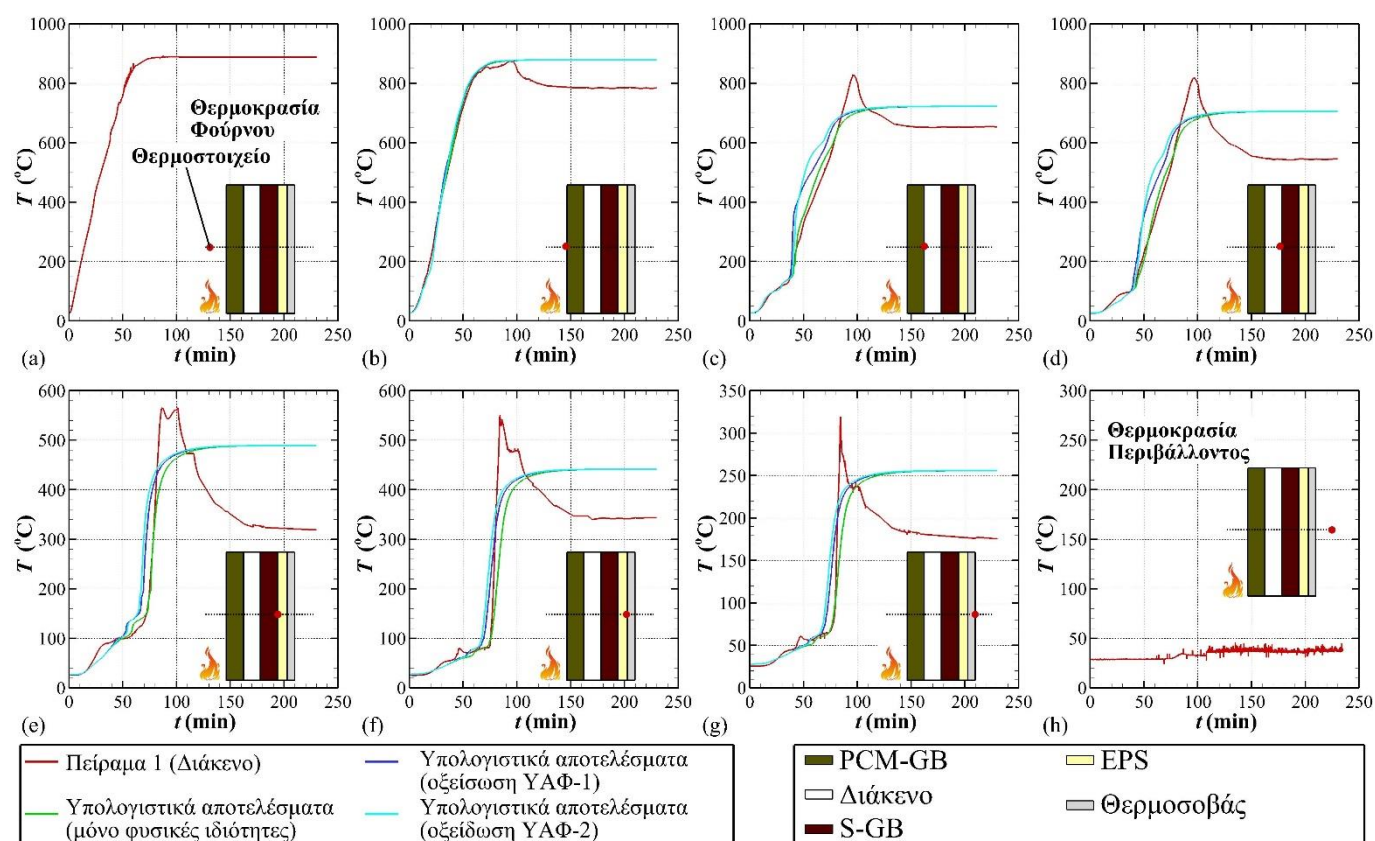


Εικόνα 4-9. Όρος πηγής για την οξείδωση του ΥΑΦ.

Στην Εικόνα 4-10 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα (καμπύλες με μπλε χρώμα) που προέκυψαν με την εφαρμογή του όρου πηγής προσομοίωσης της οξείδωσης του ΥΑΦ που περιέχεται μέσα στην γυψοσανίδα. Τα

αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν μόνο με την εισαγωγή των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων. Είναι φανερό, ότι ο όρος πηγής προσθέτει στο σύστημα παραπάνω ενέργεια από αυτή που φαίνεται να υπάρχει σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, αφού οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην πίσω πλευρά της γυψοσανίδας με ΥΑΦ (Εικόνα 4-10c) είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές. Αυτές οι αυξημένες θερμοκρασίες επηρεάζουν σημαντικά και το θερμοκρασιακό πεδίο της επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας που «βλέπει» τη γυψοσανίδα με ΥΑΦ, κυρίως λόγω της ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο όρος πηγής που αντιστοιχεί στην οξείδωση του ΥΑΦ που υπάρχει στη γυψοσανίδα, προέκυψε από μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$, οι οποίες έγιναν σε συγκεκριμένο ρυθμό θέρμανσης ($\beta=20 \text{ K min}^{-1}$). Όμως, ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος δεν είναι σίγουρο ότι αντιστοιχεί στο ρυθμό θέρμανσης των μετρήσεων $\Delta\Theta\Sigma$. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε μια παραλλαγή του όρου πηγής σύμφωνα με την οποία θεωρήθηκε ότι το εύρος της αντίδρασης μετατοπίζεται κατά $100 \text{ }^\circ\text{C}$ σε σχέση με το αρχικό της εύρος, κάτι το οποίο είναι λογικό να συμβαίνει όταν αυξάνεται ο ρυθμός θέρμανσης. Με βάση αυτή τη θεώρηση, έγιναν αντίστοιχες προσομοιώσεις οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4-10 (κυανές καμπύλες). Όπως είναι φανερό, ούτε σε αυτήν την περίπτωση ο όρος πηγής προσεγγίζει με ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, καθώς πάλι η ενέργεια που εισάγει στο σύστημα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των πειραμάτων.

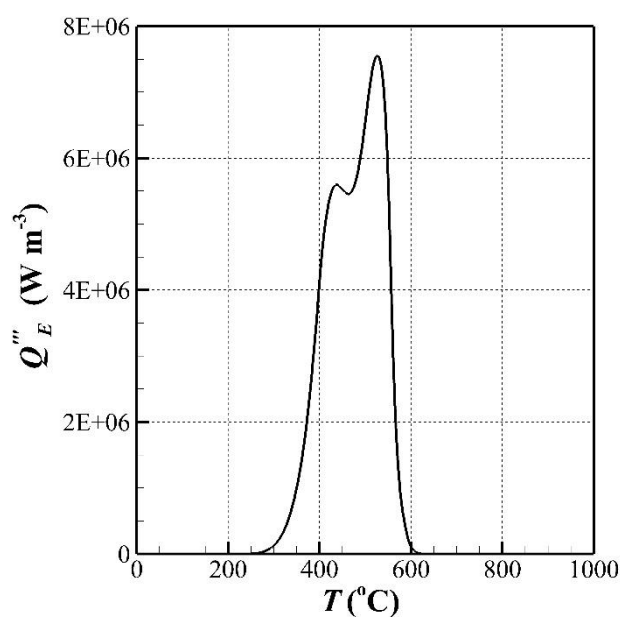


Εικόνα 4-10. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETRAN) λαμβάνοντας υπόψη την οξείδωση του ΥΑΦ και πειραματικών τιμών (πείραμα 1).

Οι παραπάνω αναλύσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στα συγκεκριμένα πειράματα δεν έγινε οξείδωση του ΥΑΦ που υπάρχει μέσα στη γυψοσανίδα. Ο ισχυρισμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί αληθής, καθώς ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι φούρνος ακτινοβολίας με αποτέλεσμα μέσα στον χώρο του να μην υπάρχει επαρκής ποσότητα οξυγόνου που να οδηγήσει στην οξείδωση του ΥΑΦ από την εκτεθειμένη πλευρά της γυψοσανίδας. Από την άλλη μεριά, επίσης μέσα στο διάκενο της τοιχοποιίας πάλι το διαθέσιμο οξυγόνο φαίνεται να μη είναι επαρκές για την οξείδωση του ΥΑΦ, καθώς κατά τη διάρκεια της αφυδάτωσης της γυψοσανίδας ο συγκεκριμένος χώρος αρχίζει να γεμίζει με υδρατμούς, ενώ η τοιχοποιία είναι αρκετά μονωμένη ώστε να μην εισάγονται μεγάλες ποσότητες αέρα στα κενά της.

4.4.2.2 Οξείδωση χάρτινης επιφάνειας γυψοσανίδας

Η υπό μελέτη τοιχοποιία περιέχει μια στάνταρντ γυψοσανίδα, της οποίας οι δύο εξωτερικές τις πλευρές είναι καλυμμένες με ένα ειδικό χαρτί που χρησιμοποιείται στις στάνταρντ γυψοσανίδες²². Όπως και με το ΥΑΦ, έτσι και το χαρτί που χρησιμοποιείται στις στάνταρντ γυψοσανίδες είναι οργανικό υλικό και άρα είναι εν δυνάμει υλικό το οποίο μπορεί να οξειδωθεί και να οδηγήσει σε εξώθερμη αντίδραση, με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Συνεπώς, μελετήθηκε η επίδραση της οξείδωσης της χάρτινης επιφάνειας της γυψοσανίδας. Για τη μοντελοποίηση της συγκεκριμένης αντίδρασης εισήχθη κατάλληλος όρος πηγής στην εξίσωση μετάδοσης θερμότητας, όπου τα δεδομένα για τον προσδιορισμό του ελήφθησαν από μετρήσεις ΔΘΣ [Kontogeorgos et al., 2015].



