

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΗΣ ΣΕ ΦΩΤΙΑ

Δήμος Κοντογεώργος

Υποψ. Διδ., Ε.Μ.Σ.Κ. – Ε.Μ.Π.

Διονύσιος Κολαΐτης

Δρ. Ερευνητής, Ε.Μ.Σ.Κ. – Ε.Μ.Π.

Μαρία Φούντη

Καθηγήτρια Σχολής Μηχ. Μηχ. Ε.Μ.Π., Ε.Μ.Σ.Κ. – Ε.Μ.Π.

Λέξεις κλειδιά: Μετάδοση θερμότητας, δομικά υλικά, γυψοσανίδα, φωτιά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης ενός υπολογιστικού κώδικα προσομοίωσης μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό δομικών υλικών τα οποία είναι εκτεθειμένα σε φωτιά. Για την επαλήθευση της ακρίβειας των προβλέψεων του κώδικα χρησιμοποιούνται πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες αφορούν τη θερμική συμπεριφορά μιας τυποποιημένης γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας, παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γυψοσανίδες είναι ένα δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το 2000 παρήχθησαν παγκοσμίως περίπου 5.6 δισεκατομμύρια τ.μ. σε 250 εργοστάσια κατασκευής γυψοσανίδων (Wakili et al., 2007). Τα κύρια πλεονεκτήματα των γυψοσανίδων είναι η ευκολία κατασκευής τους, η ευκολία εύρεσης της πρώτης ύλης (γύψου) ανά τον κόσμο, οι καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες τους καθώς και η πολύ καλή συμπεριφορά τους σε συνθήκες φωτιάς. Το τελευταίο χαρακτηριστικό αποτελεί μια σημαντική παράμετρο η οποία αφορά την πυροπροστασία στα κτίρια.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των γυψοσανίδων σε συνθήκες φωτιάς ξεκίνησε κατά τη δεκαετία του 1960 (Ryan, 1962). Ακολούθησαν αρκετές εργασίες οι οποίες εστίαζαν τόσο στην πειραματική διερεύνηση, όσο και στην υπολογιστική προσομοίωση (King et al., 1971, Mehaffey et al., 1994,

Sultan, 1996). Στις εργασίες αυτές μελετήθηκε, κατά κύριο λόγο, η μετάδοση θερμότητας σε τοίχο αποτελούμενο από γυψοσανίδες, οι οποίες συνδέονταν μεταξύ τους είτε με ξύλινους δοκούς στήριξης (Mehaffey et al., 1994) είτε με μεταλλικούς (Sultan, 1996). Ο κύριος στόχος τους ήταν η πρόβλεψη της κατάρρευσης ενός τοίχου, όταν αυτός εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς.

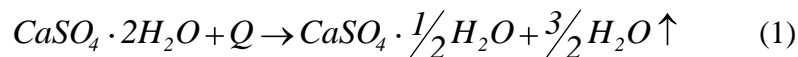
Πρόσφατα, παρουσιάστηκαν εργασίες οι οποίες εστιάζουν περισσότερο στην αριθμητική προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας και βασίζονται στις εργασίες των Mehaffey et al., 1994 και Sultan, 1996, κυρίως όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες της γύψου σε υψηλές θερμοκρασίες (Axenenko, 1996, Alfawakhiri, 1999, Thomas, 2002, Feng, 2003, Ang, 2004, Benichou, 2005).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο υπολογιστικός κώδικας HETRAN (HEat TRansfer ANalysis), ο οποίος αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Ε.Μ.Π., και αφορά την προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό μιας γυψοσανίδας, η οποία εκτίθεται σε συνθήκες φωτιάς. Τα αποτελέσματα του κώδικα συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα των Wakili et al., 2007.

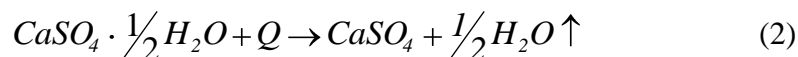
1.1 Θερμοχημεία της γύψου

Η γύψος, η οποία αποτελεί το κύριο συστατικό της γυψοσανίδας, είναι ουσιαστικά ο διυδρίτης του θειικού ασβεστίου, με μοριακό τύπο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Στην κρυσταλλική δομή της γύψου περιέχεται 21% κ.μ. νερό. Επιπλέον, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, η γύψος μπορεί να περιέχει και μια μικρή ποσότητα ελεύθερης υγρασίας.

