



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΚΟ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ**

ΚΛΕΙΣΙΑΡΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων
για την απόκτηση του Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2018

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων): Δρ. Μυστακίδης Ευριπίδης, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γραμμένος Θεοφάνης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Τζάρος Κωνσταντίνος, Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΚΟ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Κλεισιάρης Γεώργιος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Μυστακίδης Ευριπίδης, Καθηγητής

Περίληψη

Η μεταφορά θερμότητας σε εφαρμογές ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς μελετάται σε πειραματικό και αναλυτικό επίπεδο. Η αριθμητική ανάλυση γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη λόγω της φθηνότερης διαδικασίας διεξαγωγής της και της δυνατότητας εφαρμογής της σε μεγαλύτερο εύρος περιπτώσεων. Σε αυτό βοηθάει η ανάπτυξη λογισμικών σε προγραμματιστικά περιβάλλοντα. Τα τελευταία με σωστή μεθοδολογία και εμπειριστατωμένη γνώση στην χρήση τους μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο στο σχεδιασμό ανθεκτικότερων, σε συνθήκες πυρκαγιάς, κατασκευών.

Απαραίτητη κρίνεται η μελέτη και κατανόηση της θερμικής απόκρισης μεταλλικών κατασκευών μονωμένων με πυροπροστασία αλλά και μη πυροπροστατευμένων. Οι διατάξεις σύγχρονων κανονισμών, όπως ο Ευρωκώδικας, προτείνουν αποδεδειγμένα σωστά βήματα σχεδιασμού για παροχή επαρκούς αντοχής σε περίπτωση ανάπτυξης φωτιάς. Ωστόσο, συμπληρωματική γνώση απαιτείται για τη συνεχή αναβάθμιση και βελτίωση τους με στόχο την παροχή ασφαλέστερων υποδομών στην κοινωνία.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια εύρεσης λύσης τόσο στην σωστή χρήση των αριθμητικών εργαλείων, όσο και στην κατανόηση του προβλήματος της συμπεριφοράς μεταλλικών μελών σε υψηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Οργάνωση Διπλωματικής εργασίας.....	1
2	Μεταφορά Θερμότητας	2
2.1	Αγωγή.....	2
2.2	Συναγωγή.....	8
2.3	Ακτινοβολία.....	11
3	Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών έναντι Πυρκαγιάς	15
3.1	Μέτρα Πυροπροστασίας.....	15
3.2	Πυρκαγιά σε Κλειστό Χώρο.....	16
3.3	Σχεδιασμός βάσει Κανονισμών.....	17
3.4	Πειραματική Διαδικασία.....	18
3.4.1	Πειράματα Αντοχής σε Πρότυπη Φωτιά.....	19
3.5	Σχεδιασμός έναντι Πυρκαγιάς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.....	20
3.5.1	Σχέσεις θερμοκρασίας-χρόνου Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-2.....	20
3.5.2	Σχεδιασμός βάσει Πρότυπης Καμπύλης ISO 834.....	21
3.5.3	Τοπικές Πυρκαγιές.....	22
3.5.4	Μη Πυροπροστατευμένη Εσωτερική Μεταλλική Κατασκευή.....	24
3.5.5	Εσωτερική Μεταλλική Κατασκευή με Πυροπροστασία.....	28
3.5.6	Εξωτερική Μεταλλική Κατασκευή.....	29
3.5.7	Θερμικές Ιδιότητες Υλικών Κατασκευής.....	29
4	Πειράματα Βρετανικής Εταιρίας Μεταλλικών Κατασκευών	34
4.1	Εξεταζόμενο Πείραμα.....	34
5	Αριθμητική Προσομοίωση Μη Πυροπροστατευμένης Δοκού	36
5.1	Πεπερασμένα Στοιχεία.....	36
5.2	Προσομοίωση της Μεταλλικής Δοκού.....	37
5.3	Προσομοίωση της Πλάκας Σκυροδέματος.....	37
5.4	Προσομοίωση της Επιφάνειας Θέρμανσης.....	38
5.5	Σύνθετη Μέθοδος Προσομοίωσης της Μεταφοράς Θερμότητας.....	39
5.5.1	Ανάλυση με Παράμετρο τη Γεωμετρία της Επιφάνειας Θέρμανσης.....	40
5.5.2	Ανάλυση με Παράμετρο την Απόσταση της Επιφάνειας Θέρμανσης από τη Δοκό.....	42
5.5.3	Ανάλυση με Παράμετρο τον Τύπο της Κοιλότητας.....	44
5.5.4	Ανάλυση με Παράμετρο τα Θερμικά Χαρακτηριστικά της Πλάκας Σκυροδέματος.....	46
5.6	Απλοποιημένη Μέθοδος Προσομοίωσης της Μεταφοράς Θερμότητας.....	50
5.7	Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μη Πυροπροστατευμένης Μεταλλικής Δοκού σύμφωνα με τις Διατάξεις του Ευρωκώδικα.....	52
5.8	Συμπεράσματα.....	55
6	Αριθμητική Προσομοίωση Πυροπροστατευμένης Δοκού	57
6.1	Πυροπροστασία δίχως Βλάβη.....	58
6.2	Βλάβες στο Υλικό Πυροπροστασίας.....	62
6.3	Συμπεράσματα.....	68
7	Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας	68
8	Βιβλιογραφία	69

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 5. 1	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με παράμετρο τη γεωμετρία	41
Σχήμα 5. 2	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο τη γεωμετρία	41
Σχήμα 5. 3	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με παράμετρο τη γεωμετρία	42
Σχήμα 5. 4	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με παράμετρο την απόσταση	42
Σχήμα 5. 5	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο την απόσταση	43
Σχήμα 5. 6	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με παράμετρο την απόσταση	43
Σχήμα 5. 7	Διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλματος με παράμετρο την απόσταση.....	44
Σχήμα 5. 8	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με παράμετρο την κοιλότητα	45
Σχήμα 5. 9	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο την κοιλότητα	45
Σχήμα 5. 10	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με παράμετρο την κοιλότητα	46
Σχήμα 5. 11	Διάγραμμα αποκλίσεων άνω πέλματος με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.....	47
Σχήμα 5. 12	Διάγραμμα αποκλίσεων κορμού με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.....	47
Σχήμα 5. 13	Διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλματος με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος	48
Σχήμα 5. 14	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος για μία και δύο κοιλότητες	49
Σχήμα 5. 15	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού για μία και δύο κοιλότητες	49
Σχήμα 5. 16	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος για μία και δύο κοιλότητες.....	50
Σχήμα 5. 17	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με την απλοποιημένη μέθοδο	51
Σχήμα 5. 18	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με την απλοποιημένη μέθοδο	51
Σχήμα 5. 19	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με την απλοποιημένη μέθοδο.....	52
Σχήμα 5. 20	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα	54
Σχήμα 5. 21	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα	54
Σχήμα 5. 22	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.....	55
Σχήμα 5. 23	Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποκλίσεων κορμού	55
Σχήμα 5. 24	Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλματος.....	56

Σχήμα 6. 1	Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας SFRM.....	57
Σχήμα 6. 2	Διάγραμμα ειδικής θερμότητας SFRM	58
Σχήμα 6. 3	Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με εφαρμογή πυροπροστασίας.....	60
Σχήμα 6. 4	Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με εφαρμογή πυροπροστασίας.....	60
Σχήμα 6. 5	Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με εφαρμογή πυροπροστασίας.....	61
Σχήμα 6. 6	Διάγραμμα μείωσης της θερμοκρασίας του κάτω πέλματος μετά την εφαρμογή πυροπροστασίας.....	61
Σχήμα 6. 7	Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 10mm για βλάβη	63
Σχήμα 6. 8	Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 20mm για βλάβη	64
Σχήμα 6. 9	Διάγραμμα αύξησης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 10mm και 20mm για βλάβη μετά από 60min	64
Σχήμα 6. 10	Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας άνω πέλματος δοκού με SFRM 20mm για βλάβη.....	65
Σχήμα 6. 11	Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας κορμού δοκού με SFRM 20mm για βλάβη.....	65
Σχήμα 6. 12	Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας κάτω πέλματος δοκού με SFRM 20mm για βλάβη	66

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. 1	Πίνακας αριθμών Prandtl	10
Πίνακας 1. 2	Πίνακας αριθμών Nusselt.....	11
Πίνακας 3. 1	Πίνακας συντελεστή γ_1	26
Πίνακας 3. 2	Πίνακας συντελεστή γ_2	26
Πίνακας 3. 3	Πίνακας συντελεστών γ_n	27
Πίνακας 4. 1	Πίνακας διαστάσεων μεταλλικής δοκού του πειράματος.....	34
Πίνακας 4. 2	Πίνακας θερμοκρασιών μεταλλικής δοκού του πειράματος.....	35
Πίνακας 4. 3	Πίνακας θερμοκρασιών φούρνου εξεταζόμενου πειράματος	35

1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της αποτελεσματικότερης μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας και η χρήση της για ανάλυση της θερμικής απόκρισης μεταλλικών δοκών. Δεδομένου της πολυπλοκότητας του φαινομένου αλλά και της σημασίας απόκτησης ενός αξιόπιστου αριθμητικού μοντέλου ανάλυσης κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς, εξετάστηκε επαρκής αριθμός προσομοιωμάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον και τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν προσεκτικά.

1.1 Οργάνωση Διπλωματικής εργασίας

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στη θεωρία της μεταφοράς θερμότητας. Αναλύονται οι τρεις μηχανισμοί που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο φαινόμενο και δίνονται οι βασικοί νόμοι που τους διέπουν.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναφέρονται γενικές πληροφορίες για τη δράση της φωτιάς και τα μέτρα πυροπροστασίας που απαιτεί. Δίνονται κάποιοι βασικοί κανόνες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών έναντι πυρκαγιάς. Οι πληροφορίες αντλήθηκαν από διατάξεις του Ευρωκώδικα και σχετική βιβλιογραφία.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πείραμα που αποτελεί τη βάση αναφοράς των παραμετρικών αναλύσεων που ακολουθούν. Πρόκειται για πείραμα αντοχής σε φωτιά μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού που διεξήγαγε η Βρετανική Εταιρία Μεταλλικών Κατασκευών.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος του προηγούμενου κεφαλαίου. Περιγράφονται και συγκρίνονται δύο μέθοδοι προσομοίωσης, μία απλή και μία πιο σύνθετη. Επιπρόσθετα υπολογίζεται η θερμοκρασία της μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού με βάση τον Ευρωκώδικα.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θερμική ανάλυση πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού. Η ανάλυση αφορά δύο περιπτώσεις, την ύπαρξη υλικού πυροπροστασίας με βλάβη και χωρίς.

Στο 7^ο κεφαλαίο γίνεται μια σύντομη σύνοψη της διπλωματικής και αναφέρονται πιθανά αντικείμενα έρευνας που θα μπορούσαν να τη συμπληρώσουν.

Στο 8^ο κεφάλαιο αναφέρεται η Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

2 Μεταφορά Θερμότητας

Η θεωρία της μετάδοσης θερμότητας καλύπτει το κενό που αφήνει η θεωρία της Θερμοδυναμικής στις περιοχές του ρυθμού και της μορφής της θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός σώματος και του περιβάλλοντα του χώρου.

Η Θερμοδυναμική μας διδάσκει ότι ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί με τις αλληλεπιδράσεις ενός συστήματος με το περιβάλλον, οι οποίες ονομάζονται έργο και θερμότητα. Με τη σειρά της, ως μετάδοση θερμότητας ορίζουμε τους ρυθμούς μετάδοσης θερμικής ενέργειας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών. Οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας είναι τρεις: η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία.

Αγωγή (Conduction): Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας σε ένα στερεό ή υγρό όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά στο εσωτερικό του. Η θερμότητα μεταφέρεται σε μοριακή κλίμακα χωρίς να υπάρχει σχετική μακροσκοπική κίνηση ύλης.

Συναγωγή (Convection): Ο μηχανισμός με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και του κινούμενου ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με αυτήν όταν παρουσιάζουν διαφορά θερμοκρασίας.

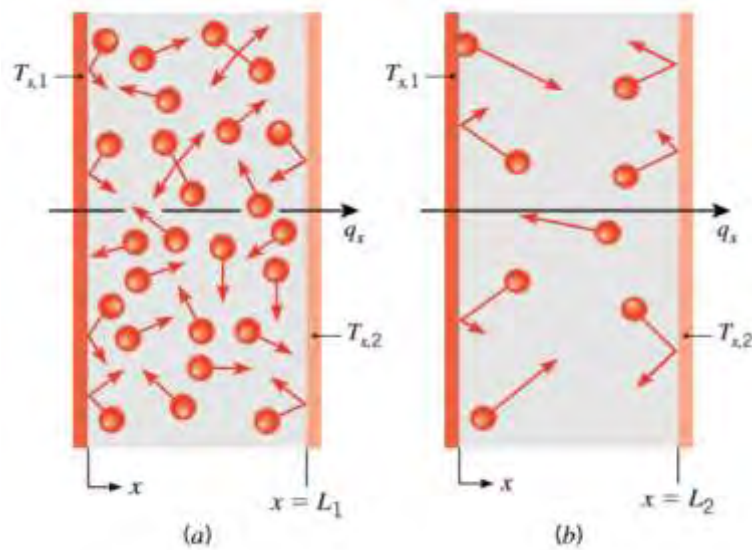
Ακτινοβολία (Radiation): Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας μεταξύ δύο επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας που ανάμεσά τους δεν παρεμβάλλεται κανένα μέσο. Πραγματοποιείται με εκπομπή ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η θεωρία μεταφοράς θερμότητας καλύπτει τόσο τα προβλήματα βελτιστοποίησης της μετάδοσης θερμικής ενέργειας, όσο και αυτά του περιορισμού της. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι παρακάτω μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας.

2.1 Αγωγή

Η θερμοκρασία εκφράζεται σε ενέργεια της τυχαίας κίνησης των μορίων ενός σώματος. Όταν σωματίδια με διαφορετική θερμοκρασία έλθουν σε επαφή, έχουμε μεταφορά ενέργειας από αυτά με την υψηλότερη σε αυτά με την χαμηλότερη θερμοκρασία. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αγωγή και λαμβάνει χώρα σε στερεά και ακίνητα ρευστά. Η μεταφερόμενη με αυτόν τον μηχανισμό ενέργεια σχετίζεται τόσο με την τυχηματική μεταφορική και περιστροφική κίνηση των μορίων, όσο και με την ενέργεια λόγω δονήσεων στο εσωτερικό τους.

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ο φυσικός μηχανισμός της αγωγής. Γίνονται οι παραδοχές ότι δεν υπάρχει βαρύτητα και η αγωγή πραγματοποιείται μέσα σε αέριο μέσο. Αρχικά παρατηρείται διάχυση ενέργειας με μετάδοση κινητικής ενέργειας. Καθώς τα μόρια συγκρούονται στο θερμό τοίχωμα παίρνουν μέρος της κινητικής ενέργειας των μορίων του τοιχώματος και στη συνέχεια συγκρούονται με τα γειτονικά προς τα δεξιά τους μόρια, αυξάνοντας την ταχύτητα αυτών. Η διαδικασία συνεχίζεται με αυτόν τον τρόπο έως ότου η κινητική ενέργεια να μεταβιβαστεί στα μόρια του ψυχρού τοιχώματος. Στα υγρά μέσα παρατηρείται μεγαλύτερη αγωγιμότητα λόγω πυκνότερης μοριακής διάταξης και συνεπώς ευκολότερης διάχυσης.



Εικόνα 1 Μηχανισμός αγωγής σε αέριο μέσο (Bergman κ.ά., 2011, σ. 189)

Στα στερεά η διάχυση πραγματοποιείται μέσω της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων και μέσω των ταλαντώσεων του πλέγματος που σχηματίζουν τα μόριά τους. Εξαιτίας της πυκνής διάταξης των μορίων αλλά και της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα στερεά σώματα είναι οι καλύτεροι αγωγοί θερμότητας με αυτόν τον μηχανισμό μεταφοράς. Όσον αφορά τα μέταλλα συγκεκριμένα, ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι με την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Οι διαδικασίες που συμβαίνουν κατά την μεταφορά θερμότητας ποσοτικοποιούνται με κατάλληλες εξισώσεις που εκφράζουν ρυθμό. Οι σημαντικότερες από αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η μαθηματική μονοδιάστατη έκφραση του μηχανισμού της αγωγής γίνεται με τον εμπειρικό νόμο του Fourier, σύμφωνα με τον οποίο η θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας (ή αλλιώς πυκνότητα θερμικής ροής) είναι ανάλογη του αντίθετου πρόσημου της θερμοκρασίας:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1) \quad \text{όπου,}$$

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, χαρακτηριστικό του υλικού $[\frac{W}{m \cdot C}]$

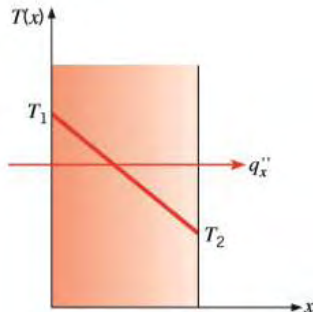
\dot{q} : πυκνότητα θερμικής ροής $[\frac{W}{m^2}]$

Το αρνητικό πρόσημο στη παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει την μεταφορά θερμότητας από την πλευρά με την υψηλότερη θερμοκρασία προς αυτή με την χαμηλότερη. Η εξίσωση του Fourier προέρχεται από εμπειρικές παρατηρήσεις του φαινομένου και όχι από τις βασικές αρχές της θερμοδυναμικής.

Η γενική έκφραση του νόμου Fourier για τρισδιάστατο θερμοκρασιακό πεδίο $T(x,y,z)$ είναι: $\vec{q} = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right)$ (2.2)

Η παραπάνω σχέση υποδεικνύει ότι το διάνυσμα της πυκνότητας θερμικής ροής είναι κάθετο στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια, δηλαδή μια επιφάνεια με σταθερή θερμοκρασία.

Από τη γενική έκφραση του Fourier προκύπτει ότι η πυκνότητα θερμικής ροής είναι θετική για κίνηση στην κάθετη διεύθυνση επιφάνειας με αρνητική κλίση θερμοκρασίας (∇T). Στην περίπτωση ισοθερμοκρασιακής επιφάνειας, στη διεύθυνση αυτή η ροή θερμότητας παρουσιάζει μέγιστη τιμή.

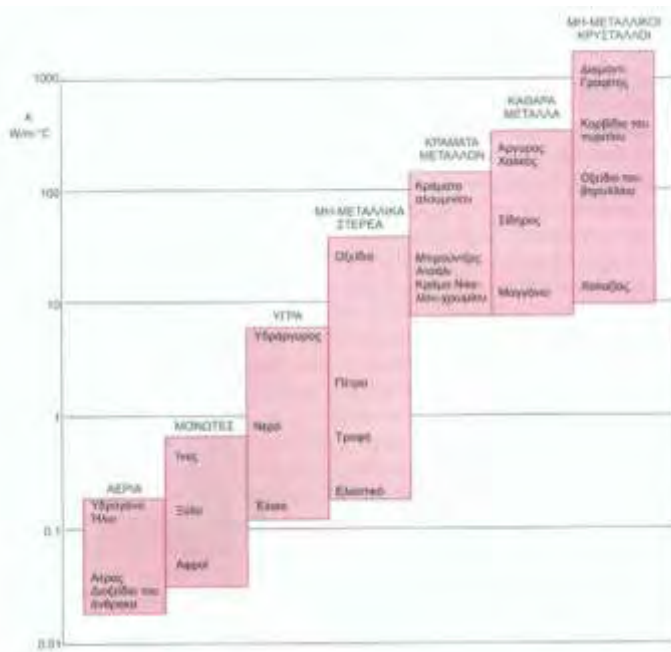


Εικόνα 2 Κατεύθυνση θερμικής ροής για κίνηση σε επίπεδη επιφάνεια (Bergman κ.ά., 2011, σ.69)

Η εξίσωση 2.2 καλείται Θεμελιώδης νόμος της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και ισχύει ότι:

- Είναι γενίκευση πειραματικών ενδείξεων
- Είναι η έκφραση ορισμού της θερμικής αγωγιμότητας
- Έχει εφαρμογή σε στερεά, υγρά και αέρια

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι δείκτης του ρυθμού μεταφοράς ενέργειας με διάχυση. Εξαρτάται από το υλικό και συγκεκριμένα την φυσική του δομή, την πίεση και τη θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές η θερμική αγωγιμότητα ενός στερεού είναι μεγαλύτερη ενός υγρού, που με τη σειρά της είναι μεγαλύτερη ενός αερίου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3 υπάρχουν στερεά με θερμική αγωγιμότητα έως και τέσσερις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή αερίων. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορά που παρουσιάζουν οι δύο καταστάσεις στο μέγεθος των κενών μεταξύ των μορίων.



Εικόνα 3 Θερμική αγωγιμότητα υλικών (Παπασιώπη, n.d., σ.23)

Επειδή η μετάδοση θερμότητας στα στερεά οφείλεται τόσο στην κίνηση των ηλεκτρονίων όσο και στις ταλαντώσεις του κυτταρικού πλέγματος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αναλύεται σε δύο μέρη: $\lambda = \lambda_e + \lambda_l$. Τα καθαρά μέταλλα παρουσιάζουν υψηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, με τις τιμές τους να μειώνεται όταν υπάρχουν προσμίξεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των καθαρών και των κραμάτων μετάλλων με την αύξηση της θερμοκρασίας, με τα πρώτα να εμφανίζουν μείωση της αγωγιμότητας τους ενώ τα δεύτερα σταδιακή αύξηση (Χατζηαθανασίου, 2009).

Ιδιαιτερότητα παρουσιάζει η μεταφορά θερμικής ενέργειας στα θερμομονωτικά υλικά εξαιτίας της πορώδους ή ινώδους δομής τους. Συγκεκριμένα, η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή στο στερεό μέρος τους, με συναγωγή στον αέρα των πόρων και σε πού υψηλές θερμοκρασίες ακόμα και με ακτινοβολία μεταξύ των τοιχωμάτων τους. Για την ένταξη αυτής της ιδιαιτερότητας στους υπολογισμούς ορίζεται ο ενεργός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ_{eff} . Ο αέρας αποτελεί κακός αγωγός της θερμότητας και γι'αυτό η θερμομονωτική ικανότητα υλικού εξαρτάται από την ύπαρξη του στους πόρους του. Αν ,εξαιτίας της υγρασίας, οι πόροι γεμίσουν με νερό η θερμική αγωγιμότητα του υλικού μεγαλώνει και ο λ_{eff} αυξάνεται.

Συγκεκριμένα για τη μεταβολή θερμοκρασίας, η σχέση προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι γραμμική και ισχύει:

$$\lambda = \lambda_0(1 + b\Delta T) \quad (2.3) \text{ ,όπου}$$

λ_0 : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 (0° ή 20°C)

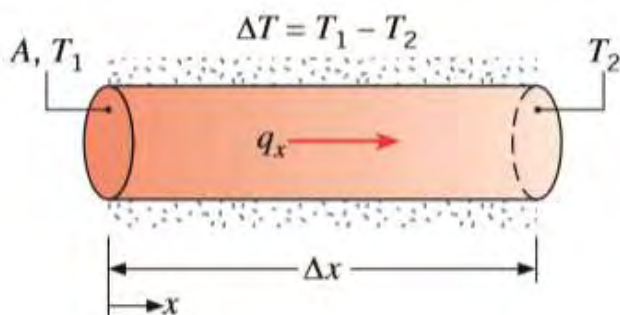
b : σταθερά που έχει προσδιοριστεί από πειράματα

$\Delta T = T - T_0$: η μεταβολή της θερμοκρασίας

Τα περισσότερα υλικά είναι ομογενή και ισότροπα και συνεπώς ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δεν εξαρτάται από τη θέση και τη διεύθυνση. Μάλιστα σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές η θερμική αγωγιμότητα του υλικού θεωρείται σταθερή και συνεπώς η μονοδιάστατη εξίσωση Fourier μπορεί να αντικατασταθεί από τη πεπερασμένη μορφή:

$$\dot{q} \cdot A = \dot{Q} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \Rightarrow T_1 - T_2 = \dot{Q} \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (2.4)$$

Στη παραπάνω εξίσωση A είναι το εμβαδόν της διατομής εισόδου της ροής θερμότητας, T_2 και T_1 οι θερμοκρασίες στις δύο πλευρές του υλικού και Δx το πάχος του. Το πηλίκο $\frac{\Delta x}{\lambda} = R$ εκφράζει την θερμική αντίσταση του υλικού.



Εικόνα 4 Ροή θερμότητας σε κυλινδρικό σώμα (Bergman κ.ά., 2011, σ.68)

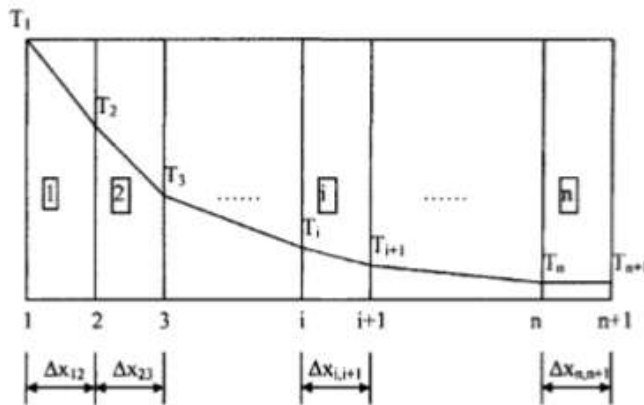
Ενδιαφέρον παρουσιάζει το διευρυμένο πρόβλημα μονοδιάστατης θερμικής αγωγής με σταθερές συνθήκες σε ένα σύνθετο υλικό, όπως μιας σύμμικτης δοκού χάλυβα-σκυροδέματος. Γίνεται η θεώρηση ότι η θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού που συνθέτει το σύνθετο υλικό είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με το θεώρημα της διατήρησης της ενέργειας που ορίζει ως ίδια τη ροή θερμότητας σε κάθε στρώμα του σύνθετου υλικού, η εξίσωση 2.4 παίρνει την μορφή:

$$\dot{Q} = -\lambda_{12} \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_{12}} = -\lambda_{23} \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_{23}} = \dots = -\lambda_{n,n+1} \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta x_{n,n+1}} \quad (2.5)$$

Αναμορφώνοντας την παραπάνω σχέση με τον κατάλληλο τρόπο και προσθέτοντας τα μέλη προκύπτει η εξίσωση:

$$T_1 - T_{n+1} = \dot{Q} \sum_{i=1}^n R_{i,i+1} \quad (2.6)$$



Εικόνα 5 Σύνθετο υλικό (Wang, 2002, σ.173)

Έχουμε χωρίσει συνεπώς το σύνθετο υλικό σε n στρώματα όπως φαίνεται στην εικόνα 5, και σύμφωνα με την εξίσωση 2.6 ο προσδιορισμός του ρυθμού θερμότητας είναι δυνατός αν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες στις εξωτερικές πλευρές του σύνθετου υλικού. Η τιμή αντικαθίσταται στη συνέχεια στο σύστημα εξισώσεων 2.5 και υπολογίζεται η θερμοκρασία στις διεπιφάνειες μεταξύ των διάφορων υλικών-στρωμάτων. Συνήθως οι θερμοκρασίες των εξωτερικών επιφανειών ενός μέλους υπολογίζονται από τις γνωστές θερμοκρασίες των ρευστών με τα οποία έρχονται σε επαφή. Αυτές οι θερμοκρασίες ρευστών χρησιμοποιούνται ως συνοριακές συνθήκες.

Στο παράδειγμα της επαφής με φωτιά από τη μία πλευρά και με αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από την άλλη, η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευστού και επιφάνειας υλικού εξαρτάται από την θερμοκρασιακή τους διαφορά.

Επομένως στη πλευρά της φωτιάς η ροή θερμότητας είναι:

$$\dot{Q} = h_{fi}(T_{fi} - T_1) \quad (2.7), \text{ όπου}$$

T_{fi} : η θερμοκρασία της φωτιάς

Στη πλευρά του περιβάλλοντος αέρα ισχύει:

$$\dot{Q} = h_a(T_{n+1} - T_a) \quad (2.8), \text{ όπου}$$

T_a : η θερμοκρασία του αέρα

Οι ποσότητες h_{fi} και h_a είναι συντελεστές ανταλλαγής θερμότητας της φωτιάς και του αέρα αντίστοιχα και οι τιμές τους εξαρτώνται από τα μέρη της συναγωγής και της ακτινοβολίας στην μεταφορά θερμότητας.

Οι εξισώσεις 2.7 και 2.8 μπορούν να γραφούν στην μορφή:

$$T_{fi} - T_1 = \frac{\dot{Q}}{h_{fi}} = \dot{Q}R_f \quad (2.9)$$

$$T_{n+1} - T_a = \frac{\dot{Q}}{h_a} = \dot{Q}R_a \quad (2.10)$$

Αντίστοιχα, R_f και R_a είναι η θερμική αντίσταση των στρωμάτων της φωτιάς και του αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τους θερμικούς συντελεστές της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού. Ένας συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από δύο μέρη, αυτό της συναγωγής και αυτό της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ αυτός της συναγωγής μόνο όταν υπάρχει επαφή του ρευστού με την επιφάνεια του στερεού.

Για τη σωστή ανάλυση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας απαιτείται η χρήση των θερμοφυσικών χαρακτηριστικών του υλικού, δηλαδή των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων μεταφοράς που παρουσιάζει. Οι ιδιότητες μεταφοράς περιλαμβάνουν τις σταθερές ρυθμού διάχυσης, όπως η θερμική αγωγιμότητα στη μεταφορά θερμότητας και το κινηματικό ιξώδες στη μεταφορά μάζας. Η θερμοδυναμικές ιδιότητες, από την άλλη, αναφέρονται στην κατάσταση ισορροπίας του συστήματος και μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά μεγέθη είναι η πυκνότητα (ρ) και η ειδική θερμότητα (c_p) του υλικού. Το γινόμενο ($\rho \cdot c_p$) εκφράζει την ογκομετρική χωρητικότητα θερμότητας, δηλαδή την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμική ενέργεια.

Σημαντική ιδιότητα στη θερμική ανάλυση αποτελεί ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας προς την χωρητικότητα θερμότητας, γνωστός ως διάχυση θερμότητας (α):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (2.11)$$

Εκφράζει την ικανότητα του υλικού να μεταδίδει θερμική ενέργεια σε αναλογία με αυτή που αποθηκεύει. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάχυση θερμότητας του υλικού τόσο πιο άμεση είναι η αντίδραση του στις αλλαγές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η ακρίβεια στις θερμικές αναλύσεις των μηχανικών και επιστημόνων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια προσδιορισμού αυτών των ιδιοτήτων.

Σημαντικό στοιχείο στην ανάλυση του μηχανισμού της αγωγής αποτελεί ο προσδιορισμός της κατανομής της θερμοκρασίας στο μέσο διάδοσης, που επηρεάζεται από τις συνοριακές του συνθήκες. Γνωρίζοντας αυτήν την κατανομή είναι δυνατός ο υπολογισμός της ροής θερμότητας στο μέσο για κάθε στιγμή από την σχέση του Fourier. Σημαντική, επίσης, είναι η γνώση της κατανομής θερμοκρασίας για προσδιορισμό των θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων, απαραίτητα για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας στερεών σωμάτων. Ο προσδιορισμός, επίσης, του αποτελεσματικότερου πάχους υλικού πυροπροστασίας σχετίζεται με τις πληροφορίες για την μεταβολή της θερμοκρασίας σε κάθε θέση του μέσου.

Ο προσδιορισμός της κατανομής θερμοκρασίας βασίζεται στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, την αρχή διατήρησης ενέργειας. Σύμφωνα με τον τελευταίο, η αύξηση της ενέργειας που αποθηκεύεται σε έναν όγκο ελέγχου ισούται με την ενέργεια που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου μείον την ενέργεια που απομακρύνεται. Στην περίπτωση κλειστού συστήματος ο 1^{ος} Νόμος της Θερμοδυναμικής εκφράζεται από την σχέση:

$$\Delta E_{st}^{tot} = Q - W \quad (2.12), \text{ όπου}$$

ΔE_{st}^{tot} : η μεταβολή της ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα

Q: καθαρή θερμότητα που μεταφέρεται στο σύστημα

W: καθαρό έργο που παράγεται από το σύστημα

Ερμηνεύοντας τον παραπάνω νόμο, σε ένα κλειστό σύστημα, δηλαδή σε ένα σύστημα στο οποίο δεν είναι δυνατή η ανταλλαγή μάζας με το περιβάλλον, ενέργεια μπαίνει ή βγαίνει με μεταφορά θερμότητας στα σύνορά του και με το έργο που παράγεται στο εσωτερικό του. Στα ανοικτά συστήματα, στα οποία επιτρέπεται η ανταλλαγή μάζας με το περιβάλλον, η ενέργεια μεταβάλλεται και με μετακίνηση μάζας. Στα πλαίσια της θεωρίας της μεταφοράς ενέργειας, οι ενέργειες του συστήματος αφορούν την θερμική και μηχανική ενέργεια.

Με εκπλήρωση της απαίτησης διατήρησης της ενέργειας, ορίζεται ένας απειροστός όγκος ελέγχου και προσδιορίζοντας τις διαδικασίες μεταφοράς ενέργειας και εισάγοντας τις κατάλληλες εξισώσεις ρυθμού μεταβολής προκύπτει η διαφορική εξίσωση της οποίας η λύση, σύμφωνα με τις συνοριακές συνθήκες, δίνει την κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσο. Η διαφορική εξίσωση αυτή αποτελεί το βασικότερο εργαλείο της ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και ονομάζεται εξίσωση διάδοσης θερμότητας:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

2.2 Συναγωγή

Η συναγωγή είναι συνδυασμός δύο μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας, αυτού της αγωγής με τη μεταφορά μορίων καθώς και της μεταφοράς θερμότητας με την μακροσκοπική κίνηση του ρευστού.

Υπάρχουν τρεις μορφές συναγωγής ανάλογα με την ροή του ρευστού:

- Η *Εξαναγκασμένη*, όταν η ροή ευθύνεται σε εξωτερικά μέσα όπως αντλίες και ανεμιστήρες.
- Η *Ελεύθερη* ή *Φυσική* συναγωγή που προκαλείται από τις δυνάμεις άνωσης λόγω της διαφοράς πυκνότητας που δημιουργούν οι θερμοκρασιακές διαφορές στο ρευστό.
- Η *Συνδυασμένη* συναγωγή, όταν η ροή οφείλεται τόσο σε εξωτερικά μέσα όσο και στις δυνάμεις άνωσης του ρευστού. Χαρακτηρίζεται από μικρές ταχύτητες λόγω εξαναγκασμένης ροής και μεγάλες δυνάμεις άνωσης.

Η μελέτη του προβλήματος ροής ρευστού πάνω από θερμή επιφάνεια βοηθάει στην κατανόηση του μηχανισμού της συναγωγής. Προϋπόθεση δημιουργίας ροής είναι η ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ επιφάνειας και ρευστού. Σε αυτή τη περίπτωση οριακό στρώμα ταχύτητας ρευστού ονομάζεται η περιοχή του ρευστού

στην οποία η ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν για $y = 0$ μέχρι την ταχύτητα ελεύθερης ροής του ρευστού u_{∞} .

