



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση διατομών οπλισμένου σκυροδέματος σε συνθήκες πυρκαγιάς

Πατρικής Άγγελος

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθηγ. Π. Νομικός

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη διατομών οπλισμένου σκυροδέματος υπό υψηλές θερμοκρασίες σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Αρχικά μελετήθηκαν τα μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και του χάλυβα και η μεταβολή τους με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και οι θερμοκρασιακές καμπύλες που προβλέπουν την θερμοκρασία στην επιφάνεια της διατομής μας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Στη συνέχεια με την αξιοποίηση μαθηματικών μοντέλων διαφορών για τη διατύπωση της διαφορικής εξίσωσης διάδοσης θερμότητας έγινε ο υπολογισμός της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Πρώτα αναλύθηκαν διατομές χωρίς πυροπροστασία και έπειτα διερευνήθηκε η επίδραση της παρουσίας ενός υλικού παθητικής πυροπροστασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας εντός της διατομής. Αυτές οι παραμετρικές αναλύσεις είναι χρήσιμες για τον καθορισμό των απαιτήσεων ενός υλικού ώστε να είναι κατάλληλο για πυροπροστασία και για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους για συγκεκριμένες διατομές.

Επιπλέον κάναμε αναφορά στο φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης και είδαμε πως αναπτύσσεται η θερμοκρασία στην περίπτωση αυτή.

Τέλος έγινε ο υπολογισμός της ροπής αντοχής για διάφορες διατομές με απλό και διπλό οπλισμό και εξετάσθηκε η μείωσή της με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκρίναμε την επίδραση των θερμοκρασιακών καμπυλών ISO και RWS καθώς και το πώς επηρεάζουν την ροπή αντοχής παράμετροι όπως η επικάλυψη του οπλισμού, το ύψος της διατομής και η μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Abstract

In the present thesis, the effect of high temperatures on a reinforced concrete section was studied.

Initially, we reviewed the mechanical and thermal properties of concrete and steel and how they change with the temperature along with the fire curves that give us the temperature on the surface of the section. Then with the use of numerical models the calculation of the temperature inside the section took place. At first an analysis of sections without protection was carried out, after that we observed the effect that fire protection had with the use of diagrams. The requirements of passive fire protection were reviewed through example.

Furthermore the phenomenon of explosive spalling was mentioned and the temperature inside the cross section was calculated once again.

Finally the calculation of the moment capacity was made for section with tensile and compressive reinforcement. A comparison was made between the ISO and RWS fire curves along with the effect of reinforcement cover, section size and compressive strength of the concrete on the capacity moment.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	10
1.1	Στάδια ανάπτυξης της φωτιάς	10
1.2	Βήματα ελέγχου ενός φορέα Ο.Σ. σε πυρκαγιά	12
1.2.1	Χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς	12
1.2.2	Ανάπτυξη της θερμοκρασία	12
1.2.3	Μηχανική ανάλυση	12
1.2.4	Έλεγχος της αντοχής του φορέα	12
1.3	Εμποδιζόμενη παραμόρφωση	13
2	Το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες	14
2.1	Καμπύλες θερμοκρασίας	14
2.2	Το Ο.Σ. υπό υψηλές θερμοκρασίες	16
2.2.1	Ειδική Θερμότητα	18
2.2.2	Θερμική Αγωγιμότητα	19
2.2.3	Πυκνότητα	19
2.2.4	Μηχανικά χαρακτηριστικά Σκυροδέματος	20
2.3	Ο χάλυβας υπό υψηλές θερμοκρασίες	21
2.4	Παραμορφωσιμότητα	23
2.5	Συντελεστής φωτιάς	25
2.6	Ο παράγοντας του χρόνου	26
3	Υπολογισμός Θερμοκρασιών	28
3.1	Μαθηματικό μοντέλο	28
3.2	Αριθμητικό παράδειγμα	29
3.3	Ταχύτητα ανάπτυξης της θερμοκρασίας	33
3.3.1	Η επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας	34
3.3.2	Η επίδραση της πυροπροστασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας	36
3.3.3	Απαιτήσεις Παθητικής πυροπροστασίας	40
3.3.4	Αποφλοίωση	42
3.4	Σύγκριση με αριθμητική προσομοίωση	45
4	Υπολογισμός διατομών μελών υπό κάμψη	49
4.1	Μέθοδος ζωνών	49
4.2	Μέθοδος της Ισόθερμης	50
4.3	Υπολογισμός Φέρουσας Ικανότητας	50
4.3.1	Απλός Οπλισμός	51
4.3.2	Διπλός Οπλισμός	51
4.4	Υπολογισμός Ροπών και αξονικών σε συνθήκες πυρκαγιάς	52