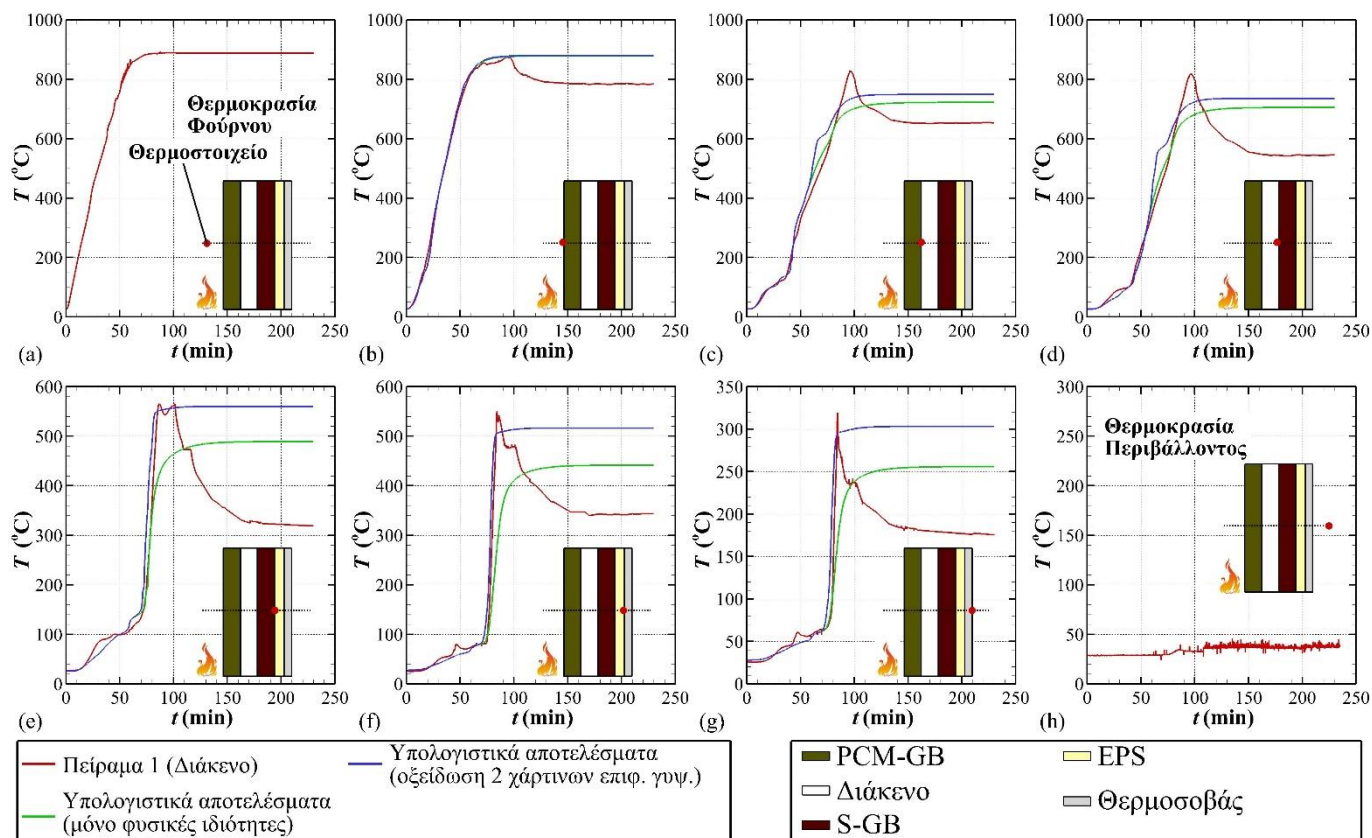
Εικόνα 4-11. Όρος πηγής για την οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας.

Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζεται ο όρος πηγής, όπως προέκυψε από τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος όρος πηγής εισήχθη σε δύο χωρία πάχους 0.5 mm το καθένα, τα οποία αντιστοιχούσαν στις δύο χάρτινες επιφάνειες της γυψοσανίδας.

Στην Εικόνα 4-12 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα (καμπύλες με μπλε χρώμα) που προέκυψαν με την εφαρμογή του όρου πηγής προσομοίωσης της οξείδωσης της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν μόνο με την εισαγωγή των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων. Όπως είναι φανερό, ο όρος πηγής που εισάγεται για την προσομοίωση της οξείδωσης της χάρτινης επιφάνειας στη μη εκτεθειμένη πλευρά της στάνταρντ γυψοσανίδας (Εικόνα 4-12e) προσθέτει στο σύστημα την απαραίτητη ενέργεια, αφού οι θερμοκρασίες

²² Οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκαν στις υπό μελέτη τοιχοποιίες δεν καλύπτονταν από χαρτί, όπως οι στάνταρντ γυψοσανίδες, αλλά από μια επικάλυψη που και αυτή περιλάμβανε ΥΑΦ.

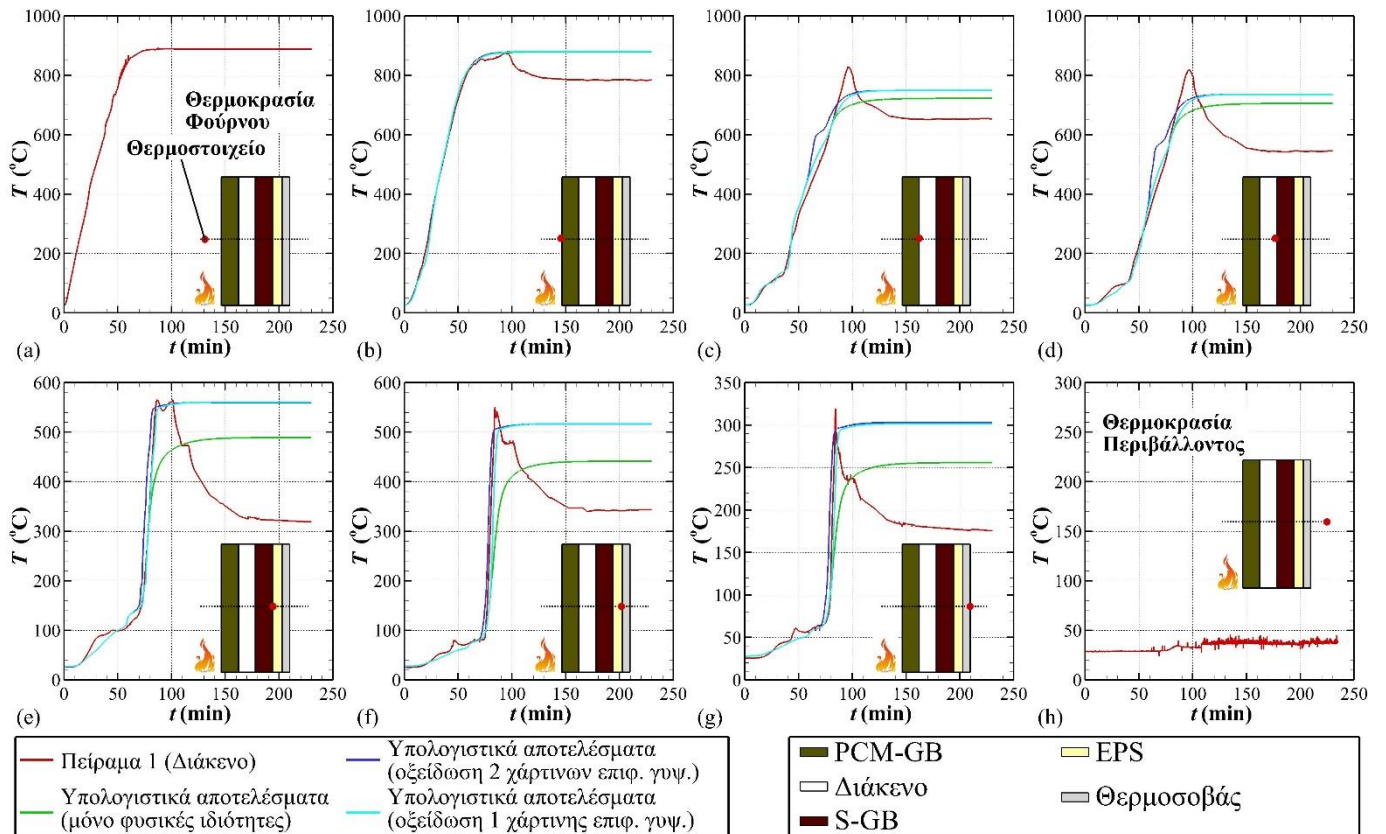
που αναπτύσσονται στην πίσω πλευρά της γυψοσανίδας και μέχρι τη μη εκτεθειμένη πλευρά (Εικόνα 4-12e έως g) βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Από την άλλη μεριά, η εισαγωγή του όρου πηγής για την οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας στην εκτεθειμένη πλευρά (Εικόνα 4-12d) δίνει ενέργεια στο σύστημα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος που δεν μπορεί να δικαιολογηθεί από τα πειράματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται στην επιφάνεια αυτή και στην επιφάνεια της μη εκτεθειμένης πλευράς της γυψοσανίδας με ΥΑΦ (Εικόνα 4-12c) να υπερεκτιμά τις πειραματικές τιμές.



Εικόνα 4-12. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETRAN) λαμβάνοντας υπόψη την οξείδωση των δύο χάρτινων επιφανειών της στάνταρντ γυψοσανίδας και πειραματικών τιμών (πειράμα 1).