Στο οριακό στρώμα, η μεταφορά της θερμότητας οφείλεται τόσο στην τυχαία και άναρχη κίνηση των μορίων όσο και στην κίνηση του ρευστού στο εσωτερικό του. Κοντά στην επιφάνεια η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή κυριαρχεί εξαιτίας της χαμηλής ταχύτητας του ρευστού. Μάλιστα ακριβώς πάνω στην επιφάνεια η αγωγή αποτελεί τον μοναδικό μηχανισμό μεταφοράς θερμικής ενέργειας. Το οριακό στρώμα αυξάνεται στην κατεύθυνση x . Αυτό μεταφράζεται σε μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει ως αποτέλεσμα την ώθηση της θερμότητας, που εισάγεται στο στρώμα με αγωγή, έξω από αυτό και στο υπόλοιπο ρευστό.

Θερμικό οριακό στρώμα καλείται η περιοχή του ρευστού στην οποία η θερμοκρασία μεταβάλλεται από αυτή στην επιφάνεια T_s μέχρι την θερμοκρασία ελεύθερης ροής T_{∞} .



Εικόνα 6 Μηχανισμός της συναγωγής (Παπασιώπη, n.d., σ.28)

Από το νόμο ψύξης του Newton προκύπτει η μαθηματική έκφραση της συναγωγής:

$$\dot{q} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (2.14), \text{ όπου}$$

\dot{q} : η πυκνότητα θερμικής ροής

h : ο συντελεστής συναγωγής $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$

T_s : η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στερεού

T_{∞} : η θερμοκρασία ελεύθερης ροής

Βασικό πρόβλημα του μηχανισμού της συναγωγής είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή συναγωγής, καθώς εμπεριέχει όλες τις παραμέτρους που την επηρεάζουν. Τέτοιες παράμετροι είναι ιδιότητες του ρευστού όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα, η γεωμετρία της επιφάνειας και οι συνθήκες ροής. Οι τελευταίες, μάλιστα, δύναται να μεταβάλλονται κατά μήκος της ροής και για αυτό συχνά αναφερόμαστε σε τοπικό και μέσο συντελεστή συναγωγής. Ακόμα πιο συγκεκριμένα, οι συνθήκες που επικρατούν στο οριακό στρώμα καθορίζουν στον μέγιστο βαθμό αυτόν τον συντελεστή. Τα μόρια του ρευστού που είναι σε επαφή με τη σταθερή επιφάνεια είναι ακίνητα και συνεπώς η μετάδοση θερμότητας γίνεται αποκλειστικά με τον μηχανισμό της αγωγής. Έτσι σε κάθε θέση x η πυκνότητα θερμοροής υπολογίζεται από τον νόμο του Fourier για $y=0$, όπου y η απόσταση από την στερεή σταθερή επιφάνεια:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} \quad (2.15)$$

Αν η εξίσωση 2.15 συνδυαστεί με τον νόμο ψύξης του Newton προκύπτει η σχέση προσδιορισμού του συντελεστή συναγωγής:

$$h = -\frac{\lambda \frac{dT}{dy}|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (2.16)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασιακές κλίσεις εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούν στο θερμικό οριακό στρώμα.

Σε κάθε κατηγορία συναγωγής, φυσική ή εξαναγκασμένη, υπάρχουν δύο ειδών ροές, η στρωτή και η τυρβώδης. Η φύση της ροής και τα αδιάστατα μεγέθη των αριθμών Nusselt, Reynolds και Prandtl μπορούν να δώσουν έναν προσεγγιστικό τρόπο υπολογισμού του συντελεστή συναγωγής.

Ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$N_u = \frac{hL}{\lambda} \quad (2.17), \text{ όπου}$$

L : το χαρακτηριστικό μήκος της στερεάς επιφάνειας

Όσον αφορά την εξαναγκασμένη συναγωγή, έχοντας δεδομένη την θερμική αγωγιμότητα από τον πίνακα 1.1, το πρόβλημα προσδιορισμού του συντελεστή συναγωγής ανάγεται σε πρόβλημα υπολογισμού του αριθμού Nusselt. Ο N_u μπορεί να προσδιοριστεί από τον πίνακα 1.2 με βάση τους αριθμούς Reynolds και Prandtl. Τιμές του αριθμού Prandtl δίνονται στον πίνακα 1.1:

$$Re = \frac{\rho Lu_0}{\mu} = \frac{Lu_0}{\nu} \quad (2.18), \text{ όπου}$$

ρ : η πυκνότητα του ρευστού

u_0 : η ταχύτητα ροής

ν : το σχετικό ιξώδες

$$Pr = \frac{\mu C}{\lambda} \quad (2.19), \text{ όπου}$$

C : η ειδική θερμότητα του αέρα

T [K]	ρ [kg/m ³]	C [K/kg°C]	$\mu \times 10^5$ [kg/(m·s)]	$\nu \times 10^6$ [m ² /s]	λ [W/m°C]	Pr
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.49	0.01809	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.49	0.02227	0.722
300	1.1774	1.0057	1.846	15.68	0.02624	0.708
350	0.998	1.009	2.075	20.76	0.03003	0.697
400	0.8826	1.014	2.286	25.9	0.03365	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	28.86	0.03707	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.9	0.04038	0.68
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.0436	0.68
600	0.5879	1.0551	30.18	51.34	0.04659	0.68
650	0.543	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.682
700	0.503	1.0752	3.332	66.25	0.0523	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	0.702
1100	0.3204	1.16	4.44	138.6	0.0732	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	0.705
1500	0.2355	1.23	5.4	229.1	0.0946	0.705

Πίνακας 1. 1 Πίνακας αριθμών Prandtl

Τύπος Ροής	Συνθήκη	Χαρακτηριστικό Μήκος	Nu (=hL/λ)
Στρωτή ροή, παράλληλη σε μια επίπεδη επιφάνεια μήκους L	$20 < Re < 3 \cdot 10^5$	L	$0.66 \sqrt{Re Pr^{1/4}}$
Τυρβώδης ροή, παράλληλη σε μια επίπεδη επιφάνεια μήκους L	$Re > 3 \cdot 10^5$	L	$2 + 0.6 Re^{1/4} Pr^{1/4}$
Ροή γύρω από σφαίρα διαμέτρου L	Γενική Εξίσωση	L	$2 + 0.6 \sqrt{Re Pr^{1/4}}$

Πίνακας 1. 2 Πίνακας αριθμών Nusselt

Στην φυσική συναγωγή η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευστού και στερεάς επιφάνειας εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του ρευστού όσο και από την σχετική θέση των δύο. Η σταθερά της συναγωγής εξαρτάται από την θερμοκρασία, πολλές φορές άγνωστη σε συνθήκες φωτιάς, και η χρήση των αναλυτικών σχέσεων μπορεί να αποδειχθεί μία χρονοβόρα και περίπλοκη διαδικασία.

2.3 Ακτινοβολία

Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας η ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη μέσου. Η θερμική ενέργεια σε αυτή τη περίπτωση ,που ακτινοβολείται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, μεταδίδεται πιο αποτελεσματικά στο κενό. Οι ταλαντώσεις και οι περιστροφές των μορίων, των ατόμων και των ηλεκτρονίων μιας υλικής μάζας παράγουν θερμική ακτινοβολία. Η τελευταία καλύπτει τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που περιλαμβάνει την ορατή, την υπέρυθη και ένα μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας. Παρ' ότι όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπουν ακτινοβολία, η εκπομπή αξιοσημείωτης ορατής ακτινοβολίας συμβαίνει για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 800K. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η εκπομπή είναι υπέρυθη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.

Σε αντίθεση με τα στερεά, υγρά και αέρια στα οποία η ακτινοβολία είναι ένα συνεχές ογκομετρικό φαινόμενο, στα αδιαφανή στερεά όπως τα μέταλλα το φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως επιφανειακό. Συγκεκριμένα η ακτινοβολία των εσωτερικών σωματιδίων δεν φτάνει στην επιφάνεια, ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται σε ένα επιφανειακό στρώμα μικρού πάχους.

Προσπίπτουσα ακτινοβολία (G) ονομάζεται η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου. Κατά κανόνα ένα μέρος της ενέργεια αυτής αντανακλάται, ένα απορροφάται και ένα διαπερνά την επιφάνεια. Αντιστοίχως, ως συντελεστής απορρόφησης (α) ορίζεται το ποσοστό ακτινοβολίας που απορροφάται, ως συντελεστής ανάκλασης (ρ) το ποσοστό που ανακλάται και ως συντελεστής διαπερατότητας (τ) το ποσοστό που διαπερνά την επιφάνεια. Προφανώς ισχύει $\alpha + \rho + \tau = 1$. Τα ποσοστά αυτά είναι συνάρτηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και των ιδιοτήτων της επιφάνειας του σώματος στο οποίο προσπίπτει η ακτινοβολία.

Μαθηματικά οι παραπάνω συντελεστές προσδιορίζονται ως:

$$\alpha = \frac{G_a}{G} \quad , 0 \leq \alpha \leq 1$$

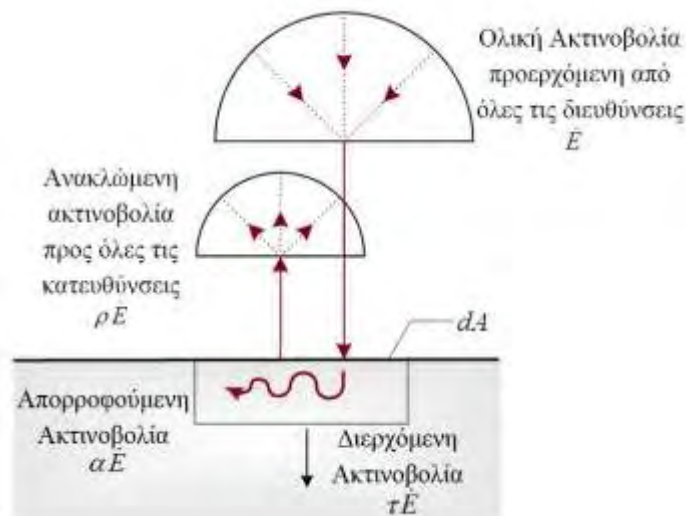
$$\rho = \frac{G_r}{G} \quad , 0 \leq \rho \leq 1$$

$$\tau = \frac{G_t}{G} \quad , 0 \leq \tau \leq 1$$

όπου,

G : η προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται η επιφάνεια

G_a, G_r, G_t : το τμήμα, αντίστοιχα, της ακτινοβολίας που απορροφάται, ανακλάται και διαπερνά την επιφάνεια



Εικόνα 7 Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνεια (Παπασιώπη, n.d., σ.37)

Σε όρους θερμικής ροής, η ακτινοβολία που απορροφά ένα σώμα από το περιβάλλον του ισούται με:

$$\dot{q}_a = \alpha q_{in} \quad (2.20)$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που έχουν ως έργο την μεταφορά της ενέργειας στον μηχανισμό της ακτινοβολίας διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και χαρακτηρίζονται από τη συχνότητα (ν) και το μήκος κύματος (λ). Για ένα δεδομένο μήκος κύματος η ενέργεια αυτή εξαρτάται από το υλικό, την θερμοκρασία και την κατάσταση της επιφάνειας σώματος. Συνεπώς τίθεται το ερώτημα της μέγιστης ποσότητας ακτινοβολίας που δύναται να εκπέμψει μια επιφάνεια σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το ερώτημα αυτό απαντάται με την θεώρηση μιας ιδανικής επιφάνειας που λειτουργεί σαν επιφάνεια αναφοράς για τον προσδιορισμό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πραγματικών επιφανειών. Η επιφάνεια αυτή ανήκει στο ιδεατό σώμα που ονομάζεται 'μαύρο' και η μέγιστη πυκνότητα θερμικής ροής που εκπέμπει δίνεται από τον νόμο των Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q} = \sigma T_s^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.21) \quad , \text{όπου}$$

T_s : η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας [K]

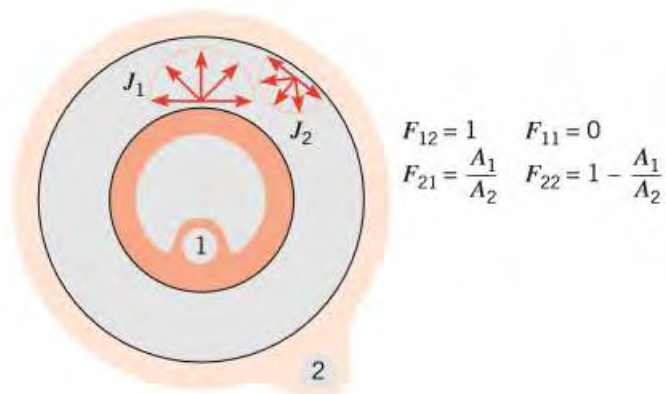
σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann ίση με $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

Το ‘μαύρο’ σώμα έχει την ιδιαιτερότητα ότι απορροφά όλη την ακτινοβολία την οποία δέχεται. Ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς την ακτινοβολία που εκπέμπει ‘μαύρο’ σώμα ίδιας θερμοκρασίας ονομάζεται συντελεστής εκπομπής (ϵ), με $0 < \epsilon < 1$, και η θερμική ροή που εκπέμπεται από πραγματικό σώμα ορίζεται ως:

$$\dot{q} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.22)$$

Συνήθως ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από την θερμοκρασία της επιφάνειας, την γωνία της ακτινοβολίας και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που δεν εξαρτάται από τους παραπάνω παράγοντες, η ακτινοβόλος επιφάνεια ανήκει σε σώμα που ονομάζεται ‘γκρίζο σώμα’. Στους υπολογισμούς της μηχανικής φωτιάς οι επιφάνειες θεωρούνται ότι ανήκουν σε ‘γκρίζα’ σώματα, είναι ισοθερμικές και η εκπομπή ακτινοβολίας ισούται με την απορροφητικότητα όπως ορίζει η θεωρία το Kirchhoff.

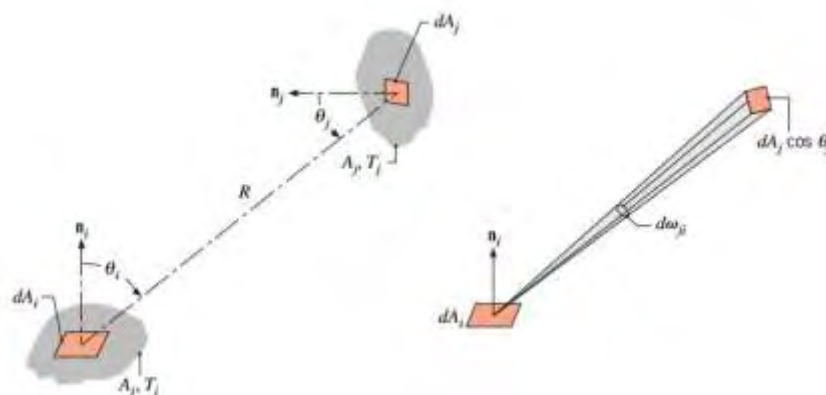
Ως αποτέλεσμα της συνεχούς εκπομπής ακτινοβολίας των σωμάτων με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός, κάθε σώμα αποτελεί συνεχώς δέκτης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που εκπέμπει μια επιφάνεια δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία της, το μήκος κύματος και τη διεύθυνση εκπομπής. Ειδικότερα στο πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ δύο ή περισσότερων επιφανειών, ο σχετικός προσανατολισμός τους λαμβάνεται υπόψη με τους συντελεστές θέας. Ως συντελεστής θέας (F_{ij}) μιας επιφάνειας j από μια επιφάνεια i ορίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια i και καταλήγει στην επιφάνεια j . Ελάχιστη τιμή του συντελεστή θέας είναι το μηδέν όταν επιφάνειες δεν έχουν άμεση θέα μεταξύ τους, ενώ μέγιστη τιμή το 1 όταν η επιφάνεια j περικλείει πλήρως την επιφάνεια i . Η τελευταία τιμή εμφανίζεται, για παράδειγμα, στη περίπτωση των ομόκεντρων κύκλων. Ειδικοί πίνακες έχουν προσδιοριστεί με συντελεστές θέας για διάφορους χωρικούς σχηματισμούς σωμάτων.



Εικόνα 8 Συντελεστές θέας για ομόκεντρους κύκλους (Bergman κ.ά.,2011, σ.865)

Αναλυτικά ο συντελεστής θέας F_{ij} υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2.23)$$



Εικόνα 9 Συντελεστές θέας δύο επιφανειών (Bergman κ.ά.,2011, σ.862)

Χρησιμοποιώντας όσα περιγράφηκαν παραπάνω μπορεί να προσδιοριστεί η καθαρή ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας που δέχεται οποιαδήποτε επιφάνεια σε ένα σύστημα αποκλειστικά μαύρων σωμάτων. Θεωρώντας N επιφάνειες διαφορετικής θερμοκρασίας, η καθαρή ροή ακτινοβολίας από επιφάνεια i εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τις υπόλοιπες επιφάνειες δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{q}_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.24)$$

Όταν ένα τρίτο σώμα παρεμβάλλεται μεταξύ δύο επιφανειών μειώνεται η καθαρή ακτινοβολία που μεταφέρεται μεταξύ των τελευταίων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται 'φαινόμενο σκίασης' και μεταβάλλει τον τρόπο προσδιορισμού των συντελεστών θέας. Το επιφανειακό ολοκλήρωμα της σχέσης 2.23 μετατρέπεται σε επικαμπύλιο με χρήση του θεωρήματος του Stokes. Επιφανειακή ολοκλήρωση πραγματοποιείται για την επιφάνεια που εκπέμπει, ενώ για αυτήν που λειτουργεί ως δέκτης οι συντελεστές υπολογίζονται με επίλυση του επικαμπύλιου ολοκληρώματος. Η μεθοδολογία αυτή προτείνεται κυρίως για την περίπτωση που στην ακτινοβολία με φαινόμενο σκίασης συμμετέχουν ορθογώνιες επιφάνειες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας κάτω από υψηλές θερμοκρασίες η ακτινοβολία αποτελεί σημαντικό ποσοστό της μεταφερόμενης ενέργειας, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες το ποσοστό αυτό θεωρείται αμελητέο σε σύγκριση με την αγωγή και τη συναγωγή (Bergman κ.ά.,2011).

3 Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών έναντι Πυρκαγιάς

Ως αντοχή έναντι φωτιάς μιας κατασκευής ή μέρους αυτής ορίζεται η ικανότητα της να διατηρεί την ικανότητα παράλειψης φορτίων υπό την έκθεση σε αυτή ή να δρα ως εμπόδιο για την εξάπλωσή της. Στην πλειοψηφία των κανονισμών εκφράζεται σε μονάδες χρόνου και ως παράγοντες αξιολόγησής της, ανάμεσα σε άλλους, ορίζονται οι διαστάσεις, η χρήση της κατασκευής και τα θερμικά φορτία. Προτιμάται η χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασιών φωτιάς ISO 834 για τον προσδιορισμό της απόκρισης της κατασκευής. Ωστόσο το γεγονός ότι η συγκεκριμένη καμπύλη συνεχίζει να αυξάνεται με το χρόνο, σε αντίθεση με την πραγματική που ακολουθεί πτωτική πορεία μετά από κάποια μέγιστη τιμή, οδηγεί σε λιγότερο ακριβή αποτελέσματα.

Η εντατική έρευνα των τελευταίων χρόνων στον χώρο των μεταλλικών κατασκευών υπό την επίρεια φωτιάς θέτει αμφισβητήσεις στην μέχρι πρότινος κλασική προσέγγιση του κανονισμού, της υπόθεσης δηλαδή ότι το μεταλλικό μέλος χρειάζεται πυροπροστασία και το πάχος αυτής καθορίζεται από τα πειράματα αντοχής στην πρότυπη φωτιά (Wang, 2002). Σε αντίθεση, μία προσέγγιση που στηρίζεται στην ρεαλιστική απόκριση της κατασκευής αποκτά αυξανόμενη εγκυρότητα. Μια ουσιαστική διαφορά των δύο προσεγγίσεων είναι ότι στην προτεινόμενη από τον κανονισμό διαδικασία η μέγιστη θερμοκρασία του χάλυβα προσδιορίζεται στους 550°C όταν εκτίθεται στην πρότυπη φωτιά, θερμοκρασία που θεωρείται επικίνδυνη ενώ οι προηγούμενες ασφαλείς. Συνεπώς αυτή η προσέγγιση αγνοεί τις ειδικές συνθήκες της κατασκευής όπως ο τύπος της φωτιάς που είναι πιο πιθανό να πλήξει την κατασκευή, τις επιπτώσεις σε αυτήν την έκθεση, τις συνθήκες φόρτισης και την σημαντικότητα των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων διαφορετικών στατικών στοιχείων. Οι παραπάνω παράγοντες λαμβάνονται υπόψη στην βάση της πραγματικής απόκρισης προσέγγιση.

Αυτή η μετάβαση στην προσέγγιση του προβλήματος της φωτιάς σε μεταλλικές κατασκευές και η ανάγκη για ορθότερη λύση ενθαρρύνεται τόσο από τον εμπορικό όσο και από τον ερευνητικό κόσμο. Το κόστος της πυροπροστασίας εκτιμάται στο 30% της συνολικής μεταλλικής κατασκευής, καθιστώντας τον χάλυβα λιγότερο ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα υλικά κατασκευής που παρουσιάζουν καλύτερα πυροπροστατευτικά χαρακτηριστικά, όπως το σκυρόδεμα.

Επιπρόσθετα, η απόκριση των χαλύβδινων κατασκευών υπό συνθήκες φωτιάς αποτελεί πεδίο χωρίς επαρκή και εκτενή έρευνα ωθώντας επιστήμονες και ερευνητές στον στρέψουν την προσοχή τους στο συγκεκριμένο πεδίο.

3.1 Μέτρα Πυροπροστασίας

Η πρώτη ενέργεια κατά της καταστροφικής δράσης μιας πυρκαγιάς στον σχεδιασμό αφορά τον περιορισμό της από εξάπλωση σε υπόλοιπους χώρους του κτιρίου. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό είναι κρίσιμης σημασίας ο σχεδιασμός με στόχο την στατική ακεραιότητα του κτιρίου μέχρι την πλήρη εκκένωση. Συνεπώς μια αποτελεσματική στρατηγική εναντίον πυρκαγιάς περιλαμβάνει μέτρα καθυστέρησης της εξάπλωσης της φωτιάς, μέτρα προστασίας των ανθρώπων στο εσωτερικό του κτιρίου και μέτρα απομόνωσης της φωτιάς σε συγκεκριμένους χώρους. Η καθυστέρηση μπορεί να επιτευχθεί με χρήση πυροπροστασίας όπως το SFRM, με χρήση ψεκαστών νερού και με χρήση μη εύφλεκτων υλικών κατασκευής.

Σημαντική, επίσης, κρίνεται η ύπαρξη διόδου εξόδου των ανθρώπων και εύκολης πρόσβασης της πυροσβεστικής και συστήματα εξαερισμού ικανά να ελαχιστοποιήσουν την εξάπλωση καπνού και θερμών αερίων.

Η πυροπροστασία των κτιρίων αποτελείται από ένα συνδυασμό παθητικής και ενεργητικής προστασίας. Η παθητική στοχεύει στην παροχή επαρκούς αντοχής έναντι φωτιάς ώστε να διατηρηθεί η στατική ακεραιότητα του κτιρίου. Αυτό μεταφράζεται σε επιλογή των κατάλληλων υλικών κατασκευής, διαστάσεων των μελών και πυράντοχων υλικών για την εκάστοτη χρήση κατασκευής. Η ενεργητική πυροπροστασία ενεργοποιείται είτε με ανθρώπινη παρέμβαση είτε με ειδικό αυτοματισμό και περιλαμβάνει ανάμεσα σε άλλα συναγερμούς φωτιάς και ψεκαστήρες νερού.

Στον συμβατικό τρόπο πυροπροστασίας ολόκληρη η διατομή της σύμμικτης κατασκευής προστατεύεται. Ο Wang (1998), λαμβάνοντας υπόψη ότι σε μια σύμμικτη δοκό το πιο κρίσιμο τμήμα είναι το κάτω πέλμα, διεξήγαγε έρευνα προτείνοντας την επένδυση με πυροπροστασία μόνο του κάτω πέλματος και του $\frac{1}{4}$ του κορμού. Απέδειξε ότι η μερική πυροπροστασία μπορεί να αποδειχθεί αποτελεσματική μέθοδος τόσο για την παροχή αντοχής σε φωτιά όσο και για τη μείωση του συνολικού κόστους που δαπανάται για αυτό τον σκοπό.

Η επιπρόσθετη θερμότητα που οδηγείται στο κάτω πέλμα από το μη προστατευμένο μέρος του κορμού απαιτεί πυροπροστασία μεγαλύτερου πάχους, διατηρώντας ωστόσο τον συνολικό όγκο του πυροπροστατευτικού υλικού σε χαμηλότερα επίπεδα από την πλήρως προστατευμένη διατομή. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται σημαντικά χρηματικά κεφάλαια σχετικά με το κόστος του υλικού αλλά και των εργασιών εγκατάστασής του. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για πυροπροστασία τύπου SFRM.

3.2 Πυρκαγιά σε Κλειστό Χώρο

Στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο η καύση περιορίζεται κοντά στο σημείο ανάφλεξης και η θερμοκρασία των αερίων καύσης είναι μικρή. Οι σοβαρότεροι κίνδυνοι προέρχονται από τη μειωμένη ορατότητα εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας καπνού και στην τοξικότητα των χημικών που παράγονται από τις καύσεις. Σε αυτό το σημείο η ακεραιότητα της κατασκευής δεν πλήττεται. Είναι σε μετέπειτα στάδια υψηλών θερμοκρασιών αερίων και καύσης όλων των εύφλεκτων υλικών της κατασκευής που τίθεται το ερώτημα απώλειας της ευστάθειας. Αυτό το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς συνοδεύεται με την απότομη εξάπλωσή της, παίρνοντας τον χαρακτηρισμό post-flashover πυρκαγιά.

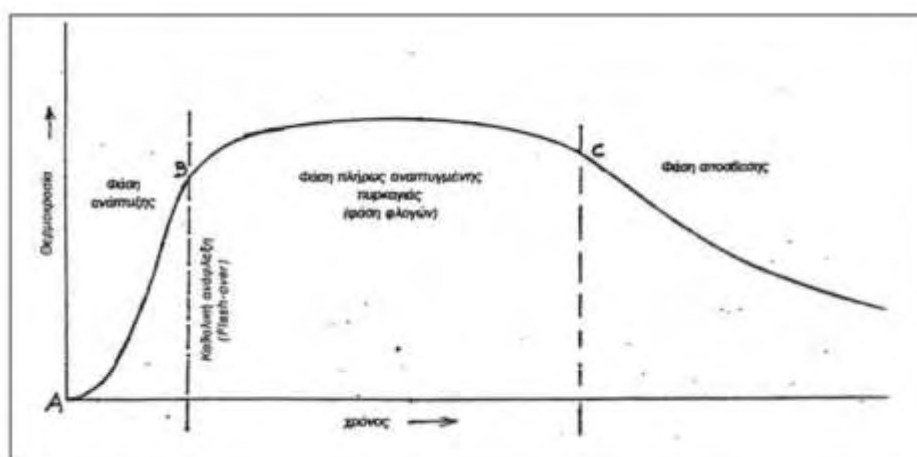
Η ανάπτυξη φωτιάς σε κλειστό χώρο μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια (Εικόνα 10):

1. *Επέκταση της φωτιάς*: Η επέκταση της φωτιάς ξεκινάει με την ανάφλεξη του πρώτου αντικειμένου και περιορίζεται σε τοπική δράση. Η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ανομοιόμορφη και οι κίνδυνοι οφείλονται στην παρουσία μεγάλων ποσοτήτων καπνού και χημικών. Σε αυτό το στάδιο, αν η φωτιά καταπολεμιστεί έγκαιρα με μέσα πυρόσβεσης είναι εφικτή η σημαντική ελαχιστοποίηση των καταστροφικών της συνεπειών. Περιορισμένη ύπαρξη οξυγόνου στον χώρο καθώς και απουσία εύφλεκτων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε τερματισμό της επέκτασής της. Στον δομικό σχεδιασμό έναντι φωτιάς γίνεται η υπόθεση ότι η φωτιά θα επεκταθεί και θερμές μάζες αερίων θα δημιουργηθούν στον χώρο από την καύση εύφλεκτων υλικών. Η

ακτινοβολία της φλόγας και η παρουσία διαρκώς θερμότερου καπνού επιταχύνουν τον ρυθμό καύσης της φωτιάς . Το τελευταίο αντιπροσωπεύεται από τον αύξοντα κλάδο στο διάγραμμα χρόνου-θερμοκρασίας.

Ο κλάδος αυτός σημειώνει μια απότομη αύξηση, γνωστή ως flashover, όταν όλα τα εύφλεκτα υλικά του χώρου εξαιτίας της υψηλής ακτινοβολίας αναφλέγονται ταυτόχρονα, εντείνοντας την δράση της φωτιάς. Το στάδιο πριν το flashover ονομάζεται pre-flashover και αυτό που ακολουθεί post-flashover. Η μετάβαση από το ένα στο άλλο γίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα και συνοδεύεται από έντονη αύξηση της θερμοκρασίας.

2. *Σταθερή καύση:* Στο στάδιο που ακολουθεί το flashover, η αύξηση της θερμοκρασίας της φωτιάς χαρακτηρίζεται από σταθερό ρυθμό . Τα εύφλεκτα υλικά έχουν ήδη καεί και η επέκταση της φωτιάς πλέον εξαρτάται από την παροχή φρέσκου αέρα στον χώρο. Ο ρυθμός καύσης αποκτά τη μέγιστη τιμή του και συνεπώς οι καταστροφικές επιπτώσεις στην κατασκευή έχουν μεγιστοποιηθεί.
3. *Φθίνουσα δράση:* Τα τελευταία εύφλεκτα υλικά στον χώρο ανάπτυξης πυρκαγιάς έχουν καεί πλήρως και συνεπώς η θερμοκρασία της φωτιάς αρχίζει να ακολουθεί ένα φθίνοντα κλάδο έως ότου εξασθενήσει εντελώς.



Εικόνα 10 Στάδια ανάπτυξης πυρκαγιάς (n.d.). Ανακτήθηκε από <http://dspace.lib.ntua.gr>

3.3 Σχεδιασμός βάσει Κανονισμών

Οι κυριότερες πηγές πληροφορίας για τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών έναντι φωτιάς είναι ο British Standard BS 5950 Part8 και ο Ευρωκώδικας 3 Μέρος 1.2. Οι δυο κανονισμοί παρουσιάζουν διαφορές στις μεθόδους που προτείνουν.

Τα τρία κριτήρια αστοχίας έναντι φωτιάς που προτείνουν οι κανονισμοί είναι:

- Αστοχία στατικού συστήματος (Structural Failure)
- Αστοχία θερμομόνωσης (Insulation Failure)
- Αστοχία ακεραιότητας υλικού(Integrity failure)

Και τα τρία κριτήρια αστοχίας με την μορφή που συνιστούν πρέπει να αποφεύγονται.

Αστοχία στατικού συστήματος μπορεί να επέλθει είτε από αστοχία ενός μέλους, είτε από αστοχία στον κόμβο μεταξύ διαφορετικών μελών λόγω μεγάλων παραμορφώσεων. Οι βασικές αρχές αποφυγής αυτής της μορφής αστοχίας συνιστούν τον προσδιορισμό ορίων μέγιστων παραμορφώσεων και την εξασφάλιση συνέχειας στους κόμβους. Η αστοχία ενός μέλους της κατασκευής δεν συνεπάγεται κατάρρευση της κατασκευής αλλά η τελευταία εξαρτάται από την ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών ανάληψης φορτίου και της επάρκειας τους.

Η αστοχία της θερμομόνωσης σχετίζεται με την θερμική απόκριση και λαμβάνει χώρα μετά από μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, συνεισφέροντας στην περεταίρω διάδοση της φωτιάς.

Η αστοχία της ακεραιότητας του υλικού οδηγεί στη διάδοση της φωτιάς μέσα από κενά που δημιουργούνται από την καύση του.

Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής από δομικό χάλυβα έναντι πυρκαγιάς πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικές με τις βασικές αρχές του σχεδιασμού, τις μηχανικές και θερμικές δράσεις, τις σχέσεις για τον καθορισμό της θερμοκρασίας της κατασκευής στο χρονικό διάστημα δράσης της φωτιάς και τους κανόνες για τον καθορισμό της στατικής ευστάθειας

Οι παραπάνω πληροφορίες αποκτώνται από τα τρία στάδια σχεδιασμού μιας μεταλλικής κατασκευής σε πυρκαγιά:

1. Προσδιορίζονται οι συνθήκες της φωτιάς στην οποία υποβάλλεται το μέλος. Οι συνθήκες αυτές καθορίζουν την σχέση θερμοκρασίας-χρόνου της φωτιάς που δίνει το θερμικό φορτίο που επιβάλλεται στην κατασκευή.
2. Υπολογίζονται οι θερμοκρασίες της κατασκευής χρησιμοποιώντας τις συνθήκες φωτιάς του πρώτου βήματος
3. Σύμφωνα με τις θερμοκρασίες του δεύτερου βήματος εκτιμάται η απόκριση της μεταλλικής κατασκευής και εξετάζεται αν αυτή πληροί τις προϋποθέσεις για την απαιτούμενη αντοχή στην φωτιά.

Για τον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς, σύμφωνα με τους κανονισμούς, χρησιμοποιούνται μειωμένοι συντελεστές ασφαλείας παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό για λειτουργικότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι η φωτιά είναι τυχαϊκό γεγονός και σπάνια λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με ακραία φόρτιση της κατασκευής.

3.4 Πειραματική Διαδικασία

Ο πιο συνήθης τρόπος αξιολόγησης της αντοχής έναντι φωτιάς ενός μέλους κατασκευής είναι μέσω κατάλληλων εργαστηριακών πειραματικών διαδικασιών. Αυτές οι πειραματικές τεχνικές εξετάζουν τρία κριτήρια: την δυνατότητα παραλαβής φορτίων, την ακεραιότητα και στην περίπτωση των εμποδίων εξάπλωσης φωτιάς την αύξηση της θερμοκρασίας στα μη εκτεθειμένα σημεία.

Είναι σημαντική η μελέτη πειραματικών διαδικασιών γιατί δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τις διάφορες μορφές απόκρισης των κατασκευών στην φωτιά. Βοηθούν στον προσδιορισμό των ελλείψεων σε επίπεδο γνώσης, ελλείψεις που μπορούν να καλυφθούν με περαιτέρω έρευνα και πειραματικά μοντέλα.

Επίσης τα αποτελέσματα τους αποτελούν αξιόπιστα δεδομένα αναφοράς, για την σύγκριση με τις όλο και πιο δημοφιλείς υπολογιστικές και αναλυτικές μεθόδους.

