

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΦΩΤΙΑ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Νικολαΐδης Ν. Θεμιστοκλής, Τσαλίκης Τ. Χρήστος, Μπανιωτόπουλος Κ. Χαράλαμπος¹

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

E-mail: think@civil.auth.gr
ccb@civil.auth.gr

¹School of Civil Engineering, University of Birmingham
B15 2TT Birmingham, United Kingdom

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα διαμόρφωσης δεικτών συμπεριφοράς σε φωτιά διαφορετικών συνθέσεων του κελύφους χαλύβδινων κτιρίων με κριτήριο τη βέλτιστη προστασία των φερόντων χαλύβδινων μελών. Συγκεκριμένα στο πλαίσιο της έρευνας αυτής εξετάζεται η περίπτωση χαλύβδινων διατομών κτιρίου με διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης του κελύφους που τις περικλείει ή τις ενσωματώνει, σε συνθήκες φωτιάς. Η διερεύνηση αυτή γίνεται μέσα από θερμική ανάλυση με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, σύνθετων διατομών διαστρωμάτωσης κελύφους που εμπεριέχουν χαλύβδινο φέρον στοιχείο με δυο κύριες κατευθύνσεις ανάλυσης. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά στον προσδιορισμό της καμπύλης χρόνου, από τη στιγμή της εκδήλωσης της φωτιάς, στον οποίο η θερμοκρασία σε κάποια πλευρά της χαλύβδινης διατομής θα ανέλθει σε κρίσιμα για την αντοχή της όρια. Τα όρια αυτά καθορίζονται στον Ευρωκώδικα 3, EN1993-1-2, μέσα από τις μεταβολές στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού σε συνθήκες φωτιάς. Η δεύτερη κατεύθυνση αφορά εμβάθυνση στην ανάλυση της εντατικής κατάστασης της διατομής στο χρονικό διάστημα όπου αυτή, παρά την αύξηση της θερμοκρασίας παραμένει στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος. Τα δεδομένα θερμοκρασιών φωτιάς προκύπτουν μέσα από της εφαρμογή του προγράμματος υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών FDS του N.I.S.T. για την δυναμική προσομοίωση της φωτιάς εντός πυροδιαμερίσματος χαλύβδινου κτιρίου.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις διαφορετικές περιπτώσεις διαμόρφωσης κελύφους συγκρίνονται και εισάγονται σε πίνακες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη φάση σχεδιασμού του κελύφους ενός κτιρίου, αλλά και για την εκτίμηση του βαθμού δομικής ευρωστίας του χαλύβδινου φέροντος οργανισμού σε συνθήκες φωτιάς.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη διερεύνηση της συμπεριφοράς του κελύφους ενός κτιρίου με φέροντα οργανισμό από χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς. Η ανάλυση μελετά

