

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ****Αναστασία Κ. Παπαδοπούλου-Μαθιοπούλου,**

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ, Ελλάδα.*e-mail: nat @ civil.auth.gr***Ιωάννης Τσιάφης,**

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ

Εργαστήριο εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ, Ελλάδα.*e-mail: tsiafis@eng.auth.gr***Κ. Παπαϊωάννου,**

Καθηγητής Α.Π.Θ

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ, Ελλάδα.*e-mail: kirpap @ civil.auth.gr***1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι υψηλές θερμοκρασίες μιας πυρκαγιάς προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των δομικών στοιχείων με αντίστοιχη μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας τους, με τελικό αποτέλεσμα τη διαστολή τους και τον κίνδυνο κατάρρευσης των κατασκευών. Πολλές φορές τα δομικά χαλύβδινα στοιχεία, για να ικανοποιήσουν ορισμένες απαιτήσεις πυραντίστασης των Κανονισμών, είναι ανάγκη να προστατευτούν με μονωτικά υλικά με τρόπο, που ο χάλυβας να μην εκτίθεται άμεσα στη φωτιά.

Η επιφάνεια που καλύπτεται με ένα μονωτικό υλικό με μικρή αγωγιμότητα, επιφέρει μια σημαντική μείωση του ρυθμού θέρμανσης της χαλύβδινης διατομής. Το μονωτικό στρώμα έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μια καθορισμένη ποσότητα θερμότητας.

Στην παρούσα εργασία αναφέρεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων των πυροπροστατευτικών υλικών (μονωτικών) με προκαθορισμένες ιδιότητες στη μείωση της θερμοκρασίας συναρτήσεως του χρόνου των χαλύβδινων διατομών, ώστε να διερευνηθεί η αύξηση της πυραντίστασης των χαλύβδινων δομικών στοιχείων των κατασκευών. Έχουν συνταχθεί και χρησιμοποιηθεί δύο προγράμματα σε γλώσσα Fortran.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ [1]

Ο χάλυβας χάνει την ευστάθειά του στους 550 °C με 620 °C. Ένα χαλύβδινο δομικό στοιχείο καθυστερεί να φθάσει τη θερμοκρασία αστοχίας του, όταν πυροπροστατευθεί με κάποιο τρόπο.

Παραδοσιακές μέθοδοι πυροπροστασίας χαλύβδινων κατασκευών είναι η βαφή των δομικών στοιχείων με μονωτικά υλικά ή η επένδυση. Έτσι, ο ψεκασμός στην επιφάνεια της διατομής δομικών στοιχείων με επιχρίσματα από διάφορα κονιάματα, γύψο, ορυκτή ίνα, περλίτη και βερμικουλίτη δημιουργεί μία μονωτική στρώση. Χρησιμοποιούνται επίσης διογκούμενα επιχρίσματα. Ως επενδύσεις χρησιμοποιούνται συνήθως γυψοσανίδες ή σανίδες επιχρισμάτων ή πιο εξειδικευμένα συστήματα βασισμένα σε ορυκτές ίνες ή μικρού βάρους υλικά, όπως είναι περλίτης, βερμικουλίτης.

Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη μονωμένων δομικών στοιχείων με διάφορα πυροπροστατευτικά υλικά, που βασίζεται σε αριθμητικές προσομοιώσεις των υλικών και σύγκριση με μη μονωμένα δομικά στοιχεία.

Συντάχθηκαν δύο σύντομα ειδικά προγράμματα, σε γλώσσα Fortran, υπολογισμού της θερμοκρασίας μονωμένου και μη μονωμένου χαλύβδινου δομικού στοιχείου. Σε σύγκριση έγινε σύγκριση με άλλα ερευνητικά αποτελέσματα [Kruppa J.] παρατηρήθηκε ικανοποιητική προσέγγιση.

3. ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ [1], [2], [3], [4]

Η ικανότητα μιας κατασκευής να αντέξει στη φωτιά εξαρτάται κυρίως από την πυραντίσταση των δομικών στοιχείων της. Η πυραντίσταση που αναφέρεται σε δομικά στοιχεία και όχι σε υλικά εκφράζεται με τη διάρκεια χρόνου κατά τον οποίο ικανοποιούνται η ευστάθεια, η ακεραιότητα και η θερμομονωτική ικανότητα. Για τον υπολογισμό της πυραντίστασης του δομικού στοιχείου απαιτείται η γνώση των μηχανισμών διάδοσης της θερμότητας. Η πυραντίσταση δομικών στοιχείων γυμνού χάλυβα μπορεί να αυξηθεί με έναν κατάλληλο πυροπροστατευτικό σχεδιασμό. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος προστασίας των χαλύβδινων κατασκευών έναντι φωτιάς είναι η μόνωση.

Ο υπολογισμός της αύξησης θερμοκρασίας στο χάλυβα $\Delta\theta_{\alpha,t}$ μονωμένου δομικού στοιχείου σε χρονικό διάστημα Δt προκύπτει από το ισοζύγιο της αγωγής στην εκτεθειμένη επιφάνεια, με αποθήκευση της θερμότητας στο μονωτικό στρώμα και τη χαλύβδινη διατομή.

Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός χαλύβδινου μονωμένου (πυροπροστατευμένου) δομικού στοιχείου, στο χρόνο Δt , σε απλά υπολογιστικά προσομοιώματα, με ομοιόμορφη διανομή της θερμοκρασίας στην εγκάρσια διατομή, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\theta_{\alpha,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{\alpha,t})}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a (1 + \phi / 3)} \Delta t \cdot (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (1)$$

με $\Delta\theta_{\alpha,t} \geq 0$ αν $\Delta\theta_{g,t} > 0$ και

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \quad (1a)$$

όπου :

$\Delta\theta_{a,t}$: αύξηση θερμοκρασίας του χάλυβα [K]

A_p/V : συντελεστής διατομής για μονωμένη χαλύβδινη διατομή με πυροπροστατευτικό υλικό [m^{-1}], που δεν πρέπει να είναι μικρότερος από $10[m^{-1}]$

A_p : εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας του μονωτικού υλικού ανά μονάδα μήκους του στοιχείου (περίμετρος της εγκάρσιας διατομής)

V : όγκος της διατομής ανά μονάδα μήκους (επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής)

ρ_p : πυκνότητα του πυροπροστατευτικού υλικού [kg/m^3]

λ_p : θερμική αγωγιμότητα του πυροπροστατευτικού υλικού [$W/(m K)$]

c_p : ειδική θερμότητα του πυροπροστατευτικού υλικού [$J/(kg K)$]

d_p : πάχος του πυροπροστατευτικού υλικού [m]

ρ_a : πυκνότητα του χάλυβα [kg/m^3]

c_a : ειδική θερμότητα του χάλυβα [$J/(kg K)$]

Δt : χρονικό βήμα [sec]

$\theta_{a,t}$: θερμοκρασία του χάλυβα τη χρονική στιγμή t [$^{\circ}C$]

$\theta_{g,t}$: θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα τη χρονική στιγμή t [$^{\circ}C$]

$\Delta\theta_{g,t}$: αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος Δt [K].

3.1. ΘΕΡΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ [5].

Επιλέχθηκαν τέσσερα πυροπροστατευτικά υλικά με τα θερμικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Για όλα τα πυροπροστατευτικά υλικά η πυκνότητα είναι: $\rho_p=0,32$.

Περίπτωση 1^η:

Η θερμική αγωγιμότητα είναι σταθερή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία: $\lambda_p=0,12 W m K$.

Η ειδική θερμότητα είναι σταθερή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία: $c_p=950 J/kg K$.