Τα πειράματα κατασκευών υπό την επίδραση φωτιάς διεξάγονται είτε σε σταθερές συνθήκες είτε σε μεταβλητές συνθήκες πειράματος. Στα πειράματα σταθερής κατάστασης η θερμοκρασία της κατασκευής αυξάνεται στο προκαθορισμένο επίπεδο και διατηρείται σταθερή, ενώ στην συνέχεια εφαρμόζονται τα φορτία έως ότου επέλθει η αστοχία. Στις μεταβλητές συνθήκες πρώτα εφαρμόζονται οι φορτίσεις και κρατούνται σταθερές όσο η κατασκευή υπόκειται σε αυξανόμενες θερμοκρασίες φωτιάς. Όταν ικανοποιείται κάποιο από τα κριτήρια αστοχίας το πείραμα τερματίζεται. Αν η στατική συμπεριφορά της κατασκευής δεν εξαρτάται από τον ρυθμό αύξησης θερμότητας ή την χρονοιστορία της φόρτισης τότε και οι δύο μέθοδοι δίνουν τα ίδια αποτελέσματα (Wang, 2002).

3.4.1 Πειράματα Αντοχής σε Πρότυπη Φωτιά

Τα πειράματα αντοχής σε πρότυπη φωτιά πραγματοποιούνται για την εκτίμηση και ταξινόμηση της αντοχής σε φωτιά ενός απλώς στηριζόμενου στατικού μέλους μιας κατασκευής και ευθύνονται για το σημαντικότερο ποσοστό της σύγχρονης πληροφορίας πάνω στον χώρο της πυροπροστασίας. Η γνώση αυτή της μεθοδολογίας κρίνεται σημαντική για την ορθότερη κατανόηση της συμπεριφοράς των μεταλλικών κατασκευών σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες πυρκαγιάς.

Μεθοδολογία: Τα πειράματα αντοχής πραγματοποιούνται σε διεθνές επίπεδο με βάση την πρότυπη φωτιά ISO 834. Το πείραμα διεξάγεται σε φούρνο θερμαινόμενο με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Παρότι στην πράξη παρατηρείται ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του, η μέση θερμοκρασία παρατηρήσεων με ειδικά θερμόμετρα σε διάφορα σημεία του χρησιμοποιείται ως ενιαία θερμοκρασία αερίου. Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας προσδιορίζεται από την πρότυπη φωτιά:

$$T_{fi} = 345 \log(8t + 1) + T_a \quad (3.1), \text{όπου}$$

T_{fi} : θερμοκρασία της φωτιάς σε [°C]

T_a : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε °C

t : ο χρόνος [min]

Η διάταξη του πειράματος είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη ανάλογα με το αν το εξεταζόμενο δείγμα είναι δοκός, πλάκα ή υποστύλωμα, τοίχος. Συνήθεις διαστάσεις είναι 4m οριζοντίως ή 3m καθέτως.

Τα αποτελέσματα κρίνονται με βάση την ικανότητα ανάληψης φορτίων, την μονωτική συμπεριφορά και την δομική ακεραιότητα του δείγματος. Η μονωτική συμπεριφορά προσδιορίζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας στην μη εκτεθειμένη στην φωτιά επιφάνεια της διάταξης, ενώ η ακεραιότητα καθορίζεται από την εξάπλωση της φωτιάς μέσα από τυχόν κενά του δείγματος. Ωστόσο το σημαντικότερο κριτήριο σε φέροντα στοιχεία είναι η ικανότητα ανάληψης φορτίων. Αδυναμία ανάληψης σημειώνεται όταν το εξεταζόμενο δείγμα δεν μπορεί να αντέξει στα φορτία του πειράματος. Για οριζόντιες δοκούς, αδυναμία ανάληψης φορτίων ορίζεται, επίσης, η ικανοποίηση ενός εκ των δύο;

- η ύπαρξη αποκλίσεων μεγαλύτερων του $L/20$ για άνοιγμα δείγματος L (mm)
- ρυθμού απόκλισης (mm/min) μεγαλύτερου του $\frac{L^2}{9000d}$ για πάχος δείγματος d (mm)

Παρότι τα πειράματα αντοχής σε πρότυπη φωτιά αποτελούν εύκολο μέσο προσδιορισμού αντοχής ενός μέλους σε υψηλές θερμοκρασίες δεν συνιστούν τόσο αποτελεσματικό εργαλείο κατανόησης της απόκρισης κάτω από τέτοιες συνθήκες για τους εξής λόγους (Franssen κ.ά.,2009):

- Υπάρχουν πολλοί τύποι φωτιάς και η πρότυπη είναι μόνο μία εξ'αυτών
- Δεν μπορούν να αξιολογηθούν οι δομικές αλληλεπιδράσεις γιατί τέτοια πειράματα διεξάγονται σε μεμονωμένα στοιχεία και όχι σε σχηματισμό μελών
- Η διάταξη του πειράματος με τον φούρνο χρησιμοποιείται για πολλαπλά πειράματα προκαλώντας του φθορά που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Επίσης οι καθορισμένες διαστάσεις του περιορίζουν την εξέταση δειγμάτων ποικίλου μεγέθους.
- Αδυναμία προσδιορισμού των πραγματικών συνοριακών συνθηκών του πειράματος που πιθανόν να διαφέρει από τις απλές στηρίξεις που είχαν αρχικά προγραμματιστεί. Επιπροσθέτως, ο περιορισμένος αριθμός εφικτών στηρίξεων αποτελεί μειονέκτημα χρήσης τέτοιων πειραμάτων.

3.5 Σχεδιασμός έναντι Πυρκαγιάς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα

Ο Ευρωκώδικας είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για σχεδιασμό κατασκευών σε ένα εύρος συνθηκών φωτιάς, εξαιτίας της μεθόδου εκτίμησης της σχέσης θερμοκρασίας χρόνου τέτοιων συνθηκών

Σύμφωνα με τις διατάξεις του EC3, η μειωμένη αντοχή και δυσκαμψία του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες της φωτιάς υπολογίζονται και συγκρίνονται με το επιβαλλόμενο φορτίο. Αν τα μηχανικά χαρακτηριστικά επαρκούν ο σχεδιασμός ικανοποιεί τα κριτήρια ασφαλείας.

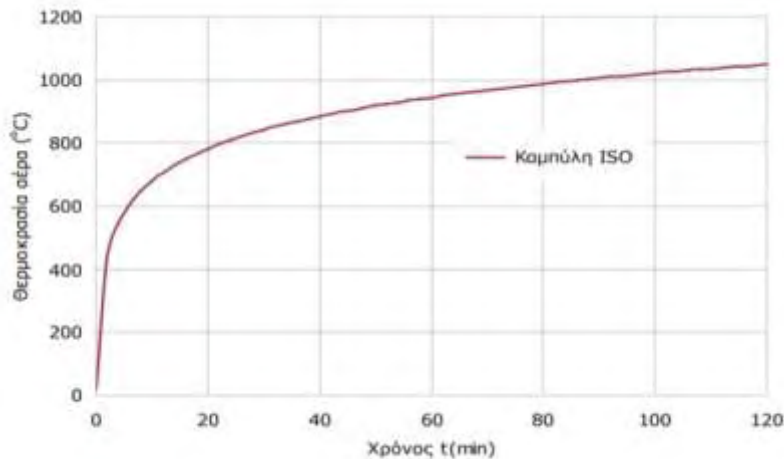
3.5.1 Σχέσεις θερμοκρασίας-χρόνου Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-2

Στα πλαίσια του κανονισμού η δράση μιας πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς περιγράφεται με την εξίσωση εξέλιξης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα χώρου με τον χρόνο. Η βέλτιστη απεικόνιση αυτής της εξίσωσης είναι με μία καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου.

Οι δοθείσες ονομαστικές καμπύλες του Ευρωκώδικα 1 Μέρος 1-2 είναι τρεις:

- Η πρότυπη καμπύλη (ή συνηθέστερα ISO 834) που χρησιμοποιείται για την περιγραφή πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς σε έναν χώρο:
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3.2)$$
- Η εξωτερική καμπύλη φωτιάς που χρησιμοποιείται για τη μελέτη εξωτερικών τοίχων εκτεθειμένων στον καπνό της φωτιάς από το εσωτερικό του δωματίου ή από παρακείμενο δωμάτιο:
$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (3.3)$$
- Η καμπύλη υδρογονάνθρακα αναφερόμενη σε φωτιά υδρογονάνθρακα:
$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (3.4)$$

Στις παραπάνω καμπύλες θ_g είναι η θερμοκρασία των αερίων στο δωμάτιο ή κοντά στο χαλύβδινο μέλος σε °C και t ο χρόνος εκφρασμένος σε λεπτά.



Εικόνα 11 Καμπύλη ISO 834 Ευρωκώδικα. (n.d.) Ανακτήθηκε από <http://dspace.lib.ntua.gr>

3.5.2 Σχεδιασμός βάσει Πρότυπης Καμπύλης ISO 834

Ο σχεδιασμός με βάση την πρότυπη φωτιά, παρά τους περιορισμούς που θέτει, παρουσιάζει και πλεονεκτήματα έναντι ρεαλιστικότερων σχέσεων θερμοκρασίας χρόνου (Purkiss, 1996):

- Υπάρχει αρκετός όγκος αποτελεσμάτων πειραμάτων αντοχής σε πυρκαγιά που στηρίζονται στη χρήση της καμπύλης ISO 834 σε αντίθεση με ρεαλιστικότερες φωτιές
- Η χρήση της τυπικής καμπύλης τάσσεται υπέρ της ασφάλειας. Αυτό το αποδεικνύει η ικανοποιητική απόκριση των κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς που έχουν σχεδιαστεί με βάση την ISO 834
- Αποτελεί εύχρηστο εργαλείο σχεδίασης έναντι πυρκαγιάς εξαιτίας της μονοκλαδικής σχέσης θερμοκρασίας-χρόνου που παρουσιάζει

Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει στην προσπάθεια σύνδεσης της τυπικής φωτιάς με ρεαλιστικότερες μέσω του ισοδύναμου χρόνου έκθεσης στη φωτιά. Ισοδύναμος χρόνος μιας πλήρους καύσης (t_{ed}) είναι ο χρόνος έκθεσης σε μια πειραματική δοκιμή φωτιάς ακολουθώντας την ISO 834 που θα οδηγούσε σε ισοδύναμο αντίκτυπο στην κατασκευή υπό συνθήκες ρεαλιστικής πυρκαγιάς. Ο Ευρωκώδικας 1 περιέχει μέθοδο που αποδίδει τον ισοδύναμο χρόνο με χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας χρόνου.

Συγκεκριμένα, με εξίσωση που λαμβάνει υπόψη το θερμικό φορτίο σχεδιασμού, τον τύπο των ανοιγμάτων και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών προσδιορίζεται η διάρκεια της τυπικής φωτιάς που θα είχε το ίδιο αντίκτυπο σε μια πραγματική φωτιά κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Η εξίσωση προσδιορισμού του ισοδύναμου χρόνου είναι:

$$t_{ed} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \quad (3.5), \text{ όπου}$$

$q_{f,d}$: πυκνότητα του θερμικού φορτίου σχεδιασμού

k_b : συντελεστής μετατροπής

w_f : συντελεστής αερισμού του χώρου

k_c : συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της διατομής

Στο παράρτημα Α του Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-2 δίνονται οι εξισώσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό της καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου με βάση τις παραμέτρους κάθε ειδικής περίπτωσης. Το παραμετρικό αυτό υπολογιστικό μοντέλο έχει ισχύ για χώρους φωτιάς μέχρι $500m^2$ εμβαδόν και 4m μέγιστο ύψος χωρίς ανοίγματα στην οροφή και στηρίζεται στην υπόθεση ότι όλα τα εύφλεκτα υλικά του χώρου έχουν καταναλωθεί.

Χρήσιμα είναι και τα μοντέλα πολλαπλών ζωνών που επιτρέπουν την ανάλυση του χώρου φωτιάς σε ζώνες με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες και όχι ενιαίες όπως στα προηγούμενα.

3.5.3 Τοπικές Πυρκαγιές

Τοπική πυρκαγιά καλείται το συμβάν εκδήλωσης φωτιάς με μικρό ενδεχόμενο ξαφνικής και έντονης πλήρους επέκτασης της (*flashover*), εξαιτίας της δράσης της σε μεγάλους χώρους και την αδυναμία της να συμπεριλάβει όλα τα εύφλεκτα υλικά κατασκευής. Συνεπώς τέτοιες πυρκαγιές αναπτύσσονται σε περιορισμένη έκταση. Η θερμοκρασία της φλόγας, του καπνού και του περιβάλλοντα αερίου δεν είναι ενιαία και πρέπει να καθοριστούν ξεχωριστά. Επίσης, ανάλογα με το μέγεθος της πυρκαγιάς και τον χώρο ανάπτυξής της είναι πιθανό ή όχι να επεκταθεί μέχρι την οροφή.

Σε μια τοπική φωτιά που δεν επηρεάζει την οροφή το μήκος της φλόγας L_f υπολογίζεται σε m από τη σχέση φλόγας-ύψους του Heskestad:

$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D \quad (3.6), \text{ όπου}$$

Q: ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας της φωτιάς [W]

D: το χαρακτηριστικό μήκος της φωτιάς [m]

Είναι εμφανές ότι για μικρές τιμές του Q και μεγάλες του D το ύψος φωτιάς βγαίνει αρνητικό, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η περιοχή D πρέπει να διαχωριστεί σε μικρότερα τμήματα και η εξίσωση να εφαρμοστεί σε κάθε τμήμα ξεχωριστά.

Στον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-2 η εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα της πυρκαγιάς δίνεται στην περίπτωση που αυτή δεν επηρεάζει την οροφή του πυροδιαμερίσματος:

$$\theta_z = 20 + 0.25Q_c^{\frac{2}{3}}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad , \text{ όπου}$$

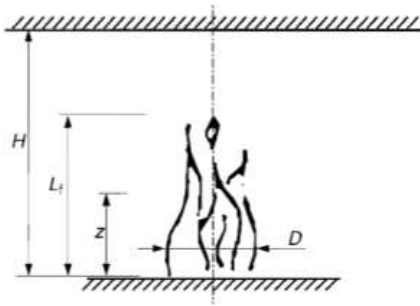
Q_c : ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας λόγω συναγωγής [W]

z: το ύψος κατά μήκος του άξονα της φλόγας

H: η απόσταση μεταξύ της εστίας της πυρκαγιάς και της οροφής του πυροδιαμερίσματος

$z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5}$: το ύψος αναφοράς

Τις περισσότερες φορές μπορεί να αγνοηθεί το αντίκτυπο της φωτιάς στην κατασκευή της οροφής εφόσον η φλόγα δεν φτάνει σε τέτοιο ύψος.



Εικόνα 12 Τοπική πυρκαγιά που δεν επηρεάζει την οροφή (British Standards Institution, 2002, σ.41)

Στην περίπτωση μιας τοπικής πυρκαγιάς με τις φλόγες να επηρεάζουν την οροφή του χώρου, η συνολική ροή θερμότητας \dot{h} [$\frac{W}{m^2}$] που δέχεται η κατασκευή στο επίπεδο της οροφής δίνεται ως συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων και του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας:

$$\dot{h} = 100000 \quad \text{αν } y \leq 0.3$$

$$\dot{h} = \text{από } 136300 \text{ μέχρι } 121000y \quad \text{αν } 0.3 < y < 1$$

$$\dot{h} = 15000y^{-3.7} \quad \text{αν } y > 1$$

$$\text{Όπου } y = \frac{r+H+z'}{L_h+H+z'}$$

r : η οριζόντια απόσταση [m] μεταξύ του κάθετου άξονα της φωτιάς και του σημείου της οροφής στο οποίο υπολογίζεται η ροή θερμότητας

H : η απόσταση [m] της εστίας της φωτιάς και της οροφής

$$L_h = (2.9H\dot{Q}_H^{0.33}) - H : \text{το οριζόντιο μήκος φλόγας}$$

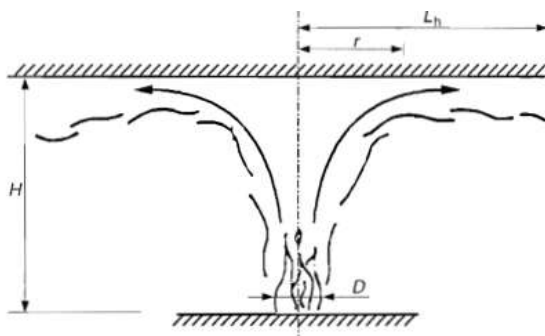
$$\dot{Q}_H = \frac{Q}{1.11 \cdot 10^6 H^{2.5}} : \text{ο αδιάστατος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας}$$

z' : η κατακόρυφη θέση της πραγματικής εστίας φωτιάς που δίνεται από τα παρακάτω

$$z' = 2.4D(\dot{Q}_D^{\frac{2}{5}} - \dot{Q}_D^{\frac{2}{3}}) \quad \text{όταν } \dot{Q}_D < 1$$

$$z' = 2.4D(1 - \dot{Q}_D^{\frac{2}{5}}) \quad \text{όταν } \dot{Q}_D \geq 1$$

$$\dot{Q}_D = \frac{Q}{1.11 \cdot 10^6 \cdot D^{2.5}}$$



Εικόνα 13 Τοπική πυρκαγιά που επηρεάζει την οροφή (British Standards Institution, 2002, σ.42)

Η καθαρή ροή θερμότητας που δέχεται ένα μέλος είναι η διαφορά της θερμότητας που δέχεται με αυτήν που χάνει εκπέμποντας τη στο περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - a_c(\theta_m - 20) - \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma[(\theta_m^4 + 273^4) - 293^4] \quad (3.7), \text{όπου}$$

\dot{h} : η ροή θερμότητας που δέχεται η κατασκευή στο επίπεδο της οροφής

Φ : συντελεστής διαμόρφωσης

ε_m : ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του μέλους

ε_f : ο συντελεστής εκπομπής της φωτιάς

σ : η σταθερά Stephan Boltzmann ίση με $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

a_c : ο συντελεστής συναγωγής

Στην περίπτωση πολλαπλών πηγών τοπικής φωτιάς η καθαρή ροή θερμότητας υπολογίζεται για την κάθε πηγή με την εξίσωση για επιρροή στην οροφή και προστίθενται. Η συνολική καθαρή ροή πρέπει να είναι μικρότερη των $100 \frac{kW}{m^2}$. Το μοντέλο της τοπικής πυρκαγιάς με την οροφή να πλήττεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για υπολογισμό μελών που βρίσκονται ελαφρώς χαμηλότερα της οροφής, δίνοντας συντηρητικά αποτελέσματα. Ουσιαστικά αντικαθίσταται η κατακόρυφη απόσταση πηγής φωτιάς-οροφής με την κατακόρυφη απόσταση πηγής φωτιάς-μέλους.

3.5.4 Μη Πυροπροστατευμένη Εσωτερική Μεταλλική Κατασκευή

Ο Ευρωκώδικας 3 Μέρος 1.2 ορίζει την αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα δεδομένο χρονικό βήμα, με τη θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας στη μη πυροπροστατευμένη διατομή, από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\theta_{a,t} = 0.9 K_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (3.8), \text{όπου}$$

K_{sh} : ο συντελεστής διόρθωσης για το φαινόμενο σκίασης

A_m : το εμβαδόν της επιφάνειας του μέλους ανά μονάδα μήκους [m^2]

V : ο όγκος του μέλους ανά μονάδα μήκους [m^3]

A_m/V : ο συντελεστής διατομής

c_a : ειδική θερμότητα του χάλυβα [$\frac{J}{kgK}$]

ρ_a : πυκνότητα μάζας του χάλυβα [$\frac{kg}{m^3}$]

\dot{h}_{net} : τιμή σχεδιασμού της καθαρής ροής θερμότητας ανά μονάδα εμβαδού

Δt : το χρονικό βήμα

Η ειδική θερμότητα του χάλυβα υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του χάλυβα. Ο συντελεστής διόρθωσης για το φαινόμενο σκίασης συχνά παραλείπεται στα πειράματα φούρνου επειδή η μεταλλική διατομή θερμαίνεται κυρίως από την ακτινοβολία των τοιχωμάτων του φούρνου και της φλόγας του καυστήρα. Αυτό μεταφράζεται στο ότι η θερμικές ενέργεια που δέχεται η επιφάνεια της διατομής ταξιδεύει στην μικρότερη δυνατή περιοχή.

Ορθότερα θα έπρεπε να επιβάλλεται μόνο στο κομμάτι της ροής θερμότητας που αφορά την ακτινοβολία και όχι τη συνολική (Franssen κ.ά., 2009).

Η εξίσωση (3.8) μπορεί να μεταφερθεί στην μορφή:

$$\dot{h}_{net} K_{sh} A_m \Delta t = \Delta \theta_{\alpha,t} c_a \rho_a V \quad (3.9)$$

Αυτή η μορφή εκφράζει την διατήρηση της ενέργειας μεταξύ της ποσότητας που εισέρχεται στην διατομή και της ποσότητας που χρησιμοποιείται για την μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα, και συνεπώς της ενθαλπίας.

Στην εξίσωση υπολογισμού της μεταβολής θερμοκρασίας μη πυροπροστατευμένης διατομής η παράμετρος που καθορίζει στο μεγαλύτερο βαθμό την αύξηση της θερμοκρασίας του μέλους είναι ο συντελεστής διατομής $\frac{A_m}{V}$. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο λεπτότερη είναι η διατομή και συνεπώς θερμαίνεται ταχύτερα. Ορίζεται το μέγεθος 'θερμική μάζα' το οποίο παρουσιάζει, σε αντίθεση με τον συντελεστή διατομής, υψηλότερες τιμές για όσο πιο κοντόχοντρη είναι η διατομή. Η πρότυπη καμπύλη ISO 834 δείχνει ότι, με εξαίρεση πολύ ογκώδεις διατομές, η θερμοκρασία του χάλυβα είναι μεγαλύτερη από 700°C μετά από 30 λεπτά. Η θερμοκρασία που αναπτύσσει η διατομή μετά από 60 λεπτά είναι τόσο υψηλή που είναι αδύνατο για μια μη πυροπροστατευμένη διατομή να έχει αντοχή σε φωτιά για μια ώρα κάτω από συνθήκες τυπικής φωτιάς. Από πρακτική εμπειρία θεωρείται πιο αποδοτικό για την αντίσταση σε πυρκαγιά να επιλεγεί διατομή με μεγαλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερο μέτρο πλαστικότητας από ότι να αυξηθεί η θερμική μάζα (Purkiss, 1996).

Στην προσπάθεια προώθησης του χάλυβα ως ένα ανταγωνιστικό εμπορικά δομικό υλικό, συστηματική έρευνα διεξάγεται στην κατεύθυνση της κατανόησης και μετέπειτα χρήσης, της συμπεριφοράς του μη πυροπροστατευμένου χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς. Το μεγάλο κόστος της πυροπροστασίας στη συνολική μεταλλική κατασκευή εντείνει αυτή την προσπάθεια.

Η βασική προϋπόθεση που πρέπει να ικανοποιείται στον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς σε μια κατασκευή χωρίς πυροπροστασία είναι :

Αντοχή της κατασκευής έναντι πυρκαγιάς > Απαιτούμενη αντοχή σε φωτιά

Όπως έχει αναφερθεί, ο σχεδιασμός έναντι φωτιάς διεξάγεται με βάση την πρότυπη φωτιά η οποία θέτει ως ελάχιστη απαίτηση αντοχής το χρονικό διάστημα των 30 λεπτών. Σε ρεαλιστικές συνθήκες ωστόσο, η δριμύτητα της δράσης της φωτιάς μπορεί να είναι μικρότερη, δίνοντας τη δυνατότητα για αποφυγή χρήσης πυροπροστασίας (Schleich, 1996). Κάτω από την επίδραση της πρότυπης φωτιάς οι συμβατικές κατασκευές συνήθως απαιτούν την ενίσχυση της αντοχής με πυροπροστασία για την ικανοποίηση της χειρότερης δυνατής κατάστασης, στην οποία η φωτιά δρα σε κλειστό χώρο και φτάνει το στάδιο του flashover. Βάσει πιθανοτήτων ωστόσο, το ενδεχόμενο εκδήλωσης φωτιάς σε ανοικτό χώρο που δεν θα οδηγήσει σε flashover λόγω επαρκούς πυρόσβεσης και πυρανίχνευσης είναι κάτι περισσότερο από υπαρκτό. Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση μειώνεται ο κίνδυνος της φωτιάς, αντιπροσωπεύοντας μια ρεαλιστικότερη κατάσταση. Αυτό επιτρέπει την χρήση μειωμένου θερμικού φορτίου στους κανονιστικούς υπολογισμούς.

Το θερμικό φορτίο σχεδιασμού προσδιορίζεται από την σχέση:

$$q_{d,f} = \gamma_n \cdot \gamma_q \cdot q_{k,f} \quad (3.10), \text{ όπου}$$

$q_{k,f}$ το χαρακτηριστικό φορτίο σχεδιασμού

γ_n συντελεστής που εισάγει τη δράση των ενεργών πυροπροστατευτικών μέσων

γ_q συντελεστής ασφάλειας που λαμβάνει υπόψη την συχνότητα εκδήλωσης φωτιάς και το πόσο καταστροφικές συνέπειες θα επιφέρει η αστοχία

Δεδομένα από ρεαλιστικές συνθήκες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αυτών των συντελεστών. Αυτή η προσέγγιση υιοθετείται στον EC1.

Ο συντελεστής ασφαλείας γ_q υπολογίζεται από την σχέση:

$$\gamma_q = \gamma_{q1} \cdot \gamma_{q2} \quad (3.11), \text{ όπου}$$

γ_{q1} συντελεστής συναρτήσει του μεγέθους του χώρου που είναι υπό συνθήκες πυρκαγιάς και τον αριθμό των ορόφων του κτιρίου, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες μια αστοχίας

γ_{q2} συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο χρήσης της κατασκευής και εκφράζει την συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Οι τιμές των γ_{q1} και γ_{q2} δίνονται στους πίνακες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα.

Εμβαδόν δαπέδου του χώρου A_f (m^2)	Συντελεστής γ_{q1} σε σχέση τον αριθμό των ορόφων			
	N=1	N=2	2 < N ≤ 10	N > 10
≤2500	1	1.25	1.5	2
2500 < A_f ≤ 5000	1.05	1.4	1.75	2.5
5000 < A_f ≤ 10000	1.1	1.5	N/A	N/A
10000 < A_f ≤ 20000	1.2	1.6	N/A	N/A

Πίνακας 3. 1 Πίνακας συντελεστή γ_{q1}

Συντελεστής γ_{q2}	Συχνότητα Εκδήλωσης Φωτιάς	Παράδειγμα Χρήσης Κατασκευής
0.85	Μικρή	Μουσείο
1	Κανονική	Κατοικία, Ξενοδοχείο
1.2	Μέτρια	Εργοστάσιο
1.45	Υψηλή	Εργαστήριο Χημικών
1.8	Πολύ Υψηλή	Εργοστάσιο εύφλεκτων υλών

Πίνακας 3. 2 Πίνακας συντελεστή γ_{q2}

Ο συντελεστής γ_n διαμοιράζεται σε επιμέρους συντελεστές για κάθε τύπο ενεργής πυροπροστασίας. Οι συντελεστές γ_{ni} για διάφορα μέσα πυροπροστασίας φαίνονται στον πίνακα 3.3. Ο τελικός συντελεστής γ_n προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\gamma_n = \gamma_{n1} \gamma_{n2} \dots \gamma_{n9} \leq 1 \quad (3.12)$$

Συντελεστής γ _{ni}	Μέσο Ενεργής Πυροπροστασίας
γ _{n1} =0.6	Ψεκαστήρες
γ _{n2} =0.7,0.9 ή 1	Άλλα μέσα παροχής νερού
γ _{n3} =0.9	Αυτόματος συναγερμός θερμότητας
γ _{n4} =0.8	Αυτόματος συναγερμός καπνού
γ _{n5} =0.8	Αυτόματη κλήση πυροσβεστικής
γ _{n6} =0.6	Πυροσβεστική εντός εγκαταστάσεων
γ _{n7} =0.7	Πυροσβεστική εκτός εγκαταστάσεων
γ _{n8} =1/1.5	Δίοδοι διευκόλυνσης πυρόσβεσης
γ _{n9} =1/1.5	Συσκευές Πυρόσβεσης
γ _n =0.1-0.54	Συνολική Ελάχιστη Τιμή

Πίνακας 3. 3 Πίνακας συντελεστών γ_n

Ένας άλλος τρόπος ικανοποίησης των κριτηρίων αντοχής έναντι πυρκαγιάς είναι η αύξηση της αντοχής της μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής κατασκευής, είτε αυξάνοντας την αντοχή των μελών μεμονωμένα είτε αξιοποιώντας την αποτελεσματικότερη απόκριση σε φωτιά ολόκληρης της κατασκευής.

Η αύξηση της πυραντοχής μεμονωμένων μελών επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους (Wang, 2002):

- Με υπερδιαστασιολόγηση της κατασκευής. Για παράδειγμα, μεγαλύτερα μέλη έχουν αυξημένη ικανότητα ανάληψης φορτίου που πιθανώς να επαρκεί στο συμβάν της φωτιάς, χωρίς να απαιτεί εφαρμογή πυροπροστασίας. Ωστόσο αυτή η μέθοδος εμφανίζει αυξημένο κόστος χωρίς να εγγυάται καλύτερα αποτελέσματα από αυτά της μικρότερης διατομής με οριακή αντοχή.
- Με την ενσωμάτωση και εκμετάλλευση της αυξημένης ικανότητας ανάληψης στατικών φορτίων και πυροπροστασίας, του σκυροδέματος. Ο χάλυβας σπανίως χρησιμοποιείται ως το μοναδικό υλικό κατασκευής, αλλά συμμετέχει σε σύμμικτες κατασκευές με άλλα υλικά, κυρίως το σκυρόδεμα.
- Με την χρήση πυράντοχου χάλυβα. Η δυσκαμψία και η αντοχή του τυπικού χάλυβα μειώνεται στο ήμισυ της αρχικής τιμής όταν η θερμοκρασία του φτάσει στους 550°C, δημιουργώντας την απαίτηση πυροπροστασίας. Ο πυράντοχος χάλυβας εμφανίζει λιγότερο ραγδαία μείωση της αντοχής του, επιτρέποντας έτσι την παράλειψη χρήσης πυροπροστασίας. Ο καταλληλότερος τύπος πυράντοχου χάλυβα είναι ο ανοξειδωτός. Η δυνατότητά του να διατηρεί το 40% της αντοχής του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ακόμα και σε θερμοκρασίες μεγέθους 800°C και η εξαιρετικά αντανakλαστική επιφάνειά του, το οποίο ισοδυναμεί με μείωση της απορροφητικότητας, καθιστά τον ανοξειδωτο χάλυβα ικανό να χρησιμοποιηθεί δίχως πυροπροστασία. Μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος του.
- Όπως αναφέρθηκε, η κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής ως ολοκληρωμένο στατικό σύστημα μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την εξασφάλιση αντοχής σε φωτιά χωρίς χρήση πυροπροστασίας. Συγκεκριμένα η αξιοποίηση της υπερστατικότητας των κατασκευών και η καλύτερη κατανόηση της στατικής συμπεριφοράς σε συνθήκες πυρκαγιάς αποτελούν τα αποτελεσματικότερα εργαλεία αυτής της προσέγγισης. Συγκεκριμένα με χρήση της υπερστατικότητας της κατασκευής είναι δυνατή η διατήρηση της σταθερότητάς της ακόμη και με αστοχία κάποιου δομικού μέλους, αν υπάρξει εναλλακτική διαδρομή ανάληψης φορτίου.

- Στον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι ο μηχανισμός ανάληψης φορτίων που προσδιορίστηκε σε συνθήκες περιβάλλοντος παραμένει ο ίδιος και κατά την διάρκεια πυρκαγιάς. Αν αυτή η υπόθεση αναιρεθεί και επιτραπεί η ύπαρξη εναλλακτικών μηχανισμών, τότε ακόμα και η απώλεια ενός μέλους δεν εμποδίζει την ασφαλή μετάδοση των φορτίων στη θεμελίωση.
- Όσον αφορά τις ως τώρα πληροφορίες για την απόκριση της κατασκευής σε συνθήκες φωτιάς, έχει υιοθετηθεί η συντηρητική θεωρία των απειροστών μετακινήσεων. Επιτρέποντας στα μέλη της κατασκευής να δεχθούν μεγάλες μετακινήσεις μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα αντοχής και να μειωθεί η αναγκαιότητα χρήσης πυροπροστασίας.

3.5.5 Εσωτερική Μεταλλική Κατασκευή με Πυροπροστασία

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1.2, αν η κατανομή της θερμοκρασίας σε μια διατομή θεωρείται ομοιόμορφη, τότε η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος Δt δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta\theta_{\alpha,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{\alpha,t})}{(1 + \varphi/3)} \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (3.13)$$

$$\text{με } \varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \text{ όπου,}$$

λ_p : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού πυροπροστασίας $[\frac{W}{mK}]$

$\frac{A_p}{V}$: ο συντελεστής διατομής για προστατευμένα χαλύβδινα μέλη

A_p : το εμβαδόν του υλικού πυροπροστασίας ανά μονάδα μήκους $[m^2]$

V : ο όγκος του μέλους ανά μονάδα μήκους $[m^3]$

$\theta_{g,t}$: η περιβάλλουσα θερμοκρασία αερίου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή t $[^{\circ}C]$

$\theta_{\alpha,t}$: η θερμοκρασία του χάλυβα σε μια δεδομένη χρονική στιγμή t $[^{\circ}C]$

d_p : το πάχος του υλικού πυροπροστασίας $[m]$

c_a : η ειδική θερμότητα του χάλυβα $[\frac{J}{kgK}]$

ρ_a : πυκνότητα μάζας του χάλυβα $[\frac{kg}{m^3}]$

Δt : το χρονικό βήμα

$\Delta\theta_{g,t}$: η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αερίου κατά το χρονικό βήμα Δt

c_p : η ειδική θερμότητα του υλικού πυροπροστασίας $[\frac{J}{kgK}]$

ρ_p : η πυκνότητα μάζας του υλικού πυροπροστασίας $[\frac{kg}{m^3}]$

Η παραπάνω εξίσωση παράγεται από τη λύση της κύριας μερικής διαφορικής εξίσωσης της μεταφοράς θερμότητας σε ένα μονωτικό στρώμα. Ο συντελεστής φ δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 1.5.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παραπάνω εξίσωση έχει γίνει η υπόθεση ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας της πυροπροστασίας είναι ίδια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αερίου, συνεπώς η θερμική αντίσταση ανάμεσα στην επιφάνεια της πυροπροστασίας και του αερίου αγνοείται. Θεωρείται ότι η συνολική αντίσταση σε αγωγή οφείλεται στο πάχος της πυροπροστασίας και συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας καθορίζεται από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας πυροπροστασίας και εξωτερικής επιφάνειας χάλυβα.