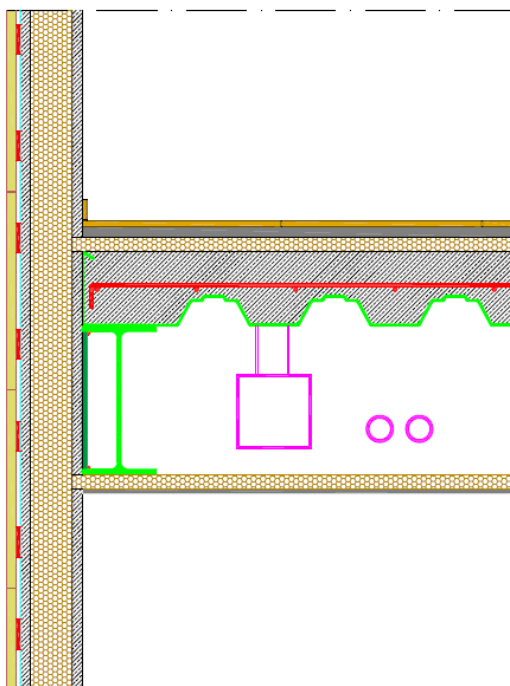
την επιρροή του θερμικού φορτίου στη διατομή την ώρα της πυρκαγιάς. Μια τέτοια ανάλυση έχει ως πρώτο κριτήριο επιτελεστικότητας την προστασία της ανθρώπινης ζωής και στη συνέχεια τον περιορισμό σε αποδεκτό βαθμό των βλαβών στο κτίριο. Η ανάλυση αυτή βέβαια δεν περιέχει άλλα κρίσιμα και σημαντικά στοιχεία όπως ο εκλυόμενος καπνός και το είδος αυτού ή η ύπαρξη και λειτουργία συστήματος ενεργητικής πυροπροστασίας στο κτίριο. Η διερεύνηση έχει ως γενικότερο στόχο τη καταγραφή κριτηρίων, με αναφορά στην πυροπροστασία, επιλογής των δομικών στοιχείων ενός κελύφους ώστε να ανταποκρίνεται ταυτόχρονα σε πολλά κριτήρια σχεδιασμού. Τέτοια κριτήρια είναι ο βαθμός θερμομόνωσης, υγρομόνωσης, πυροπροστασίας αλλά και η ανάλυση κύκλου ζωής των χρησιμοποιούμενων υλικών. Σχετικά με την πυροπροστασία των μεταλλικών διατομών αρχικά διακρίνονται οι σύγχρονες και συνήθεις μέθοδοι που μπορεί να εφαρμόσει ο μηχανικός σήμερα. Οι μέθοδοι αυτοί στο σύνολο τους στοχεύουν στην αύξηση του χρόνου εντός του οποίου η θερμοκρασία στη χαλύβδινη διατομή να ανέλθει σε συνθήκες πυρκαγιάς σε επίπεδα που επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της διατομής και ελαττώνει την αντοχή της. Ταυτόχρονα η συνύπαρξη της διατομής ή και η ενσωμάτωσή της μερικά ή ολικά με το κέλυφος, εισάγει αβεβαιότητες σε αυτό το σχεδιασμό, οι οποίες καλό είναι να εκτιμηθούν και να αξιολογηθούν. Επομένως μια διαδικασία προσδιορισμού των δυνατοτήτων διαφορετικής διαμόρφωσης και της αντίστοιχης απόδοσής τους, του κελύφους χαλύβδινου με κριτήριο την πυροπροστασία μπορεί να δώσει χρήσιμα εργαλεία στο μηχανικό ώστε να επιλέξει τη βέλτιστη δυνατή λύση.

2. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΦΩΤΙΑ

2.1 Μόρφωση κελύφους μεταλλικών κτιρίων

Η συμπεριφορά στη φωτιά ενός χαλύβδινου κτιρίου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα υλικά με τα οποία δομείται όπως π.χ. τα φέροντα στοιχεία σε τοίχους, οροφές και πατώματα, στοιχεία θερμικής, ηχητικής κλπ μόνωσης, επενδύσεις και βαφές, καθώς και υαλοπετάσματα στις όψεις. Κάθε ένα από τα υλικά αυτά μπορεί να βρίσκεται μπροστά ή πίσω από τη μεταλλική διατομή και να επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τη συμπεριφορά της την ώρα της φωτιάς. Αρχικά πρέπει να προηγηθεί μια κατηγοριοποίηση του είδους των κτιρίων ανάλογα με τη λειτουργία για την οποία είναι σχεδιασμένα γιατί αυτά αντίστοιχα έχουν συνήθως διαφορετική διαμόρφωση στο κέλυφος. Ξεχωρίζουν έτσι οι γενικές κατηγορίες των κτιρίων κατοικίας ή γραφείων και των κτιρίων που καλύπτουν αίθουσες μεγάλου ανοίγματος για πολλαπλές δράσεις και χρήσεις.