Καθώς η γύψος θερμαίνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80°C ξεκινά η διαδικασία αφυδάτωσης, στην οποία το χημικά συνδεδεμένο νερό διαχωρίζεται από το κρυσταλλικό πλέγμα (Mehaffey, 1994). Η χημική αντίδραση που περιγράφει αυτή τη διαδικασία δίνεται από την εξίσωση 1 και αποτελεί μια ενδόθερμη χημική αντίδραση.



Η χημική ένωση που παράγεται ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) αποτελεί τον ημιυδρίτη του θειικού ασβεστίου. Περαιτέρω θέρμανση του ημιυδρίτη απελευθερώνει το υπόλοιπο νερό με αποτέλεσμα την πλήρη αφυδάτωσή του. Στην περίπτωση αυτή, ο ημιυδρίτης του θειικού ασβεστίου μετατρέπεται σε ανυδρίτη ή αλλιώς άνυδρο θειικό ασβέστιο (CaSO_4). Η αντίστοιχη χημική αντίδραση, στην οποία επίσης απορροφάται ενέργεια (ενδόθερμη αντίδραση), παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.



Η διαδικασία της αφυδάτωσης λαμβάνει χώρα από τους 100°C μέχρι τους 250°C περίπου, με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται περίπου στους 145°C για την 1^η αντίδραση και 200°C για την 2^η αντίδραση (Elbeyli, 2004). Σε αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές, η δεύτερη αντίδραση της πλήρους αφυδάτωσης, είτε δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη (Mehaffey et al., 1994), είτε θεωρείται εσφαλμένα ότι λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 400°C, παρουσιάζοντας μέγιστο ρυθμό περί τους 600°C (Sultan, 1996). Η υπόθεση αυτή συνδυάζεται με την εμφάνιση περαιτέρω απώλειας μάζας της γύψου μετά τους 600°C, η οποία, όμως, οφείλεται στην αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου (Sanders, 2002, Wakili et al., 2007), σύμφωνα με την αντίδραση που περιγράφεται στην εξίσωση 3.



Το νερό, το οποίο είναι χημικά συνδεδεμένο στη γύψο, καθώς και η ελεύθερη υγρασία που μπορεί να περιέχεται σε αυτή, αποτελούν την κύρια αιτία για την υψηλή αντίσταση που προβάλλουν οι γυψοσανίδες στη φωτιά. Όταν μια γυψοσανίδα εκτεθεί σε περιβάλλον φωτιάς, οι περιεχόμενες ποσότητες νερού απελευθερώνονται υπό τη μορφή ατμού. Η πραγματοποίηση της διαδικασίας αυτής απαιτεί την απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται σημαντικά ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ HETRAN

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναλυτική παρουσίαση του υπολογιστικού κώδικα HETRAN, ο οποίος αναπτύχθηκε ειδικά για την επίλυση προβλημάτων μονοδιάστατης μη μόνιμης μετάδοσης θερμότητας σε δομικά υλικά. Η παρουσίαση αυτή κρίνεται σκόπιμη προκειμένου να γίνει δυνατή η αναπαραγωγή του αλγόριθμου από άλλους μελετητές που ασχολούνται με το σύνθετο πρόβλημα της συμπεριφοράς δομικών υλικών σε συνθήκες φωτιάς. Σημειώνεται ότι ο κώδικας HETRAN λαμβάνει υπόψη του τη πολύ-στρωματική δομή δομικών υλικών και τη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας, με στόχο τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού (φαινόμενο το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιορισθεί πειραματικά). Στα πλαίσια αυτά, λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας με χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά ενός υλικού σε συνθήκες φωτιάς.