5 Υπολογισμός Ροπής Σχεδιασμού	55
5.1 Απλός Οπλισμός	55
5.2 Αριθμητικός υπολογισμός ροπής αντοχής για απλό οπλισμό	56
5.3 Διπλός Οπλισμός	60
Βιβλιογραφία	62
Παράρτημα	63

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Γραφικές Παραστάσεις Θερμοκρασιακών Καμπυλών	14
Σχήμα 1-2: Γραφική παράσταση Ειδικής Θερμότητας (cp) για υγρασία 3, 1.5 και 0 %	18
Σχήμα 2-3: Γραφική παράσταση Θερμικής αγωγιμότητας	19
Σχήμα 2-4: Γραφική παράσταση πυκνότητας – θερμοκρασίας για σκυρόδεμα πυκνότητας 2300 kg/m ³	20
Σχήμα 2-5: Γραφική παράσταση Τάσης – Παραμόρφωσης για θερμοκρασίες 20, 400, 600 και 1100 °C	21
Σχήμα 2-6: Γραφική παράσταση Αντοχής – Θερμοκρασίας για χάλυβα Θερμής και Ψυχρής εξέλασης	22
Σχήμα 2-7: Γραφική παράσταση Μέτρου ελαστικότητας – Θερμοκρασίας για χάλυβα θερμής και ψυχρής εξέλασης	22
Σχήμα 2-8: Γραφική παράσταση Θερμικής μήκυνσης για σκυρόδεμα με πυριτικά και ασβεστολιθικά αδρανή	24
Σχήμα 2-9: Γραφική παράσταση Θερμικής μήκυνσης για χάλυβα σπλισμού και χάλυβα προέντασης	25
Σχήμα 3-1: Γραφική παράσταση Θερμικής διαχυτότητας	30
Σχήμα 3-2: Γραφική παράσταση του συντελεστή $ac \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$	30
Σχήμα 3-3: προφίλ θερμοκρασιών για 10, 30, 60 και 120 λεπτά έκθεσης σε πυρκαγιά	31
Σχήμα 3-4: Προφίλ θερμοκρασιών σε χρόνο έκθεσης 10 λεπτά για τις καμπύλες RWS, ISO και HC	32
Σχήμα 3-5: Προφίλ θερμοκρασιών σε χρόνο έκθεσης 120 λεπτά για τις καμπύλες RWS, ISO και HC	32
Σχήμα 3-6: Μέτωπο των 100 °C για θερμοκρασιακή καμπύλη ISO	33
Σχήμα 3-7: Μέτωπο των 100 °C για θερμοκρασιακή καμπύλη ISO	33
Σχήμα 3-8: Μέτωπο των 100 oC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος	34
Σχήμα 3-9: Μέτωπο των 200 oC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος	35
Σχήμα 3-10: Μέτωπο των 400 oC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος	35
Σχήμα 3-11: Ανάπτυξη θερμοκρασίας για σκυρόδεμα με πυροπροστασία 5 εκατοστά για χρόνο έκθεσης 2 ωρών	37
Σχήμα 3-12: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 2 ώρες	38

Σχήμα 3-13: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 1 ώρα	38
Σχήμα 3-14: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 30 λεπτά	39
Σχήμα 3-15: Θερμοκρασία που επικρατεί στον εφελκούμενο χάλυβα κατά την διάρκεια ανάπτυξης της φωτιάς	39
Σχήμα 3-16: Θερμοκρασία επιφάνειας σκυροδέματος για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό Firebarrier 135	40
Σχήμα 3-17: Θερμοκρασία του εφελκούμενου χάλυβα για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό FireBarrier 135	41
Σχήμα 3-18: Θερμοκρασία επιφάνειας σκυροδέματος για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό Meycο fireshield 1350	41
Σχήμα 3-19: Θερμοκρασία εφελκούμενου χάλυβα για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό Meycο fireshield 1350	42
Σχήμα 3-20: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοιώση 5mm/min σε χρόνο 10 min	43
Σχήμα 3-21: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοιώση 5mm/min σε χρόνο 30 min	43
Σχήμα 3-22: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοιώση 5mm/min σε χρόνο 60 min	44
Σχήμα 3-23: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοιώση 5mm/min σε χρόνο 120 min	44
Σχήμα 3-24: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών	45
Σχήμα 3-25: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 5$ min	46
Σχήμα 3-26: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 10$ min	46
Σχήμα 3-27: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 30$ min	47
Σχήμα 3-28: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 120$ min	47
Σχήμα 3-29: Σύγκριση αποτελεσμάτων FLAC 3D και αλγορίθμου για χρόνο $t = 5, 10, 30$ και 120 min	48
Σχήμα 5-1: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 20 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm	56
Σχήμα 5-2: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 35 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm	57
Σχήμα 5-3: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 50 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm	58