Μία λογική σκέψη για την υπερεκτίμηση του θερμοκρασιακού πεδίου στις περιοχές εκατέρωθεν του διακένου της τοιχοποιίας (Εικόνα 4-12c και d) είναι ότι η χάρτινη επιφάνεια της στάνταρντ γυψοσανίδας στη συγκεκριμένη περιοχή δεν οξειδώθηκε και ότι οξειδώθηκε μόνο η χάρτινη επιφάνεια της στάνταρντ γυψοσανίδας που βρίσκεται σε επαφή με το EPS (το οποίο λιώνει σχετικά γρήγορα). Για το λόγο αυτό, έγιναν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας μόνο έναν όρο πηγής, για την προσομοίωση της οξείδωσης της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας στη μη εκτεθειμένη πλευρά της. Στην Εικόνα 4-13 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα (καμπύλες με κυανό χρώμα) που προέκυψαν με την εφαρμογή του όρου πηγής προσομοίωσης της οξείδωσης της μιας χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν μόνο με την εισαγωγή των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εισαγωγή δύο όρων πηγής (βλ. προηγούμενη παράγραφο). Όπως είναι φανερό, η εισαγωγή του όρου πηγής στην μη εκτεθειμένη πλευρά της γυψοσανίδας δίνει την απαραίτητη ενέργεια, όπως και πριν, στο σύστημα, με αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό πεδίο στις περιοχές πίσω

από την στάνταρντ γυψοσανίδα (Εικόνα 4-13ε έως g) να είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Από την άλλη μεριά, στις περιοχές του διακένου της τοιχοποιίας παρατηρείται μια μικρή αύξηση του θερμοκρασιακού πεδίου σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας μόνο τις φαινόμενες φυσικές ιδιότητες, η οποία προφανώς οφείλεται στην εισαγωγή του όρου πηγής. Παρόλα αυτά, είναι φανερό ότι υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στην περιοχή του διακένου, αφού οι υπολογισμοί υποεκτιμούν τα πειραματικά δεδομένα. Το τελευταίο, καταδεικνύει ότι πραγματοποιούνται και άλλες διαδικασίες κατά τις οποίες εκλύονται ποσά θερμότητας και οι οποίες πρέπει να μοντελοποιηθούν, να ποσοτικοποιηθούν και να εισαχθούν στους υπολογισμούς.



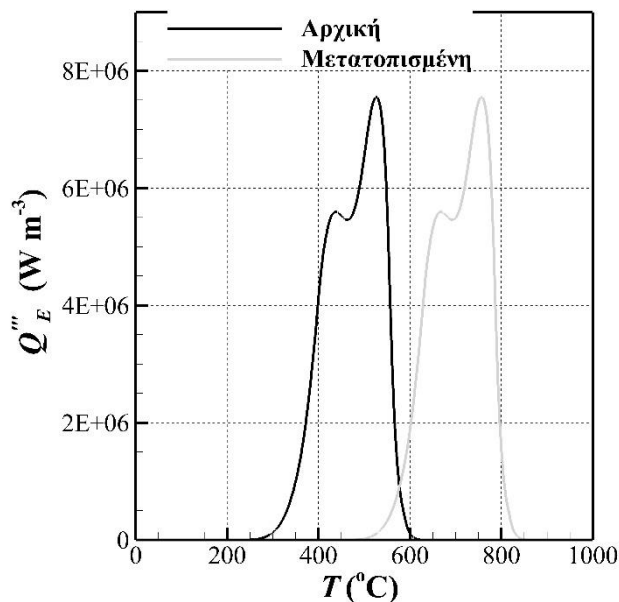
Εικόνα 4-13. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETTRAN) λαμβάνοντας υπόψη την οξείδωση της μιας χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας (προς τη μη εκτεθειμένη πλευρά) και πειραματικών τιμών (πείραμα 1).

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση της μελέτης της οξείδωσης του ΥΑΦ που υπάρχει στην γυψοσανίδα, ο όρος πηγής που αντιστοιχεί στην οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας προέκυψαν από μετρήσεις $\Delta\Theta\Sigma$, οι οποίες έγιναν σε συγκεκριμένο ρυθμό θέρμανσης. Όμως, ο ρυθμός αυτός δεν είναι σίγουρα ίδιος ή κοντινός με το ρυθμό θέρμανσης του πειράματος. Δεδομένου ότι υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στην περιοχή του διακένου της τοιχοποιίας, όπου επικρατούν αρκετά υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης, δοκιμάστηκε μια παραλλαγή του όρου πηγής της οξείδωσης της χάρτινης επιφάνειας στην περιοχή αυτή, σύμφωνα με την οποία θεωρήθηκε ότι το θερμοκρασιακό εύρος της αντίδρασης μετατοπίστηκε κατά $\Delta T=230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ²³. Στην Εικόνα 4-14 παρουσιάζεται η παραλλαγή του όρου πηγής που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την

²³ Η μετατόπιση της καμπύλης του όρου πηγής κατά $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ προέκυψε με τη διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος, όπου δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές ΔT και τα αποτελέσματα συγκρίνονταν με τα πειραματικά δεδομένα.

οξειδωση της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας στην περιοχή του διακένου χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή του όρου πηγής (Εικόνα 4-14 γκρι καμπύλη), ενώ για την οξειδωση της χάρτινης επιφάνειας στη μη εκτιθέμενη πλευρά της γυψοσανίδας χρησιμοποιήθηκε ο αρχικός όρος πηγής (Εικόνα 4-14 μαύρη καμπύλη).

Στην Εικόνα 4-15 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα (καμπύλες με πορτοκαλί χρώμα) που προέκυψαν με την εφαρμογή του αρχικού και του μετατοπισμένου όρου πηγής για την προσομοίωση της οξειδωσης των χάρτινων επιφανειών της στάνταρντ γυψοσανίδας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν μόνο με την εισαγωγή των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εισαγωγή του ενός όρου πηγής (οξειδωση χάρτινης επιφάνειας στη μη εκτιθέμενη πλευρά της στάνταρντ γυψοσανίδας). Όπως είναι φανερό, η εισαγωγή του μετατοπισμένου όρου πηγής στην εκτεθειμένη πλευρά

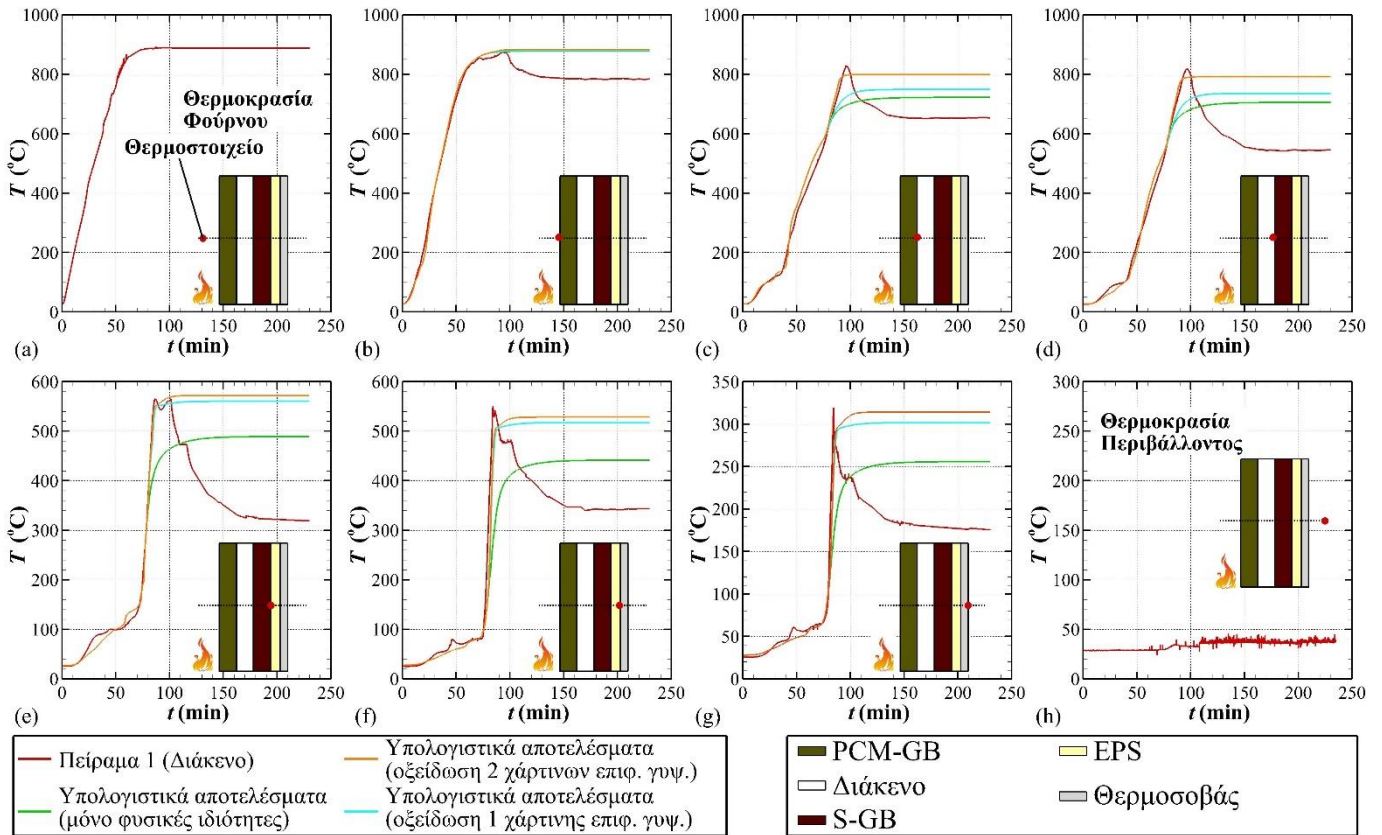


Εικόνα 4-14. Μετατοπισμένος όρος πηγής για την οξειδωση της χάρτινης επιφάνειας στην εκτεθειμένη πλευρά της στάνταρντ γυψοσανίδας.