3.5.6 Εξωτερική Μεταλλική Κατασκευή

Αξίζει να συζητηθεί και το αντίκτυπο της φωτιάς σε μεταλλικά μέλη έξω από τα όρια του χώρου στο οποίο αναπτύσσεται. Τα μέλη αυτά θερμαίνονται μέσω της ακτινοβολικής ροής θερμότητας και της φλόγας που εξάγεται από τα ανοίγματα του φλεγόμενου χώρου. Στην περίπτωση που οι φλόγες έρχονται σε επαφή με το μέλος η θερμότητα μεταφέρεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας από τις φλόγες και μέσω ακτινοβολίας από τα αντικρισμένα ανοίγματα του φλεγόμενου χώρου. Στην αντίθετη περίπτωση, το μέλος θερμαίνεται μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας από τα γειτονικά ανοίγματα και τις φλόγες που ξεπροβάλλουν από αυτά. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτείνεται η εγκατάσταση πυράντοχων πετασμάτων με αντοχή σε φωτιά τουλάχιστον 30 λεπτών για προστασία από τη θερμότητα που μεταφέρεται με ακτινοβολία.

3.5.7 Θερμικές Ιδιότητες Υλικών Κατασκευής

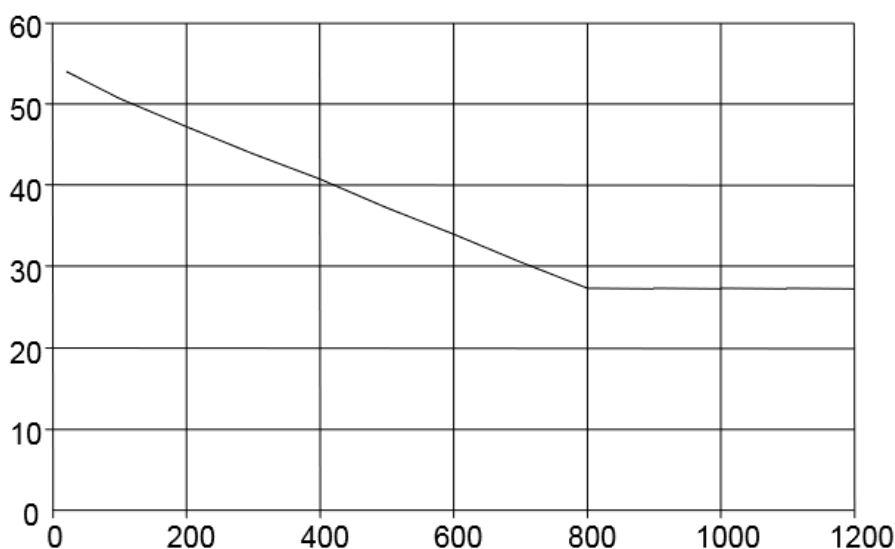
Χάλυβας: Στον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1.2 δίνονται οι θερμικές ιδιότητες του τυπικού χάλυβα με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η θερμική αγωγιμότητα, που εκφράζεται σε μονάδες $\frac{W}{mK}$, προσδιορίζεται από την σχέση :

$$\lambda_{\alpha} = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \theta_{\alpha} \quad \text{για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 800^{\circ}\text{C} \quad (3.14)$$

$$\lambda_{\alpha} = 27.3 \quad \text{για } 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

όπου θ_{α} η θερμοκρασία του χάλυβα [$^{\circ}\text{C}$]



Εικόνα 14 Θερμική αγωγιμότητα χάλυβα [W/mk] (British Standards Institution, 2002, σ.23)

Η ειδική θερμότητα, που εκφράζεται σε μονάδες $\frac{J}{kgK}$, δίνεται από την σχέση :

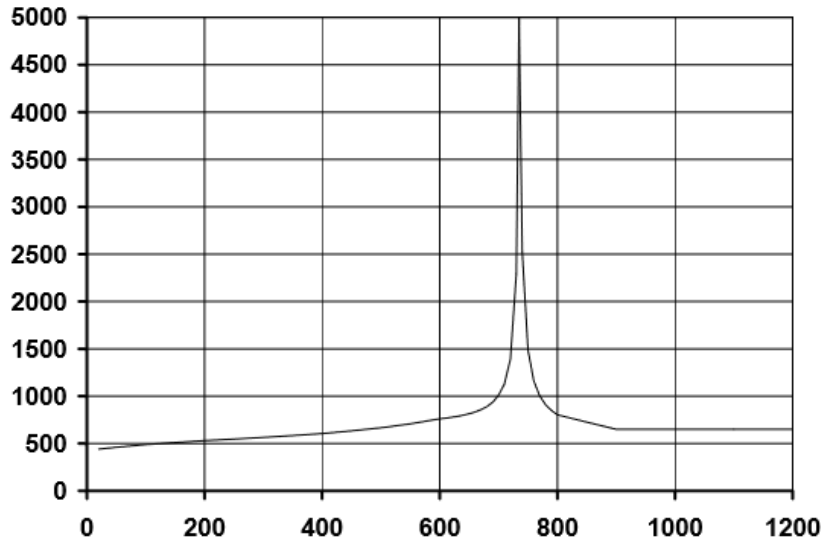
$$c_{\alpha} = 425 + 0.773 \theta_{\alpha} - 0.00169 \theta_{\alpha}^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_{\alpha}^3 \quad \text{για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 600^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\alpha} = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_{\alpha}} \quad \text{για } 600^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 735^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\alpha} = 545 + \frac{17820}{\theta_{\alpha} - 731} \quad \text{για } 735^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 900^{\circ}\text{C} \quad (3.15)$$

$$c_{\alpha} = 650 \quad \text{για } 900^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 1200^{\circ}\text{C}$$

,όπου θ_{α} η θερμοκρασία του χάλυβα [$^{\circ}\text{C}$]



Εικόνα 15 Ειδική θερμότητα χάλυβα [J/kgK] (British Standards Institution, 2002, σ.22)

Σκυρόδεμα: Όσον αφορά το σκυρόδεμα υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές των θερμικών ιδιοτήτων στον Ευρωκώδικα 2 Μέρος 1-2, που εξαρτώνται από παράγοντες όπως το επίπεδο υγρασίας και το βάρος του υλικού.

Συγκεκριμένα οι κανονισμός ορίζει τον υπολογισμό της τιμής της ειδικής θερμότητας (c_p) του σκυροδέματος για μηδενική περιεκτικότητα υγρασίας από τις σχέσεις:

$$c_p = 900 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$$

$$c_p = 900 + (\theta - 100) \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad (3.16)$$

$$c_p = 1000 + \frac{\theta - 200}{2} \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$c_p = 1100 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

όπου θ είναι η θερμοκρασία του σκυροδέματος

Όταν δεν προσδιορίζεται το ακριβές ποσοστό υγρασίας, η συνάρτηση της ειδικής θερμότητας σε σχέση με την θερμοκρασία του σκυροδέματος μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια συνεχής μέγιστη τιμή $c_{p,peak}$ για τις θερμοκρασίες μεταξύ 100°C και 115°C , η οποία μειώνεται γραμμικά για τιμές θερμοκρασίας μεταξύ 115°C και 200°C .

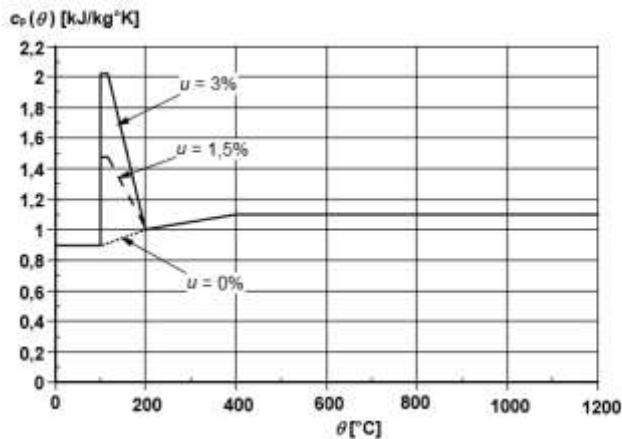
Η τιμή $c_{p,peak}$ για τα διάφορα επίπεδα υγρασίας είναι:

$$c_{p,peak} = 900 \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για ποσοστό υγρασίας } 0\% \text{ του βάρους σκυροδέματος}$$

$$c_{p,peak} = 1470 \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για ποσοστό υγρασίας } 1.5\% \text{ του βάρους σκυροδέματος}$$

$$c_{p,peak} = 2020 \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \quad \text{για ποσοστό υγρασίας } 3\% \text{ του βάρους σκυροδέματος}$$

Για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας επιτρέπεται η γραμμική παρεμβολή.



Εικόνα 16 Ειδική θερμότητα σκυροδέματος για επίπεδα υγρασίας (British Standards Institution, 2004, σ.27)

Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε απώλεια νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος, γεγονός που μεταβάλλει την πυκνότητά του:

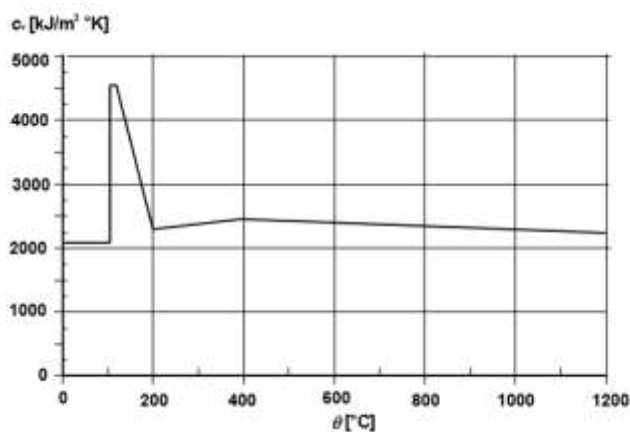
$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \quad \text{για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(1 - 0.02 \frac{(\theta - 115)}{85} \right) \quad \text{για } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0.98 - 0.03 \frac{(\theta - 200)}{200} \right) \quad \text{για } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

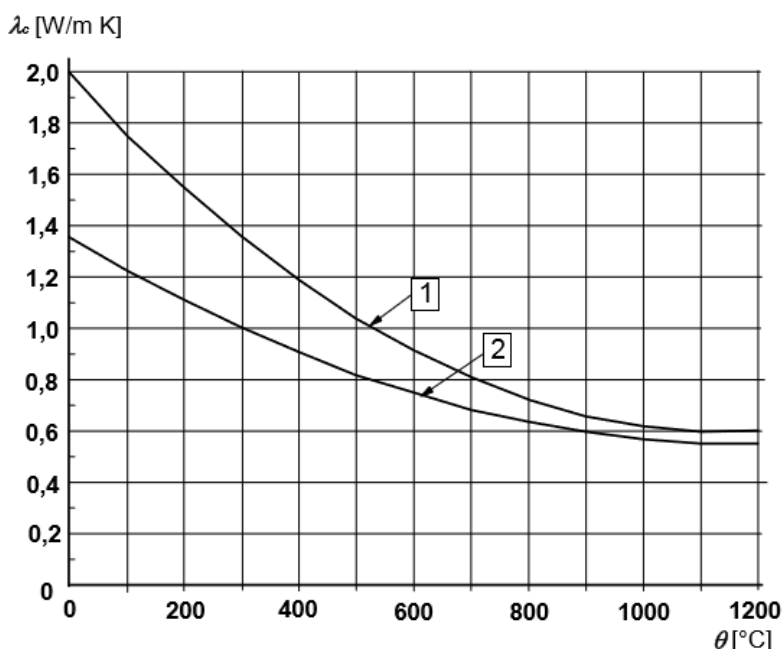
$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0.95 - 0.07 \frac{(\theta - 400)}{800} \right) \quad \text{για } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

Η διακύμανση της ογκομετρικής ειδικής θερμότητας $c_v(\theta) = \rho(\theta) \cdot c_p(\theta)$ για ποσοστό υγρασίας 3% του βάρους και πυκνότητα $2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17 Ογκομετρική ειδική θερμότητα σκυροδέματος (British Standards Institution, 2004, σ.27)

Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος ορίζεται μεταξύ ενός κατώτερου και ενός ανώτερου ορίου. Το κατώτερο όριο έχει προσδιοριστεί μετά από συγκρίσεις με αποτελέσματα θερμοκρασιών πειραμάτων φωτιάς σε διάφορους τύπους κατασκευών σκυροδέματος. Αντιθέτως το ανώτερο όριο έχει προσδιοριστεί από πειράματα σε σύμμικτες κατασκευές χάλυβα/σκυροδέματος. Για αυτόν τον λόγο το κατώτερο όριο θεωρείται ότι παρέχει ρεαλιστικότερες τιμές.



Εικόνα 18 Θερμική αγωγιμότητα σκυροδέματος (British Standards Institution, 2004, σ.29)

Το ανώτερο όριο της θερμικής αγωγιμότητας για σκυρόδεμα συνηθισμένου βάρους δίνεται από την σχέση του κανονισμού:

$$\lambda_c = 2 - 0.2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad \left(\frac{W}{mK} \right) \quad \text{για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.17)$$

Το κατώτερο όριο της θερμικής αγωγιμότητας για σκυρόδεμα συνηθισμένου βάρους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 είναι:

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad \left(\frac{W}{mK} \right) \quad \text{για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

Στις παραπάνω σχέσεις (θ) είναι η θερμοκρασία του σκυροδέματος.

Όπως αναφέρθηκε και για την περίπτωση της πυκνότητας, το σκυρόδεμα περιέχει νερό και οι μεταβολές στην συγκέντρωση αυτού στο εσωτερικό του επηρεάζει την διαδικασία της ανταλλαγής θερμότητας. Αυτό το χαρακτηριστικό, που το κατατάσσει στα υγροσκοπικά υλικά, καθιστά αναγκαία μια μοντελοποίηση συνδυασμού μεταφοράς θερμότητας και μάζας για τον υπολογισμό της ανακατανομής της πίεσης στους πόρους εξαιτίας της υγρασίας. Αυτή η περίπλοκη διαδικασία μπορεί να αποφευχθεί όταν ζητούνται υπολογισμοί καθαρά θερμοκρασιών και να αντικατασταθεί με μια προσεγγιστική μέθοδο (Wang, 2002). Σύμφωνα με αυτήν, η ενέργεια που καταναλώνεται για την εξάτμιση του νερού στους 100°C προστίθεται στην ειδική θερμότητα του σκυροδέματος. Γίνεται η υπόθεση ότι το νερό δεν κινείται μέσα στο υλικό και η εξάτμιση πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα θερμοκρασίας.

Υπό αυτές τις συνθήκες η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού σε μια μονάδα βάρους του υλικού είναι:

$$E = W_c \cdot Q_w \quad (3.19), \text{ όπου}$$

W_c : η περιεκτικότητα σε υγρασία εκφρασμένη σε βάρος

$$Q_w = 2260 \frac{kJ}{kg}; \text{ η λανθάνουσα θερμότητα των ατμών.}$$

Αν η αύξηση της ειδικής θερμότητας του υγροσκοπικού υλικού έχει τριγωνική κατανομή με την θερμοκρασία, τότε η μέγιστη αύξησή της κατά την μετάβαση σε στεγνή κατάσταση ισούται με:

$$\Delta C = \frac{2W_c \cdot Q_w}{\Delta T} \quad (3.20)$$

όπου ΔT είναι το διάστημα θερμοκρασίας στο οποίο συμβαίνει η εξάτμιση

Υλικά Πυροπροστασίας: Οι θερμομονώσεις των κατασκευών αποτελούνται από υλικά χαμηλή θερμικής αγωγιμότητας τα οποία συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα μίγμα ακόμα χαμηλότερης. Για τα μίγματα αυτά ορίζεται το μέγεθος της ενεργής θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα και τις σχετιζόμενες με την ακτινοβολία ιδιότητες της επιφάνειας του υλικού, καθώς και τη φύση και το ογκομετρικό ποσοστό των κενών που εμφανίζουν στο εσωτερικό τους. Το ειδικό βάρος του υλικού αποτελεί σημαντική παράμετρο στη θερμική απόκριση της πυροπροστασίας.

Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού πυροπροστασίας πρέπει να προσδιοριστούν πειραματικά βάσει Ευρωκώδικα. Ένας αριθμός δειγμάτων υπόκειται σε πρότυπη φωτιά και χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Ευρωκώδικα για μεταλλικά μέλη με πυροπροστασία και τις γνωστές θερμοκρασίες του χάλυβα υπολογίζεται η θερμική αγωγιμότητα της πυροπροστασίας. Η πυκνότητα μάζας και η ειδική θερμότητα δίνονται από τον κατασκευαστή του προϊόντος.

Πρέπει να αποφεύγεται ο προσδιορισμός των τιμών των θερμικών ιδιοτήτων βάσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε εφαρμογές όπως η πυροπροστασία κτιρίων καθώς μια τέτοια πρακτική θα οδηγούσε σε επιβλαβή αποτελέσματα σε συνθήκες φωτιάς. Αυτό οφείλεται, ανάμεσα σε άλλα, στο γεγονός ότι η θερμική αγωγιμότητα περισσότερων υλικών πυροπροστασίας έχει την τάση να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αξίζει να συμπληρωθεί ότι συνήθως η θερμική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση του πάχους της πυροπροστασίας, όπως για παράδειγμα σε 'αντιδραστική' προστασία σαν τις διογκωτικές βαφές.

Εξαιτίας των περίπλοκων και ποικίλων χημικών διεργασιών σε υψηλές θερμοκρασίες που πραγματοποιούνται σε κάθε διαφορετικό υλικό πυροπροστασίας είναι δύσκολο να εξαχθούν ακριβείς πληροφορίες για τις θερμικές ιδιότητες αυτών των υλικών. Το γεγονός ότι τα περισσότερα πυροπροστατευτικά υλικά αποτελούν ιδιοκτησία εταιριών που αποφεύγουν την δημοσιοποίηση των θερμικών χαρακτηριστικών τους δυσχεραίνει το εγχείρημα προσδιορισμού τους (Wang, 2002).

4 Πειράματα Βρετανικής Εταιρίας Μεταλλικών Κατασκευών

Το πείραμα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική συγκαταλέγεται στα πειράματα που διεξήγαγε η Βρετανική Εταιρία Μεταλλικών Κατασκευών σύμφωνα με τον κανονισμό BS476:Part 8:1972. Τα πειράματα αυτά στοχεύουν στην εξαγωγή δεδομένων απαραίτητων για τη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς μη πυροπροστατευμένων μεταλλικών κατασκευών υπό την δράση της πρότυπης φωτιάς.

Στα πλαίσια αυτών των πειραμάτων, τα δείγματα συνιστώνται από στοιχεία χάλυβα θερμής έλασης είτε πλήρως απροστάτευτα είτε μερικώς προστατευμένα αποκλειστικά από υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, όπως το σκυρόδεμα και το τούβλο. Τα εξεταζόμενα δείγματα θερμαίνονται σε φούρνο του οποίου η θερμοκρασία ελέγχεται έτσι ώστε να συνάδει με τις προτεινόμενες θερμοκρασίες της πρότυπης φωτιάς ISO. Οι θερμοκρασίες προσδιορίζονται από την σχέση 3.1.

Οι διαστάσεις των δειγμάτων είναι αντιπροσωπευτικές αυτών που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές κατασκευές και φορτίζονται με παρόμοιου μεγέθους και τύπου δυνάμεων για την όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη προσομοίωση της απόκρισης του μέλους.

Το πείραμα τερματίζεται μετά από απόφαση του ερευνητή ή όταν ικανοποιηθεί κάποιο από τα κριτήρια αστοχίας. Αν επέλθει κατάρρευση ως ονομαστικός χρόνος διατήρησης ευστάθειας ορίζεται το 80% του χρόνου στον οποίο σημειώθηκε η αστοχία. Σε αντίθετη περίπτωση, τα φορτία των στατικών μελών αφαιρούνται μετά το πέρας του χρόνου θέρμανσης και ξαναεφαρμόζονται μετά από 24 ώρες εφόσον το δείγμα έχει επιστρέψει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αν μετά την επαναληπτική εφαρμογή των φορτίων σημειωθεί αστοχία, ως ονομαστικός χρόνος διατήρησης της ευστάθειας θεωρείται το 80% του αρχικού χρόνου θέρμανσης (Wainman & Kirby, 1988).

4.1 Εξεταζόμενο Πείραμα

Η διάταξη του πειράματος που επιλέχθηκε να μελετηθεί σε αυτήν τη διπλωματική παρουσιάζεται από τους Wainman & Kirby (1988) στη συλλογή τους με το σύνολο των πειραμάτων της Βρετανικής Εταιρίας Μεταλλικών Κατασκευών. Το πείραμα περιελάμβανε μια απλώς στηριγμένη μεταλλική δοκό διπλού ταυ ποιότητας 50B και μήκους 4.5m και μια πλάκα σκυροδέματος τοποθετημένη στο πάνω πέλαμα της δοκού. Το σύμμικτο μέλος τοποθετήθηκε σε φούρνο θερμαινόμενο σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για την πλάκα σκυροδέματος παρείχαν πλήρη κάλυψη του ανοίγματος της οροφής του φούρνου και συνεπώς η δοκός ήταν εκτεθειμένη στην φωτιά από 3 πλευρές. Υπήρξε πρόληψη διάθεσης αρκετού χρόνου στο σκυρόδεμα ώστε να αποβάλλει υψηλά ποσοστά υγρασίας πριν την χρήση του στο πείραμα. Η πυκνότητα του σκυροδέματος προσδιορίστηκε σε $2240 \frac{kg}{m^3}$ και οι ονομαστικές διαστάσεις της πλάκας είναι 630mm πλάτος και 130mm ύψος. Οι πραγματικές διαστάσεις της διατομής της εξεταζόμενης μεταλλικής δοκού φαίνονται στον πίνακα 4.1:

Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Πάχος Κορμού (mm)	Πάχος Πέλματος (mm)
146	260	7.34	12.36

Πίνακας 4. 1 Πίνακας διαστάσεων μεταλλικής δοκού του πειράματος



Εικόνα 19 Η μεταλλική δοκός του πειράματος τοποθετείται στον φούρνο (Wainman & Kirby, 1988, σ.32)

Ειδικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας (*thermocouples*) χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε όλο το μήκος της μεταλλικής δοκού. Τα όργανα αυτά τοποθετήθηκαν σε προσχεδιασμένες εσοχές στο μέσο του πάχους κάθε τμήματος της διατομής για να εξασφαλιστούν πιο αξιόπιστες μετρήσεις. Στα πέλματα οι τιμές της θερμοκρασίας καταγράφονται στις θέσεις των 1/4 και 3/4 του πλάτους, ενώ η θερμοκρασία του κορμού καταγράφεται στο μισό του ύψους της διατομής. Από τις συνολικά 4 θέσεις καταγραφής τιμών θερμοκρασίας για το άνω πέλμα, 5 για το κάτω πέλμα και 4 για τον κορμό υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία κάθε 3 λεπτά για ένα χρονικό διάστημα 27 λεπτών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 4.2. Ως αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος για το πείραμα ορίστηκαν οι 17°C.

		Θερμοκρασία (°C)									
Χρόνος (min)		3	6	9	12	15	18	21	24	26	27
Άνω Πέλμα	F3	86	155	211	273	326	384	431	479	516	535
	F5	122	185	246	305	358	418	464	510	545	563
	F8	88	144	203	267	329	392	446	499	533	551
	F9	68	114	171	229	288	340	390	436	469	488
	Μέση Τιμή	91	149	208	268	325	383	433	481	516	534
Κορμός	W1	146	276	393	485	552	603	640	671	693	702
	W2	174	303	414	506	572	623	659	690	711	720
	W3	155	284	417	509	576	623	660	689	712	722
	W4	162	286	408	496	563	607	645	674	697	707
	Μέση Τιμή	159	287	408	499	566	614	651	681	703	713
Κάτω Πέλμα	F1	127	239	364	475	558	619	660	692	711	721
	F2	104	218	355	471	561	624	669	702	722	733
	F4	144	272	401	501	576	633	672	703	723	733
	F6	131	249	371	478	560	619	660	692	713	722
	F7	144	246	370	474	557	616	659	691	713	724
Μέση Τιμή	130	245	372	480	562	622	664	696	716	727	

Πίνακας 4. 2 Πίνακας θερμοκρασιών μεταλλικής δοκού του πειράματος

Η θερμοκρασία του αερίου στο εσωτερικό του φούρνου μετρήθηκε και ελέγχθηκε ώστε να συμφωνεί με τις διατάξεις του BS476:Part 8:1972 με 6 ή 8 *thermocouples* συμμετρικά τοποθετημένα και στις δυο πλευρές της δοκού σε απόσταση 100mm. Οι μέσες τιμές των θερμοκρασιών από τις μετρήσεις στα εν λόγω σημεία δίνονται στον πίνακα 4.3.

Χρόνος (min)	3	6	9	12	15	18	21	24	26	27
Θερμοκρασία Φούρνου (°C)	515	649	680	730	749	775	793	800	835	832

Πίνακας 4. 3 Πίνακας θερμοκρασιών φούρνου εξεταζόμενου πειράματος

5 Αριθμητική Προσομοίωση Μη Πυροπροστατευμένης Δοκού

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η αριθμητική προσομοίωση του πειράματος που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον σκοπό αυτό έγινε εκτεταμένη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Μέσα από μια λεπτομερή θερμική ανάλυση μεταβλητών συνθηκών ικανοποιητικού μεγέθους μοντέλων προσομοίωσης διερευνήθηκε η αποτελεσματικότερη μεθοδολογία παραγωγής δεδομένων με μικρή απόκλιση σε σχέση με αυτά που παρέχει το εξεταζόμενο πείραμα.

Η έλλειψη πληροφοριών στην αναφορά του πειράματος σχετικές με το υλικό, τις διαστάσεις και την ακριβή λειτουργία του φούρνου μεταφράζει το πρόβλημα προσομοίωσης του πειράματος σε πρόβλημα αποδοτικής προσομοίωσης της πηγής θερμότητας και των μηχανισμών μετάδοσής της: την αγωγή, τη συναγωγή και την ακτινοβολία. Σε αυτήν την κατεύθυνση, για την προσομοίωση του φούρνου σχεδιάστηκε μια θεωρητική επιφάνεια και ορίστηκε ως πηγή θερμότητας του προσομοιώματος. Ακολούθησε σειρά παραμετρικών αναλύσεων των παρακάτω κατηγοριών:

- Αναλύσεις με παράμετρο την γεωμετρία της επιφάνειας θέρμανσης
- Αναλύσεις με παράμετρο την απόστασή της επιφάνειας από τη μεταλλική δοκό
- Αναλύσεις με παράμετρο το είδος της κοιλότητας που ορίζει η ακτινοβολία
- Αναλύσεις με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά της πλάκας σκυροδέματος

Στη συνέχεια ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραπάνω μεθόδου με τα αποτελέσματα μιας απλοποιημένης μεθόδου εισαγωγής θερμικών φορτίων στο μοντέλο προσομοίωσης.

Στο τελευταίο βήμα υπολογίστηκε η ομοιόμορφη θερμοκρασία της μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των μεθόδων προσομοίωσης.

Λεπτομερής περιγραφή των παραπάνω μεθοδολογιών και συμπληρωματικό υλικό από διαγράμματα και εικόνες παρέχονται στη συνέχεια. Πρέπει να τονιστεί ότι σε κάθε βήμα ανάλυσης τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα δεδομένα του πειράματος.

5.1 Πεπερασμένα Στοιχεία

Για τη θερμική ανάλυση του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό χρησιμοποιήθηκαν εξάεδρα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία 1^{ns} τάξης, 8 κόμβων, κατάλληλα για τρισδιάστατες αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας. Παρουσιάζουν τρεις βαθμούς ελευθερίας. Εξαιτίας της χρήσης τριγωναμικών συναρτήσεων παρεμβολής από το στοιχείο, οι βαθμίδες θερμοκρασίας είναι σταθερές σε όλο το μήκος του. Η θερμική αγωγιμότητα του στοιχείου προσδιορίζεται με ένα σημείο ολοκλήρωσης στο κέντρο του, ενώ η ειδική θερμότητα υπολογίζεται από το λογισμικό χρησιμοποιώντας 8 σημεία Gauss.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, οι ροές στις επιφάνειες θεωρούνται θετικές όταν κατευθύνονται προς το στοιχείο και υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μεθοδολογία ολοκλήρωσης 4 σημείων, σε θέσεις ίδιες με αυτές των κόμβων.

Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή σχεδίαση των κόμβων, σε αντιορολογιακή φορά και σε συμφωνία με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων, και χρησιμοποιήθηκε επαρκές επίπεδο διακριτοποίησης για εξασφάλιση εξαγωγής σωστών αποτελεσμάτων.

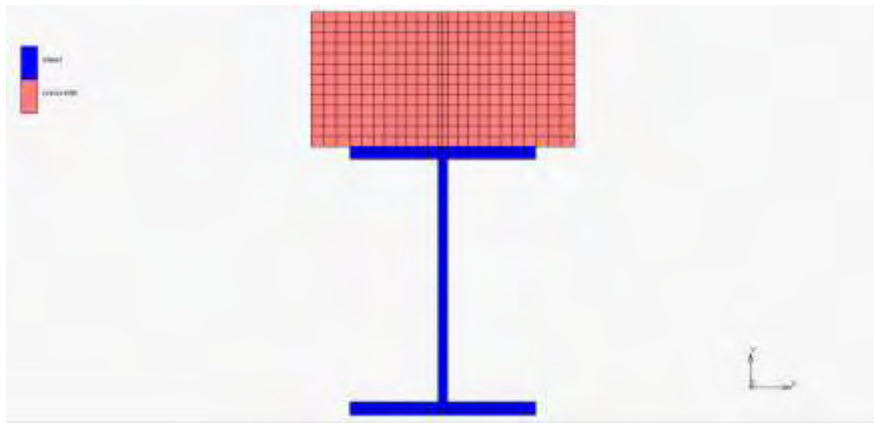
5.2 Προσομοίωση της Μεταλλικής Δοκού

Η μεταλλική δοκός προσομοιώθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων σύμφωνα με τις πραγματικές διαστάσεις του υπό εξέταση πειράματος. Εξαιτίας της υπόθεσης ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος της επιφάνειας-πηγής θερμότητας, το προσομοίωμα ανάλυσης της μεταλλική δοκού εκτείνεται σε μήκος 3m. Θερμική ανάλυση σε μοντέλο μήκους 4.5m, ίδιου δηλαδή με του πειράματος, επιβεβαίωσε την ταύτιση αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης.

Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα ορίστηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1,2. Η πυκνότητα μάζας, η οποία θεωρήθηκε ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του χάλυβα, ορίστηκε σε $7850 \frac{kg}{m^3}$. Η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα προσδιορίστηκε από τις σχέσεις 3.14 και 3,15 αντίστοιχα. Ο συντελεστής απορρόφησης για τον σχεδιασμό υπό τη δράση φωτιάς θεωρείται ίσος με τον συντελεστή εκπομπής (ϵ). Για τις μεταλλικές επιφάνειες ο τελευταίος ορίστηκε ως 0.7 όπως προτείνει ο κανονισμός για τον τυπικό χάλυβα.

5.3 Προσομοίωση της Πλάκας Σκυροδέματος

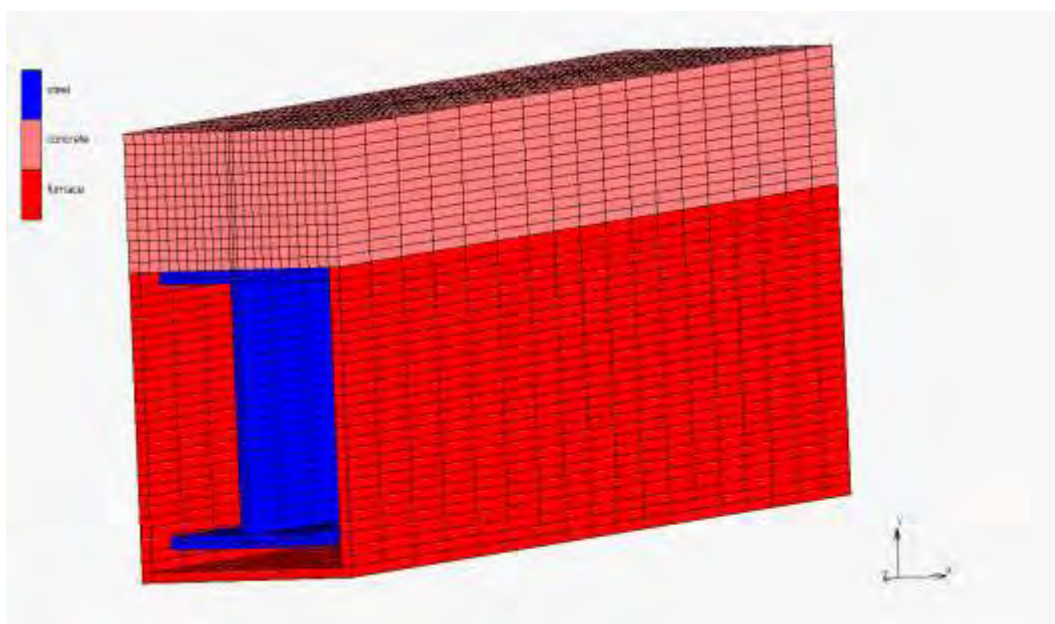
Για την προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις και οι τιμές που προτείνει ο Ευρωκώδικας 2 Μέρος 1-2 για σκυρόδεμα συνηθισμένου βάρους. Για την πυκνότητα μάζας χρησιμοποιήθηκε η τιμή $2240 \frac{kg}{m^3}$ που δίνεται ως δεδομένο από το πείραμα και διατηρήθηκε σταθερή σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Ο συντελεστής εκπομπής και ο συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών που δέχονται θερμότητα ορίστηκαν αμφότεροι ίσοι με 0.85. Η αναφορά του πειράματος δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε και συνεπώς οι εξετάστηκαν διάφορες τιμές τους. Στο πρώτο βήμα ανάλυσης με παράμετρο την γεωμετρία της θεωρητικής επιφάνειας θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο όριο που προτείνει ο κανονισμός για τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και υπολογίστηκε από την σχέση 3.17. Η ειδική θερμότητα του σκυροδέματος προσδιορίστηκε από την σχέση 3.16 για επίπεδο υγρασίας 3% του βάρους του σκυροδέματος. Στο δεύτερο βήμα ανάλυσης εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης και για διαφορετικά θερμικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είναι καθαρά θερμική και για αυτόν τον λόγο η πλάκα σκυροδέματος δεν επεκτάθηκε στο πλάτος που δίνει το πείραμα ως δεδομένο. Αντιθέτως, το πλάτος της καθορίστηκε ώστε να δημιουργεί επαρκώς μια κλειστή κοιλότητα με την θεωρητική επιφάνεια θέρμανσης, όντας σε συμφωνία με την περιγραφή του πειράματος που αναφέρει την πλήρη κάλυψη της οροφής του φούρνου από το σκυρόδεμα. Το ύψος στο μοντέλο προσομοίωσης ταυτίζεται με το δεδομένο από το πείραμα.