Ο κώδικας επιλύει αριθμητικά την εξίσωση της μη μόνιμης μετάδοσης θερμότητας σε πολυστρωματικά υλικά (εξίσωση 4), με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων (Patankar, 1980).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \dot{Q}''' - h \frac{dp}{dt} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

όπου ρ = πυκνότητα του υλικού (kg / m^3), C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ($\text{J} / \text{kg} / \text{K}$), T = θερμοκρασία (K), k = θερμική αγωγιμότητα ($\text{W} / \text{m} / \text{K}$), \dot{Q}''' = ρυθμός παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου (W / m^3), t = χρόνος (s) και h = ενθαλπία του υλικού (J / kg). Η ενθαλπία του υλικού υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης 5, όπου h^0 = ενθαλπία σχηματισμού στη θερμοκρασία αναφοράς T_{Ref} .

$$h = \int_{T_{Ref}}^T C_p dT + h_{T_{Ref}}^0 \quad (5)$$

2.1 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες, οι οποίες είναι δυνατόν να εισαχθούν κατ' επιλογή στον υπολογιστικό κώδικα HETRAN, είναι οι εξής:

- Αδιαβατικό τοίχωμα
- Σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία επιφάνειας η οποία καθορίζεται από τον χρήστη
- Σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοροή στο τοίχωμα η οποία καθορίζεται από τον χρήστη
- Συναγωγή ή/και ακτινοβολία με τον περιβάλλοντα χώρο, η θερμοκρασία του οποίου καθορίζεται από τον χρήστη (σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη)
- Οριακή συνθήκη αγωγής στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στερεών υλικών
- Οριακή συνθήκη αγωγής και ακτινοβολίας στη διεπιφάνεια μεταξύ στερεού και ρευστού, όπου το ρευστό αποτελεί μέρος του υπολογιστικού χωρίου

2.2 Διακριτοποίηση

Οι εξισώσεις 1, 3 και 4 διακριτοποιούνται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Patankar, 1980). Για τη χωρική διακριτοποίηση, το υπολογιστικό χωρίο διαμερίζεται σε $N-1$ κελιά τα οποία αντιστοιχούν σε N υπολογιστικούς κόμβους (Εικ. 1). Η θερμοκρασία υπολογίζεται σε κάθε υπολογιστικό κόμβο, ενώ τα υπολογιστικά κελιά εκτείνονται μέχρι τη μέση απόσταση των εκατέρωθεν γειτονικών τους κόμβων. Στην εξίσωση 6 παρουσιάζεται η χωρική διακριτοποίηση της εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας. Οι ποσότητες στο ενδιάμεσο δύο κόμβων υπολογίζονται από

τον αρμονικό (γεωμετρικό) μέσο. Ανάλογες με την εξίσωση 6 είναι και οι εκφράσεις για τις οριακές συνθήκες.

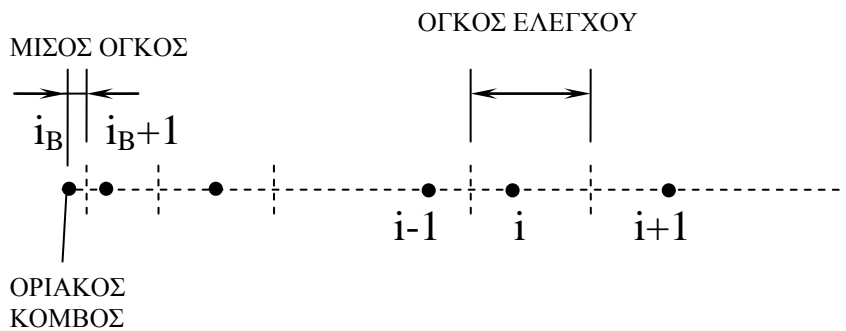
$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_1 + Q_2}{\rho C_p \Delta x_{i+1/2} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + \rho C_p \Delta x_{i-1/2} \frac{x_i - x_{i-1}}{2}}$$

$$Q_1 = \left[k_{i+1/2} \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} - k_{i-1/2} \frac{T_i - T_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right] \quad (6)$$

$$Q_2 = \left[\dot{Q}_{toti+1/2} \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + \dot{Q}_{toti-1/2} \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right]$$

Η εξίσωση 6 μπορεί επίσης να διατυπωθεί σε γενική μητρωική μορφή (εξ. 7).