σύστημα ώστε το προκύπτον υπολογιστικό θερμοκρασιακό πεδίο να είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα στην περιοχή του διακένου (Εικόνα 4-15c και d). Σύμφωνα, λοιπόν, με τα υπολογιστικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η χάρτινη επιφάνεια της στάνταρντ γυψοσανίδας που βρίσκεται μέσα στο διάκενο οξειδώνεται. Αυτό έρχεται σε μια μικρή αντίθεση με τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την οξειδωση του ΥΑΦ στην προηγούμενη παράγραφο (βλ. παράγραφο 4.4.2.1). Το τελευταίο μπορεί να δικαιολογηθεί με δύο πιθανές εξηγήσεις. Μια εξήγηση είναι ότι το οξυγόνο που υπάρχει μέσα στο διάκενο είναι επαρκές για την οξειδωση της χάρτινης επιφάνειας της στάνταρντ γυψοσανίδας, αλλά όχι επαρκές για την οξειδωση του ΥΑΦ. Μια δεύτερη εξήγηση θα μπορούσε να είναι η πιθανή οξειδωση του ΥΑΦ της γυψοσανίδας, αλλά μόνο επιφανειακά και μέχρι ένα βάθος λίγων χιλιοστών. Το τελευταίο θα μπορούσε να εξηγήσει και τη μικρή υποεκτίμηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα σε αυτήν την περιοχή. Βέβαια, η προσομοίωση της επιφανειακής οξειδωσης του ΥΑΦ είναι κάτι εξαιρετικά δύσκολο, αφού είναι άγνωστο το βάθος το οποίο μπορεί να οξειδώθηκε το υλικό και θα απαιτούσε επίπονες προσπάθειες δοκιμής και σφάλματος για να προσδιοριστεί αυτό το πάχος.

Όσον αφορά, τις περιοχές που βρίσκονται πίσω από τη στάνταρντ γυψοσανίδα (Εικόνα 4-15e έως g), οι προλέξεις του υπολογιστικού κώδικα είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Παρόλα αυτά, όμως, φαίνεται ότι σε αυτές τις περιοχές η θερμοκρασία είχε την τάση να αυξάνεται μέχρι τη στιγμή της ανάπτυξης ρωγμών στον θερμομονωτικό σοβά και την επακόλουθη πτώση της θερμοκρασίας λόγω εισαγωγής «φρέσκου» αέρα από το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, δοκιμάστηκαν επιπλέον όροι πηγής που να προσομοιώνουν και άλλες αντιδράσεις

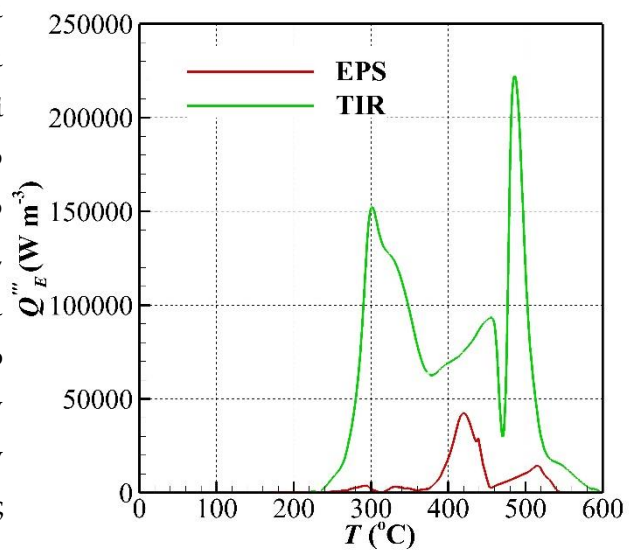
που λαμβάνουν χώρα, όπως είναι η οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης και η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 4-15. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETRAN) λαμβάνοντας υπόψη την οξείδωση των δύο χάρτινων επιφανειών της στάνταρντ γυψοσανίδας σε διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος και πειραματικών τιμών (πείραμα 1).

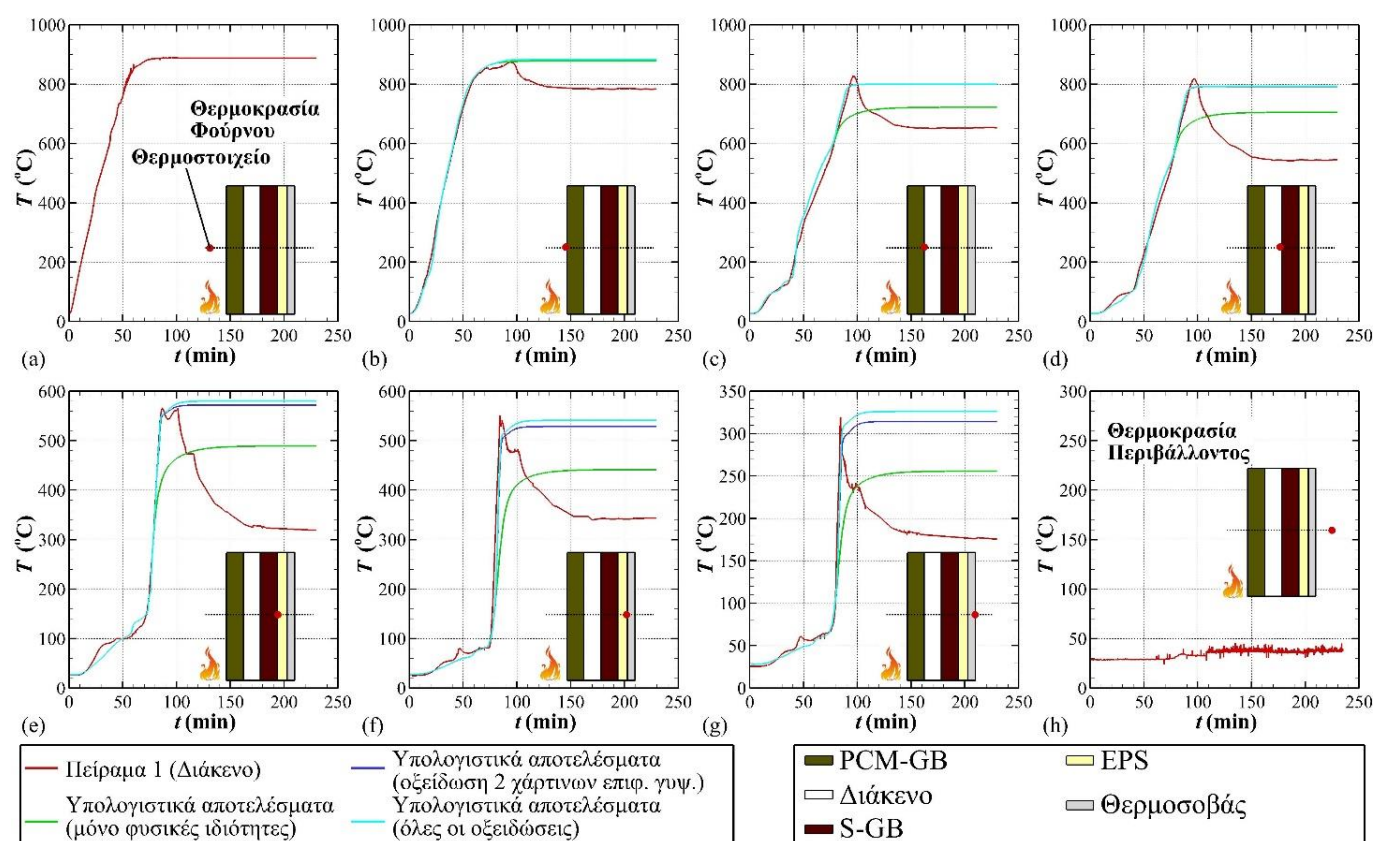
4.4.2.3 Οξείδωση διογκωμένης πολυστερίνης και θερμομονωτικού σοβά

Η τελευταία γνωστή εξώθερμη αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά τη θέρμανση της συγκεκριμένης τοιχοποιίας είναι η οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης, η οποία αποτελεί ολόκληρο στρώμα της τοιχοποιίας, αλλά και συστατικό του θερμομονωτικού σοβά. Για το λόγο αυτό, εισήχθησαν δύο επιπλέον όροι πηγής στην εξίσωση μετάδοσης θερμότητας, ένας για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης και ένας για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης που υπάρχει στο εσωτερικό του θερμομονωτικού σοβά. Στην Εικόνα 4-16 παρουσιάζονται οι όροι πηγής που εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης.



Εικόνα 4-16. Όροι πηγής για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης, τόσο ως ξεχωριστό στρώμα, όσο και μέσα στο θερμομονωτικό σοβά.

Στην Εικόνα 4-17 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα (καμπύλες με κυανό χρώμα) που προέκυψαν με την εφαρμογή των όρων πηγής για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν μόνο με την εισαγωγή των φαινόμενων θερμικών φυσικών ιδιοτήτων και χωρίς τους όρους πηγής για την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης. Όπως είναι φανερό, η εισαγωγή των όρων πηγής της οξείδωσης της διογκωμένης πολυστερίνης βελτιώνει ελαφρώς τα υπολογιστικά αποτελέσματα, καθώς οι συγκεκριμένες αντιδράσεις προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τελική θερμοκρασία που καταγράφουν τα θερμοστοιχεία (Εικόνα 4-17e έως g). Τέλος, όπως είναι φανερό, μετά από το σημείο που αρχίζει να ρωγατώνεται ο θερμομονωτικός σοβάς δεν είναι δυνατή η προσομοίωση του πειράματος, λόγω της μη ύπαρξης κάποιου μοντέλου που να προσομοιώνει το συγκεκριμένο φαινόμενο. Επιπλέον, η ρωγμάτωση του θερμομονωτικού σοβά αλλάζει σημαντικά τη μετάδοση θερμότητας στο σύστημα, καθώς παύει να ισχύει η μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας, κάτι το οποίο δεν μπορεί να προσομοιωθεί με τον υπολογιστικό κώδικα HETTRAN, καθώς είναι μονοδιάστατος κώδικας.