Εικόνα 20 Προσομοίωμα μεταλλικής δοκού και πλάκας σκυροδέματος

5.4 Προσομοίωση της Επιφάνειας Θέρμανσης

Όπως αναφέρθηκε, ως λύση στην έλλειψη δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του φούρνου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα για την θέρμανση της μεταλλικής δοκού επιλέχθηκε η σχεδίαση μιας θεωρητικής επιφάνειας. Η επιφάνεια αυτή εκτείνεται σε όλο το μήκος της δοκού με τέτοιο τρόπο ώστε να τη θερμαίνει από τρεις πλευρές αφήνοντας ανεπηρέαστες τις δύο όψεις, στην αρχή και στο τέλος της. Για την αντιπροσωπευτική προσομοίωση του πειράματος, η θερμοκρασία της επιφάνειας ορίστηκε ίδια με τις μετρήσεις του αερίου στο εσωτερικό του φούρνου για το χρονικό διάστημα των 27 λεπτών. Η θεωρητική επιφάνεια, έχοντας αυτό το θερμικό φορτίο ομοιόμορφα κατανομημένο κατά μήκος για συνοριακή συνθήκη, λειτουργεί ως πομπός θερμότητας αυξάνοντας την θερμοκρασία της μεταλλικής δοκού. Η τιμή του συντελεστή εκπομπής ορίστηκε ίση με μονάδα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της προσομοίωσης η επιφάνεια αυτή ανήκει σε μεταλλικό στοιχείο πάχους 10mm, ωστόσο αυτά τα χαρακτηριστικά δεν επηρεάζουν την θερμική ανάλυση και ορίστηκαν για λόγους δυνατότητας επεξεργασίας από το λογισμικό.



Εικόνα 21 Επιφάνεια θέρμανσης μεταλλικής δοκού

5.5 Σύνθετη Μέθοδος Προσομοίωσης της Μεταφοράς Θερμότητας

Στα πλαίσια της αριθμητικής προσομοίωσης της μεταφοράς θερμότητας, επιλέχθηκε η εισαγωγή στο μοντέλο προσομοίωσης και των τριών μηχανισμών του φαινομένου.

Αγωγή: Ο μηχανισμός της αγωγής εισέρχεται στο μοντέλο προσομοίωσης με τον προσδιορισμό των συναρτήσεων της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για κάθε υλικό. Έχοντας ορίσει τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών, το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων είναι σε θέση να υπολογίσει την διάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό τους.

Συναγωγή: Για τον μηχανισμό της συναγωγής ορίστηκαν οι επιφάνειες που αποτελούν αποδέκτες της θερμότητας, δηλαδή οι επιφάνειες της μεταλλική δοκού και του σκυροδέματος που επηρεάζονται από την θεωρητική επιφάνεια θέρμανσης. Οι επιφάνειες αυτές ορίστηκαν μέσω επιφανειακών στρωμάτων μικρού πάχους τα οποία, στο προγραμματιστικό περιβάλλον, ονομάζονται *films*. Ως θερμοκρασία περιβάλλοντος στα διάφορα χρονικά σημεία καθορίστηκαν οι μετρήσεις του αερίου στο εσωτερικού του φούρνου που εξασφάλισε το πείραμα. Η συναγωγή, συνεπώς, αποδόθηκε στις επιλεγμένες επιφάνειες σαν συνοριακή συνθήκη με συντελεστή συναγωγής 25 όπως προτείνει ο Ευρωκώδικας. Ο συντελεστής συναγωγής εκφράζει την ροή θερμότητας λόγω συναγωγής που σχετίζεται με την διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αερίου και των επιφανειών της μεταλλικής δοκού με τις οποίες έρχεται σε επαφή.

Ακτινοβολία: Το σημαντικότερο βήμα προσομοίωσης του μηχανισμού της ακτινοβολίας αποτέλεσε ο ορισμός της κοιλότητας που δημιουργούν οι επιφάνειες του προσομοιώματος που συμμετέχουν στην διαδικασία μεταφοράς θερμότητας και η εισαγωγή των παραμέτρων της ακτινοβολίας ως συνοριακή συνθήκη σε αυτή. Συγκεκριμένα την κοιλότητα συγκροτούν η επιφάνεια θέρμανσης ως πομπός θερμότητας και οι εξωτερικές επιφάνειες της μεταλλικής δοκού, καθώς και οι επιφάνειες του σκυροδέματος στο επίπεδο του πάνω πέλματος, που λειτουργούν ως δέκτες θερμότητας. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων αναλαμβάνει τον σύνθετο υπολογισμό των συντελεστών θέας λαμβάνοντας υπόψη αν η κοιλότητα είναι ανοιχτή ή κλειστή και αν παρατηρείται φαινόμενο σκίασης.

Ο συντελεστής εκπομπής και ο, ισοδύναμος στο πλαίσιο της προσομοίωσης, συντελεστής απορρόφησης καθορίζουν το ποσοστό της επιβαλλόμενης θερμότητας που θα ακτινοβοληθεί από την επιφάνεια θέρμανσης και θα απορροφηθεί τελικά από τη μεταλλική δοκό.

Οι μεταβολές στην γεωμετρία της επιφάνειας θέρμανσης και της απόστασής της από τη μεταλλική δοκό επηρεάζουν τον τρόπο υπολογισμού των συντελεστών θέας από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων οδηγώντας σε διαφορετική ανταλλαγή ενέργειας ακτινοβολίας και συνεπώς αυξομείωση στις τιμές των θερμοκρασιών που αναπτύσσει η δοκός. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν το ποσοστό της επιφάνειας δέκτη που είναι ορατό από την επιφάνεια πομπού θερμότητας και ο υπολογισμός τους απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη, ειδικά όταν παρατηρείται φαινόμενο σκίασης.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του προγράμματος, η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από την επιφάνεια 1 στην επιφάνεια 2 υπολογίζεται από την σχέση:

$$q_{12} = \sigma F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \quad (5.1)$$

όπου F_{12} ο συντελεστής θέας που προσδιορίζεται από τη σχέση

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_2 dA_1 \quad (5.2)$$

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται έχοντας γίνει οι παρακάτω παραδοχές:

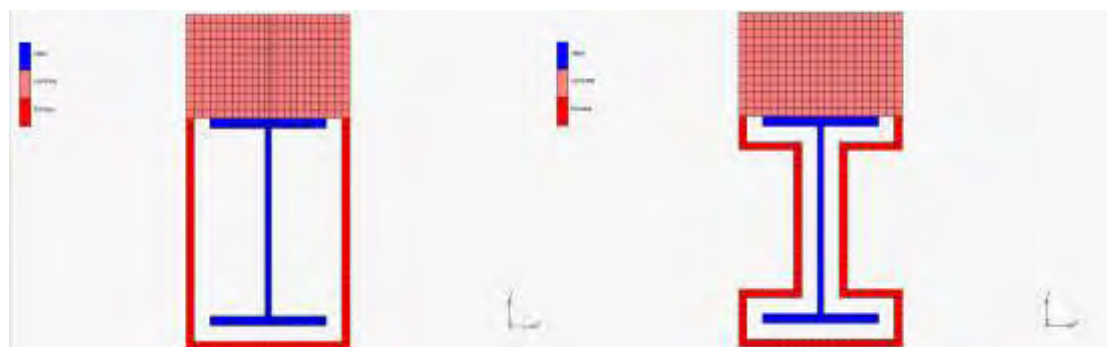
- Κάθε επιφάνεια εκπέμπει ή αντανακλά ενέργεια με διάχυτο τρόπο καθιστώντας την θερμική απόκριση ανεξάρτητη του προσανατολισμού της ακτινοβολίας
- Κάθε επιφάνεια θεωρείται ότι ανήκει σε 'μαύρο' σώμα και συνεπώς απορρόφα ολόκληρο το ποσοστό της ακτινοβολίας την οποία δέχεται
- Η επιφάνειες είναι ισοθερμικές, πράγμα το οποίο εξασφαλίζεται από την επιλογή επαρκούς διακριτοποίησης

Σε όλες τις αναλύσεις ορίστηκε ως αρχική συνθήκη η θερμοκρασία των 17°C στα στοιχεία των προσομοιωμάτων, όπως δίνεται στις πληροφορίες του πειράματος.

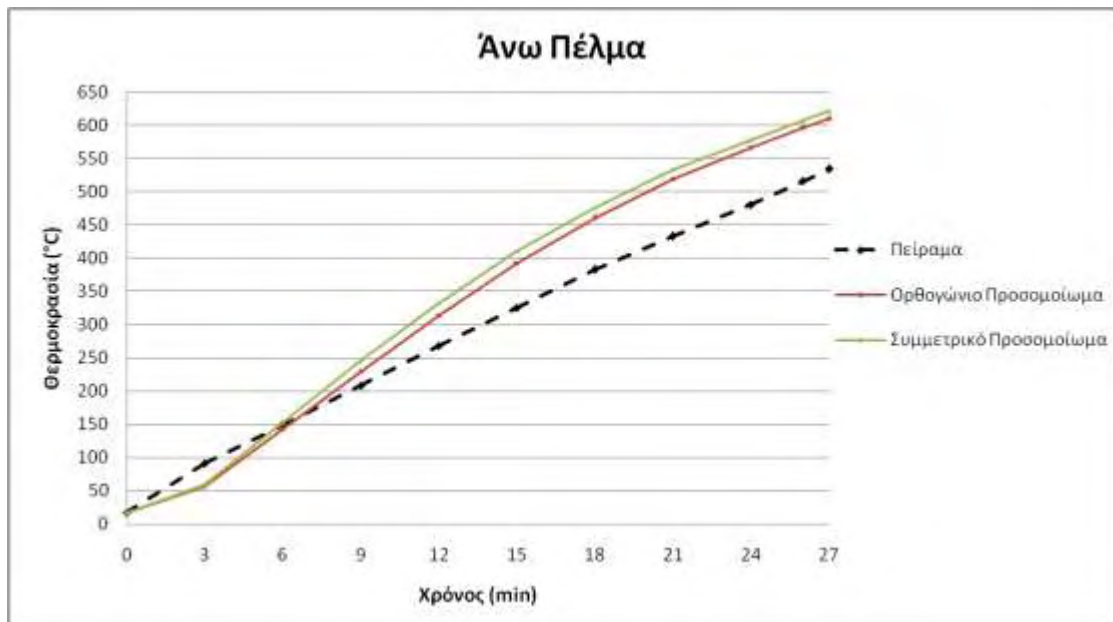
5.5.1 Ανάλυση με Παράμετρο τη Γεωμετρία της Επιφάνειας Θέρμανσης

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης περιλαμβάνει σειρά αναλύσεων με παράμετρο την γεωμετρία της επιφάνειας θέρμανσης. Τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και διατηρούνται σταθερά σε όλη την σειρά των παραμετρικών αυτών αναλύσεων. Σημειώνεται ότι σε κάθε βήμα της ανάλυσης γίνεται σύγκριση των θερμοκρασιών των εξεταζόμενων προσομοιωμάτων με τις μέσες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στο πείραμα για εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

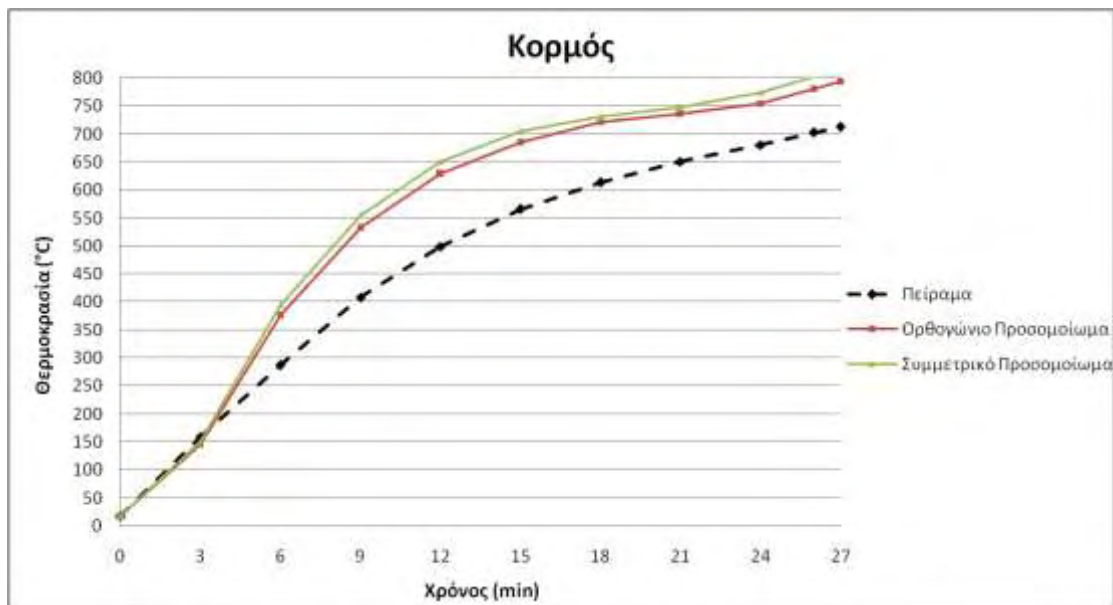
Τα μοντέλα προσομοίωσης που εξετάστηκαν φαίνονται στην εικόνα. Η κοιλότητα που ορίζει η επιφάνεια θέρμανσης και η πλάκα σκυροδέματος και στα δύο μοντέλα είναι κλειστή μην επιτρέποντας εναλλαγή θερμικής ενέργειας με το περιβάλλον. Στο πρώτο προσομοίωμα (συμμετρικό προσομοίωμα) η επιφάνεια θέρμανσης ακολουθεί το σχήμα της δοκού σε απόσταση 20mm. Στο δεύτερο (ορθογώνιο προσομοίωμα), η επιφάνεια θέρμανσης, ορθογωνικής γεωμετρίας, εγκιβωτίζει την δοκό και απέχει 20mm από τα πέλματά της. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών των πελμάτων και του κορμού της δοκού μετά την θερμική ανάλυση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων δίνονται στα σχήματα 5.1, 5.2, 5.3.



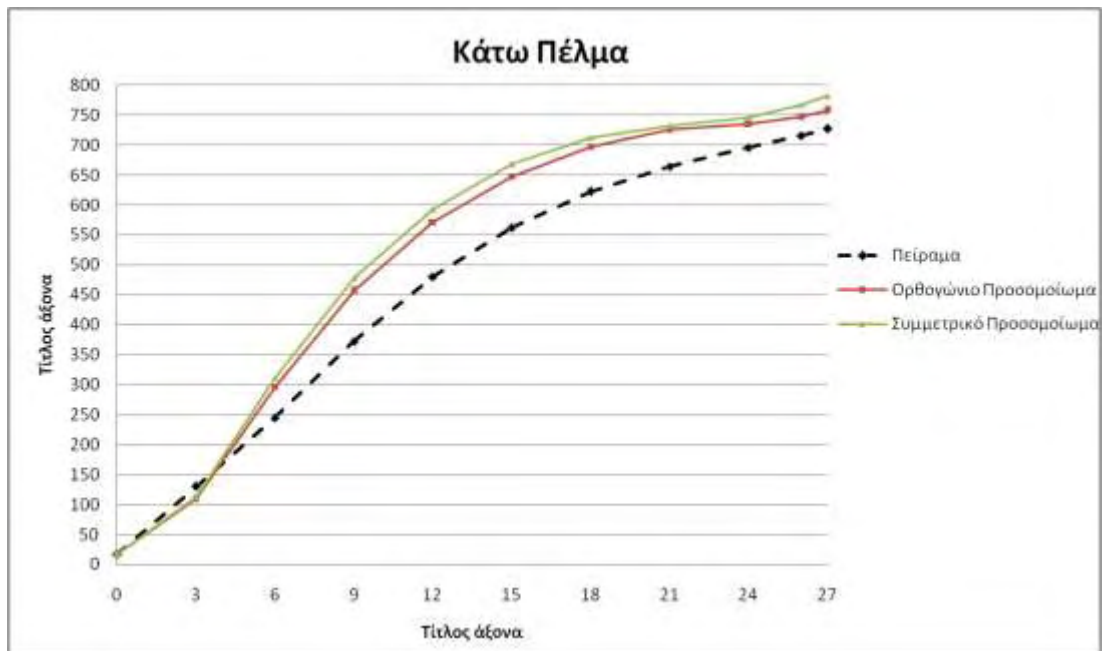
Εικόνα 22 Ορθογώνιο προσομοίωμα (αριστερά), Συμμετρικό Προσομοίωμα (δεξιά)



Σχήμα 5. 1 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλατος με παράμετρο τη γεωμετρία



Σχήμα 5. 2 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο τη γεωμετρία

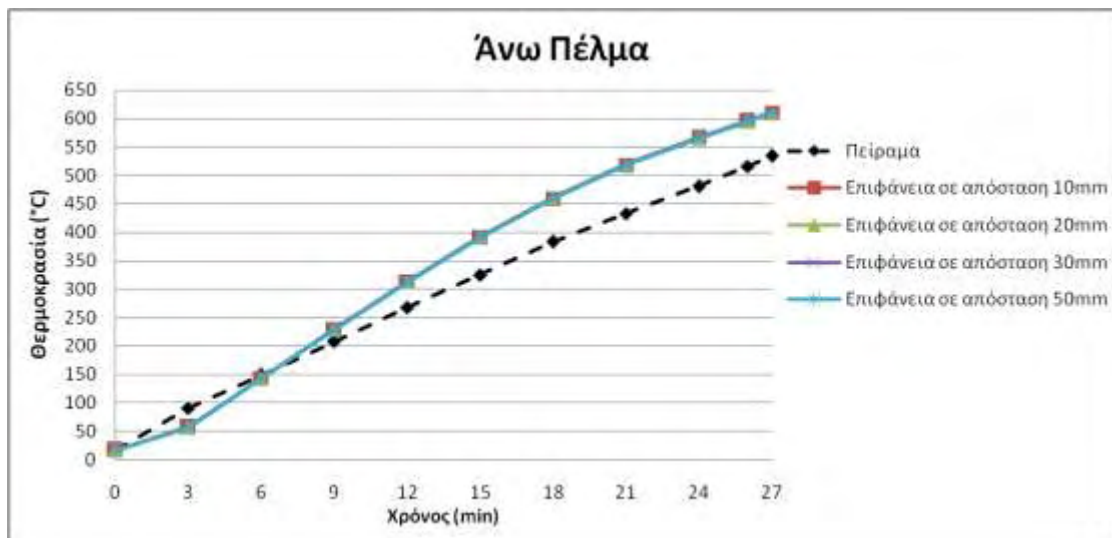


Σχήμα 5. 3 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με παράμετρο τη γεωμετρία

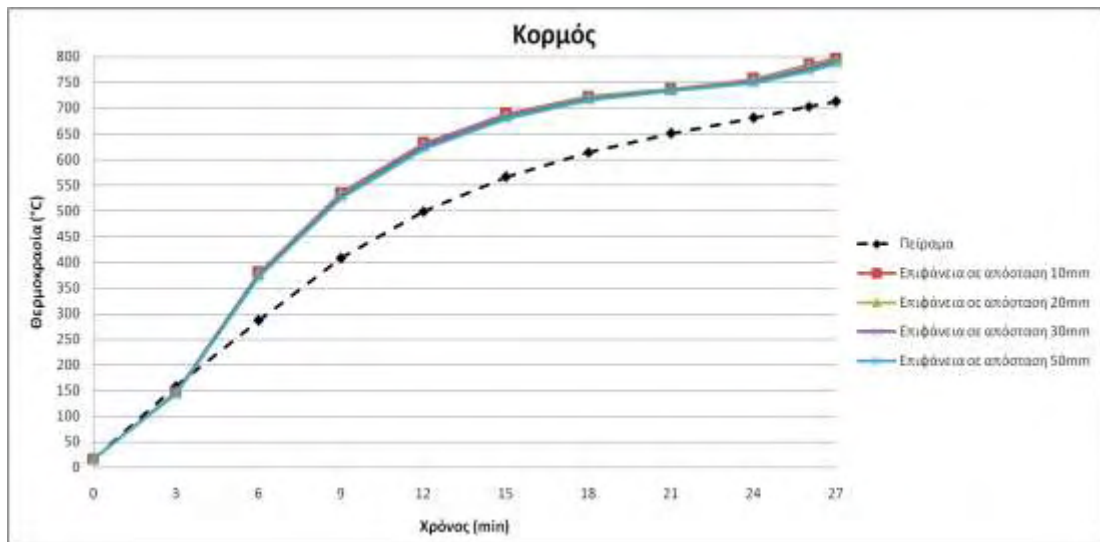
Όπως παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα, το προσομοίωμα ορθογωνικής γεωμετρίας παρουσιάζει αποτελέσματα που κυμαίνονται ελαφρώς πιο κοντά στις μέσες θερμοκρασίες του πειράματος. Πιθανώς αυτό είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών γωνιών σχετικής θέσης των επιφανειών που συμμετέχουν στην μεταφορά θερμότητας και που οδηγούν σε διαφορετικό συντελεστή θέας.

5.5.2 Ανάλυση με Παράμετρο την Απόσταση της Επιφάνειας Θέρμανσης από τη Δοκό

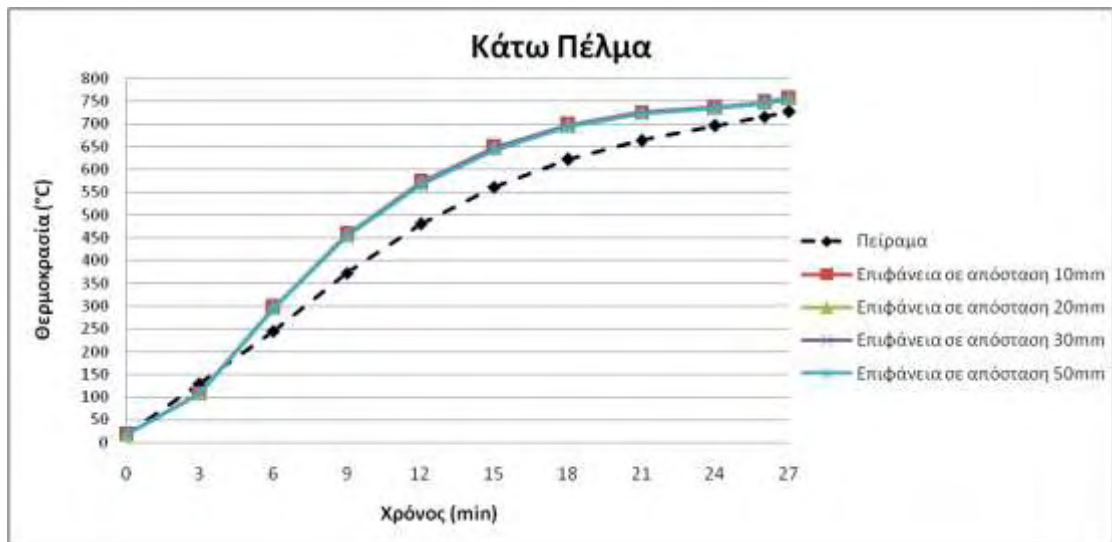
Επιλέχθηκε η περαιτέρω εξέταση προσομοιωμάτων με επιφάνεια θέρμανσης του ορθογωνίου τύπου γεωμετρίας στην προσπάθεια προσέγγισης των τιμών του πειράματος. Στις επόμενες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος η απόσταση της επιφάνειας από τα πέλματα της μεταλλικής δοκού. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι αποστάσεις 10mm, 20mm, 30mm και 50mm. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών της μεταλλικής δοκού δίνονται στα σχήματα 5.4, 5.5, 5.6.



Σχήμα 5. 4 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με παράμετρο την απόσταση

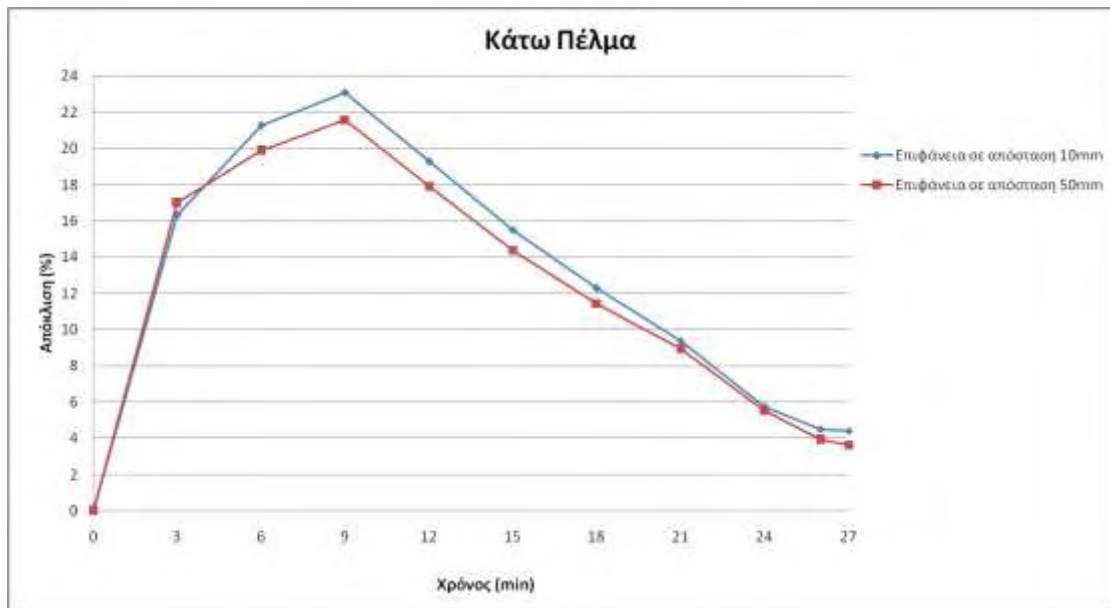


Σχήμα 5. 5 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο την απόσταση



Σχήμα 5. 6 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με παράμετρο την απόσταση

Όπως παρατηρείται στα διαγράμματα του άνω, κάτω πέλματος και του κορμού της μεταλλικής δοκού δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή στις θερμοκρασίες όταν η απόσταση της επιφάνειας λαμβάνεται ως παράμετρος ανάλυσης. Αυτό που παρατηρείται είναι από την προσεχτική εξέταση των αποτελεσμάτων είναι η μικρή σταδιακή μείωση θερμοκρασίας για αύξηση της απόστασης και συνεπώς ελαφρώς καλύτερη προσέγγιση των τιμών του πειράματος. Όπως έχει αναφερθεί, το κάτω πέλμα αποτελεί το κρίσιμο τμήμα της μεταλλικής δοκού και για αυτόν τον λόγο κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που εμφανίζει. Παρέχεται διάγραμμα με την ποσοστιαία, ως προς την τιμή του πειράματος, απόκλιση για το κάτω πέλμα (Σχήμα 5.7). Αφορά το προσομοίωμα με επιφάνεια σε απόσταση 10mm, το οποίο εμφανίζει τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες, και το προσομοίωμα με επιφάνεια σε απόσταση 50mm, το οποίο εμφανίζει τις μικρότερες, για καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της απόστασης της θεωρητικής επιφάνειας.



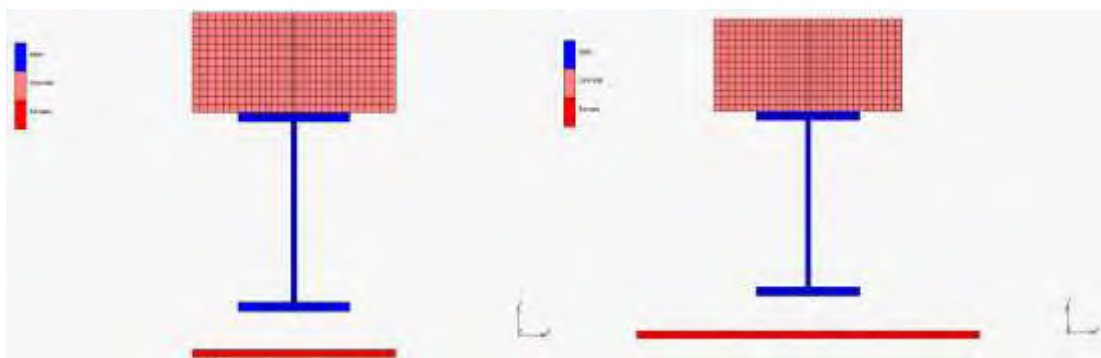
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλεματος με παράμετρο την απόσταση

Παρατηρώντας τη σχέση 5.2, η αύξηση της απόστασης των επιφανειών οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή θέας και αυτός με τη σειρά του σε μικρότερη ροή θερμότητας. Αυτό επιφέρει μικρότερη αύξηση θερμοκρασίας στο μέλος-δέκτη, όπως επιβεβαιώνεται από το σχήμα 5.7.

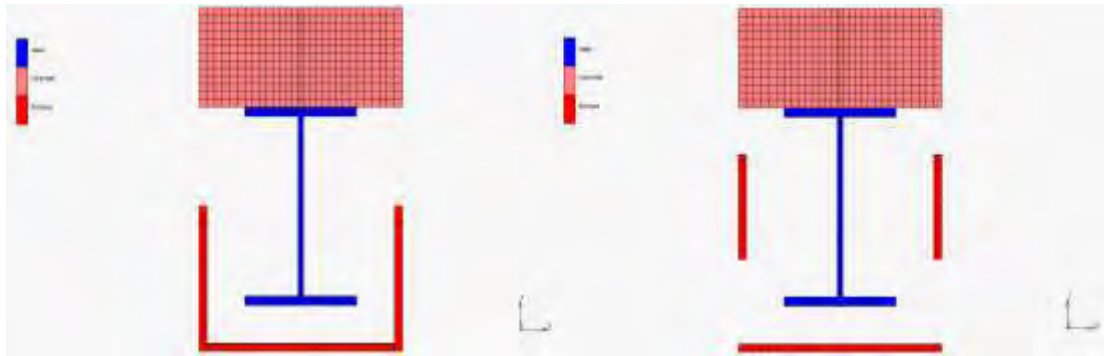
5.5.3 Ανάλυση με Παράμετρο τον Τύπο της Κοιλότητας

Στο επόμενο βήμα ανάλυσης η επιφάνεια θέρμανσης σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί ανοικτή κοιλότητα με την πλάκα σκυροδέματος. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ορίστηκε ίση με την θερμοκρασία αερίου του φούρνου στο πείραμα για να αποτραπεί η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ κοιλότητας και περιβάλλοντος.

Στις εικόνες 23, 24 φαίνεται η γεωμετρία της επιφάνειας θέρμανσης για κάθε προσομοίωμα ανοικτής κοιλότητας. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια θέρμανσης εκτείνεται σε όλο το μήκος της δοκού.

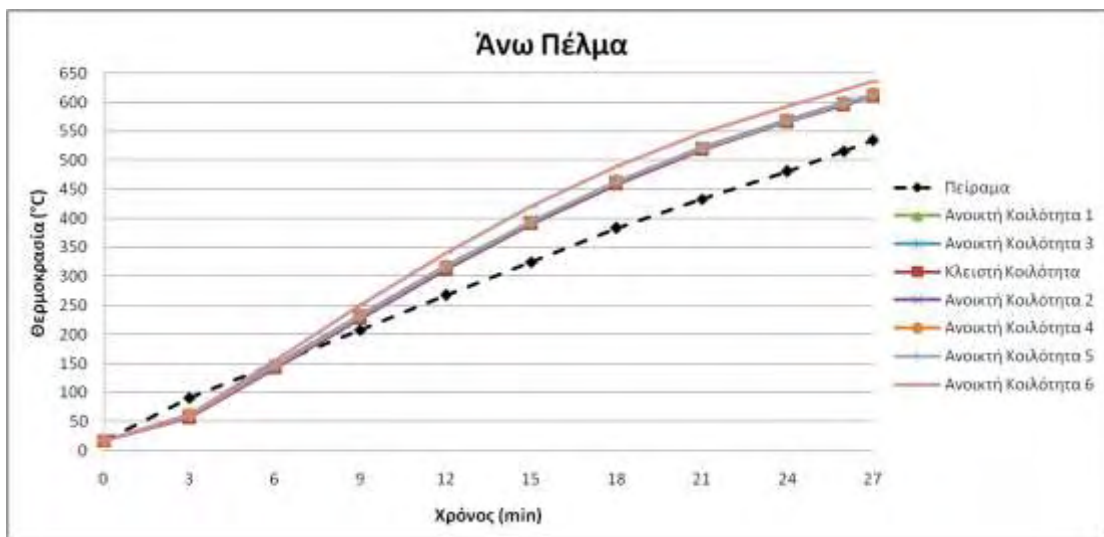


Εικόνα 23 Ανοικτή κοιλότητα 1,2,3,4. Επιφάνεια πλάτους, αντίστοιχα: 1.086m, 0.266m, 0.686m, 0.486m

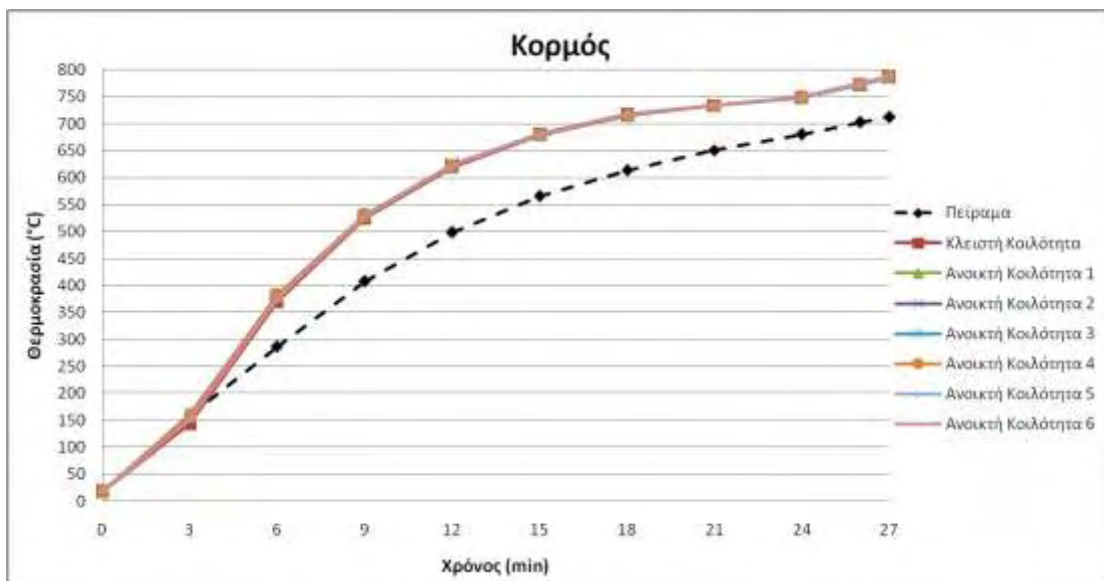


Εικόνα 24 Ανοικτή κοιλότητα 5 (αριστερά), Ανοικτή Κοιλότητα 6 (δεξιά)

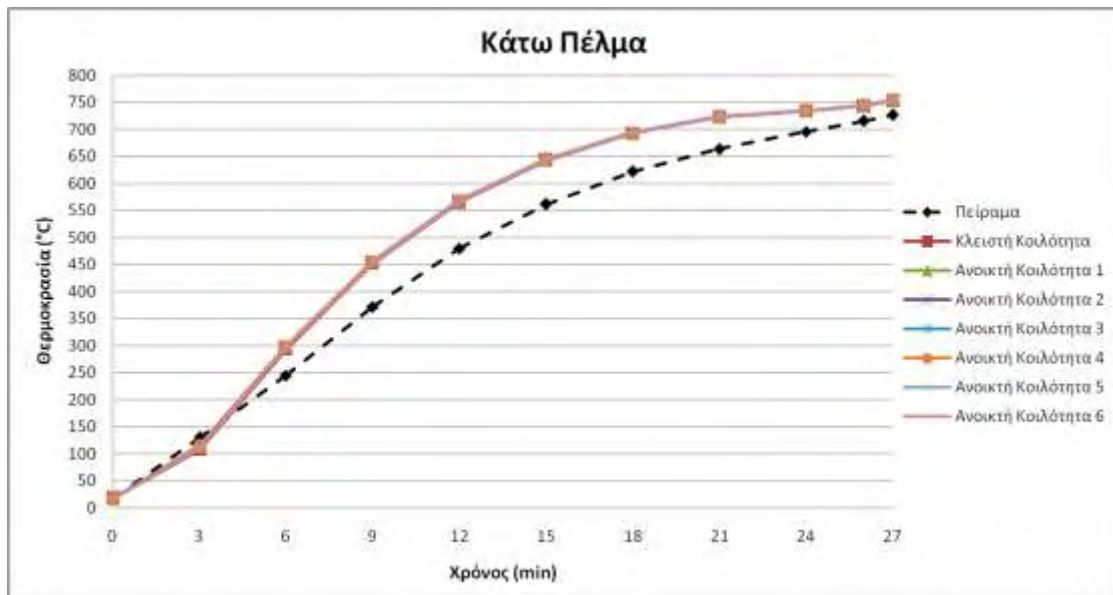
Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών της δοκού για κάθε προσομοίωμα συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται στα σχήματα 5.8, 5.9, 5.10.