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{T}) \quad (7)$$



Εικόνα 1. Υπολογιστικά κελιά

Όσον αφορά τη χρονική διακριτοποίηση, ο υπολογισμός ξεκινά από τις συνθήκες περιβάλλοντος ή από συνθήκες καθορισμένες από το χρήστη. Σε κάθε χρονικό βήμα n , το θερμοκρασιακό πεδίο \mathbf{T}^n θεωρείται γνωστό και με βάση αυτό υπολογίζονται οι φυσικές ιδιότητες. Το θερμοκρασιακό πεδίο στην επόμενη χρονική στιγμή, \mathbf{T}^{n+1} , υπολογίζεται με απλή χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης 7 και των αντίστοιχων εξισώσεων για τις

οριακές συνθήκες, όπως φαίνεται και στην εξίσωση 8. Στην εξίσωση 8, $\delta t =$ χρονικό βήμα (s), ενώ ο δείκτης e αντιστοιχεί στην προσέγγιση του θερμοκρασιακού πεδίου.

$$\mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{T}^n + \delta t \mathbf{F}(\mathbf{T}^{n+1}, \mathbf{T}^n) \quad (8)$$

2.3 Αλγόριθμος HETTRAN

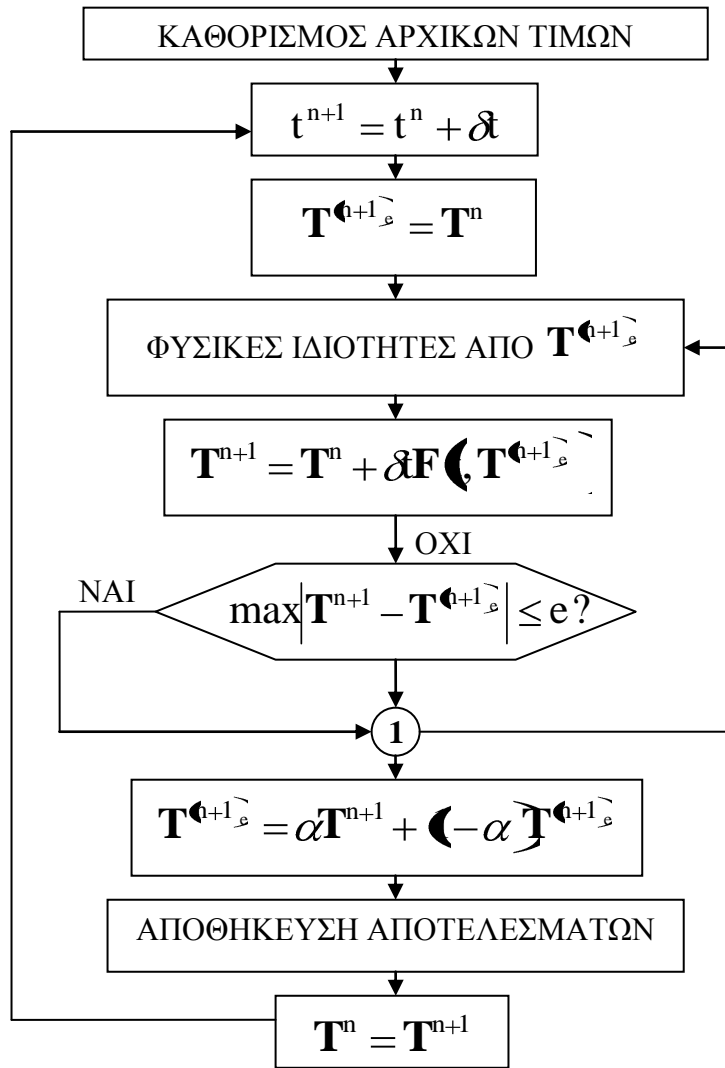
Τα κύρια βήματα του υπολογιστικού αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιείται στον κώδικα HETTRAN, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2:

1. Καθορισμός των αρχικών τιμών του θερμοκρασιακού πεδίου και των ιδιοτήτων.
2. Για το επόμενο χρονικό βήμα, ως πρώτη προσέγγιση του θερμοκρασιακού πεδίου λαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές του προηγούμενου χρονικού βήματος.
3. Όλες οι φυσικές ιδιότητες υπολογίζονται από την τρέχουσα προσέγγιση του θερμοκρασιακού πεδίου.
4. Με χρήση της εξίσωσης 8 υπολογίζεται το νέο θερμοκρασιακό πεδίο.
5. Συγκρίνεται το νέο θερμοκρασιακό πεδίο με την προσέγγισή του για κάθε υπολογιστικό κόμβο. Ελέγχεται αν η μέγιστη τιμή της διαφοράς τους για όλους του κόμβους είναι μικρότερη από την προκαθορισμένη τιμή σφάλματος (κριτήριο σύγκλισης).
6. Αν δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση, τότε το νέο προσεγγιστικό θερμοκρασιακό πεδίο υπολογίζεται από το παλαιό και από αυτό που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα (μέσω υποχαλάρωσης). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται από το βήμα 3 μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.
7. Όταν επιτευχθεί σύγκλιση αποθηκεύονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και η διαδικασία συνεχίζεται από το βήμα 2 μέχρι την ολοκλήρωση του συνολικού χρόνου προσομοίωσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την επαλήθευση της ακρίβειας του υπολογιστικού κώδικα HETTRAN, έγινε σύγκριση των προβλέψεων με διαθέσιμα πειραματικά. Οι πειραματικές μετρήσεις αφορούν δοκίμιο γυψοσανίδας διαστάσεων 1.25 m × 1.05 m × 0.012 m, του οποίου η μία πλευρά είναι εκτεθειμένη στην πρότυπη φωτιά ISO 834 (International Standard ISO 834-1, 1999), ενώ η άλλη βρίσκεται σε περιβάλλον θερμοκρασίας 20°C. Μια σειρά θερμοστοιχείων τοποθετημένων στο εσωτερικό του δοκιμίου, σε απόσταση

4 mm μεταξύ τους, επιτρέπουν τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Αναλυτική περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης γίνεται στην αντίστοιχη εργασία (Wakili et al., 2007).



Εικόνα 2. Αλγόριθμος του υπολογιστικού κώδικα HETRAN

Για την προσομοίωση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε οριακή συνθήκη συναγωγής και ακτινοβολίας για την πλευρά όπου το δοκίμιο είναι

σε επαφή με τον περιβάλλοντα χώρο, η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις 9 και 10.

$$q_{cond} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{Wall} = q_{conv} + q_{rad}^{ext} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} q_{conv} &= h_c \left(T_{Amb} - T_{Wall} \right) \\ q_{rad}^{ext} &= \varepsilon \sigma \left(T_{Amb}^4 - T_{Wall}^4 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

όπου, q_{cond} = ροή θερμότητας λόγω αγωγής (W / m^2), q_{conv} = ροή θερμότητας λόγω συναγωγής (W / m^2), q_{rad}^{ext} = ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (W / m^2), h_c = συντελεστής συναγωγής ($W / m^2 / K$), ε = συντελεστής εκπομπής του τοιχώματος, σ = σταθερά Stefan-Boltzmann $5.669 \times 10^{-8} W / m^2 / K^4$, T_{Amb} = θερμοκρασία του περιβάλλοντος και T_{Wall} = θερμοκρασία της επιφάνειας του τοιχώματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $h_c = 10 W / m^2 / K$ και $\varepsilon = 0.9$.