Περίπτωση 2^η:

Η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι $\lambda_p=0,055 W m K$ στους $100^{\circ}C$ και $\lambda_p=0,22 W m K$ στους $900^{\circ}C$ και είναι σταθερή πριν και μετά από αυτό το εύρος των θερμοκρασιών.

Η ειδική θερμότητα είναι σταθερή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία: $c_p=950 J/kg K$.

Περίπτωση 3^η:

Η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι $\lambda_p=0,055 W m K$ στους $100^{\circ}C$ και $\lambda_p=0,22 W m K$ στους $900^{\circ}C$ ενώ είναι σταθερή πριν και μετά από αυτό το εύρος των θερμοκρασιών (Περίπτωση 2).

Η ειδική θερμότητα μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι $c_p=800 J/kg K$ στους $100^{\circ}C$ και $c_p=1100 J/kg K$ στους $900^{\circ}C$.

Περίπτωση 4^η:

Η θερμική αγωγιμότητα μεταβάλλεται παραβολικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι $\lambda_p=0,055 W m K$ στους $100^{\circ}C$ και $\lambda_p=0,22 W m K$ στους $900^{\circ}C$ με ενδιάμεσες τιμές $0,08$ στους $500^{\circ}C$, $0,09$ στους $700^{\circ}C$, $0,13$ στους $800^{\circ}C$ ενώ είναι σταθερή πριν τους

100 °C και μετά τους 900 °C.

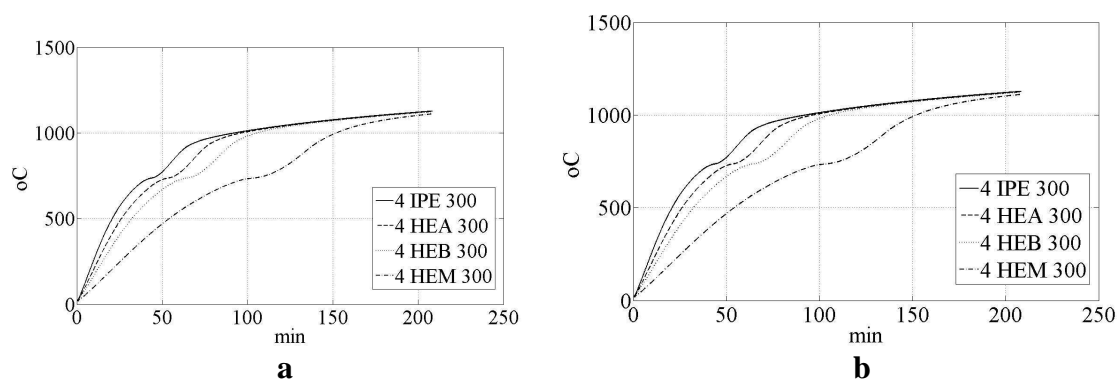
Η ειδική θερμότητα μεταβάλλεται γραμμικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και είναι $c_p=800 \text{ J/kg K}$ στους 100 °C και $c_p=1100 \text{ J/kg K}$ στους 900 °C (Περίπτωση 3).

3.2. ΣΧΕΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Επιλέχθηκαν διαφορετικές διατομές, IPE 300, HEA300, HEB300, HEM300, που μονώθηκαν με διάφορα πάχη πυροπροστατευτικών υλικών $d_a=20\text{mm}$ (ελάχιστο πάχος), $d_b=40\text{mm}$ (μεσαίο πάχος) και $d_c=60\text{mm}$ (μέγιστο πάχος).

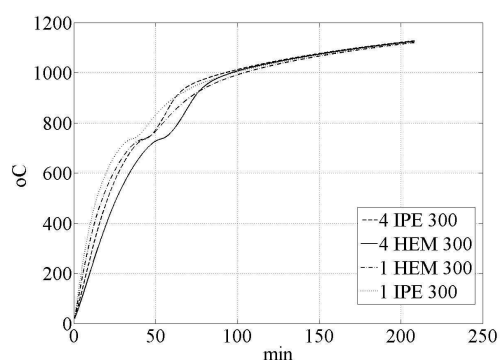
Υπολογίστηκαν οι καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου των επιλεγμένων διατομών σύμφωνα με τις θερμικές τους ιδιότητες.