Σχήμα 5. 8 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με παράμετρο την κοιλότητα



Σχήμα 5. 9 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με παράμετρο την κοιλότητα



Σχήμα 5. 10 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλεματος με παράμετρο την κοιλότητα

Είναι προφανές παρατηρώντας τα διαγράμματα ότι η φύση της κοιλότητας δεν επηρεάζει τις θερμοκρασίες που αναπτύσσει η μεταλλική δοκός. Στις επόμενες αναλύσεις χρησιμοποιείται η επιλογή της κλειστής κοιλότητας.

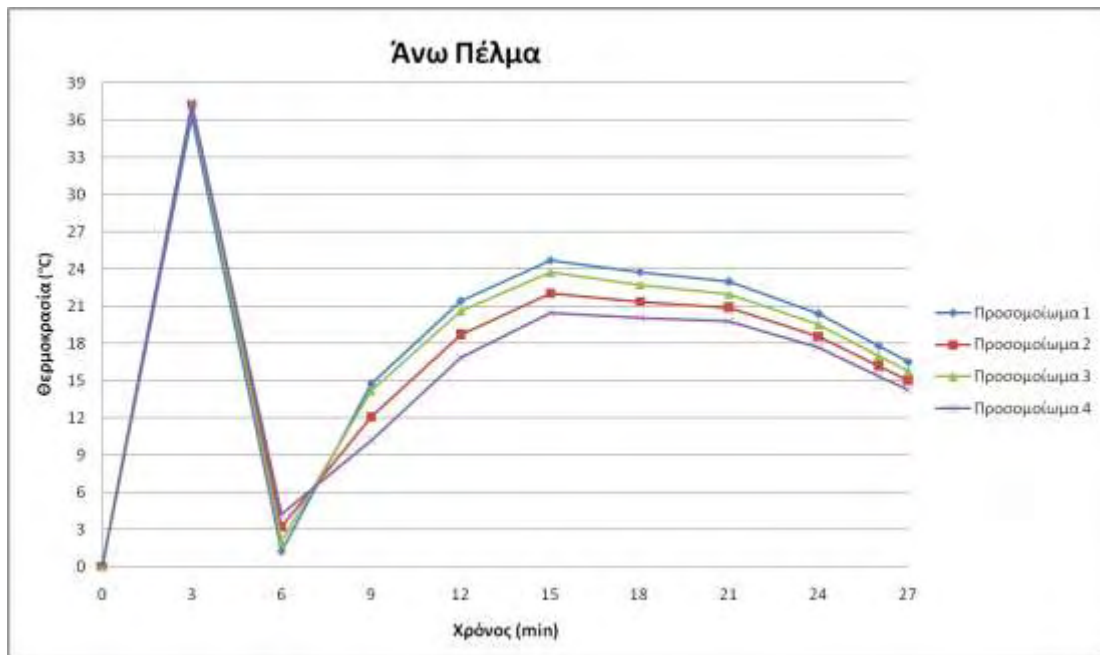
5.5.4 Ανάλυση με Παράμετρο τα Θερμικά Χαρακτηριστικά της Πλάκας Σκυροδέματος

Στα προηγούμενα κεφάλαια οι αναλύσεις αφορούσαν πλάκα σκυροδέματος με υπόθεση μέγιστης τιμής θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμότητας για τα όρια που ορίζει ο κανονισμός (Σχέσεις 3.16, 3.17, 3.18). Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλύσεις με διαφορετικές υποθέσεις θερμικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι σε όλα τα μοντέλα προσομοίωσης η θεωρητική επιφάνεια θέρμανσης βρίσκεται σε απόσταση 20mm από τα πέλεματα της μεταλλικής δοκού.

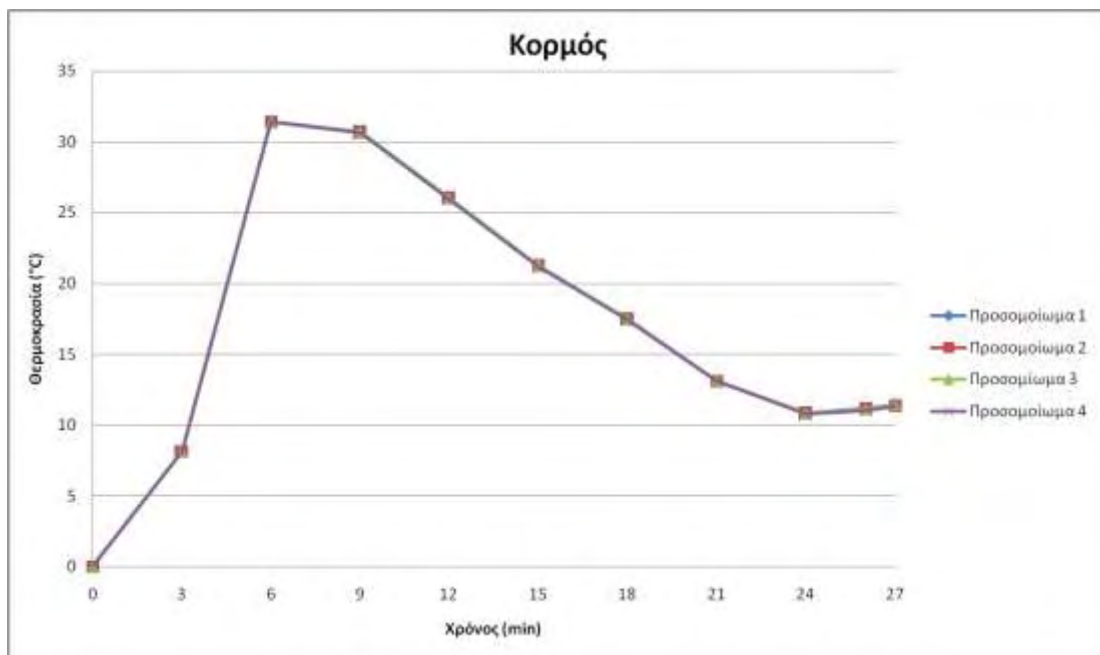
Τα προσομοιώματα που εξετάστηκαν είναι τα εξής:

- *Προσομοίωμα 1:* Μέση τιμή των ορίων του κανονισμού για τη θερμική αγωγιμότητα και μέσος όρος των τιμών ειδικής θερμότητας για τα τρία επίπεδα υγρασίας
- *Προσομοίωμα 2:* Μέγιστη τιμή θερμικής αγωγιμότητας και μέσος όρος των τιμών ειδικής θερμότητας για τα τρία επίπεδα υγρασίας
- *Προσομοίωμα 3:* Μέγιστη τιμή θερμικής αγωγιμότητας και τιμές ειδικής θερμότητας για μηδενική υγρασία
- *Προσομοίωμα 4:* Μέγιστη τιμή θερμικής αγωγιμότητας και τιμές ειδικής θερμότητας για επίπεδο υγρασίας 3%

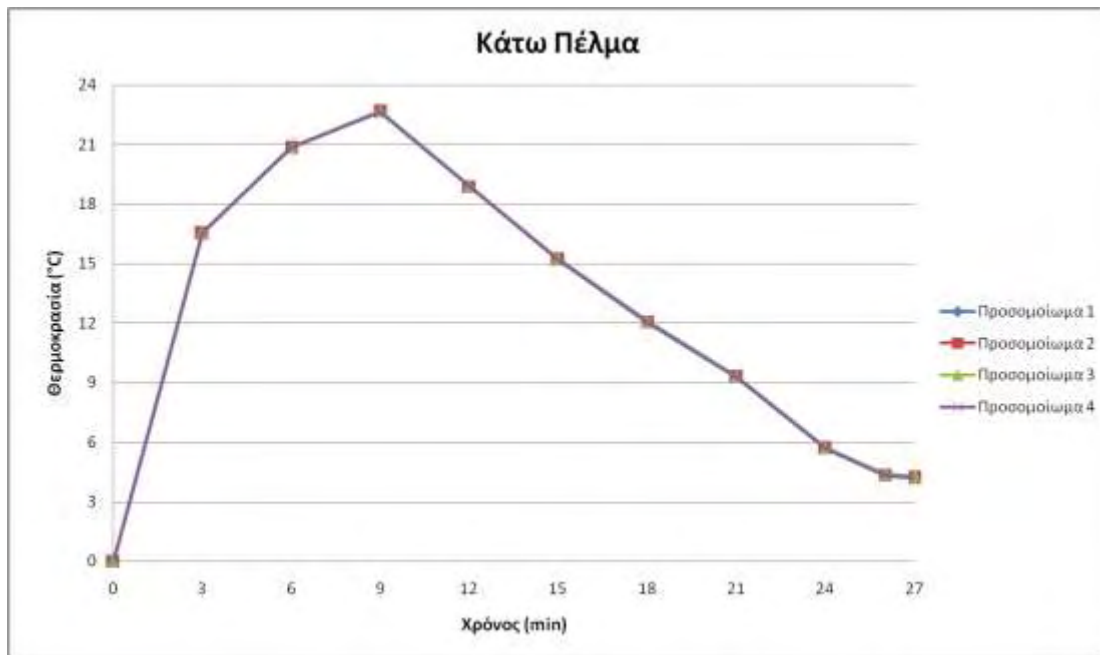
Για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρέχονται διαγράμματα με τις ποσοστιαίες αποκλίσεις ως προς τις θερμοκρασίες του πειράματος για τα παραπάνω εξεταζόμενα μοντέλα προσομοίωσης.



Σχήμα 5. 11 Διάγραμμα αποκλίσεων άνω πέλματος με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος



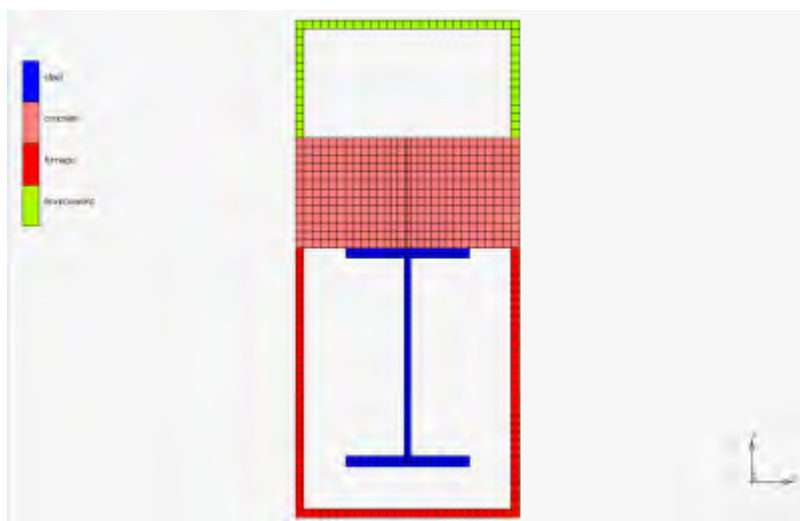
Σχήμα 5. 12 Διάγραμμα αποκλίσεων κορμού με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος



Σχήμα 5. 13 Διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλματος με παράμετρο τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος

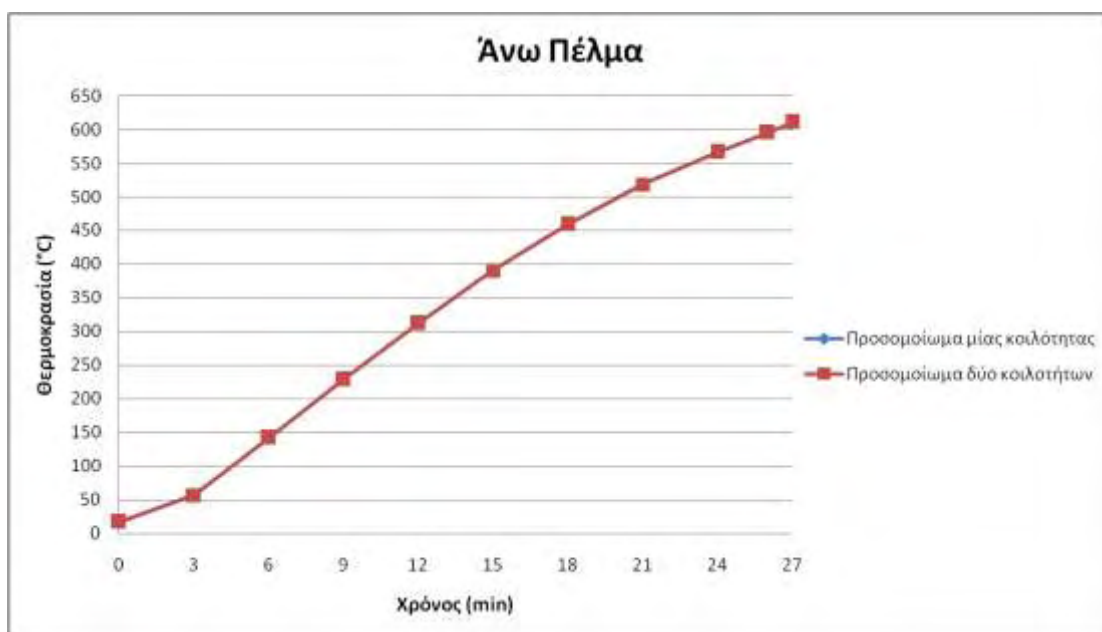
Οι θερμοκρασίες στον κορμό και το κάτω πέλμα δεν παρουσιάζουν μεταβολές από την αλλαγή των θερμικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Στο πάνω πέλμα, ωστόσο, οι θερμοκρασίες για μέγιστη θερμική αγωγιμότητα και υγρασία 3% είναι χαμηλότερες και συνεπώς εμφανίζουν μικρότερες αποκλίσεις με τις τιμές του πειράματος. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα για υγρασία 3% το σκυρόδεμα εμφανίζει την μεγαλύτερη ειδική θερμότητα. Συνεπώς, συνυπολογίζοντας και την μέγιστη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, αυξάνεται η ικανότητα του σκυροδέματος να αποθηκεύει ενέργεια μειώνοντας τη ροή θερμότητας που καταλήγει στο άνω πέλμα της μεταλλικής δοκού.

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή του πειράματος, η πλάκα σκυροδέματος τοποθετείται στο άνω πέλμα της δοκού με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείνει πλήρως την οροφή του φούρνου. Για να ενταχθεί στους υπολογισμούς η δυνατότητα ανταλλαγής θερμότητας του σκυροδέματος με το περιβάλλον προσομοιώθηκε μια δεύτερη κοιλότητα η οποία περιελάμβανε την άνω επιφάνεια του σκυροδέματος (Εικόνα 25).

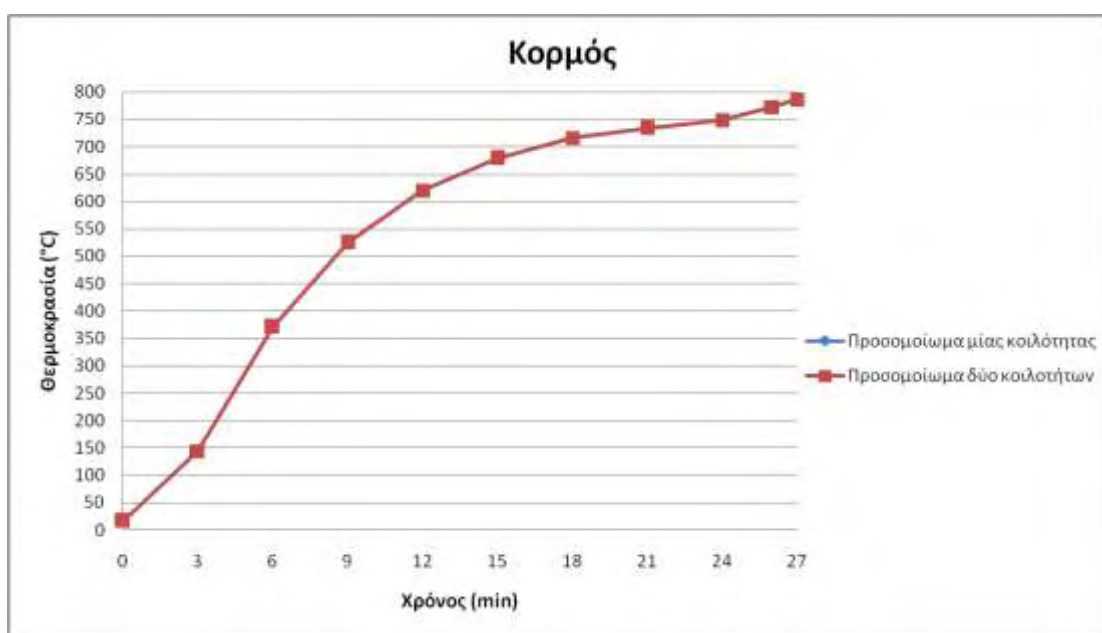


Εικόνα 25 Προσομοίωμα δεύτερης επιφάνειας θέρμανσης

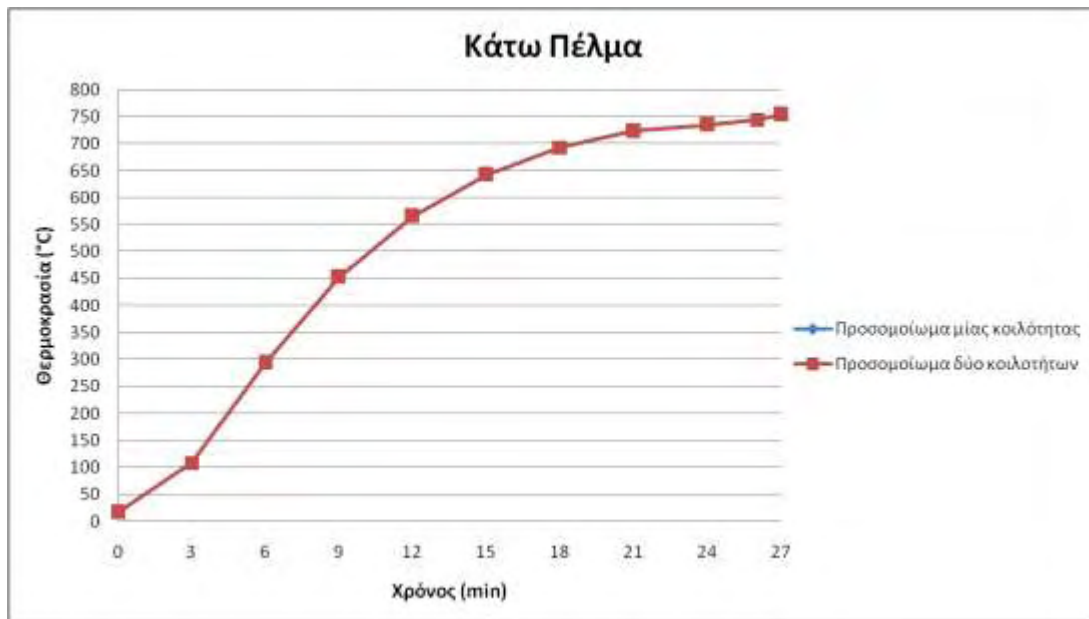
Η δεύτερη αυτή επιφάνεια θέρμανσης φορτίστηκε με σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 17°C. Ορίστηκαν οι επιφάνειες που συμμετέχουν στην μετάδοση θερμότητας, δηλαδή η δεύτερη θεωρητική επιφάνεια θέρμανσης ως πομπός και η άνω επιφάνεια του σκυροδέματος ως δέκτης. Οι συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί που προτείνει ο κανονισμός και αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας άνω, κάτω πέλματος και κορμού αυτού του προσομοιώματος σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες που εξάγονται για το προσομοίωμα χωρίς τη χρήση της δεύτερης κοιλότητας.



Σχήμα 5. 14 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος για μία και δύο κοιλότητες



Σχήμα 5. 15 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού για μία και δύο κοιλότητες



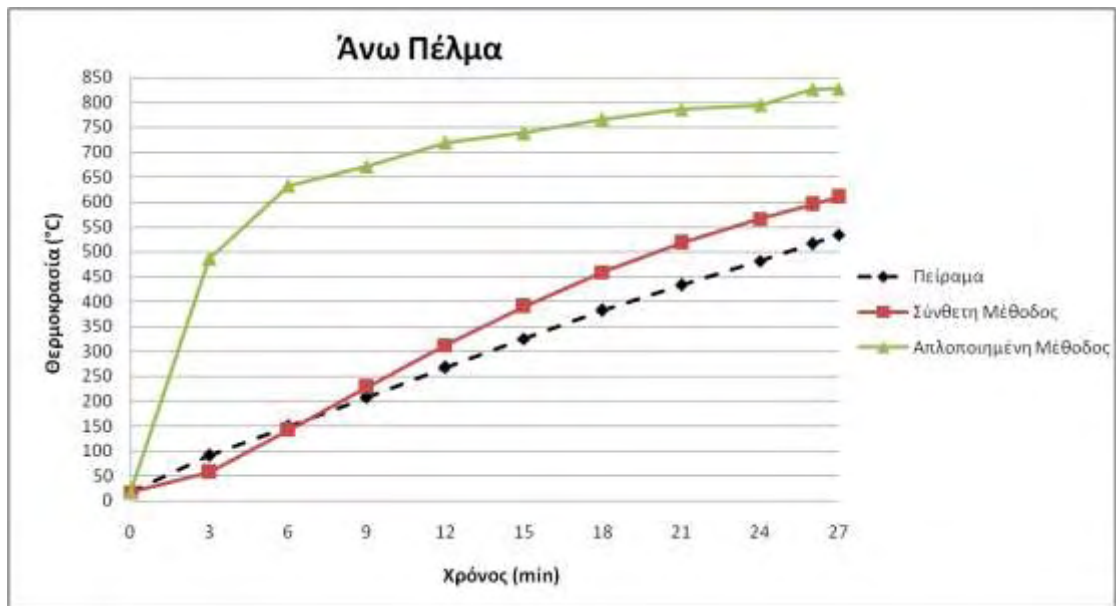
Σχήμα 5. 16 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλεματος για μία και δύο κοιλοτήτες

Όπως παρατηρείτε στα σχήματα 5,14, 5.15, 5.16 αυτή η μέθοδος προσομοίωσης δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα θερμοκρασιών σε κανένα σημείο της διατομής. Δεν λαμβάνει χώρα, συνεπώς, σημαντική ανταλλαγή θερμικής ενέργειας μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και του περιβάλλοντος.

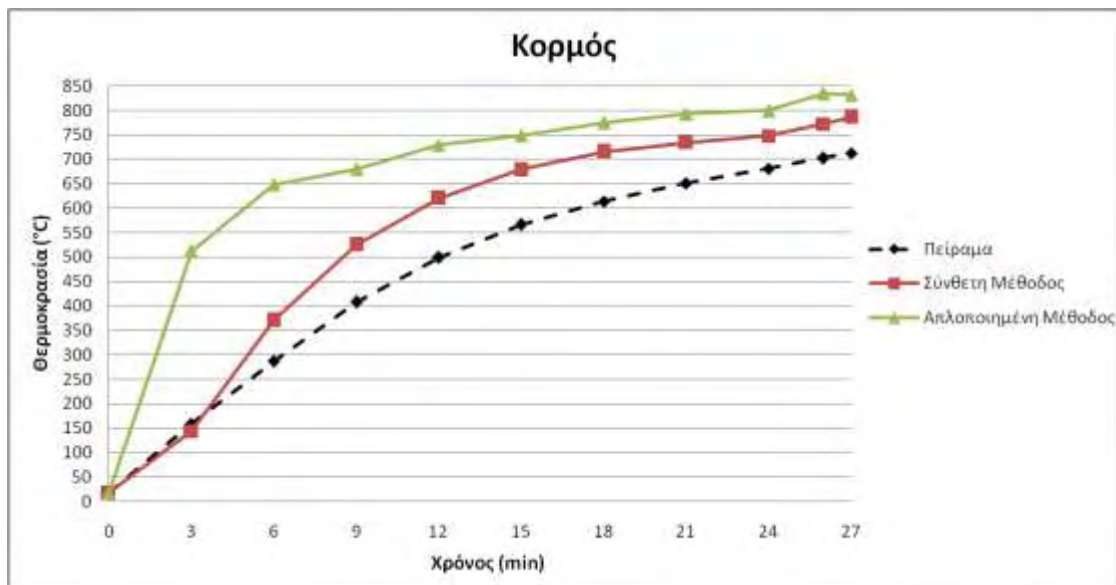
5.6 Απλοποιημένη Μέθοδος Προσομοίωσης της Μεταφοράς Θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή του εξεταζόμενου πειράματος, κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής του μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες του αερίου στο εσωτερικό του φούρνου σε διάφορες θέσεις εκατέρωθεν της δοκού και υπολογίστηκε μια μέση τιμή για κάθε χρονική παρατήρηση. Συνεπώς, πιθανή μεθοδολογία προσομοίωσης του πειράματος αποτελεί η θεώρηση αυτών των τιμών ως θερμοκρασία του περιβάλλοντος αερίου και η εφαρμογή τους στις εξωτερικές επιφάνειες της μεταλλικής δοκού. Αυτή η μεθοδολογία αγνοεί την μεταφερόμενη θερμική ενέργεια μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής και ορίζει την αγωγή και τους θερμικούς νόμους συμπεριφοράς του χάλυβα ως τον μοναδικό μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας στην δοκό. Για την προσομοίωση της μεθόδου αγνοήθηκε η θεωρητική επιφάνεια θέρμανσης και επιβλήθηκαν οι μέσες τιμές του αερίου από το πείραμα σαν θερμικό φορτίο στις εκτεθειμένες επιφάνειες της δοκού.

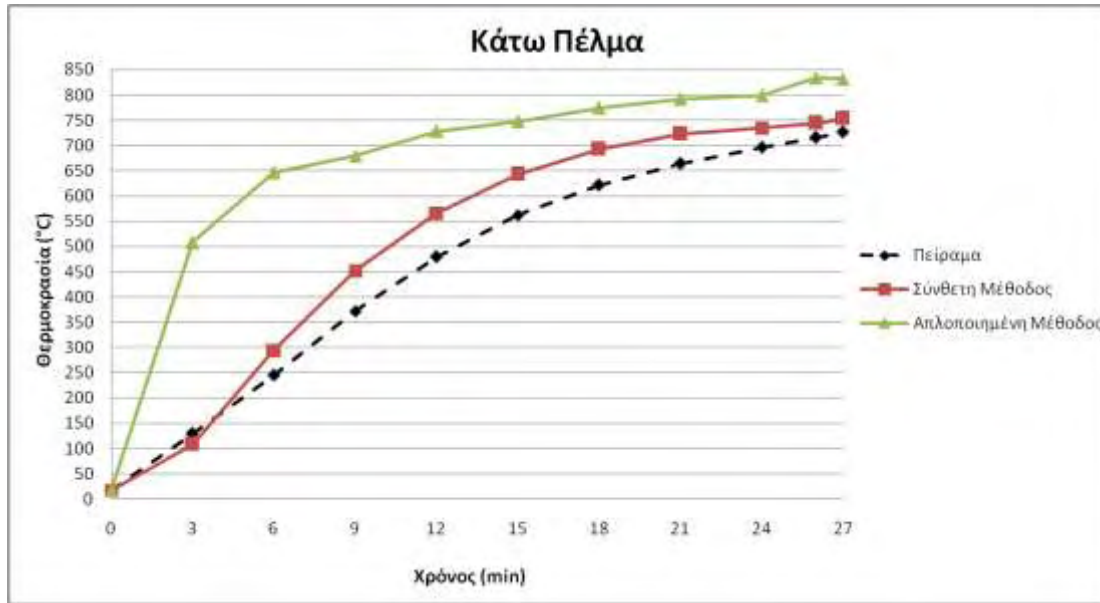
Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών για το χρονικό διάστημα των 27 λεπτών οργανώθηκαν και παρουσιάζονται στα σχήματα 5.17, 5.18, 5.19 σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες της σύνθετης μεθόδου προσομοίωσης και του πειράματος.



Σχήμα 5. 17 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με την απλοποιημένη μέθοδο



Σχήμα 5. 18 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με την απλοποιημένη μέθοδο



Σχήμα 5. 19 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέληματος με την απλοποιημένη μέθοδο

Τα διαγράμματα επιβεβαιώνουν ότι η σύνθετη μέθοδος που λαμβάνει υπόψη και τους τρεις μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας αποδίδει αποτελέσματα με μικρότερη απόκλιση σε σχέση με αυτά του πειράματος.

5.7 Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μη Πυροπροστατευμένης Μεταλλικής Δοκού σύμφωνα με τις Διατάξεις του Ευρωκώδικα

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογισμός της θερμοκρασίας της μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού για το χρονικό διάστημα διεξαγωγής του πειράματος σε συμφωνία με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1.2 και του Ευρωκώδικα 1 Μέρος 1-2.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προσδιορίστηκε από τη σχέση του Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1.2 για μη πυροπροστατευμένη μεταλλική δοκό που δόθηκε στο κεφάλαιο 3:

$$\Delta\theta_{a,t} = 0.9K_{sh} \frac{A_m/V}{c_a\rho_a} \dot{h}_{net}\Delta t$$

Σημειώνεται ότι ως θερμοκρασία περιβάλλοντος αερίου ορίστηκαν οι μέσες τιμές του αερίου στο εσωτερικό του φούρνου από το πείραμα. Όπως προτείνει ο κανονισμός, το χρονικό βήμα υπολογισμού ορίστηκε σε 5 sec. Για την εξαγωγή τιμών θερμοκρασίας αερίου στις διάφορες χρονικές στιγμές πραγματοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή στις δοσμένες μετρήσεις του πειράματος.

Ο συντελεστής σκίασης προσδιορίστηκε από την σχέση:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_{box}}{A_m/V} \quad (5.3)$$

όπου $\frac{A_m}{V}$ είναι ο συντελεστής διατομής που δίνεται για διατομή διπλού ταυ με έκθεση στη φωτιά από τρεις πλευρές από τη σχέση:

$$A_m/V = \frac{\text{περίμετρος της διατομής που εκτίθεται στη φωτιά}}{\text{εμβαδόν της διατομής}} = 176.78 \text{ m}^{-1}$$

$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{box}$ είναι ο συντελεστής διατομής για υποθετικό ορθογώνιο πλαίσιο που περικλείει την διατομή ίσος με:

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{box} = \frac{\text{περίμετρος της διατομής που εκτίθεται στη φωτιά}}{\text{εμβαδόν της διατομής}} = 124.81 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Συνεπώς } k_{sh} = \frac{[\frac{A_m}{V}]_{box}}{A_m/V} = 0.706$$

Η ειδική θερμότητα (c_a) του χάλυβα υπολογίζεται από την σχέση 3.15.

Η πυκνότητα μάζας (ρ_a) του χάλυβα ορίστηκε σε $7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Η καθαρή ροή θερμότητας υπολογίστηκε από τη σχέση του Ευρωκώδικα 1 Μέρος 1-2:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (5.4)$$

Στην παραπάνω σχέση η ροή θερμότητας υπολογίζεται σαν το άθροισμα της ροής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής.