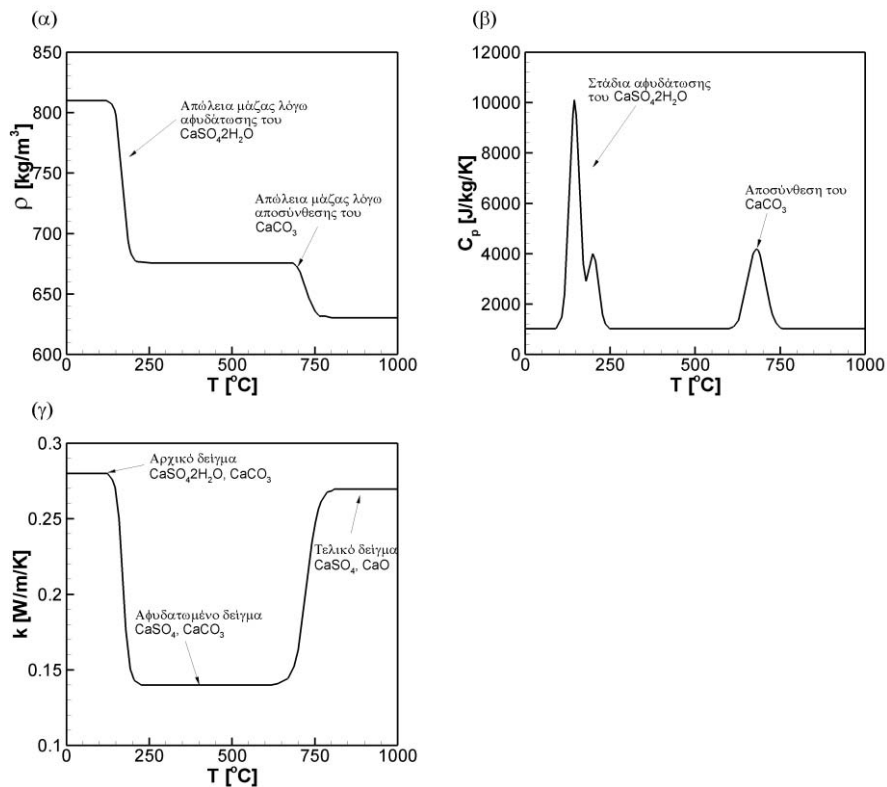
Στην πλευρά όπου το δοκίμιο είναι εκτεθειμένο στη φωτιά, χρησιμοποιήθηκε οριακή συνθήκη καθορισμένης επιφανειακής θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ως θερμοκρασία επιφάνειας η θερμοκρασία που μετρήθηκε στο πείραμα στη θερμή επιφάνεια του δοκιμίου (Εικ. 4δ).

Οι φυσικές ιδιότητες της γύψου ελήφθησαν από τους Wakili et al., 2007 και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. Είναι εμφανές ότι υπάρχει σημαντική εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας k , της πυκνότητας ρ και της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p , από τη θερμοκρασία. Η αφυδάτωση του $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, η οποία οδηγεί σε απώλεια δύο μορίων νερού, αντιστοιχεί σε απώλεια μάζας κατά 21%. Επίσης, η αποσύνθεση του $CaCO_3$ οδηγεί σε απώλεια ενός μορίου CO_2 και αντιστοιχεί σε απώλεια μάζας κατά 56% της αρχικής μάζας του $CaCO_3$. Τα δύο αυτά στάδια απώλειας μάζας είναι ευδιάκριτα στην Εικόνα 3α, στην οποία απεικονίζεται η πυκνότητα της γύψου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στην Εικόνα 3β απεικονίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα της γύψου, όπου διακρίνονται τα δύο βήματα της διαδικασίας αφυδάτωσης της γύψου, καθώς και η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου σε υψηλότερη θερμοκρασία. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την αφυδάτωση είναι περίπου $450 kJ / kg$. Επίσης, η ενέργεια που αντιστοιχεί στην αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου είναι περίπου $200 kJ / kg$. Οι δύο παραπάνω τιμές υπολογίζονται μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης της ειδικής θερμοχωρητικότητας στις αντίστοιχες θερμοκρασιακές περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα η αφυδάτωση της γύψου και η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου.

Στην Εικόνα 3γ απεικονίζεται η θερμική αγωγιμότητα της γύψου συναρτήσει της θερμοκρασίας. Είναι ευδιάκριτες δύο περιοχές σημαντικής