Στα σχήματα 1a και 1b φαίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$ για όλες τις διατομές για την 1^η 4^η περίπτωση αντίστοιχα.



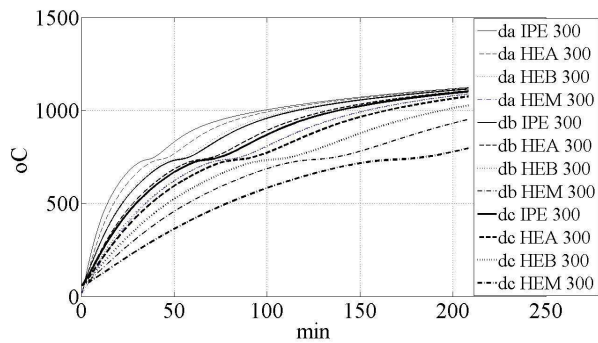
Σχήμα 1: Διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για διάφορες διατομές με πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$ για την α) 1^η περίπτωση, β) 4^η περίπτωση

Στο σχήμα 2 φαίνεται η σύγκριση της 1^{ης} και 4^{ης} περίπτωσης για IPE 300 και HEM300 για πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$.



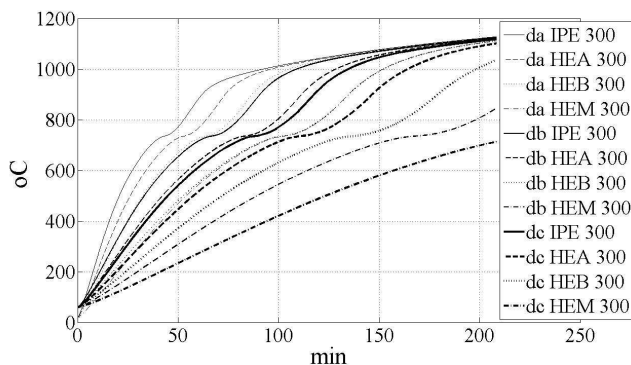
Σχ. 2: Διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου 1^{ης} και 4^{ης} περίπτωσης για IPE 300 και HEM300 με πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$

Στο σχήμα 3 φαίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για όλες τις διατομές για την 1^η περίπτωση για τα τρία πάχη του πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$.



Σχ. 3: Διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για όλες τις διατομές για την 1^η περίπτωση για τα τρία πάχη του πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$

Στο σχήμα 4 φαίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για όλες τις διατομές για την 4^η περίπτωση για τα τρία πάχη του πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$.



Σχ. 4: Διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για όλες τις διατομές για την 4^η περίπτωση για τα τρία πάχη του πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$

4. ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΜΗ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ [3], [4]

Η αύξηση της θερμοκρασίας $\Delta\theta_{\alpha,t}$ ενός χαλύβδινου μη μονωμένου δομικού στοιχείου, στο χρόνο Δt , σε απλά υπολογιστικά προσομοιώματα με ομοιόμορφη διανομή της θερμοκρασίας στην εγκάρσια διατομή δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta\theta_{\alpha,t} = \frac{A_m / V}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \tag{2}$$

όπου :

A_m/V : συντελεστής διατομής για μη μονωμένη χαλύβδινη διατομή

A_m : εκτεθειμένη επιφάνεια της διατομής ανά μονάδα μήκους (ελεύθερη περίμετρος της εγκάρσιας διατομής)

V : όγκος της διατομής ανά μονάδα μήκους (επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής)

$\dot{h}_{net,d}$: τιμή σχεδιασμού για τη θερμορροή ανά μονάδα επιφάνειας [W/m^2]

Δt : χρονικό βήμα [sec]