Εικόνα 4-17. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETTRAN) λαμβάνοντας υπόψη την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης και πειραματικών τιμών (πειράμα 1).

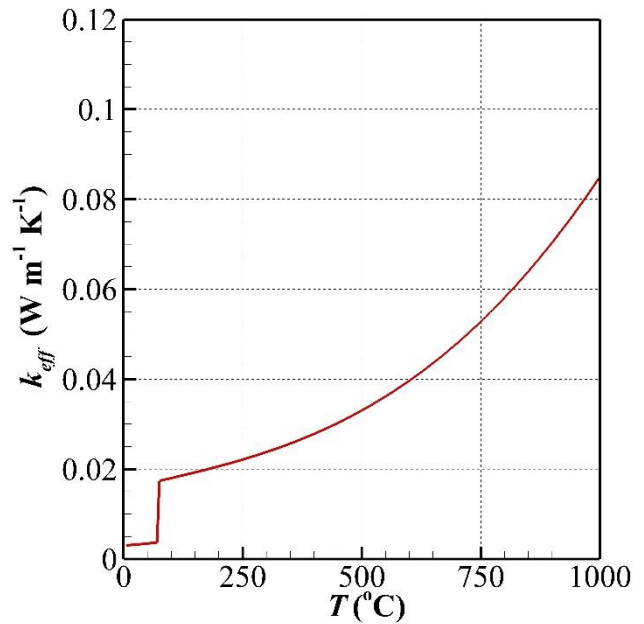
4.4.3 Προσομοίωση πειράματος 4

Επειτα από την προσομοίωση του πειράματος 1 στην προηγούμενη παράγραφο (βλ. παράγραφο 4.4.2), η οποία αποτελεί και την πιο απλή περίπτωση τοιχοποιίας, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης του πειράματος 4 (Πίνακας 4-2), λαμβάνοντας υπόψη όλα τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου. Η διαφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη του μονωτικού πάνελ κενού, του οποίου οι φυσικές ιδιότητες δίνονται στην

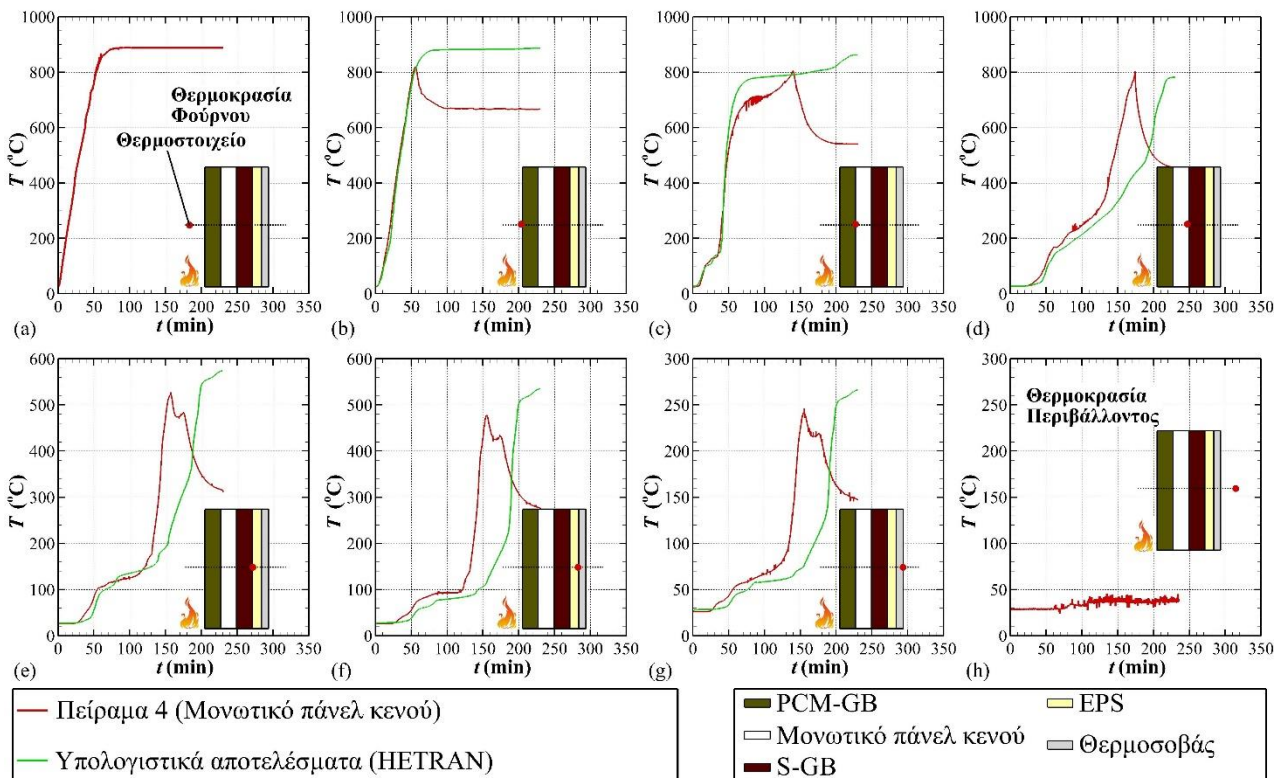
παράγραφο 4.3.1.4. Όπως αναφέρθηκε, η φαινόμενη πυκνότητα και η φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα θεωρήθηκε σταθερή σε σχέση με τη θερμοκρασία και ίσες με $\rho_{eff}=195 \text{ kg m}^{-3}$ και $c_{eff}=850 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, αντίστοιχα.

Η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε με βάση την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 4.3.1.4, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-18. Από την εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα το πώς μεταβάλλεται απότομα η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού πάνελ κενού τη στιγμή που λιώνει η εξωτερική του μεμβράνη (περίπου στους 70 °C) και η πίεση στο εσωτερικό του γίνεται ίση με την ατμοσφαιρική.

Στην Εικόνα 4-19 συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα HETTRAN με τις πειραματικές τιμές (πείραμα 4). Όπως είναι φανερό υπάρχουν περιοχές όπου τα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειράματα και περιοχές, όπου υπάρχει σημαντική υποεκτίμησή τους.



Εικόνα 4-18. Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα μονωτικού πάνελ κενού.

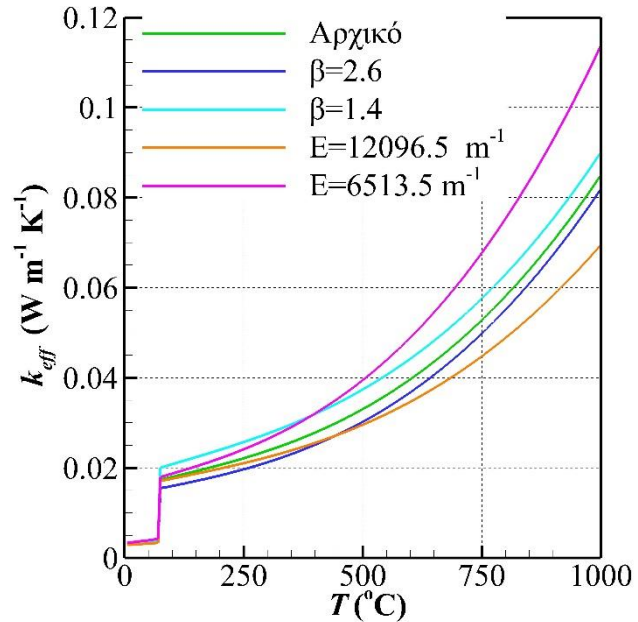


Εικόνα 4-19. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETTRAN) και πειραματικών τιμών (πείραμα 4).