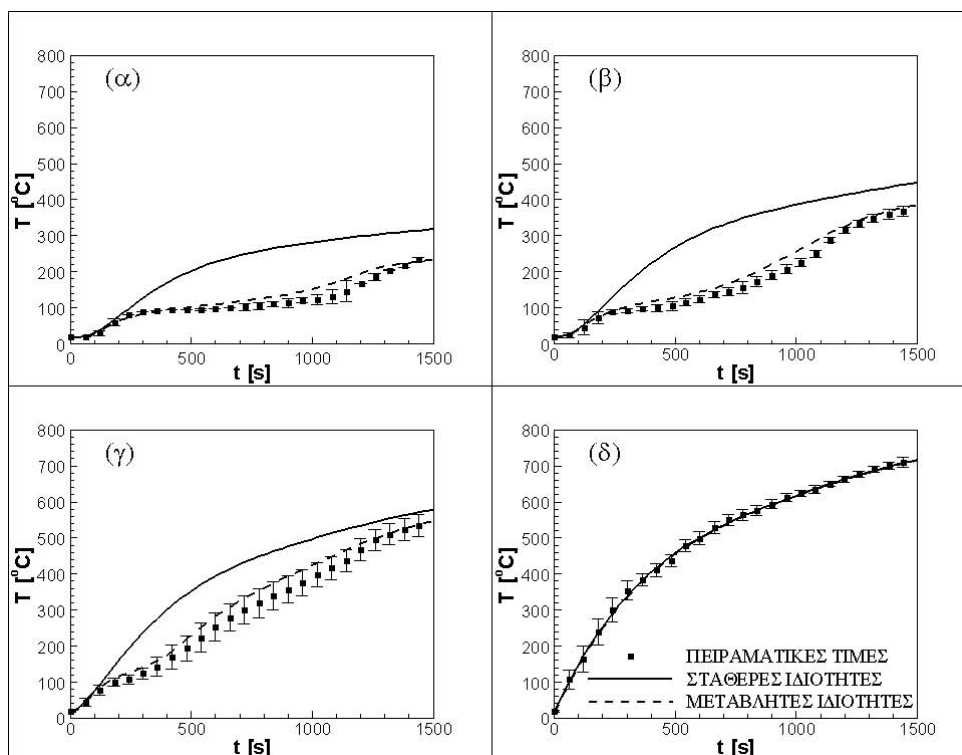
μεταβολής των τιμών, οι οποίες οφείλονται η μεν πρώτη στη διαδικασία της αφυδάτωσης, η δε δεύτερη στην αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου. Η τιμή σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 200°C αντιστοιχεί στην αρχική κατάσταση της γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaCO_3). Οι τιμές μετά το πρώτο βήμα μεταβολής αντιστοιχούν στο αφυδατωμένο δείγμα (CaSO_4 , CaCO_3), ενώ οι τιμές μετά το δεύτερο βήμα μεταβολής αντιστοιχούν στο δείγμα όπου το διοξείδιο του άνθρακα έχει διαχωριστεί από το ανθρακικό ασβέστιο (CaSO_4 , CaO).



Εικόνα 3. Μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου συναρτήσει της θερμοκρασίας: (α) πυκνότητα, (β) ειδική θερμοχωρητικότητα και (γ) θερμική αγωγιμότητα

Στην Εικόνα 4 γίνεται σύγκριση των προβλέψεων της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας της γυψοσανίδας με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, για τέσσερα σημεία στο εσωτερικό του δοκιμίου (η θέση 0 mm αντιστοιχεί στην «κρύα» πλευρά του δοκιμίου, ενώ η θέση 12 mm αντιστοιχεί στην πλευρά η οποία είναι εκτεθειμένη στη φωτιά).

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στις φυσικές ιδιότητες της γύψου, έγιναν υπολογισμοί τόσο με σταθερές ιδιότητες ($k = 0.28 \text{ W / m / K}$, $\rho = 810 \text{ kg / m}^3$ και $C_p = 1000 \text{ J / kg / K}$), όσο και με μεταβαλλόμενες (Εικ. 3). Όλες οι άλλες παράμετροι παρέμειναν ίδιες και στις δύο περιπτώσεις. Είναι φανερό ότι χρησιμοποιώντας σταθερές ιδιότητες είναι αδύνατο να προσομοιωθεί με ακρίβεια το φαινόμενο, δεδομένου ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η διαδικασία της αφυδάτωσης της γύψου. Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, τα υπολογιστικά αποτελέσματα επιτυγχάνουν πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.



Εικόνα 4. Σύγκριση προλέξεων και μετρήσεων της θερμοκρασιακής κατανομής στο εσωτερικό της γυψοσανίδας: (α) 0mm, (β) 4mm, (γ) 8mm και (δ) 12mm.

Τέλος, από τα υπολογιστικά αποτελέσματα και τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4, γίνεται εμφανής η πολύ καλή συμπεριφορά του γυψοσανίδων σε συνθήκες φωτιάς. Παρόλο που στην πλευρά της φωτιάς (Εικ. 4δ) η θερμοκρασία της γύψου αυξάνει διαρκώς, στην αντίθετη πλευρά (Εικ. 4α), που είναι και η πλευρά ενδιαφέροντος από

την άποψη της πυροπροστασίας, παραμένει σταθερή ή αυξάνεται με πολύ μικρό ρυθμό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 13 min). Το γεγονός αυτό, όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στη διαδικασία αφυδάτωσης της γύψου, η οποία απορροφά θερμότητα, εμποδίζοντας τη γρήγορη μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της γυψοσανίδας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η διαδικασία ανάπτυξης και πιστοποίησης του υπολογιστικού κώδικα HETRAN, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας διαμέσου μιας γυψοσανίδας εκτεθειμένης σε συνθήκες φωτιάς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων της γύψου με τη θερμοκρασία έχει σημαντική επίδραση στη συνολική συμπεριφορά της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς.