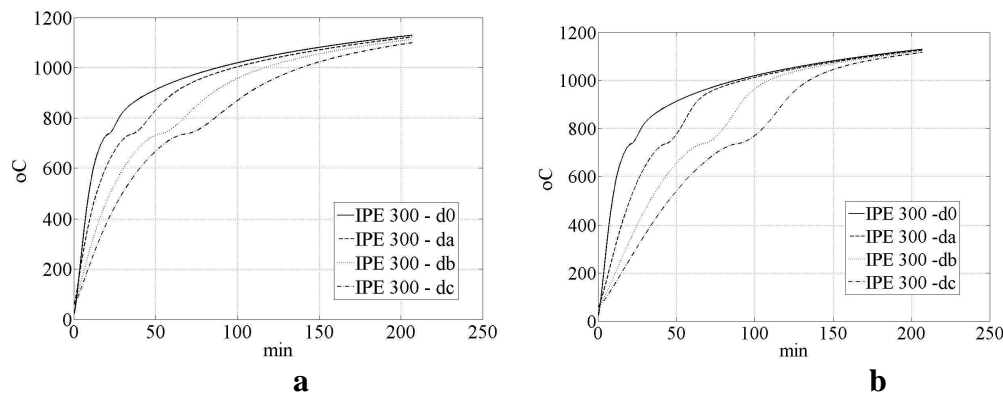
ρ_a : πυκνότητα του χάλυβα [kg/m^3]

c_a : ειδική θερμότητα του χάλυβα [$\text{J}/(\text{kg K})$].

4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΗ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

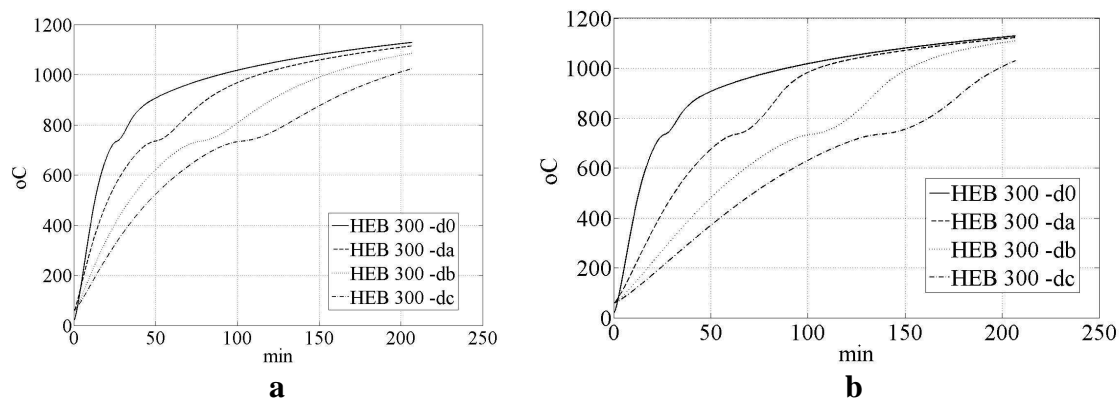
Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις (1) και (2) υπολογίστηκε η διάδοση της θερμοκρασίας στις δύο διατομές IPE 300 και HEB 300 για μη μόνωση (d0) και για μόνωση με τα τρία πάχη $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$ για την 1^η και 4^η περίπτωση του πυροπροστατευτικού υλικού.

Στα σχήματα 5a και 5b φαίνεται η σύγκριση των καμπύλων διάδοσης της θερμοκρασίας στη διατομή IPE 300 για τη μη μονωμένη διατομή (d0) και αντίστοιχα για την 1^η και 4^η περίπτωση πυροπροστατευτικού υλικού για τα τρία πάχη $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$.