Η ροή θερμότητας λόγω συναγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{h}_{net,c} = a_c(\theta_g - \theta_m) \quad (5.5), \text{ όπου}$$

a_c ο συντελεστής συναγωγής ίσος με $25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ για θερμοκρασίες που ακολουθούν την τυπική φωτιά

θ_g η θερμοκρασία του αερίου για το χρονικό βήμα ίση με τη δοσμένη από το πείραμα τιμή για το αέριο στο εσωτερικού του φούρνου

θ_m η θερμοκρασία της επιφάνειας της μεταλλική δοκού που υπολογίστηκε στο προηγούμενο χρονικό βήμα

Η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.6), \text{ όπου}$$

Φ συντελεστής διαμόρφωσης ίσος με τη μονάδα

ε_m ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του μέλους ίσος με 0.7

ε_f ο συντελεστής εκπομπής της φωτιάς ίσος με τη μονάδα

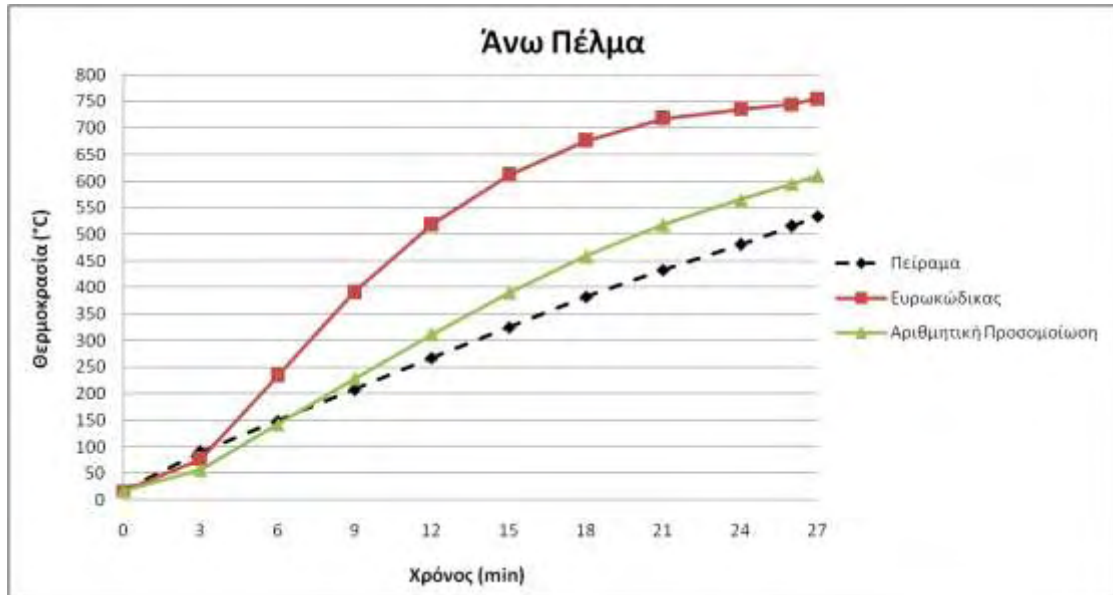
σ η σταθερά Stephan Boltzmann ίση με $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$

θ_r η θερμοκρασία ακτινοβολίας της φωτιάς, που στη περίπτωση πλήρους έκθεσης του μέλους ισούται με τη θερμοκρασία του αερίου, για το χρονικό βήμα, ίση με τη δοσμένη από το πείραμα τιμή για το αέριο στο εσωτερικού του φούρνου

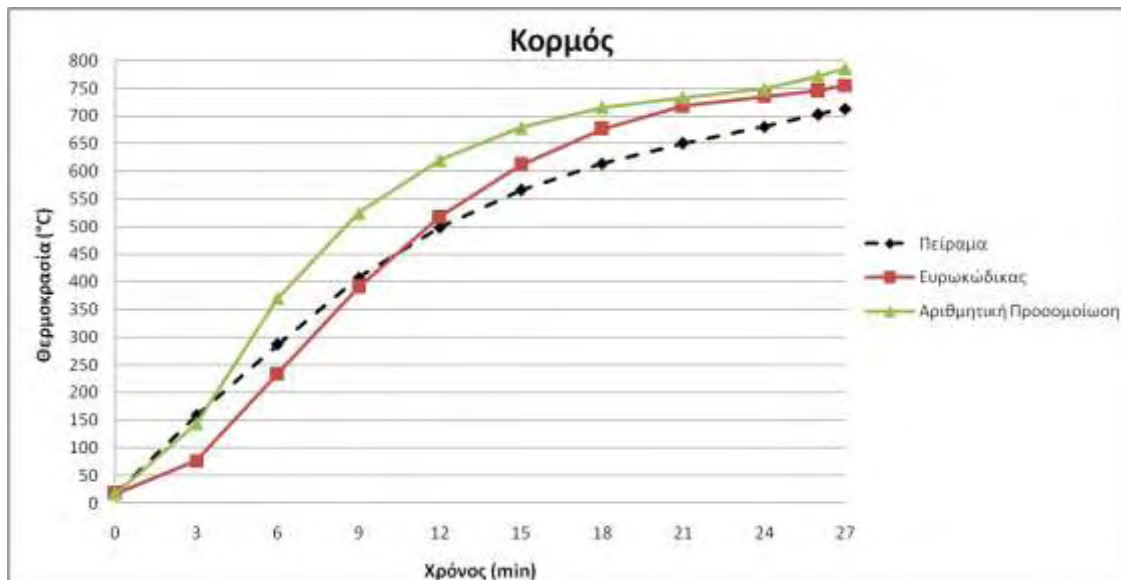
θ_m η θερμοκρασία της επιφάνειας της μεταλλική δοκού που υπολογίστηκε στο προηγούμενο χρονικό βήμα

Σύμφωνα με τον κανονισμό η παραπάνω μεθοδολογία ανάλυσης δίνει αποτελέσματα για ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στη διατομή.

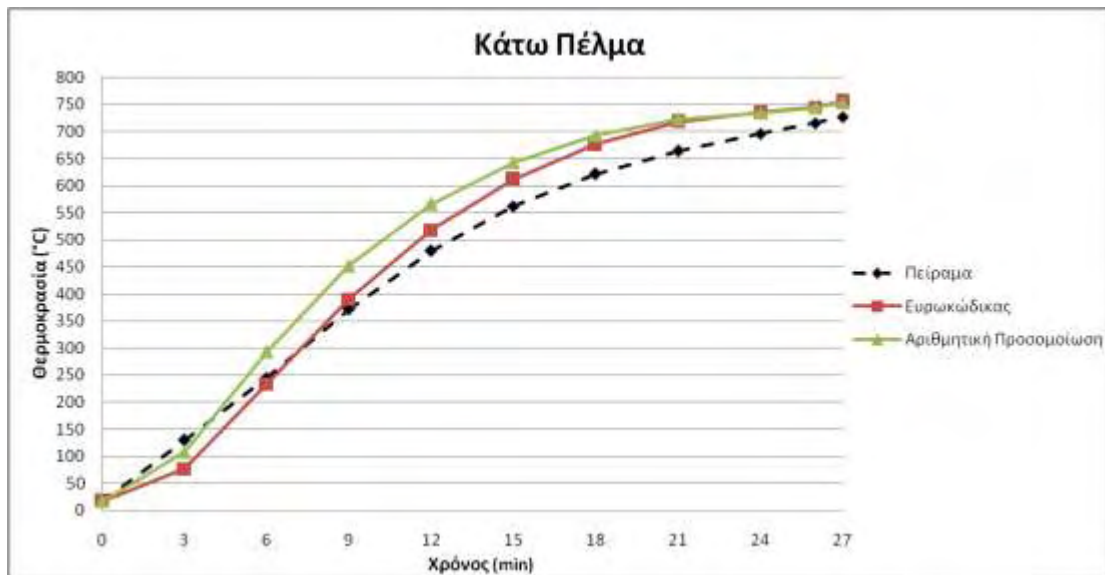
Στα σχήματα 5.20, 5.21, 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε σύγκριση με τη μέση τιμή των μετρήσεων του πειράματος και τις θερμοκρασίες της σύνθετης μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης για τα πέλματα και τον κορμό της μεταλλικής δοκού.



Σχήμα 5. 20 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα



Σχήμα 5. 21 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα

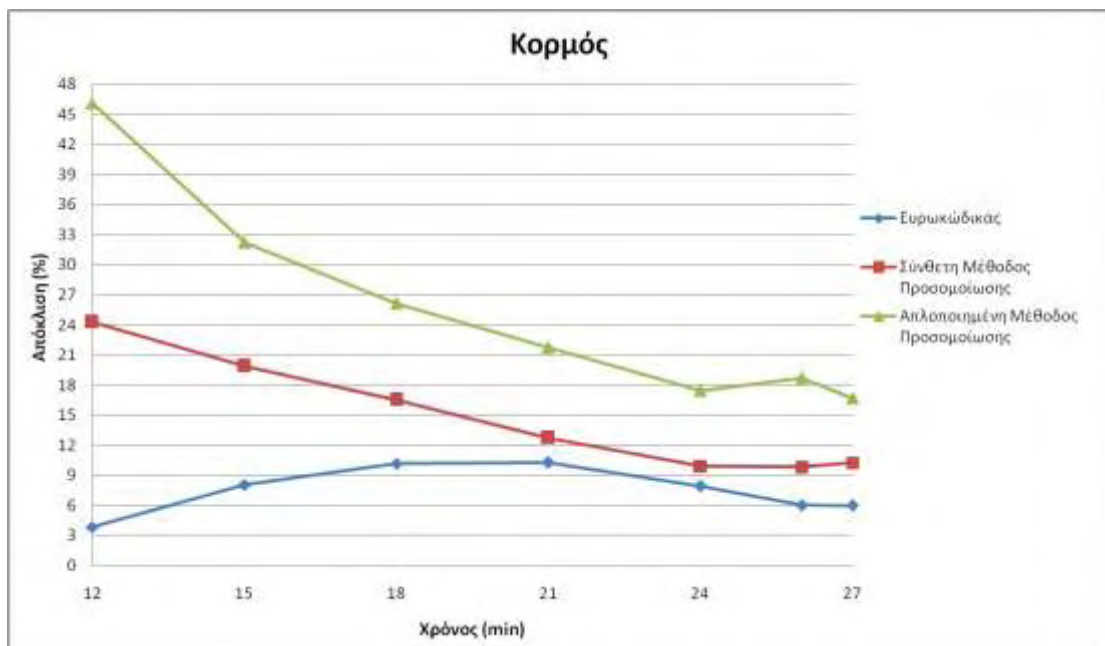


Σχήμα 5. 22 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα

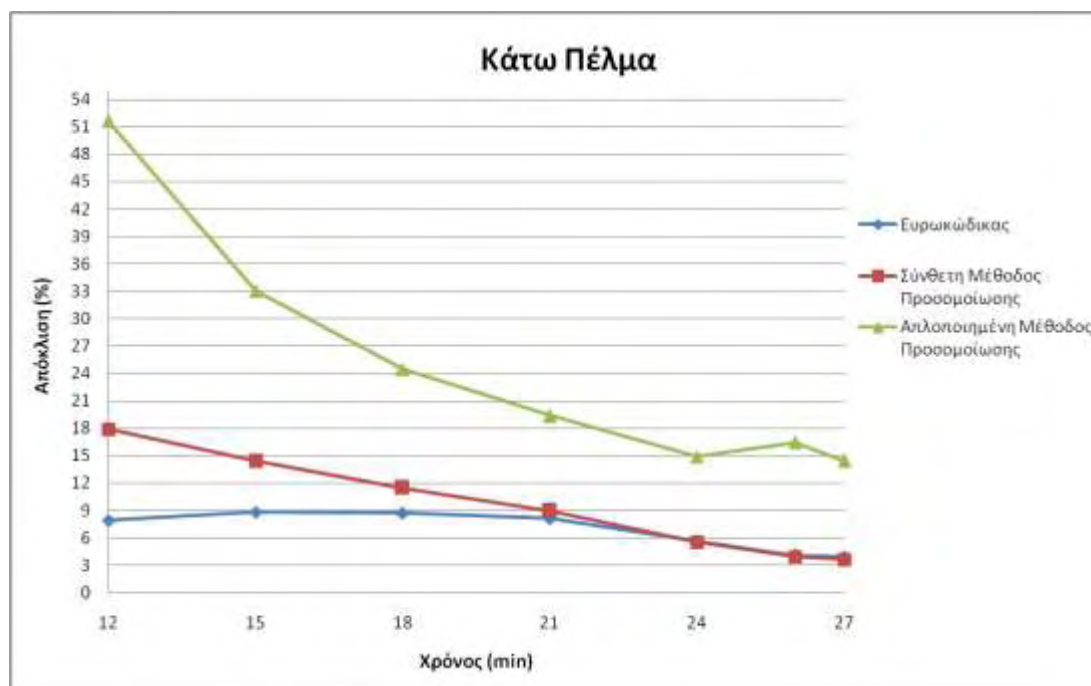
Παρατηρώντας τα διαγράμματα, η ανάλυση με βάση τον Ευρωκώδικα δίνει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις τιμές του πειράματος στο άνω πέλημα, το οποίο τονίζει το λάθος θεώρησης ομοιόμορφης κατανομής σε όλη τη διατομή. Στον κορμό και στο κάτω πέλημα οι θερμοκρασίες ανάλυσης με Ευρωκώδικα είναι πιο κοντά στις θερμοκρασίες του πειράματος από αυτές που εξάχθηκαν με την αριθμητική προσομοίωση χωρίς ωστόσο να εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις, ιδιαίτερα στις υψηλότερες θερμοκρασίες.

5.8 Συμπεράσματα

Για τον ορθότερο σχολιασμό των αποτελεσμάτων των αναλύσεων αυτού του κεφαλαίου δίνονται τα διαγράμματα ποσοστιαίας απόκλισης από τις τιμές του πειράματος για τον κορμό και το κάτω πέλημα.



Σχήμα 5. 23 Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποκλίσεων κορμού



Σχήμα 5. 24 Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποκλίσεων κάτω πέλματος

Το σχήματα 5.23 και 5.24 αφορούν τον κορμό και το κάτω πέλμα, καθώς αυτά εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία. Οι θερμοκρασίες που σημειώνονται πριν το 12^ο λεπτό της ανάλυσης και της πειραματικής διαδικασίας είναι χαμηλές και δεν δημιουργούν κίνδυνο αστοχίας του μέλους και γι' αυτό παραλείπονται.

Από τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 5 εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

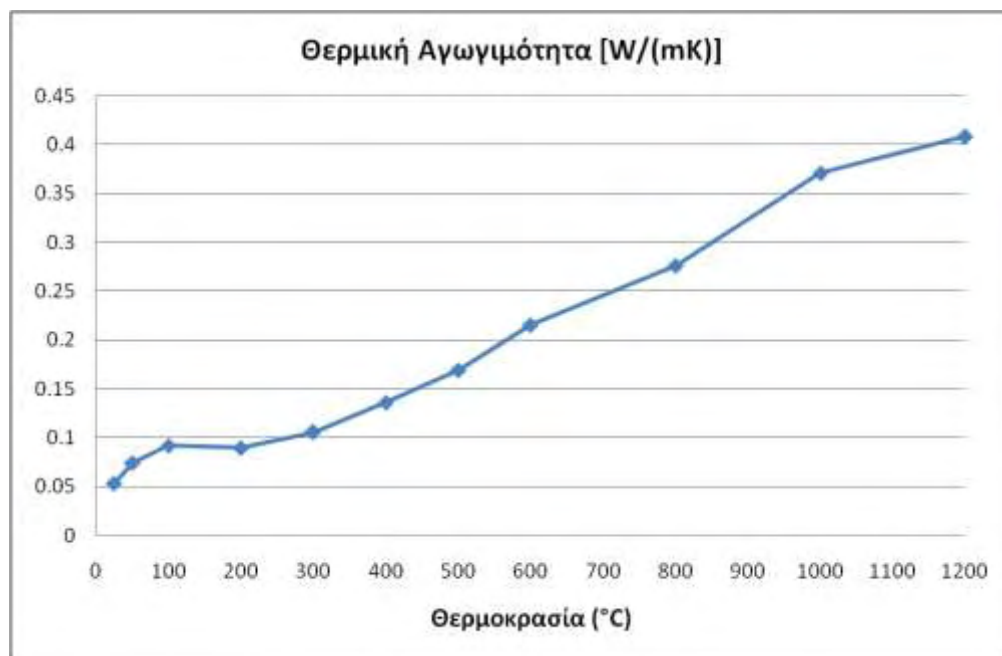
- Ο υπολογισμός τη θερμοκρασίας με βάσει τις διατάξεις του Ευρωκώδικα προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια ως προς τις δοσμένες, από το πείραμα, τιμές τόσο για τον κορμό όσο και για το κάτω πέλμα. Για το τελευταίο, στο 12^ο λεπτό η απόκλιση είναι στο 8%, ενώ στο 27^ο η απόκλιση παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή του 3%. Στον κορμό η απόκλιση μετά το πέρας του πειράματος είναι στο 6%. Μειονέκτημα της χρήσης του κανονισμού αποτελεί η θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής στην διατομή, καθιστώντας τον ανεπαρκή για λεπτομερή ανάλυση.
- Η απλοποιημένη μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης θα πρέπει να αποφεύγεται. Οι τιμές των αποτελεσμάτων εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες.
- Στη σύνθετη μέθοδο προσομοίωσης, το προσομοίωμα με τιμές που προσεγγίζουν περισσότερο το πείραμα είναι αυτό με ορθογώνια επιφάνεια θέρμανσης σε απόσταση 50mm, κλειστή κοιλότητα και πλάκα σκυροδέματος με μέγιστες τιμές θερμικών ιδιοτήτων.
- Η σύνθετη μέθοδος προσομοίωσης είναι σε θέση να παράγει ορθότερα αποτελέσματα θερμοκρασιών στις υψηλές θερμοκρασίες. Στον κορμό η τελική απόκλιση κυμαίνεται στο 9%. Ωστόσο σημαντικότερη είναι η αξιολόγηση της σύγκλισης της μεθόδου για το κρίσιμο τμήμα της διατομής, το κάτω πέλμα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στον τυπικό σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς η ελάχιστη απαίτηση αντοχής είναι συνήθως 30 λεπτά, η απόκλιση μόλις 3% των τιμών του πειράματος στο 27^ο λεπτό καθιστά τη μέθοδο αξιόπιστο εργαλείο ανάλυσης προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας.

6 Αριθμητική Προσομοίωση Πυροπροστατευμένης Δοκού

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η επιρροή της εφαρμογής υλικού πυροπροστασίας στην αύξηση της θερμοκρασίας της μεταλλικής δοκού. Για τον σκοπό αυτό, υλικό πυροπροστασίας τύπου SFRM προστέθηκε στο μοντέλο προσομοίωσης του προηγούμενου κεφαλαίου και με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίστηκε η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο χρονικό διάστημα των 27 λεπτών. Εξετάστηκαν τα προσομοιώματα με πάχη πυροπροστασίας 5mm, 10mm, 15mm και 20mm.

Το SFRM (*Sprayed Fire Resistive Material*) αποτελεί τη βασική μέθοδο παθητικής πυροπροστασίας μεταλλικών στοιχείων και εφαρμόζεται επιφανειακά. Πρόκειται για τσιμεντοειδές μίγμα με γύψο, βερμικουλίτη και περλίτη. Εξαιτίας της άσχημης αισθητικής που παρουσιάζει μετά την εφαρμογή του, συνήθως κρύβεται πίσω από διακοσμητικά στοιχεία και αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις. Προτιμάται εξαιτίας του χαμηλού του κόστους, της καλής θερμομονωτικής λειτουργίας και των μη τοξικών εκπομπών που παράγονται από την καύση του σε ένα συμβάν φωτιάς (Braxtan & Pessiki, 2011).

Η πυροπροστασία που προσομοιώθηκε ανήκει στην κατηγορία των εκτοξευόμενων υλικών πυροπροστασίας (SFRM) και πρόκειται για το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για θερμομόνωση στο συγκρότημα κτιρίων του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου της Νέας Υόρκης των ΗΠΑ. Παράγεται από την εταιρία με επωνυμία US Mineral Products, Co. και είναι γνωστό ως Blaze Shield Type D. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η πυκνότητα του υλικού είναι $240 \frac{kg}{m^3}$ και τα θερμικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στα σχήματα 6.1, 6.2:



Σχήμα 6. 1 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας SFRM

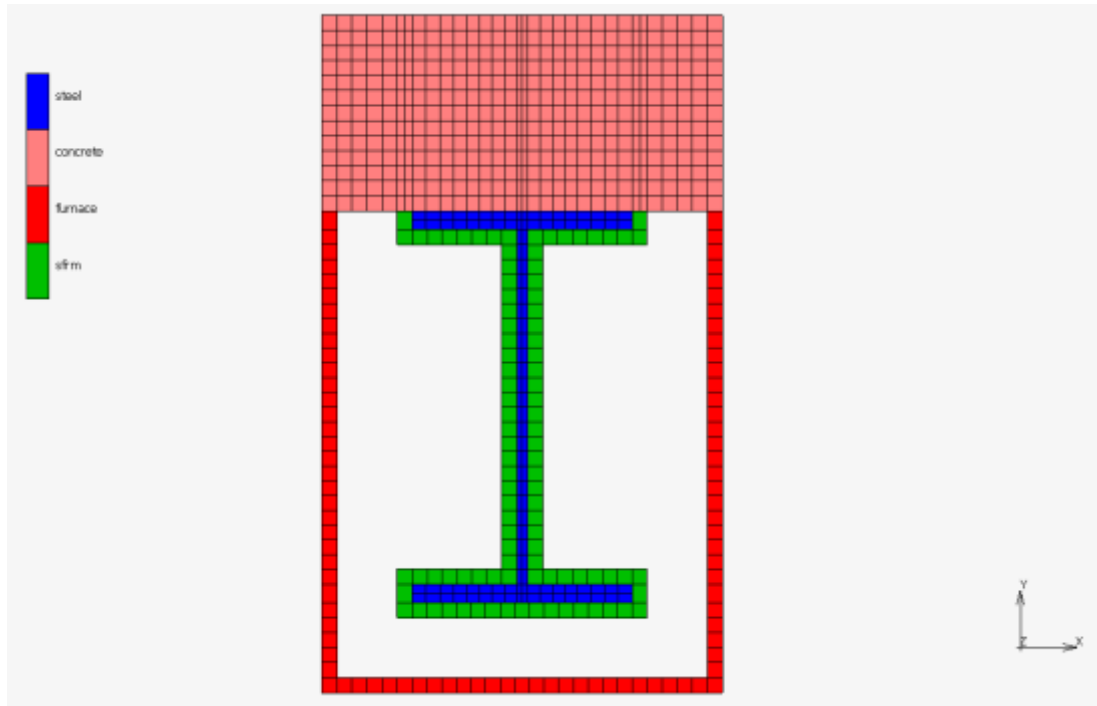


Σχήμα 6. 2 Διάγραμμα ειδικής θερμότητας SFRM

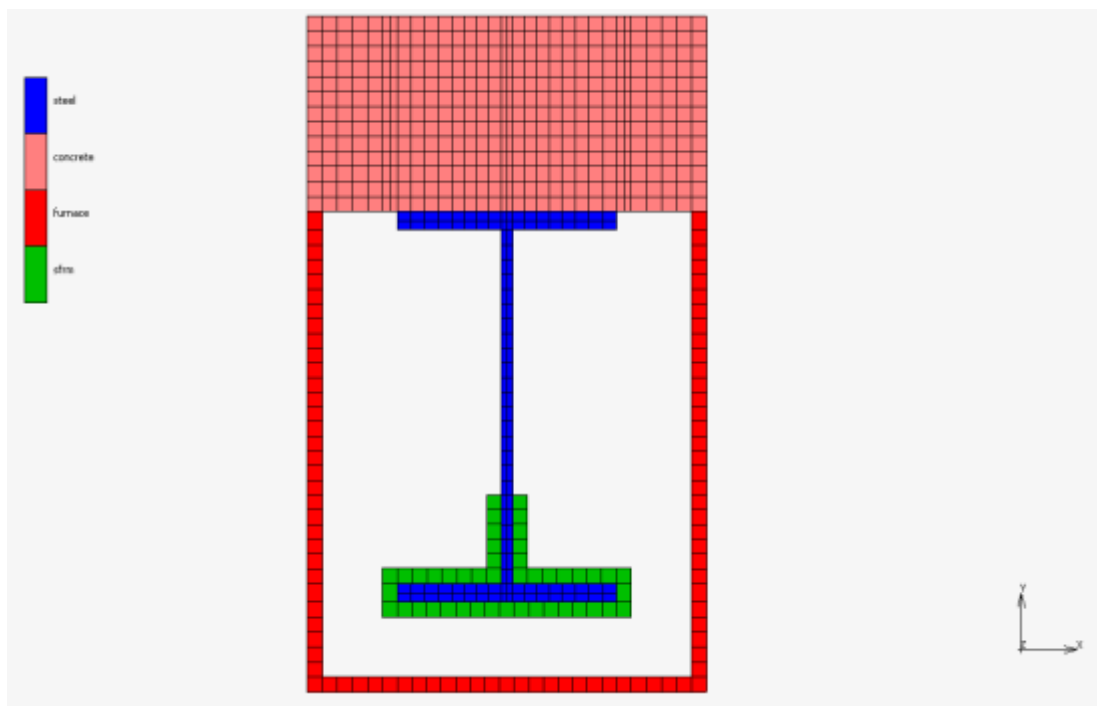
6.1 Πυροπροστασία δίχως Βλάβη

Τα προσομοιώματα με προσθήκη πυροπροστασίας εξετάστηκαν με ανάλυση μεταφοράς θερμότητας σε μεταβλητές συνθήκες σύμφωνα με τη σύνθετη μεθοδολογία προσομοίωσης του φαινομένου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.5. Σε αυτήν την περίπτωση οι εξωτερικές επιφάνειες του SFRM είναι οι αποδέκτες της ενέργειας λόγω ακτινοβολίας και σε αυτές επιβάλλεται η συνοριακή συνθήκη της συναγωγής. Έχοντας ορίσει τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού, ο μηχανισμός της αγωγής ενεργοποιείται και η θερμότητα μεταφέρεται από τις εξωτερικές επιφάνειες του SFRM στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού αυξάνοντας τη θερμοκρασία της. Οι νόμοι του γάλυβα αναλαμβάνουν πλέον να διαδώσουν αυτήν τη ροή θερμότητας στο εσωτερικό του. Η επαφή των δύο υλικών έχει οριστεί ως μονίμως κολλημένη ώστε να αποφευχθούν αλλοιώσεις στα αποτελέσματα από τυχόν αποκολλήσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του προσομοιώματος μη πυροπροστατευμένης μεταλλικής δοκού στα παρακάτω διαγράμματα.

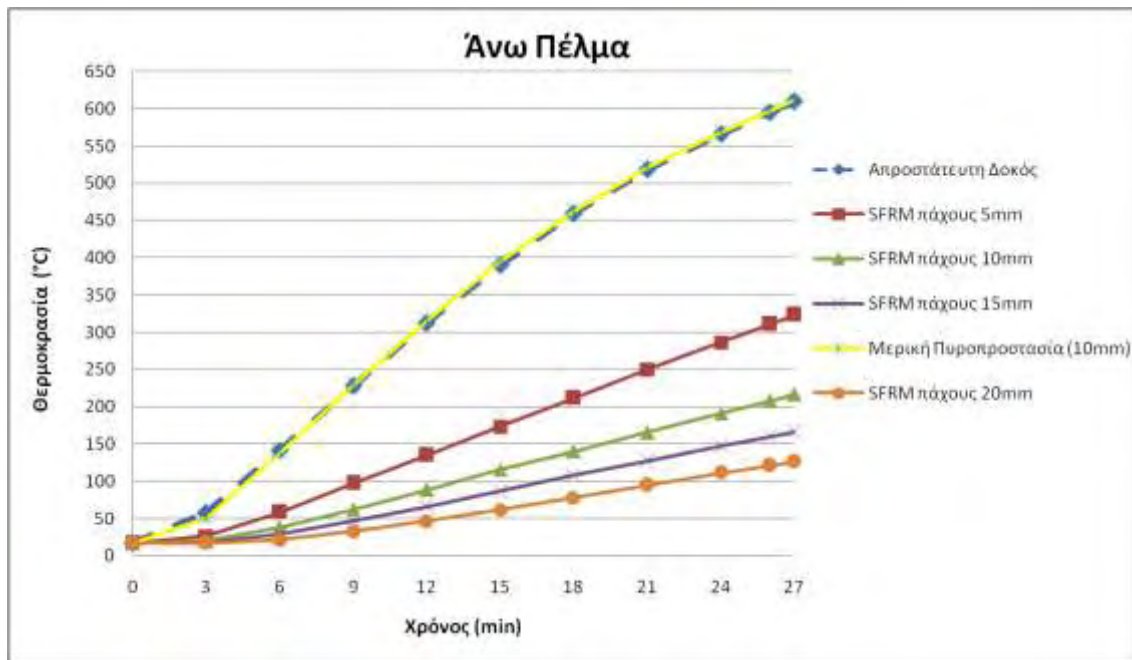
Κρίθηκε ενδιαφέρουσα η εξέταση της μεθόδου μερικής πυροπροστασίας που προτείνει ο Wang (1998). Αφαιρέθηκε, συνεπώς, μέρος της πυροπροστασίας σύμφωνα με την περιγραφή στην ενότητα 3.1. Η απώλεια πυροπροστασίας στο άνω πέλμα και στον κορμό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ροή θερμότητας προς το κάτω πέλμα από τα μη πυροπροστατευμένα τμήματα της διατομής. Ένα ποσοστό αυτής της θερμότητας απορροφάται από το προστατευμένο μέρος του κορμού, ενώ το υπόλοιπο καταλήγει στο κάτω πέλμα οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας του σε σχέση με αυτή που σημειώνεται στη περίπτωση πλήρους πυροπροστασίας. Το μοντέλο προσομοίωσης που εξετάστηκε αφορά την πυροπροστασία πάχους 10mm και επιβεβαιώνει αυτή τη θερμική απόκριση. Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5 το άνω πέλμα και ο κορμός εμφανίζουν ίδιες θερμοκρασίες με αυτές της πλήρους προστατευμένης δοκού. Στο κάτω πέλμα ωστόσο παρατηρούνται αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με το προσομοίωμα πλήρως προστατευμένης δοκού. Ενδεικτικά, η θερμοκρασία του κάτω πέλματος είναι μεγαλύτερη κατά 15% μετά το 27^ο λεπτό έκθεσης στην φωτιά.



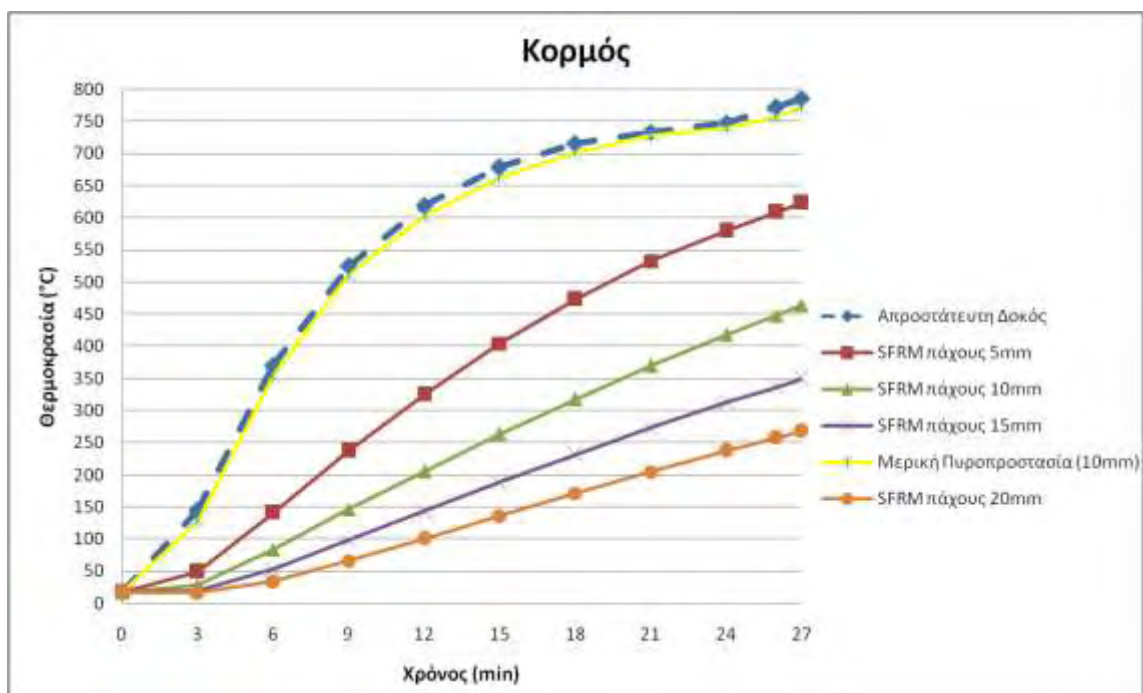
Εικόνα 26 Προσομοίωμα με εφαρμογή πυροπροστασίας



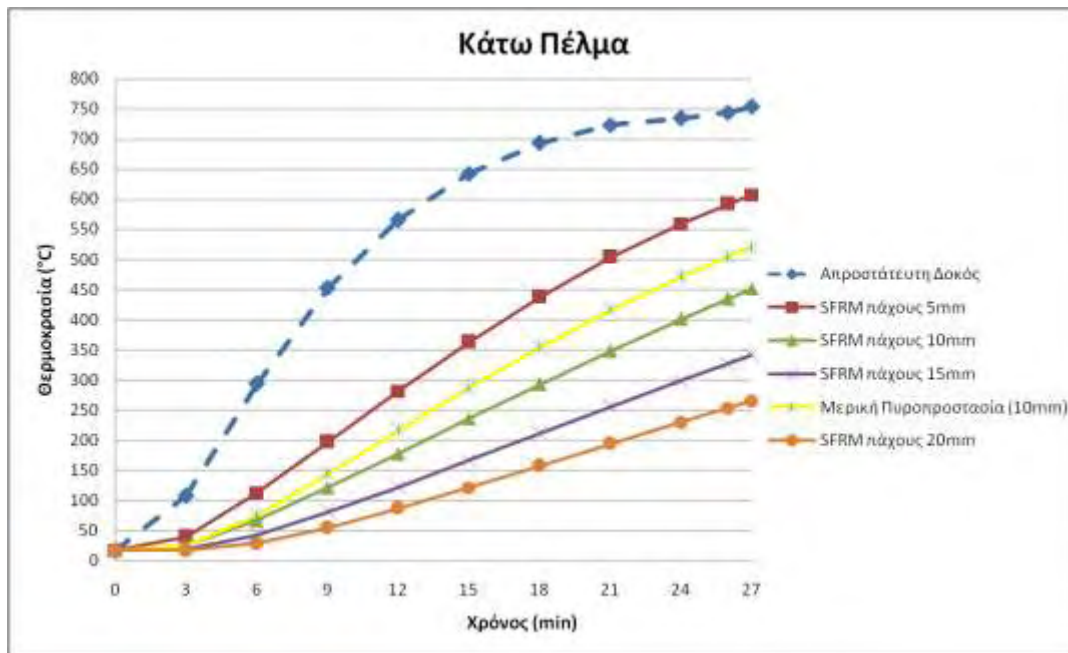
Εικόνα 27 Προσομοίωμα με εφαρμογή μερικής πυροπροστασίας



Σχήμα 6. 3 Διάγραμμα θερμοκρασίας άνω πέλματος με εφαρμογή πυροπροστασίας

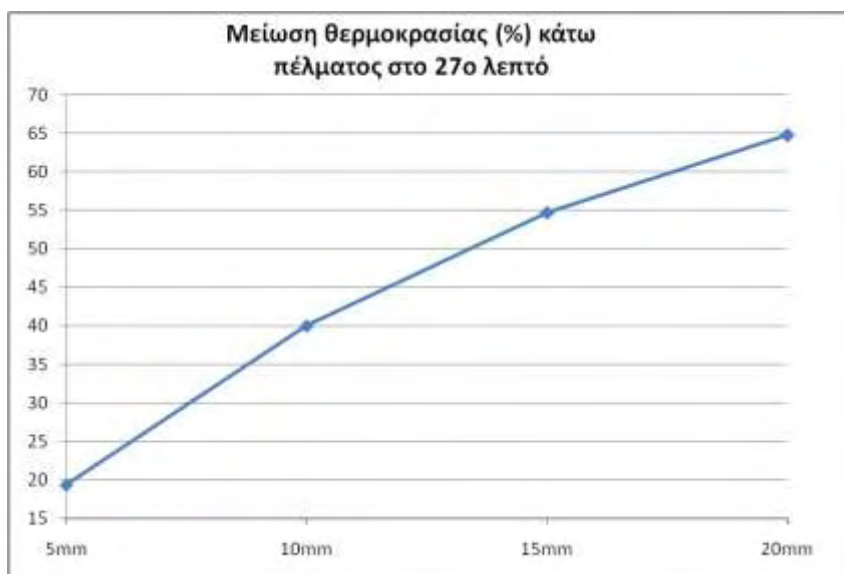


Σχήμα 6. 4 Διάγραμμα θερμοκρασίας κορμού με εφαρμογή πυροπροστασίας



Σχήμα 6. 5 Διάγραμμα θερμοκρασίας κάτω πέλματος με εφαρμογή πυροπροστασίας

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση του πάχους της πυροπροστασίας οδηγεί σε ανάλογη μείωση της θερμοκρασίας που σημειώνει η δοκός στο χρονικό διάστημα των 27 λεπτών. Τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τη σχέση 3.13 που προτείνει ο Ευρωκώδικας για προστατευμένα μεταλλικά μέλη. Ο πρώτος όρος της σχέσης δείχνει ότι μεγαλύτερο πάχος υλικού μόνωσης οδηγεί σε μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω πυρκαγιάς. Στο σχήμα 6.6 δίνεται η μείωση της θερμοκρασίας στο κάτω πέλμα μετά την εφαρμογή κάθε πάχους υλικού πυροπροστασίας, υπολογισμένη στο τέλος του πειράματος. Ενδεικτικά, για SFRM πάχους 10mm η θερμοκρασία που αναπτύσσει η δοκός στο 27^ο λεπτό έχει μειωθεί στο 60% της τιμής για μη πυροπροστατευμένη διατομή. Η ίδια θερμοκρασία για υλικό πυροπροστασίας 20mm αντιπροσωπεύει το 35% της μη πυροπροστατευμένης τιμής. Όμοια πτώση θερμοκρασίας παρουσιάζει και ο κορμός ενώ το άνω πέλμα σημειώνει μειωμένη θερμοκρασία στο 35% και 20% της αρχικής για, αντίστοιχα, 10mm και 20mm πάχους SFRM.