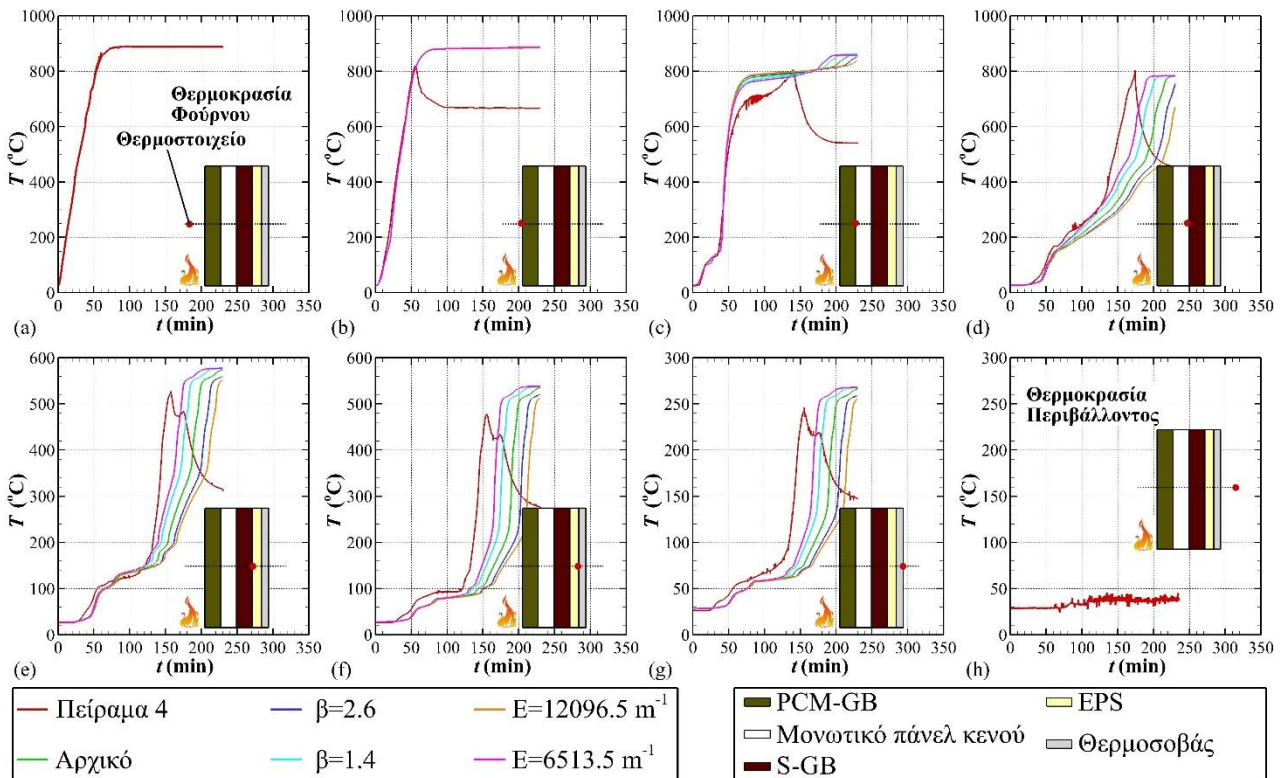
Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.3.1.4, η φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού πάνελ κενού προέκυψε από συνδυασμό πειραματικών τιμών και υπολογιστικών μοντέλων. Οι παράμετροι των υπολογιστικών μοντέλων που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα εμπεριέχουν ένα σφάλμα το οποίο μπορεί να μεταβάλλει

την καμπύλη θερμικής αγωγιμότητας. Θα πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι το μοντέλο που θεωρήθηκε εμπεριέχει διάφορες προσεγγίσεις κυρίως όσον αφορά τη θεώρηση ότι διάφορες τιμές είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία, όπως π.χ. η θερμική αγωγιμότητα του στερεού υλικού, k_{solid} , και ο συντελεστής απόσβεσης, E .

Έτσι, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη σχετικά με τις παραμέτρους β και E του μοντέλου προσέγγισης της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού πάνελ κενού. Στην Εικόνα 4-20 παρουσιάζονται οι καμπύλες της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού πάνελ κενού, όπως προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη διάφορες τιμές των συντελεστών β (1.4 και 2.6) και E (6513.5 m⁻¹ και 12096.5 m⁻¹). Όπως είναι φανερό, η μεταβολή των παραμέτρων επηρεάζουν σημαντικά την καμπύλη της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει σημαντικά και τα υπολογιστικά αποτελέσματα.



Εικόνα 4-20. Φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα μονωτικού πάνελ κενού για διάφορες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.



Εικόνα 4-21. Σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων (HETRAN) για διάφορες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού πάνελ κενού και πειραματικών τιμών (πειράμα 4).

Στην Εικόνα 4-21 συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα HETRAN για διάφορες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού πάνελ κενού με τις πειραματικές τιμές (πείραμα 4). Όπως είναι φανερό, οι παράμετροι του μοντέλου της φαινόμενης θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζουν σημαντικά τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Η μείωση του συντελεστή β , που εκφράζει το βαθμό μεταφοράς ενέργειας κατά τη σύγκρουση των αερίων μορίων με τα τοιχώματα, οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα τα υπολογιστικά αποτελέσματα να βελτιώνονται. Επιπλέον, η μείωση του συντελεστή E , που αντιστοιχεί στο συντελεστή απόσβεσης της ακτινοβολίας, οδηγεί στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση τα υπολογιστικά αποτελέσματα να βελτιώνονται. Όπως είναι φανερό, η μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται η βελτίωση του μοντέλου, ειδικότερα ως προς τη θεώρηση ότι οι παράμετροι είναι ανεξάρτητοι από τη θερμοκρασία. Γενικά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα προσομοιώνουν αρκετά καλά τα πειράματα δεδομένου της πολυπλοκότητας του προβλήματος και της πολυπλοκότητας των φυσικο-χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε για πρώτη φορά μια προσπάθεια προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Τα συστήματα ξηράς δόμησης περιέχουν κυρίως γυψοσανίδες ή/και τσιμεντοσανίδες τα οποία λόγω της περιεκτικότητάς τους σε κρυσταλλικό νερό, έχουν αυξημένη αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνδυασμό με το χαμηλό τους βάρος τα καθιστά αρκετά ελκυστικά στις σύγχρονες κατασκευές. Η μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των υλικών των συστημάτων ξηράς δόμησης έγινε κυρίως μέσω θεωρητικής ανάλυσης και χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό κώδικα HETRAN. Επικουρικά, χρησιμοποιήθηκαν και πειραματικά δεδομένα τόσο για την ποσοποίηση της ακρίβειας των υπολογισμών, όσο και στην ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων που να προσομοιώνουν τα διάφορα φυσικό-χημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία εστίασε στις φυσικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τις τοιχοποιίες που μελετήθηκαν (μικρό-κλίμακα) και στη θερμική συμπεριφορά των τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς (μέσο-κλίμακα). Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιώντας απλοϊκές μαθηματικές εκφράσεις από τη βιβλιογραφία και στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των τοιχοποιιών σε συνθήκες φωτιάς. Αφού προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες των υλικών έγινε ανάλυση ευαισθησίας των υπολογιστικών αποτελεσμάτων όσον αφορά το μέγεθος του πλέγματος (ανεξαρτησία πλέγματος). Έτσι, εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά πλέγματα και ελέγχθηκε η ανεξαρτησία των λύσεων, όπου προσδιορίστηκε το μέγιστο χωρικό βήμα ($\delta x=0.125 \text{ mm}$) για το οποίο επιτυγχάνεται αυτή η ανεξαρτησία.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο τοιχοποιίες ξηράς δόμησης οι οποίες αποτελούνταν από πέντε διαφορετικές στρώσεις: 1) γυψοσανίδα με υλικά αλλαγής φάσης, 2) διάκενο αέρος στη μια τοιχοποιία και μονωτικό πάνελ κενού στην άλλη τοιχοποιία, 3) απλή γυψοσανίδα, 4) διογκωμένη πολυστερίνη και θερμομονωτικός σοβάς. Αρχικά, έγινε προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας με το διάκενο αέρα, όπου τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν με τον κώδικα HETRAN χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες που προσδιορίστηκαν ήταν σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα μέχρι μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Πέραν από αυτήν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή τα υπολογιστικά αποτελέσματα υποεκτιμούσαν τα πειραματικά δεδομένα γιατί το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δε λάμβανε υπόψη τις διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες που συνέβαιναν. Έτσι, μελετήθηκαν διάφορες φυσικό-χημικές διεργασίες που εν δυνάμει μπορούσαν να λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των τοιχοποιιών, όπως είναι η οξείδωση του υλικού αλλαγής φάσης που υπάρχει στη γυψοσανίδα, η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας που υπάρχει στην απλή γυψοσανίδα και η οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης.

Εισάγοντας την ενέργεια που εκλύεται από την οξείδωση του υλικού αλλαγής φάσης στον κώδικα HETRAN τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν μεγάλη υπερεκτίμηση των θερμοκρασιών σε σχέση με τα

πειραματικά δεδομένα στο θερμοκρασιακό εύρος που λάμβανε χώρα η οξείδωση του υλικού αλλαγής φάσης. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το υλικό αλλαγής φάσης δεν οξειδώθηκε (ή τουλάχιστον δεν οξειδώθηκε πλήρως) λόγω της έλλειψης επαρκούς οξυγόνου τόσο μέσα στο θάλαμο του φούρνου ακτινοβολίας όσο και μέσα στο διάκενο της τοιχοποιίας. Στη συνέχεια μελετήθηκε η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας που υπάρχει στην απλή γυψοσανίδα και εισήχθη η ενέργεια που εκλύεται από τη συγκεκριμένη αντίδραση στον κώδικα HETRAN. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν, ανέδειξαν ότι η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας λαμβάνει χώρα στη συγκεκριμένη τοιχοποιία, καθώς το θερμοκρασιακό πεδίο που προέκυψε βελτιώθηκε σε σχέση με αυτό που προέκυψε από τη χρήση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας από την πλευρά των υψηλών θερμοκρασιών έγινε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας στην πλευρά των χαμηλών θερμοκρασιών. Αυτό ήταν απολύτως λογικό, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός θέρμανσης αυξάνονται και οι θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις. Τέλος, εισήχθη στον κώδικα HETRAN και η ενέργεια που εκλύεται από την οξείδωση της διογκωμένης πολυστερίνης, με τα υπολογιστικά αποτελέσματα να βελτιώνονται ελαφρώς, γεγονός που υποδεικνύει ότι λαμβάνει χώρα και η συγκεκριμένη αντίδραση.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά της δεύτερης τοιχοποιίας, η οποία περιλάμβανε ένα μονωτικό πάνελ κενού. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της πρώτης τοιχοποιίας, αλλά και τις φυσικές ιδιότητες του μονωτικού πάνελ κενού έγινε προσομοίωση της δεύτερης τοιχοποιίας. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα ήταν σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα μέχρι το πέρας της αφυδάτωσης των δύο γυψοσανίδων, ενώ από εκεί και πέρα υπήρχε αρκετά μεγάλη υποεκτίμηση του θερμοκρασιακού πεδίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη φαινόμενη θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού πάνελ κενού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς αυτό προέκυψε από ένα συνδυασμό πειραματικών τιμών και μαθηματικών εκφράσεων (και όχι από απευθείας μετρήσεις). Οι παράμετροι των μαθηματικών εκφράσεων, οι οποίες ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία, έχουν προσδιοριστεί από πειραματικές τιμές με αποτέλεσμα να εμπεριέχουν σφάλμα. Για το λόγο αυτό έγινε ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων αυτών, η οποία έδειξε ότι η μεταβολή τους επηρεάζει σημαντικά τα υπολογιστικά αποτελέσματα (τόσο προς το καλύτερο όσο και προς το χειρότερο), και μάλιστα ανέδειξε ότι οι παράμετροι αυτοί είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και όχι σταθερές τιμές, όπως έχει θεωρηθεί.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς μιας τοιχοποιίας ξηράς δόμησης (αλλά και όχι μόνο), πρέπει να γίνεται συνδυαστικά τόσο με πειράματα όσο και με υπολογισμούς. Αυτό γίνεται εμφανές από το γεγονός ότι με βάση του υπολογισμούς επιβεβαιώθηκε ή όχι η ύπαρξη διάφορων φυσικό-χημικών διεργασιών στο εσωτερικό των τοιχοποιιών, όπως π.χ. η οξείδωση της χάρτινης επιφάνειας κ.λπ., αλλά και ποσοτικοποιήθηκε. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει τη σημασία των ακριβών υπολογισμών, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η ύπαρξη πειραματικών δεδομένων δεν είναι εφικτή.