Ένα σύγχρονο χαλύβδινο κτίριο κατοικίας ή γραφείων δομείται είτε με το φέροντα χαλύβδινο οργανισμό στο εσωτερικό ενός κελύφους που περιέχει προκατασκευασμένα στοιχεία και μονωτικά υλικά διάφορων τύπων είτε με το φέροντα οργανισμό ενσωματωμένο εν μέρει ή εν όλο στο κέλυφος του κτιρίου. Στη δεύτερη περίπτωση το κέλυφος μπορεί να κατασκευάζεται με συμβατικές μεθόδους όπως και στα κτίρια από σκυρόδεμα αλλά μπορεί και να διαμορφώνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία όπως προηγούμενα. Αυτό που θεωρείται δεδομένο για ένα πολυώροφο χαλύβδινο κτίριο κατοικίας ή γραφείων είναι η ύπαρξη σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος στο επίπεδο των ορόφων με συγκεκριμένο τρόπο διαμόρφωσης και πιθανή ύπαρξη ψευδοροφής (βλ. Σχ. 1). Αντίστοιχα ένα κτίριο που καλύπτει αίθουσα μεγάλου ανοίγματος, μπορεί να φέρει κέλυφος από προκατασκευασμένα και βαμμένα βιομηχανικά πετάσματα πολυουρεθάνης, στην οροφή. Οι εξωτερικοί τοίχοι μπορεί να φέρουν τα ίδια πετάσματα ή να δομούνται με άλλες συμβατικές μεθόδους όπως και τα κτίρια κατοικίας.



Σχήμα 1. Τυπική μορφή εξωτερικού κελύφους χαλύβδινου κτιρίου κατοικίας στο ύψος του ορόφου

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας η οποία εντάσσεται στη δράση ολοκληρωμένου ερευνητικού προγράμματος που βρίσκεται σε εξέλιξη, αναλύεται η περίπτωση κελύφους πολυώροφου κτιρίου κατοικίας με τη χαλύβδινη διατομή να εφάπτεται στην εσωτερική πλευρά του. Η έρευνα καλύπτει τις γνωστές περιπτώσεις μεθόδων πυροπροστασίας μεταλλικών διατομών όπως πυράντοχη βαφή, τοποθέτηση επαρκούς στρώσης πετροβάμβακα γύρω από τη διατομή κατάλληλης πυκνότητας και επένδυση με γυψοσανίδα, ειδικές σανίδες πυροπροστασίας που έχουν ως βάση πυράντοχα υλικά, ειδικό επίχρισμα πυροπροστασίας και επένδυσης με γυψοσανίδα. Σημειώνεται ότι η περίπτωση του εγκιβωτισμού της χαλύβδινης διατομής με σκυρόδεμα ανάγεται στην αντίστοιχες προδιαγραφές πυροπροστασίας και αντοχής του σκυροδέματος εγκιβωτισμού και δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

2.2 Προδιαγραφές υλικών κελύφους με κριτήριο την πυροπροστασία

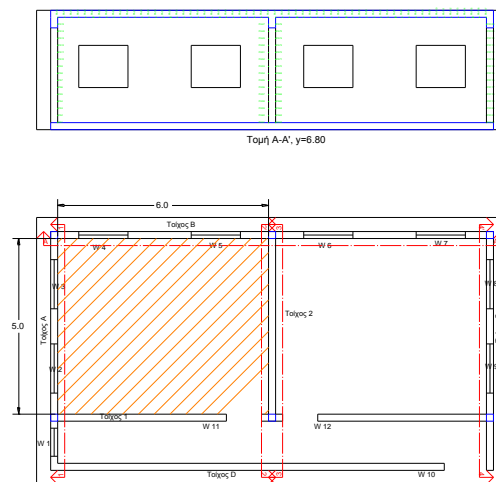
Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε ένα κέλυφος μπορεί να υποβοηθούν, να είναι ουδέτερα ή να καθυστερούν την ανάπτυξη της φωτιάς. Σε μερικές περιπτώσεις όμως μπορεί να αποτελούν τα ίδια πυροπροστατευτικά υλικά και για αυτό πρέπει να αξιολογούνται ανάλογα. Τέιο παράδειγμα αποτελούν τα στοιχεία πλινθοδομής διαφόρων τύπων (θερμομονωτικά, με βάση τον περλίτη, πυρότουβλα κα) και προκατασκευασμένα πάνελ με διπλή τσιμεντοσανίδα και θερμική μόνωση στο εσωτερικό (πετροβάμβακας, εξηλασμένη πολυστερίνη, διογκωμένη πολυστερίνη κα). Στην εξωτερική πλευρά διαμορφώνεται η όψη είτε με εξωτερικό επίχρισμα είτε με (με ύπαρξη διακένου ή μη) και τοποθέτηση διακοσμητικών στοιχείων όψεως(μάρμαρα, τούβλα, μεταλλικά στοιχεία κα). Σε μερικές περιπτώσεις όπως ο πετροβάμβακας η λύση μπορεί να καλύπτει εν μέρει και τις απαιτήσεις πυροπροστασίας.