Γενικότερα, για την ακριβή πρόλεξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό δομικών υλικών (όπως οι γυψοσανίδες) τα οποία εκτίθενται στις υψηλές θερμοκρασίας της φωτιάς, απαιτείται να ληφθεί υπόψη η πολυστρωματική δομή των υλικών, η εξάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων από τη θερμοκρασία καθώς και η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.

Συνολικά, με τη βοήθεια της υπολογιστικής προσομοίωσης, πιστοποιήθηκε ότι η συμπεριφορά της γυψοσανίδας σε συνθήκες φωτιάς είναι πολύ καλή, δεδομένου ότι μειώνει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό της, λόγω των ενδόθερμων αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της αφυδάτωσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα ISSB: The Integrated Safe & Smart Building Concept του 6^{ου} Προγράμματος Πλαισίου της Ε.Ε.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Alfawakhiri, F., Sultan, M.A. & MacKinnon, D.H. "Fire Resistance of Loadbearing Steel-Stud Walls Protected with Gypsum Board: A Review", *Fire Technology*, Vol. 35, No. 4 (1999) 308–335.

Ang, C.N. & 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*, Vol. 18, No. 7 (2004) 505–515.

Axenenko, O. & Thorpe, G., “The Modelling of Dehydration and Stress Analysis of Gypsum Plasterboards Exposed to Fire”, *Computational Materials Science*, Vol. 6, No. 3 (1996) 281-294.

Benichou, N. & Sultan, M.A., “Thermal Properties of Lightweightframed Construction Components at Elevated Temperatures”, *Fire and Materials*, Vol. 9, No. 3 (2005) 165–179.

Elbeyli, I.Y. & Piskin, S., “Thermal Dehydration Kinetics of Gypsum and Borogypsum under Non-isothermal Conditions”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 12, No. 2 (2004) 302-305.

Feng, M., Wang, Y.C. & Davies, J.M., “Thermal Performance of Cold-formed Thin-walled Steel Panel Systems in Fire”, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, No. 4 (2003) 365–394.

Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1: General Requirements, International Standard ISO 834-1 (1999).

King, G.A., Beretka, J. & Ridge, M.J., “Chemical Changes in Slabs of Cast Gypsum during Standard Tests of Resistance to Fire”, *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, Vol. 21, No. 6 (1971) 159-162.

Mehaffey, J.R., Cuerrier, P. & Carisse, G., “A Model for Predicting Heat Transfer through Gypsum-Board/Wood-Stud Walls Exposed to Fire”, *Fire and Materials*, Vol. 18, No. 5 (1994) 297-305.

Patankar, S.V., «Numerical Heat Transfer and Fluid Flow», Hemisphere, London (1980).

Ryan, J.V. “Study of Gypsum Plasters Exposed to Fire”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation*, Vol. 66C, No. 4 (1962) 373-387.

Sanders, J.P. & Gallagher, P.K., “Kinetic Analyses using Simultaneous TG/DSC Measurements Part I: Decomposition of Calcium Carbonate in Argon”, *Thermochimica Acta*, Vol. 388, No. 1-2 (2002) 115-128.

Sultan, M.A., “A Model for Predicting Heat Transfer through Noninsulated Unloaded Steel-Stud Gypsum Board Wall Assemblies Exposed to Fire”, *Fire Technology*, Vol. 32, No. 3 (1996) 239-259.

Thomas, G. “Thermal Properties of Gypsum Plasterboard at High Temperatures, *Fire and Materials*”, Vol. 26, No. 1 (2002) 37–45.

Wakili G.K., Hugi E., Wullschleger L. & Frank T., “Gypsum Board in Fire – Modeling and Experimental Validation”, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 25, No. 3 (2007) 267-282.