Σχ.5: Καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου διατομής IPE 300 χωρίς μόνωση (d0) και με μόνωση με πάχη $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$ για την α) 1^η περίπτωση και β) 2^η περίπτωση

Στα σχήματα 6a και 6b φαίνεται η σύγκριση των καμπύλων διάδοσης της θερμοκρασίας στη διατομή HEB 300 για τη μη μονωμένη διατομή (d0) και για την 1^η και 4^η περίπτωση πυροπροστατευτικού υλικού για τα τρία πάχη $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$.



Σχ.6: Καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου διατομής IPE 300 χωρίς μόνωση (d0) και με μόνωση με πάχη $d_a=20\text{mm}$, $d_b=40\text{mm}$, $d_c=60\text{mm}$ για την α) 1^η περίπτωση και β) 2^η περίπτωση

Στον πίνακα 1 φαίνεται ο χρόνος σε min που απαιτείται για φθάσει η θερμοκρασία στους 550 °C και 620 °C στις δύο διατομές IPE 300 και HEB 300 με πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$ για την 1^η και 4^η περίπτωση.

550 IPE300 1 (min))	620 IPE300 1 (min))	550 IPE300 4 (min))	620 IPE300 4 (min))	550 HEB300 1 (min))	620 HEB300 1 (min))	550 HEB300 4 (min))	620 HEB300 4 (min))
10,5	12,75	10,5	12,75	12,17	17,4	12,17	17,4
16,4	20,9	23,17	28,25	24,58	30,83	35,75	43,08
26	33,67	38	45	40,17	49,83	59,92	71,58
34,67	43,16	51,42	61,5	54,17	67	81,92	97,5

Πίν. 1. Απαιτούμενος χρόνος για φθάσει η θερμοκρασία των IPE 300 και HEB 300 στους 550 °C και 620 °C για πάχος πυροπροστατευτικού υλικού $d_a=20\text{mm}$ για την 1^η και 4^η περίπτωση

5. Συμπεράσματα

- Δεν επηρεάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο στη διατομή, όταν η ειδική θερμότητα c_p δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται γραμμικά.
- Η παραβολική μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας λ_p του πυροπροστατευτικού υλικού βελτιώνει σημαντικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Η επίδραση του πυροπροστατευτικού υλικού εξαρτάται εκτός των άλλων και από το πάχος d και το συντελεστή διατομής του (A_p/V).
- Η πυραντίσταση ενός χαλύβδινου δομικού στοιχείου αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της διατομής του, για το ίδιο πυροπροστατευτικό υλικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (I.I.S.I). “International Fire Engineering Design for Steel Structures: State of the Art”. Brussels, 1993.
- [2] ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ Κ. ΚΥΡΙΑΚΟΣ, “Εισαγωγή στην πυροπροστασία των κατασκευών”, Υπηρεσία δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., 2000.
- [3] EUROCODE 3 – PART 1-2: “Design of Steel structures General rules–Structural fire design”, ENV 1993-1-2, September 1995 CEN.
- [4] EUROCODE 1 – PART 2-2, “Basis of design and actions on Structures: Actions on structures exposed to fire”, ENV 1991 –2-2, February 1995 – CEN.
- [5] Kruppa J., “Elements- Sensivity Study of a Simplified Assessment Method”, Fire Safety Science-Proceedings of the Sixth International Symposium, 1999, pp 915-926.

ABSTRACT

The high temperatures of a fire cause increases in temperature of structural elements with a corresponding decrease of their strength and stiffness which has as a result their expansion and the danger of the collapse of the structure. Quite frequently to satisfy fire resistance Codes, it is necessary for steel structural elements to be protected by an insulation layer in such a way that the steel is not exposed directly to fire.

The surface covered by insulated material with a small conductivity produces a significant reduction of the heating rate of the steel section. The insulation layer has the ability to store a determined quantity of heat.

This paper refers to the influence of various parameters of fire protection materials with predetermined properties on temperature increase with respect to time in steel sections, so that the increase of fire resistance of steel structural elements can be investigated. Two computer programs have been developed in Fortran language.