Το ζητούμενο της ανάλυσης καταγράφεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 3-1-2 για τον σχεδιασμό δομικών στοιχείων χάλυβα έναντι πυρκαγιάς EN1993-1-2. Ο περιγραφόμενος σχεδιασμός καταγράφοντας και τα προηγούμενα πρέπει να ικανοποιεί το

κριτήριο R [1], δηλαδή η φέρουσα ικανότητα της χαλύβδινης διατομής πρέπει να διατηρείται κατά το θεωρούμενο χρόνο έκθεσης στην πυρκαγιά. Αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του πίνακα 3.1 και ιδιαίτερα τον χρησιμοποιούμενο μειωτικό συντελεστή, θέτει ως ζητούμενο το χρόνο έκθεσης στην πυρκαγιά έως ότου η θερμοκρασία στη διατομή ανέλθει στους 400°C, όριο στο οποίο η αντοχή βρίσκεται κοντά στο όριο διαρροής. Στη φάση αυτή θεωρείται ότι η χαλύβδινη διατομή, διατηρεί τις βασικές ιδιότητες της και δεν έχει ξεκινήσει ακόμα ο μηχανισμός κατάρρευσης.

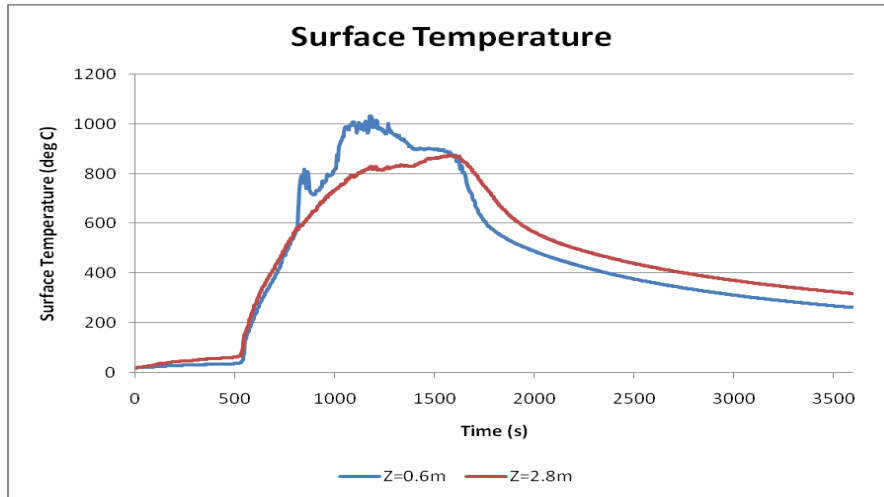
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Προκειμένου να εφαρμοστεί ένα αξιόπιστο μοντέλο προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι αναγκαίο να καθοριστεί ένα τυπικό πυροδιαμέρισμα. Στην περίπτωση του κτιρίου κατοικίας [2] επελέγη χώρος που βλέπει στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου (αντίστοιχη είναι η ανάλυση προς εσωτερικό μη θερμαινόμενο χώρο) και έχει διαστάσεις κάτοψης $L/B=2 \times 6/5$. Ο χώρος μπορεί να διαθέτει εσωτερικό διαχωριστικό τοίχωμα (βλ. Σχ. 2).