Σχήμα 6. 6 Διάγραμμα μείωσης της θερμοκρασίας του κάτω πέλματος μετά την εφαρμογή πυροπροστασίας

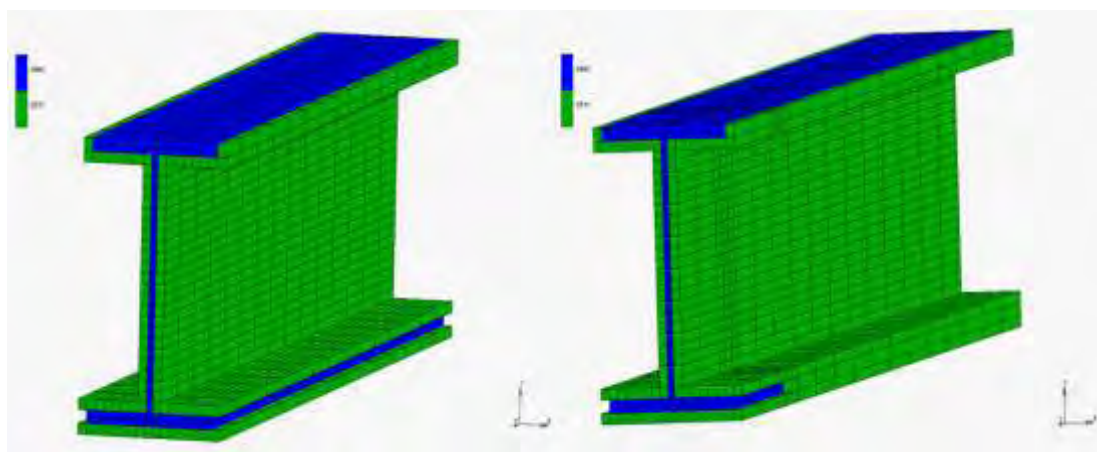
6.2 Βλάβες στο Υλικό Πυροπροστασίας

Ένα υλικό πυροπροστασίας πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιεί τους λειτουργικούς σκοπούς του καθ'όλη την διάρκεια ζωής της προστατευόμενης κατασκευής όπως επίσης και στο ενδεχόμενο έκθεσης σε φωτιά. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο βλάβης στο υλικό πυροπροστασίας μετά από μεγάλες μετακινήσεις της κατασκευής ή ακραίες δράσεις. Στην περίπτωση του SFRM, η μικρή αντοχή του σε καταπονήσεις το καθιστά ευάλωτο ακόμα και σε ελαστικές παραμορφώσεις του μέλους που προστατεύει, όπως σε δράση σεισμού ή ισχυρών ανέμων. Η ψαθυρή μορφή αστοχίας που εμφανίζει και οι κακές συγκολλητικές του ιδιότητες δημιουργούν την απαίτηση μελέτης των μορφών και της έκτασης βλαβών του (Braxtan & Pessiki, 2011).

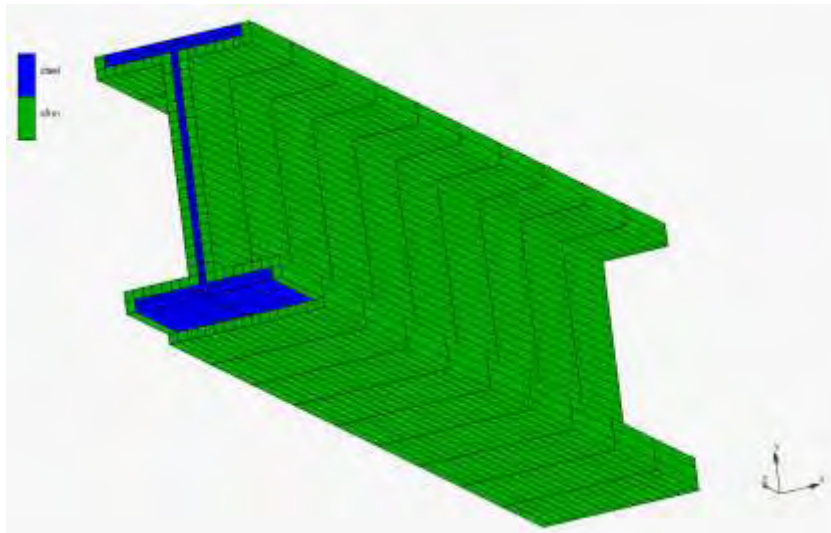
Το κρίσιμότερο τμήμα μιας σύμμικτης μεταλλικής δοκού διπλού ταυ στο σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς αποτελεί το κάτω πέλμα. Σε αυτό σημειώνεται η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας και ξεκινάει η πλαστικοποίηση και εκεί παρατηρούνται κυρίως οι βλάβες του υλικού πυροπροστασίας. Σε αυτήν την κατεύθυνση, εξετάστηκαν προσομοιώματα με μορφές βλάβης παρόμοιες με αυτές που έχουν αναφερθεί σε πραγματικά περιστατικά κατασκευών. Συγκεκριμένα, έγινε υπόθεση 6 τύπων αστοχίας για υλικά πυροπροστασίας πάχους 10mm και 20mm και εξετάστηκε η θερμική απόκριση των μοντέλων προσομοίωσης για έκθεση σε πρότυπη φωτιά ISO 2 ωρών. Ακολουθείται η σύνθετη μέθοδος προσομοίωσης που περιγράφηκε στην ενότητα 5.5.

Τα προσομοιώματα που εξετάστηκαν είναι τα εξής και φαίνονται στις εικόνες 28,29:

- *Βλάβη 1:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας σε όλο το πάχος του κάτω πέλματος για όλο το μήκος της δοκού
- *Βλάβη 2:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας σε όλο το πάχος του κάτω πέλματος για μήκος ίσο με το ύψος της διατομής
- *Βλάβη 3:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας σε όλο το πάχος του κάτω πέλματος για μήκος ίσο με το μισό του ύψους της διατομής
- *Βλάβη 4:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας στην κάτω ίνα του κάτω πέλματος για μήκος 50mm
- *Βλάβη 5:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας στην κάτω ίνα του κάτω πέλματος για μήκος 100mm
- *Βλάβη 6:* Απώλεια υλικού πυροπροστασίας στην κάτω ίνα του κάτω πέλματος για μήκος ίσο με το ύψος της διατομής

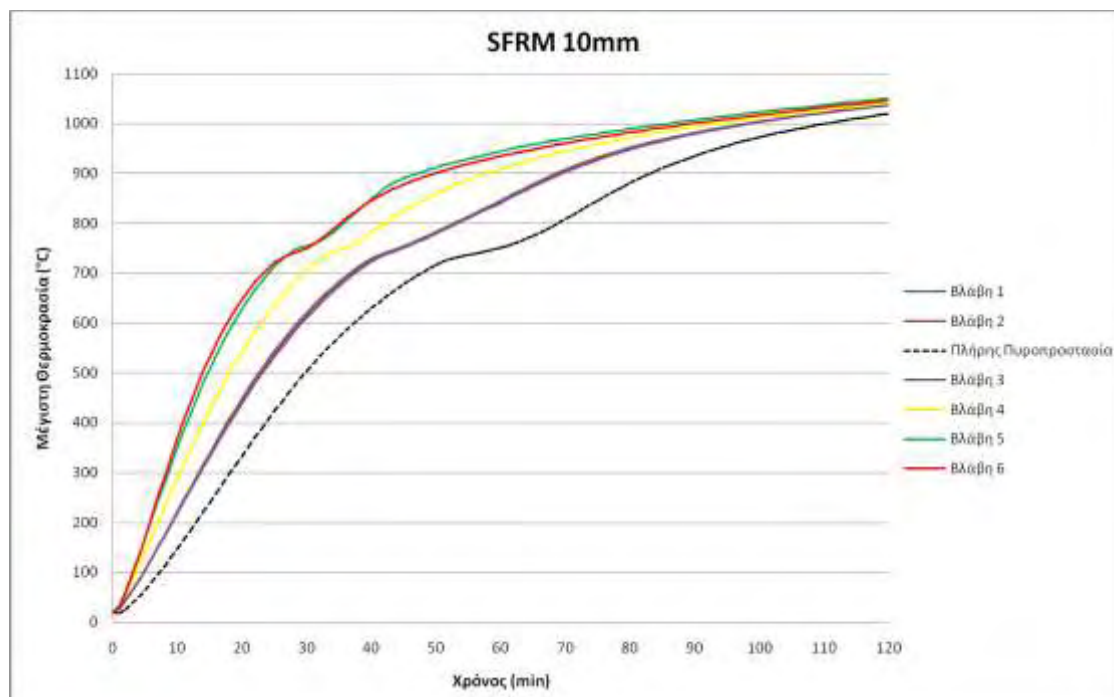


Εικόνα 28 Βλάβη 1 (αριστερά), Βλάβη 2, 3 (δεξιά)

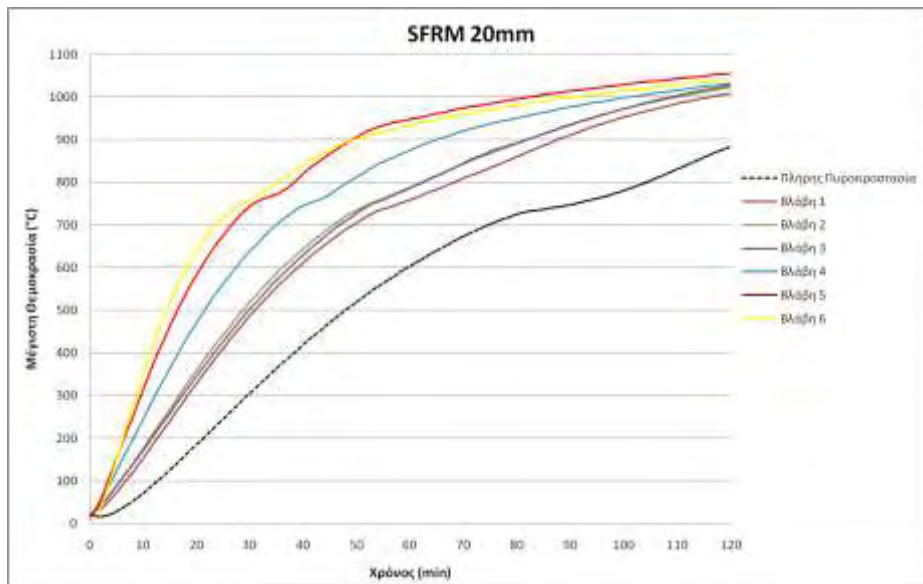


Εικόνα 29 Βλάβη 4,5,6

Εντοπίστηκε το σημείο της μεταλλικής διατομής που εμφανίζει την μεγαλύτερη θερμοκρασία μετά το πέρας των δύο ωρών και στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του σε αυτό το διάστημα. Σε όλα τα προσομοιώματα το σημείο αυτό βρίσκεται στο κάτω πέλμα. Για καλύτερη εποπτεία της επίδρασης της βλάβης, τα αποτελέσματα θερμοκρασιών συγκρίνονται με αυτά του μοντέλου προσομοίωσης πλήρους πυροπροστασίας δίχως βλάβες.

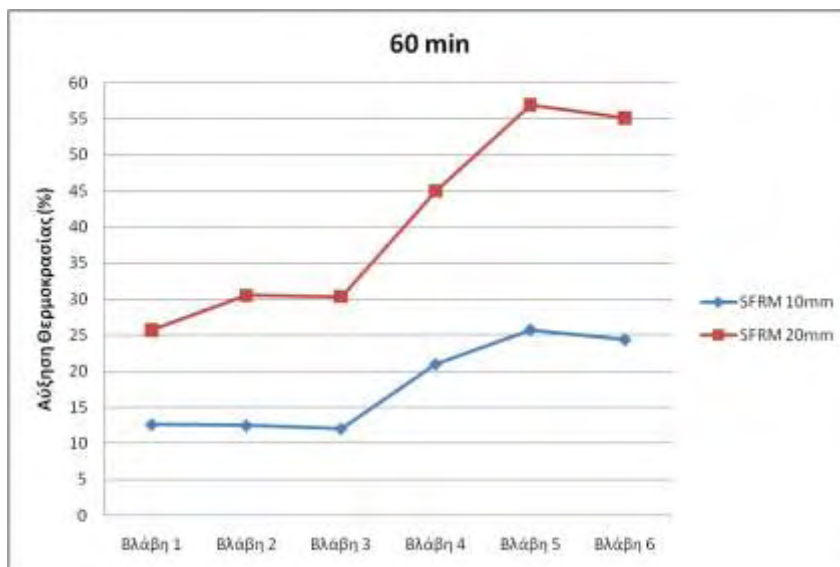


Σχήμα 6. 7 Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 10mm για βλάβη



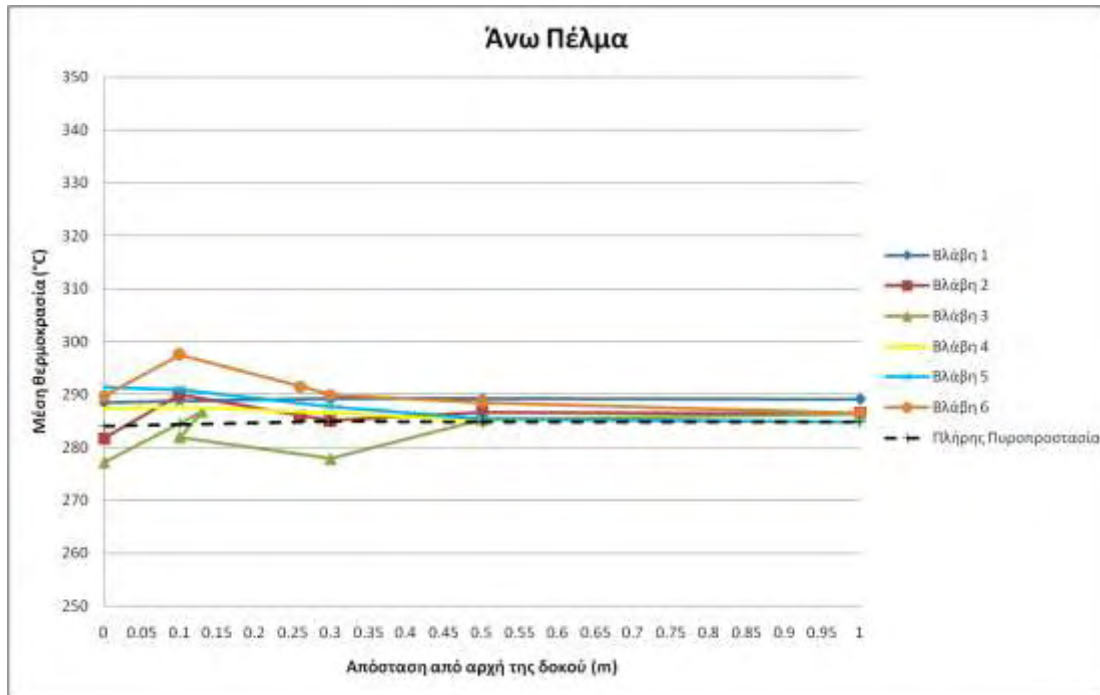
Σχήμα 6. 8 Διάγραμμα μέγιστης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 20mm για βλάβη

Τα σχήματα 6.7, 6.8 δείχνουν ότι η επίδραση της απώλειας μέρους της πυροπροστασίας είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του υλικού μεγαλύτερου πάχους. Συγκεκριμένα μετά από 2 ώρες έκθεσης σε φωτιά ISO το προσομοίωμα με πάχος πυροπροστασίας 10mm έχει σχεδόν την ίδια μέγιστη θερμοκρασία τόσο για πλήρη πυροπροστασία όσο και για το σύνολο των μορφών βλάβης που εξετάστηκαν. Στην περίπτωση του υλικού SFRM πάχους 20mm, μετά το πέρας των 2 ωρών όλα τα μοντέλα προσομοίωσης με απώλεια μέρους της πυροπροστασίας εμφανίζουν μέγιστη θερμοκρασία αυξημένη κατά 15% σε σχέση με αυτή του μοντέλου δίχως βλάβη. Τα προσομοιώματα και για τα δύο πάχη SFRM εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερες θερμοκρασίες μετά την συμπλήρωση 60 λεπτών έκθεσης στην πρότυπη φωτιά. Η ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας, σε σχέση με το μοντέλο δίχως βλάβης, στο 60^ο λεπτό της ανάλυσης φαίνεται στο σχήμα 6.9. Όπως φαίνεται, η βλάβη στο πάχος του κάτω πέλματος προκαλεί σχεδόν ίδια αύξηση της θερμοκρασίας για οποιοδήποτε μήκος. Μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας προκαλεί η βλάβη 5. Ενδεικτικά, για υλικό πυροπροστασίας 20mm η μέγιστη θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 55% μετά το πέρας μίας ώρας.

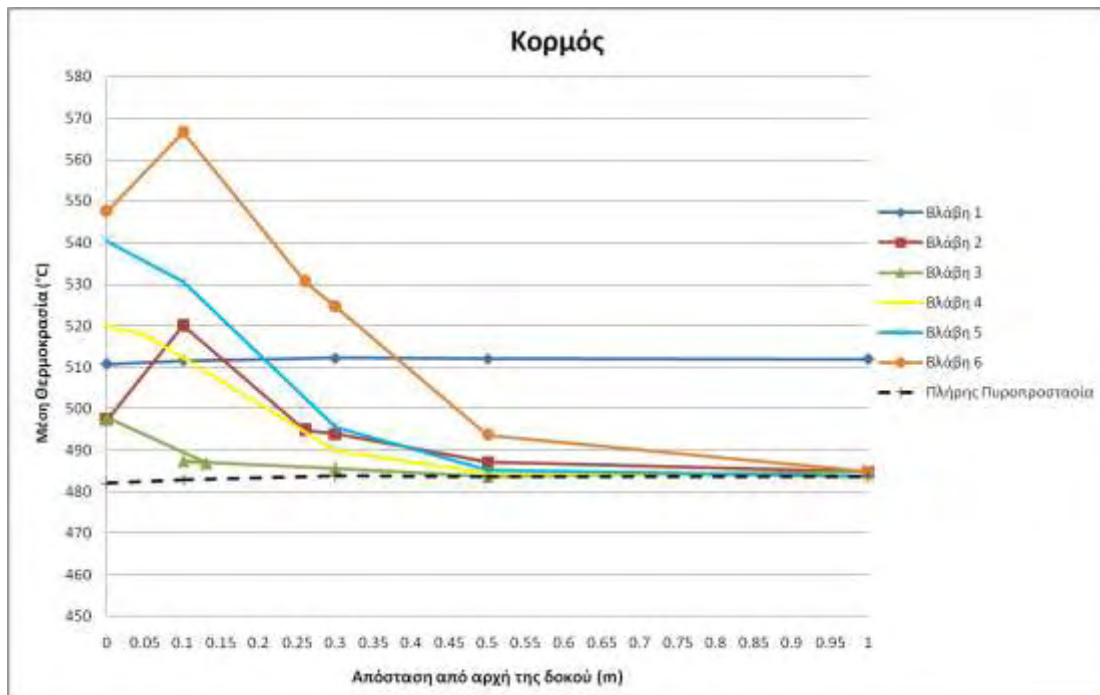


Σχήμα 6. 9 Διάγραμμα αύξησης θερμοκρασίας δοκού με SFRM 10mm και 20mm για βλάβη μετά από 60min

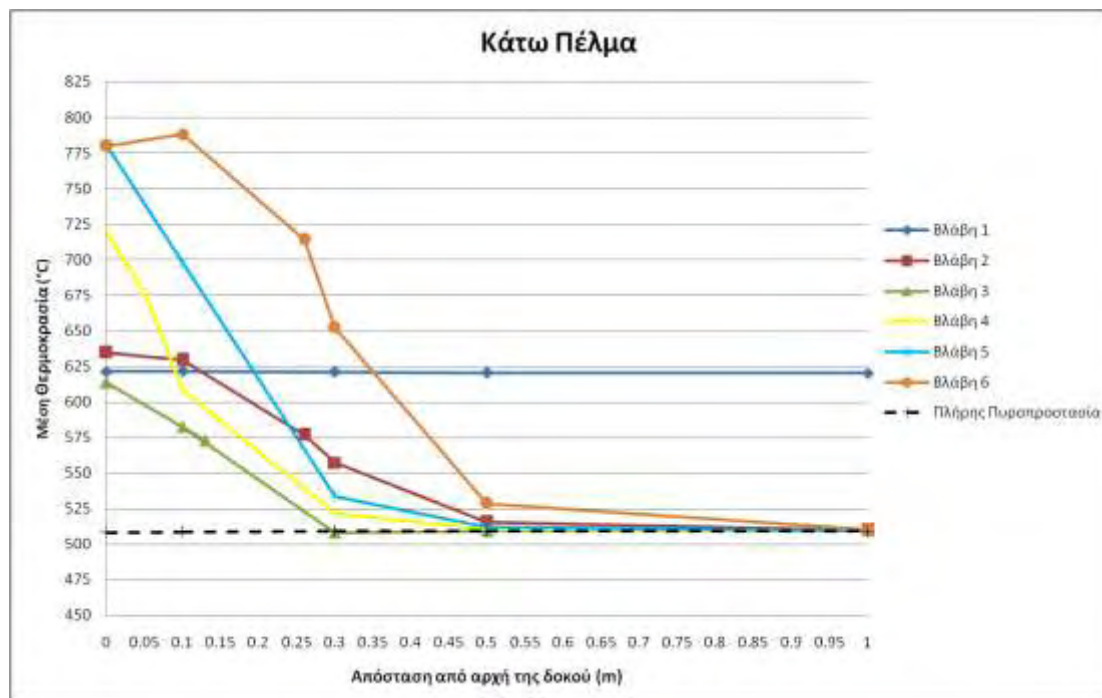
Εξαιτίας της σημαντικότερης μεταβολής στην θερμοκρασία που σημειώνεται στη δοκό στην περίπτωση του υλικού πυροπροστασίας 20mm, επιλέχθηκε η περαιτέρω εξέταση της κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος της δοκού σε όλο το ύψος της διατομής. Συγκεκριμένα, σημειώθηκαν οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος της δοκού, για τα πέλματα και τον κορμό, στο χρονικό διάστημα των δύο ωρών και υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία σε κάθε θέση. Οι μετρήσεις οργανώθηκαν και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 6. 10 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας άνω πέλματος δοκού με SFRM 20mm για βλάβη



Σχήμα 6. 11 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας κορμού δοκού με SFRM 20mm για βλάβη

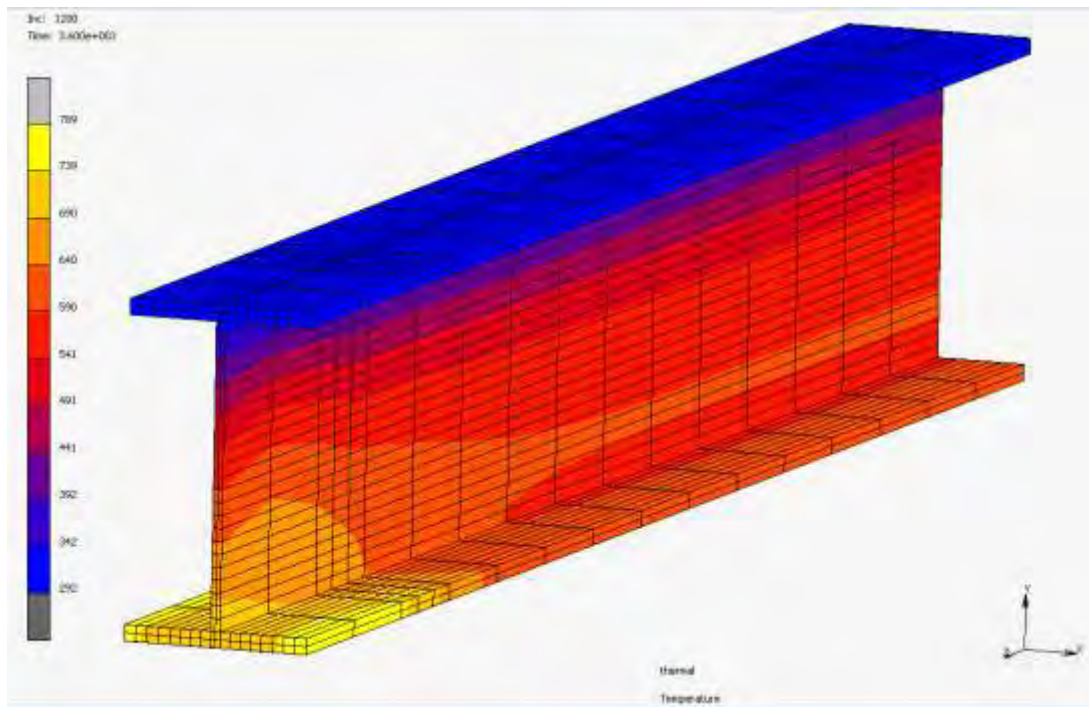


Σχήμα 6. 12 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας κάτω πέλματος δοκού με SFRM 20mm για βλάβη

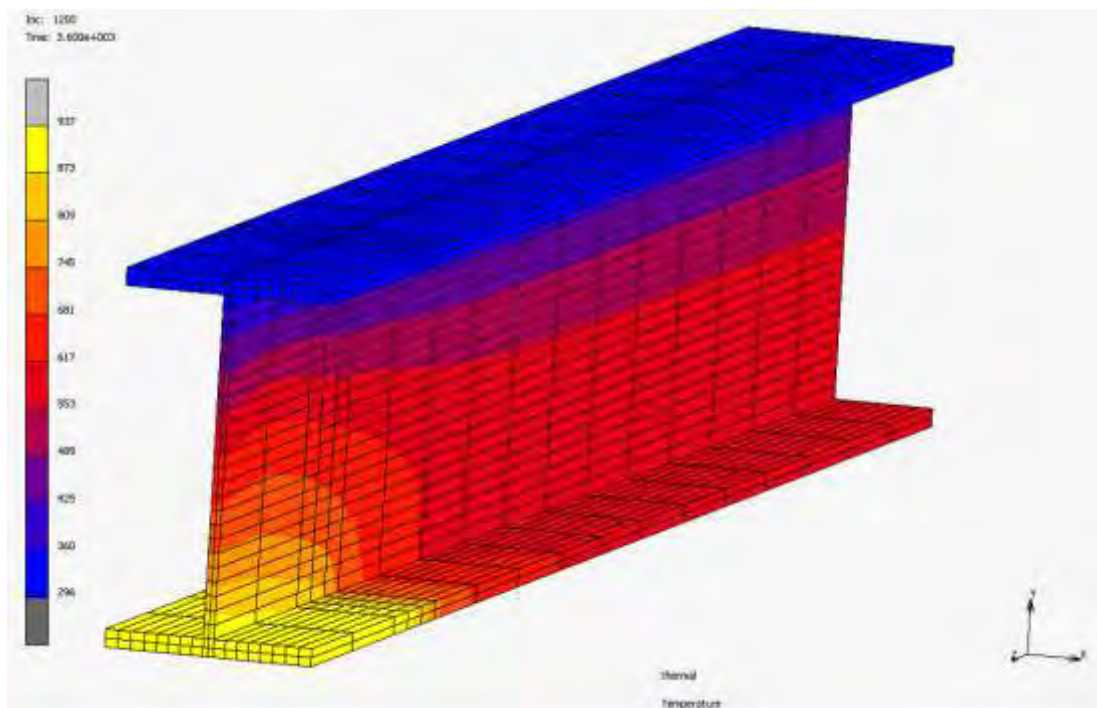
Τα σχήματα δείχνουν ότι η βλάβη στο κάτω πέλμα της δοκού δεν επηρεάζει τη θερμική απόκριση του πάνω πέλματος. Στον κορμό παρατηρείται αύξηση θερμοκρασίας έως 40°C για βλάβες κατά μήκος τη δοκού. Για βλάβες στην επιφάνεια του κάτω πέλματος η μέγιστη αύξηση είναι 90°C. Αυτό υποδεικνύει ότι όχι μόνο η ύπαρξη βλαβών στο κάτω πέλμα, αλλά μέχρι και η μορφή τους, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετική θερμική απόκριση του κορμού και συνεπώς δεν πρέπει να αγνοείται η επίδραση τους.

Σημαντικότερη είναι η επιρροή στο κάτω πέλμα με τις θερμοκρασίες να παρουσιάζουν διπλάσια αύξηση στο μη πυροπροστατευμένο τμήμα για τις βλάβες τύπου 4,5,6 σε σχέση με τις βλάβες τύπου 1,2,3. Ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι στο 1/6 του μήκους του μέλους μηδενίζεται η επιρροή της βλάβης και πλέον η θερμική απόκριση είναι ίδια με αυτήν της πλήρως προστατευμένης δοκού. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μορφή της βλάβης δεν επηρεάζει δραματικά το μήκος της δοκού στο οποίο σημειώνονται αυξημένες θερμοκρασίες εξαιτίας αυτών των αστοχιών.

Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων δίνονται οι εικόνες 30, 31 με τα προσομοιώματα για Βλάβη 2 και Βλάβη 6 μετά τη θερμική ανάλυση 60 λεπτών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Υπενθυμίζεται ότι και τα δυο μοντέλα προσομοίωσης σημειώνουν απώλεια υλικού πυροπροστασίας για μήκος ίσο με το ύψος της διατομής. Οι δύο εικόνες δείχνουν ότι για απώλεια πυροπροστασίας στην κάτω ίνα και σε δεδομένο μήκος αναπτύσσονται, στην αρχή της δοκού, θερμοκρασίες έως και 150° μεγαλύτερες από αυτές που σημειώνονται για απώλεια υλικού στο πάχος του πέλματος στο ίδιο μήκος. Το μήκος επιρροής δεν μεταβάλλεται σημαντικά και η επιρροή είναι η μέγιστη στο κάτω πέλμα, αξιοσημείωτη στον κορμό και μηδενική στο πάνω πέλμα.



Εικόνα 30 Θερμοκρασίες δοκού με SFRM 20mm και βλάβη 2 μετά από 60min



Εικόνα 31 Θερμοκρασίες δοκού με SFRM 20mm και βλάβη 6 μετά από 60min

6.3 Συμπεράσματα

Οι ενότητες του κεφαλαίου 6 βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών για τη θερμική απόκριση μιας προστατευμένης μεταλλικής δοκού:

- Η αύξηση του πάχους της πυροπροστασίας οδηγεί σε ανάλογη μείωση της θερμοκρασίας του μέλους. Δριμύτερη είναι η μείωση στο άνω πέλμα, ενώ και στην υπόλοιπη διατομή η χρήση πυροπροστασίας πάχους μεγαλύτερου των 10mm μπορεί να εξασφαλίσει την αντοχή 30 λεπτών σε ένα σενάριο πυρκαγιάς.
- Η επίδραση της βλάβης είναι εντονότερη σε μεγαλύτερο πάχος πυροπροστασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική αγωγιμότητα του SFRM αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς υλικό μικρότερου πάχους εμφανίζει, ούτως ή άλλως, χειρότερη θερμομονωτική ικανότητα στις υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσει. Δυσμενέστερη είναι η περίπτωση αποκόλλησης μέρους του υλικού σε επιφάνεια της κάτω ίνας του κάτω πέλματος τη δοκού. Σε αυτή την περίπτωση δύναται να εμφανίζονται σημαντικά αυξημένες θερμοκρασίες για μεγαλύτερη από διπλάσια επιφάνεια από αυτήν στην οποία υπάρχει απώλεια υλικού.
- Οι βλάβες της πυροπροστασίας SFRM οδηγούν σε σημαντική αύξηση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο προστατευόμενο μέλος. Θα πρέπει να ανιχνεύονται και αν είναι δυνατόν να προλαμβάνονται για να μην γίνεται το λάθος υπερεκτίμησης της αντοχής του μέλους.

7 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αυτής αποτέλεσε η εκτενής χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης για τη μελέτη του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας σε μεταλλική δοκό και της αύξησης θερμοκρασίας που αυτή θα επιφέρει. Απορρίφθηκαν και επιβεβαιώθηκαν υποθέσεις χρησιμοποιώντας τις προτεινόμενες διατάξεις του Ευρωκώδικα και της θεωρίας μετάδοσης θερμότητας.

Ως αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να καθοριστεί η πιο λεπτομερής ανάλυση της επίδρασης αστοχιών της πυροπροστασίας στην συμπεριφορά μεταλλικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Εξετάστηκε η θερμική απόκριση της μεταλλικής δοκού υπό την επίδραση φωτιάς αλλά δεν συμπεριλήφθηκε στις αναλύσεις το κομμάτι της μηχανικής απόκρισης και μείωσης αντοχής ως αποτέλεσμα αυτής της δράσης. Η επίλυση του θερμομηχανικού προβλήματος μπορεί να αποτελέσει λογική συνέχεια αυτής της διπλωματικής,

8 Βιβλιογραφία

- [1] Παπασιώπη, Ν. (n.d). *Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας*. Ανακτήθηκε από Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Φαινόμενα Μεταφοράς II
- [2] Χατζηαθανασίου, Β. (2009). *Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σοφία
- [3] Purkiss, J.A. (1996). *Fire Safety Engineering: Design of Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann
- [4] Schleich, J.B. (1996). *A Natural Fire Safety Concept for Buildings*. London: E & FN Spon
- [5] Wang, Y.C. (1998). Composite Beams with Partial Fire Protection. *Fire Safety Journal*, 30
- [6] Wang, Y.C. (2002). *Steel and Composite Structures: Behaviour and Design for Fire Safety*. USA: Spon Press
- [7] Franssen, J.M., Kodur, V., Zaharia, R. (2009). *Designing Steel Structures for Fire Safety*. The Netherlands: CRC Press
- [8] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. USA: John Wiley & Sons, Inc
- [9] British Standards Institution. (2002). *Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-2: Actions on Structures Exposed to Fire*. London: British Standards Institution
- [10] British Standards Institution. (2002). *Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.2: Structural Fire Design*. London: British Standards Institution
- [11] British Standards Institution. (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2: Structural Fire Design*. London: British Standards Institution
- [12] Wainman, D.E., Kirby, B.R. (1988). *Compendium of UK Standard Fire Test Data: Unprotected Structural Steel-1*. Rotherham: BSC Swinden Laboratories
- [13] Braxtan, N.L., Pessiki, S.P. (2011). Postearthquake Fire Performance of Sprayed Fire Resistive Material on Steel Moment Frames. *Journal of Structural Engineering*