5.1.1 Στοιχεία πρωτοτυπίας

Η παρούσα εργασία συμβάλλει τόσο στη βασική όσο και στην εφαρμοσμένη έρευνα που γίνεται διεθνώς, σε σχέση με τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και πολυστρωματικών τοιχοποιιών. Η κυριότερη

πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εργασίας σε παγκόσμιο επίπεδο, έγκειται στη μοντελοποίηση και στην υπολογιστική προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης σε συνθήκες φωτιάς. Επιμέρους πρωτοτυπίες της παρούσας διατριβής συνίσταται στα ακόλουθα σημεία:

- Διεξοδική ανάλυση και μελέτη των φυσικό-χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό πολυστρωματικών τοιχοποιιών ξηράς δόμησης.
- Πιστοποίηση της ακρίβειας της μοντελοποίησης των ενδόθερμων αντιδράσεων σε διάφορα δομικά υλικά μέσα σε πολυστρωματικές τοιχοποιίας.
- Μοντελοποίηση εξώθερμων αντιδράσεων στο εσωτερικό πολυστρωματικών τοιχοποιιών με χρήση κατάλληλων όρων πηγών. Πιστοποίηση της ακρίβειας χρήσης των όρων πηγών με πειραματικά δεδομένα.
- Μοντελοποίηση της θερμικής συμπεριφοράς μονωτικών πάνελ κενού σε συνθήκες φωτιάς

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Abedl-Rahman A.K. and Ahmed G.N., Computational heat and mass transport in concrete walls exposed to fire. *Numer Heat Transfer, Part A* 29 (1996) 373-95.
- [2] Ahmed G.N. and Hurst J.P., Modelling the thermal behaviour of concrete slabs subjected to the ASTM E119 standard fire condition. *J Fire Protect Eng* 7(4) (1995) 125-32.
- [3] Ahmed N.G. and Hurst J., Coupled Heat and Mass Transport Phenomena in Siliceous Aggregate Concrete Slabs Subjected to Fire, *Fire and Materials* 21 (1997) 161-168.
- [4] Ahmed G.N and Hurst J.P., Modelling pore pressure, moisture, and temperature in high-strength concrete columns exposed to fire. *Fire Technol* 35(3) (1999) 232-62.
- [5] Alexiades V. and Solomon A.D., *Mathematical Modelling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, Washington, DC, 1993.
- [6] Andoh Y.H. and Lips B., Prediction of porous walls thermal protection by effusion or transpiration cooling. An analytical approach, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 1947-1958.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Bazant PB, Thonguthai W. Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *ASCE J Eng Mech Div* 104(EM5) (1978) 1059-79.
- [11] Bazant ZP, Thonguthai W. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. *Mag Concr Res* 31(107) (1979) 67-76.
- [12] Bazant A., Chern J.C. and Thonguthai W., Finite element program for moisture and heat transfer in heated concrete, *Nuclear Engineering and Design* 68 (1981) 61-70.
- [13] Carslaw H.S. and Jaeger J.C., *Conduction of Heat in Solids*, second ed. Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [14] 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.
- [15] Chen Z.Q. and Shi M.H., Study of heat and moisture migration properties in porous building materials, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 61-71.
- [16] Cheng, A. and D.T. Cheng, Heritage and early history of the boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 29 (2005) 268-302.

- [17] Cheng H. and Hadjisophocleous G.V., Dynamic modeling of fire spread in building, *Fire Safety Journal* 2011 46(4):211-224. doi:10.1016/j.firesaf.2011.02.003.
- [18] Clancy P., Advances in Modelling Heat Transfer Through Wood Framed Walls in Fire, *Fire and Materials* 25 (2001) 241-254.
- [19] 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.
- [20] Crank J., *Free and moving boundary problems [M]*, Calverdon Press, Oxford, 1984.
- [21] Dayan A., Heat and mass transfer within an intensely heated concrete slab, *Int. J. Heat Mass Transfer* 25 (10) (1982) 1461-1467.
- [22] Dayan A. Self-similar temperature, pressure and moisture distributions within an intensely heated porous half space. *Int J Heat Mass Transfer* 25 (10) (1982) 1469-147.
- [23] Dincov D.D., Parrott K.A. and Pericleous K.A., Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating, *J. Food Engineering* 65 (2004) 403-412.
- [24] Dos Santos G.H. and Mendes N., Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation, *Energy and Buildings* 38 (2006) 303-314.
- [25] EN 1995-1-2, Eurocode 5, Design of Timber Structures – Part 1-2: General – Structural Fire Design, 2004.
- [26] Feng M., Wang Y.C. and Davies J.M., Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire, *Fire Safety Journal* 38 (2003) 365-394.
- [27] Feng M., Wang Y.C. and Davies J.M., Axial strength of cold-formed thin walled steel channels under non-uniform temperatures in fire, *Fire Safety Journal* 38 (2003) 679-707.
- [28] Fikiin K.A., Generalized numerical modelling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy method and quasi-one-dimensional formulation, *International Journal of Refrigeration* 19 (2) (1996) 132-140.
- [29] Fire Statistics Great Britain, 2010-2011, Department for Communities and Local Government, November 2011, ISBN: 978-1-4098-3235-5.
- [30] Founti M.A., Cox G., Fire Safety: A look in its past and future, in *Proceedings of the International Conference on Technology Watch and innovation in the Construction Industry*, Brussels, Belgium, 5-6 April 2000, pp. 121-126.
- [31] Fo, Salagnac P., Glouannec P. and Lecharpentier D., Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 4479-4489.

- [32] Foss W.R., Bronkhorst C.A. and Bennett K.A., Simultaneously heat and mass transport in paper sheets during moisture sorption from humid air, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (2003) 2875-2886.
- [33] Gaur R.C. and Bansal N.K., Effect of moisture transfer across building components on room temperature, *Building and Environment* 37 (2002) 11-17.
- [34] Gear, C.W., *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1971.
- [35] Gerlich J.T., Collier P.C.R. and Buchanan A.H., Design of light steel-framed walls for fire resistance. *Fire and Materials* 20 (1996) 79-96.
- [36] 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.
- [37] Haines P.J., *Principles of thermal analysis and calorimetry*, The Royal Society of Chemistry: UK, 2002.
- [38] Handami N., Monteau J.Y. and Le Bail A., Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix, *International Journal of Refrigeration* 27 (2004) 595-603.
- [39] Hemminger W. and Sarge S.M., in: M.E. Brown (Ed.), *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, Elsevier: Amsterdam, 1998.
- [40] Hu H.P., Zhang Y.P., Wang X.K. and Little J.C., An analytical mass transfer model for predicting VOC emissions from multi-layered building materials with convective surfaces on both sides, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 2069-2077.
- [41] Huang C.L.D., Multi-phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient, *Int. J. Heat Mass Transfer* 22 (1979) 1295-1307.
- [42] Huang C.L.D., Siang H.H. and Best C.H., Heat and moisture transfer in concrete slabs, *Int. J. Heat Mass Transfer* 22 (1979) 257-266.
- [43] IMSL®, *Fortran Subroutines for Mathematical Applications, Math/Library, Vol. 1 and 2*, Visual Numerics, Inc, 1997.
- [44] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (2nd edition). Wiley: New York, 1985.
- [45] ISO 6946, *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*, 2nd ed., International Organization for Standardization, 2007.
- [46] R. Jansson, Measurement of thermal properties at elevated temperatures - Brandforsk project 328-031, SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2004:46, Borås, Sweden Kaasinen H. The absorption of phase change substances into commonly used building materials, *Sol En Mat and Sol Cells* 27(2) (1992) 173-181.