Σχήμα 2. Προσομοίωση τυπικού πυροδιαμερίσματος χαλύβδινου κτιρίου κατοικίας

Η προσομοίωση της φωτιάς για το ορισμένο πυροδιαμέρισμα, γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος FDS (Fire Dynamic Simulator) [3]. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα υπολογιστικής μηχανικής ρευστών (CFD) το οποίο διαμορφώνει ένα μοντέλο ροής ρευστού που καθοδηγείται από τη φωτιά. Το μοντέλο επιλύει αριθμητικά μια μορφή εξισώσεων Navier-Stokes εξειδικευμένα για χαμηλές ταχύτητες ροής. Η θερμική καθοδήγηση της ροής συμπληρώνεται με στοιχεία από την έκλυση καπνού και τη μετάδοση θερμότητας εξαιτίας της φωτιάς. Η επίλυση μέσω πεπερασμένων διαφορών, ανάγεται στο χρόνο με βάση ένα καθορισμένο δίκτυο μετάδοσης. Το δίκτυο αυτό επιλέγεται κατά μήκος των υπό εξέταση μεταλλικών στοιχείων (δοκός ή στύλος) στην παρειά του εξωτερικού κελύφους.

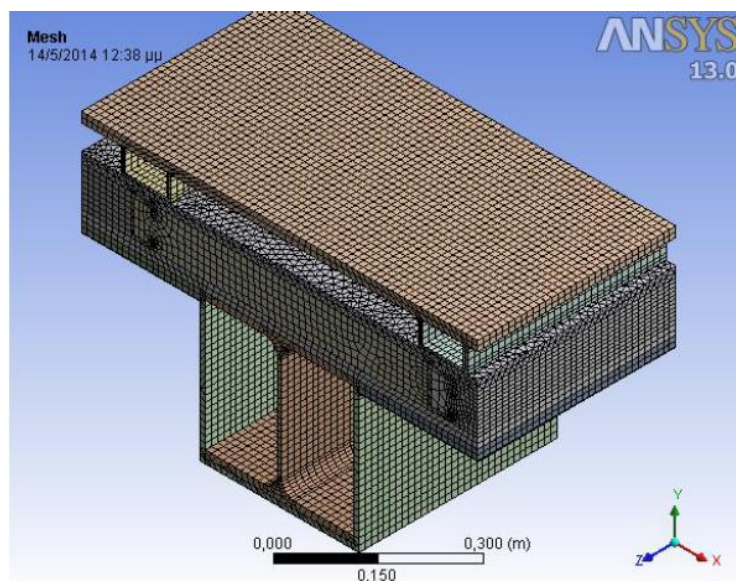


Σχήμα 3. Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας φωτιάς στο δάπεδο και την οροφή του πυροδιαμερίσματος

Στο σχήμα 3 φαίνεται η μεταβολή θερμοκρασίας με το χρόνο, στο εσωτερικό του πυροδιαμερίσματος, για δύο τυπικές θέσεις α) κοντά στο δάπεδο ($z=0.6m$) και β) κοντά στην οροφή ($z=2.8m$).

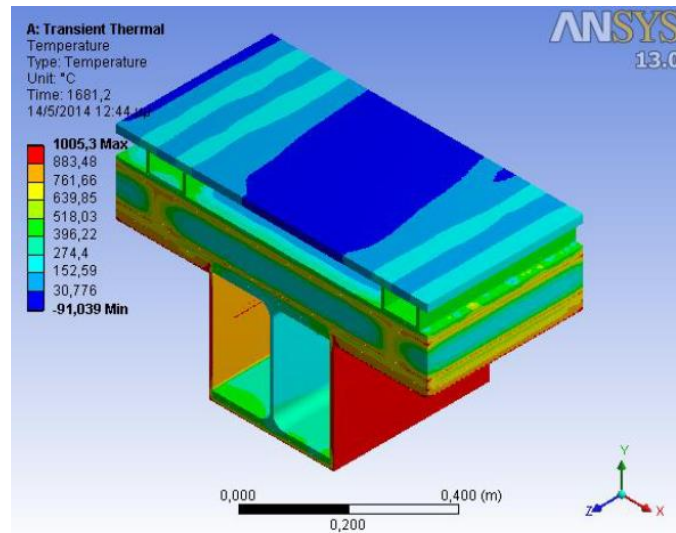
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Τα δεδομένα του προγράμματος δυναμικής προσομοίωσης πυρκαγιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της διάδοσης της θερμότητας εντός του κελύφους και ιδιαίτερα την επίδραση που θα έχει στην αύξηση της θερμοκρασίας στη μεταλλική διατομή. Για το σκοπό αυτό χαρακτηριστικό τμήμα του κελύφους διακριτοποιείται και αναλύεται με τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο (βλ. Σχ. 4) με το πρόγραμμα ANSYS Workbench.



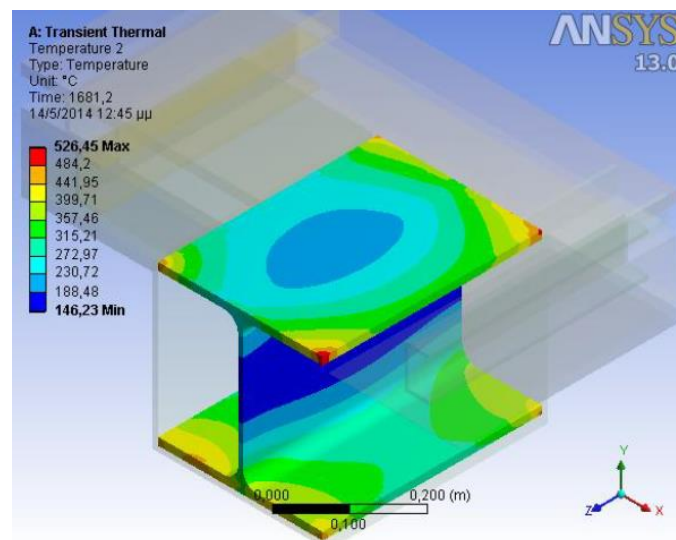
Σχήμα 4. Τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο κελύφους κτιρίου & χαλύβδινου υποστυλώματος εσωτερικά

Στο μοντέλο αυτό εύκολα τροποποιούνται το πάχος της μονωτικής στρώσης, το πάχος της γυψοσανίδας, το είδος των υλικών και η διαμόρφωση του κελύφους, αλλά και το είδος της εφαρμοζόμενης πυροπροστασίας της μεταλλικής διατομής. Στο μοντέλο εισάγεται εσωτερικά το πεδίο θερμοκρασιών στη θεωρούμενη κάθε φορά θέση ελέγχου και οι αντίστοιχοι χρόνοι μέσα από μια διαδικασία θερμικής ανάλυσης του προγράμματος. Αντίστοιχα εξωτερικά εισάγεται πεδίο θερμοκρασιών που μεταβάλλεται με δεδομένα που δίδονται από το πρόγραμμα προσομοίωσης πυρκαγιάς σύμφωνα με το είδος του κτιρίου.



Σχήμα 5. Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασιών πυρκαγιάς στα δομικά μέλη του κελύφους χαλύβδινου κτιρίου

Το αποτέλεσμα που εξάγεται (βλ. Σχ. 5) είναι ακριβώς ο χρόνος που θα απαιτηθεί για να φθάσει η θερμοκρασία το όριο κινδύνου για τη διατομή (400°C).



Σχήμα 6. Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασιών πυρκαγιάς στη χαλύβδινη φέρουσα διατομή