- [47] Karter M.J., Fire loss in the United States during 2010, National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division, September, 2011.
- [48] 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.
- [49] Kontogeorgos D., Ghazi Wakili K., Hugi E. and Founti M., Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 746-754.
- [50] Kontogeorgos D.A. and Founti M.A., Gypsum board reaction kinetics at elevated temperatures, *Thermochimica Acta* 529 (2012) 6-13.
- [51] Kontogeorgos D.A. and Founti M.A., Gypsum board dehydration kinetics at autogenous water vapour partial pressure, *Thermochimica Acta* 545 (2012) 141-147.
- [52] Kontogeorgos D. A., Mandilaras I. D. and Founti M. A., Fire behavior of regular and latent heat storage gypsum boards, *Fire and Materials* 39 (2015) 507-517.
- [53] Kontogeorgos A. Dimos, Semitelos K. Georgios, Mandilaras D. Ioannis, Caps Roland and Founti A. Maria, Experimental determination of the effective thermal conductivity of Vacuum Insulation Panels at fire temperatures, *Fire and Materials* 41 (2017) 738-749.
- [54] Kontogeorgos A. Dimos, Semitelos K. Georgios, Mandilaras D. Ioannis and Founti A. Maria, Experimental investigation of the fire resistance of multi-layer drywall systems incorporating Vacuum Insulation Panels and Phase Change Materials, *Fire Safety Journal* 81 (2016) 8-16.
- [55] Lamberg P., Lehtiniemi R. and Henell A.M., Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 277-287.
- [56] Lane G., in: *Solar Heat Storage: Latent Heat Material*, vol. 1, CRC Press, Boca Raton, FL, 1983.
- [57] Lu T. and Shen S.Q., Numerical and experimental investigation of paper drying: Heat and mass transfer with phase change in porous media, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1248-1258.
- [58] Mackenzie R.C., in *Treatise on Analytical Chemistry*, ed. I.M. Kolthoff, P.J. Elving and C.B. Murphy, Part 1, Theory and Practice (2nd edn.), Wiley: New York, 1983.
- [59] Mandilaras I.D., Kontogeorgos D.A. and Founti M.A., A hybrid methodology for the determination of the effective heat capacity of PCM enhanced building components, *Renewable Energy* 76 (2015) 790-804.
- [60] 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.
- [61] Manzello SL, Gann RG, Kukuck SR, Prasad K, Jones WW. Performance of a non-load-bearing steel stud gypsumboard wall assembly: experiments and modelling. *Fire and Materials* 2007; 31(5):297-310. doi:10.1002/fam.939

- [62] Mayers G.E., *Analytical Methods in Conduction Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- [63] McGraw J.R. and Mowrer F.W., *Flammability and Dehydration of Painted Gypsum Wallboard Subjected to Fire Heat Fluxes*, *Fire Safety Science – Proceedings of the 6th International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, Poitiers, France, 5-9 July 1999, Paper number 1003. McGraw R.J. and Mowrer Frederick.
- [64] McNabb A., Wake G.C., Hossain Md.M. and Lambourne R.D., *Transition times between steady states for heat conduction, Part I: general theory and some exact results*, *Occasional Papers in Maths & Statistics No. 20*, Massey University, 1990.
- [65] McNabb A., Wake G.C., Hossain Md.M., Lambourne R.D., *Transition times between steady states for heat conduction, Part II: approximate solutions and examples*, *Occasional Papers in Maths & Statistics No. 21*, Massey University, 1990.
- [66] M.I.G. Miranda, C.I.D. Bica, S.M.B. Nachtigall, N. Rehman, S.M.L. Rosa, *Kinetic thermal degradation study of maize straw and soybean hull celluloses by simultaneous DSC-TGA and MDSC techniques*, *Thermochim. Acta* 565 (2013) 65-71.
- [67] 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.
- [68] Mendes N., Philippi P.C. and Lamberts R., *A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media*, *Int. J. Heat Mass Transfer* 45 (2002) 509-518.
- [69] Nguyen T.Q., Petkovic J., Dangla P. and Baroghel-Bouny V., *Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials*, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 2185-2195.
- [70] Novozhilov V., *Computational fluid dynamics modeling of compartment fires*, *Progress in Energy and Combustion Science* 27 (2001) 611-666.
- [71] Patankar S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere: London, 1980.
- [72] Peippo K, Kauranen P and Lund P.D., *A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating*, *Energy and Building* 17 (1991) 259-270.
- [73] Pham Q.T., *Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs*, *Journal of Food Technology* 21 (1986) 209-219.
- [74] Pham Q.T. and Karuri N., *A computationally efficient technique for calculating simultaneous heat and mass transfer during food chilling*, in: *Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration*, Sydney, 19-24 September 1999.
- [75] Pham T.Q., *Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review*, *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 876-888.

- [76] Purkiss J.A., *Fire Safety Engineering Design of Structures*, Hartnolls Ltd, Bodmin, Cornwall, Great Britain, 1996.
- [77] Qin M., Belarbi R., Ait-Mokhtar A. and Seigneurin A., An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (2006) 39-48.
- [78] Qin M., Belarbi R., Ait-Mokhtar A. and Nilsson L., Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 967-975.
- [79] Quintiere J.G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, Jogn Wiley & Sons, Ltd, Enland, 2006.
- [80] Riley D.S., Smith F.T., Poots G., The inward solidification of spheres and circular cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17 (1974) 1507-1516.
- [81] Rutqvist J., Wu Y.-S., Tsang C.-F. and Bodvarsson G., A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock, *Int. J. Rock Mech Min Sci* 39 (2002) 429-442.
- [82] Schrefler B.A. and Pesavento F., Multiphase flow in deforming porous material, *Computers and Geotechnics* 31 (2004) 237-250.
- [83] Simmler H., Brunner S., Heinemann U., Schwab H., Kumaran K., Mukhopadhyaya P., Quénard D., Sallée H., Noller K., Kükükpinar-Niarchos E., Stramm C., Tenpierik M., Cauberg H. and Erb M., Vacuum Insulation Panels. Study on VIP components and panels for service life prediction of VIP in building applications (Subtask A), Technical Report, IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-project (High Performance Thermal Insulation for Buildings and Building Systems), 2005.
- [84] Semitelos G.K., Mandilaras I. D., Kontogeorgos D. A. and Founti M. A., Simplified correlations of gypsum board thermal properties for simulation tools, *Fire and Materials*, vol. 40, pp. 229-245, 2016.
- [85] Sha W., O' Neill E.A., Guo Z., Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement, *Cement Concr. Res.* (1999) 1487-1489.
- [86] Shepel S.V., Ghazi Wakili K. and Hugi E., Vapor Convection in Gypsum Plasterboard Exposed to Fire: Numerical Simulation and Validation, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 57 (2010) 911-935.
- [87] Spinardi G. Fire safety regulation: prescription, performance, and professionalism. *Fire Safety Journal* 2016; 80:83-88. doi:10.1016/j.firesaf.2015.11.012.
- [88] Stakulcharoen J, Pakdee W. and Ratanadecho P., Analysis of Transport Phenomena in Concrete Walls Exposed to Hot Gas, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 18-20 October 2006, p. 26-31.
- [89] 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.

- [90] 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.
- [91] Takeda H., A model to predict fire resistance of non-load bearing wood-stud walls, *Fire and Materials* 27 (2003) 19-39.
- [92] Tavares RM. An analysis of the fire safety codes in Brazil: is the performance-based approach the best practice? *Fire Safety Journal* 2009; 44(5):749-755. doi:10.1016/j.firesaf.2009.03.005
- [93] Tenchev R.T., Li L.Y. and Purkiss J.A., Finite element analysis of coupled heat and moisture transfer in concrete subjected to fire. *Numer Heat Transfer, Part A* 39 (2001) 685-710.
- [94] Tenchev R.T., Li L.Y., Purkiss J.A. and Khalafallah B.H., Finite element analysis of coupled heat and mass transfer in concrete when it is in a fire. *Mag Concr Res* 53(2) (2001) 117-25.
- [95] Thomas G., Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures, *Fire and Materials* 26 (2002) 37-45.
- [96] Thomas G., Modelling thermal performance of gypsum plasterboard-lined light timber frame walls using SAFIR and TASEF, *Fire and Materials* 34 (2010) 385-406.
- [97] Trelles J. and Lattimer B.Y., Modelling thermal degradation of composite materials, *Fire and Materials* 31 (2007) 147-171.
- [98] Voller V.R., An overview of numerical methods for solving phase change problems, in: W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow (Eds.), *Advances in Numerical Heat Transfer*, vol. 1, Taylor & Francis, London, 1996, pp. 341-375.
- [99] Weber B., Heat transfer mechanisms and models for a gypsum board exposed to fire, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 1661-1678.
- [100] 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.
- [101] Wyrwal J. and Marynowicz A., Vapour condensation and moisture accumulation in porous building wall, *Building and Environment* 37 (2002) 313-318.
- [102] Yang H. and He Y., Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 385-392.
- [103] Yeoh G.H. and Yuen K.K., *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 2009.
- [104] Zalba B., Marin M.J., Cabeza F.L. and Mehling H., Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251 - 283.
- [105] Καδιανάκης Ν., Καρανάσιος Σ. και Φελλούρης Α., ΑΝΑΛΥΣΗ Π Συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, Έκδοση Πέμπτη, Αθήνα 2000, ISBN 960-90120-0-0.

- [106] Κεραμίδα Ε.Π., Υπολογιστική ανάλυση μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία σε πολυδιάσπαρτο νέφος σωματιδίων, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας ΙΙ, Αθήνα, 2000.
- [107] Κολαΐτης Δ.Ι., Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης πολυφασικών πολυσυστατικών αντιδρωσών ροών. Εφαρμογή και εμβάθυνση στις «ψυχρές φλόγες», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Θερμότητας, Αθήνα, 2005.
- [108] Κοντογεώργος Δ.Α., Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης φαινομένων μεταφοράς σε στερεά όρια (δομικά υλικά) για συνθήκες καύσης/ φωτιάς, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Θερμότητας, Αθήνα, Ιούλιος 2012.
- [109] Μπεργελές Γ., Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2000.
- [110] Παπαϊωάννου Κ., Εισαγωγή στην προπροστασία των κατασκευών, Εκδόσεις Α.Π.Θ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [111] Σεμιτέλος Κ. Γεώργιος, Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Δομικών Υλικών και Τοιχοποιίας σε Θερμοκρασίες Φωτιάς, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, Νοέμβριος 2013.