Επίσης αναλύεται και χρησιμοποιείται η κατανομή και ο τρόπος διάδοσης της θερμοκρασίας διαμέσου των δομικών στοιχείων και ιδιαίτερα διαμέσου της χαλύβδινης φέρουσας διατομής (βλ. Σχ. 6).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής είναι ιδιαίτερα χρήσιμα καθώς περιέχουν πληροφορίες και δεδομένα για την κατά το δυνατόν ασφαλή επιλογή και διαμόρφωση του κελύφους χαλύβδινων κτιρίων. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται αποτελούν βάση για την αποτίμηση της διαμόρφωσης του κελύφους σε συνάρτηση και με άλλους κρίσιμους παράγοντες σχεδιασμού. Ταυτόχρονα η καταγραφή, με τη μορφή συγκροτημένου πίνακα, των διαφορετικών μορφών και τρόπων διαμόρφωσης του κελύφους, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την ασφαλή επιλογή από το μηχανικό χαλύβδινου φέροντος οργανισμού χωρίς αβεβαιότητες για την λοιπή διαμόρφωση του συστήματος. Το υπολογιστικό μοντέλο θερμικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται μπορεί για διακριτές περιπτώσεις να μετατραπεί σε μοντέλο δομικής ανάλυσης [5], [6] με κατάλληλη εισαγωγή τυχηματικής δράσης θερμοκρασίας και εκτίμηση του ποσοστού εξάντλησης της αντοχής που έχει ληφθεί ήδη υπόψη στη διατομή. Η καταχώρηση των δεδομένων που προκύπτουν από την ανάλυση αυτή με τη μορφή υπολογιστικού εργαλείου, μπορεί να δώσει στη συνέχεια τη δυνατότητα χρήσης τους από το μελετητή και ερευνητή μηχανικό.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα ερευνητική δραστηριότητα αποτελεί τμήμα του ερευνητικού προγράμματος “Έρευνα και ανάπτυξη συστήματος δομικών στοιχείων υψηλής ενεργειακής απόδοσης, με εφαρμογή κριτηρίων ολοκληρωμένης προστασίας του κτιριακού κελύφους και σχεδιασμού κύκλου ζωής” (κωδ.11ΣΥΝ_7_498,) το οποίο υποστηρίζεται από την Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης και Εφαρμογής Δράσεων στους τομείς της Έρευνας, της Τεχνολογικής Ανάπτυξης και της Καινοτομίας (ΕΥΔΕ –ΕΤΑΚ) την οποία οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN1993-1-2:2003, “Design of steel structures, General rules, Structural fire design”, 2003.
- [2] GOODE M. G., “Fire Protection of Structural Steel in High-Rise Buildings” NIST GCR 04-872, Building and Fire Research Laboratory, Maryland, USA, July 2004.
- [3] MOOHYUN C., SOONHUNG H., JAIKYUNG L., BYUNGIL C., “A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamic data”, Fire Safety Journal, ELSEVIER (50), 2012, pp12-24.
- [4] PURKISS J. A., “Fire Safety Engineering – Design of Structures” ELSEVIER, Second Edition, 380 pages, 2007.
- [5] ΜΠΑΝΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ Χ., ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ Θ., “Κατασκευές από χάλυβα – Παραδείγματα σχεδιασμού στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 3, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 978-960-456-323-4, 2012.
- [6] ΒΑΝΙΟΤΟΠΟΥΛΟΣ C.C., ΤΣΑΛΙΚΙΣ C., VASSART O., ZHAO B., “Steel Structures in Fire, Design of a Composite Plate”, Ziti Publ.Co, pages 420 (in Greek), 2013

BEHAVIOR OF STEEL-FRAMED BUILDING ELEMENTS IN FIRE UNDER INTEGRATED PROTECTION CRITERIA

Themistoklis N. Nikolaidis, Tsalikis C., Charalampos C. Baniotopoulos¹

Institute of Metal Structures, Department Of Civil Engineering, Aristotle University of
Thessaloniki
54124 Thessaloniki, Greece
e-mail: thnik@civil.auth.gr

¹School of Civil Engineering, University of Birmingham
B15 255 Birmingham, United Kingdom
e-mail: c.baniotopoulos@bham.ac.uk

SUMMARY

This paper develops recommendations for the determination of the efficient use of fire insulation materials and the benefits that can be obtained in comparison to non-insulated structural elements. The study focuses on the thermal analysis of structural members which consist of reinforced concrete or steel, various types of fire insulation and other layers. Thermal analysis can be divided into two parts: The first part is focused on the heat transfer from the fire to the boundaries of the component through convection and radiation whereas the second part concerns the temperature evolution inside the member through conduction. Because of the complexity that governs the equations describing the phenomena, the structural detail models have been studied using finite element models. The aim of this work is to study various constructional configurations of structural elements including insulating materials in order to determine the evolution of temperature profiles and to assess the benefits that can be gained from the use of such constructional components. The analysis will be parametric with the aid of ANSYS software. Results will be performed and delivered through tabulated data and summarized tables and figures. Professionals will have the chance to quantify the response of the structural elements in terms of temperature and time. Results of this study can be used as input data for the estimation of the maximum load capacity of a structural member under fire conditions.