Σχήμα 5-4: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 20 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm59

Σχήμα 5-5: Σύγκριση διαγραμμάτων μείωσης αντοχής σκυροδέματος 50 MPa με επικάλυψη οπλισμού 5 cm των θερμοκρασιακών καμπυλών RWS και ISO59

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Τιμές των κύριων παραμέτρων της σχέσης $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος κανονικού βάρους με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή σε υψηλές θερμοκρασίες	20
Πίνακας 2: Κατηγορία N τιμών για τις παραμέτρους της σχέσης $\sigma - \epsilon$ ράβδων σπλισμού θερμής ή ψυχρής κατεργασίας σε υψηλές θερμοκρασίες	23
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των υλικών πυροπροστασίας	36
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά διατομής με εφελκόμενο σπλισμό	55
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά διατομής με εφελκόμενο και θλιβόμενο σπλισμό	60

1. Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που έχει καλή συμπεριφορά σε πυρκαγιά. Δεν καίγεται και περιορίζει την εξάπλωση της θερμότητας στο εσωτερικό του. Σε αρκετές περιπτώσεις μόνο μερικά εκατοστά του σκυροδέματος παθαίνουν σοβαρή βλάβη, έτσι κατασκευές που έχουν εκτεθεί σε πυρκαγιά με την κατάλληλη επισκευή μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν.

Παρόλα αυτά, η αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη. Ο σχεδιασμός της κατασκευής σε συνθήκες φωτιάς είναι απαραίτητος καθώς το σκυρόδεμα αποτελείται από πολλά συστατικά που συμπεριφέρονται διαφορετικά το καθένα όταν θερμαίνονται. Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που μπορεί να λάβει χώρα κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς είναι η αποφλοίωση του σκυροδέματος, δηλαδή η βίαιη συνήθως αποκοπή κομματιών από την επιφάνεια λόγω της υψηλής και απότομα αυξανόμενης θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την έκθεση του οπλισμού.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πολύπλοκη και η μελέτη της απαραίτητη ιδιαίτερα όταν η χρήση του σκυροδέματος αυξάνεται για την κατασκευή πιο σύνθετων κτιρίων και για κατασκευές που βρίσκονται σε ακραίο περιβάλλον (σεισμικές περιοχές, πλατφόρμες).

Στο παρόν κείμενο θα ασχοληθούμε με τη συμπεριφορά οπλισμένου σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Στο πλαίσιο προγράμματος σπουδών της Σχολής MMM το αντικείμενο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τη μελέτη της επένδυσης μιας σήραγγας ή ενός υπογείου έργου γενικότερα. Αν και οι πυρκαγιές σε σήραγγα είναι πιο σπάνιο φαινόμενο οι επιπτώσεις που έχουν μπορεί να είναι πολύ πιο σοβαρές. Λόγω της στενότητας του χώρου η ανάπτυξη των θερμοκρασιών είναι μεγαλύτερη και ταχύτερη. Αυτή η ανάπτυξη της θερμοκρασίας και η παραγωγή καπνού και τοξικών αερίων μέσα σε κλειστό χώρο όχι μόνο καταστρέφουν την σήραγγα αλλά μπορεί να υπάρξουν και απώλειες ανθρωπίνων ζωών.

Μερικά παραδείγματα σηράγγων που είχαμε σημαντικές καταστροφές λόγω πυρκαγιάς είναι [4]:

Σήραγγα του Mont – Blanc στη Γαλλία

Σήραγγα του Caldecott στις ΗΠΑ

Σήραγγα του Nihonzaka στην Ιαπωνία

Σήραγγα του Tauren στην Αυστρία

Στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε πως αναπτύσσεται η θερμοκρασία κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, πως διαδίδεται μέσα στο σκυρόδεμα και πώς μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του με βάση τον Ευρωκώδικα(EN 1992 – 1 - 2)

1.1 Στάδια ανάπτυξης της φωτιάς

Μια πυρκαγιά μπορεί μόνο να ξεκινήσει όταν τα επόμενα στοιχεία είναι παρόντα: οξυγόνο, καύσιμη ύλη και κάποια πηγή θερμότητας. Τα τρία αυτά στοιχεία αποτελούν το τρίγωνο

της φωτιάς. Τα δύο πρώτα στοιχεία (οξυγόνο και καύσιμη ύλη) ξεκινούν τη διαδικασία της καύσης μόνο όταν φτάσουμε στη θερμοκρασία ανάφλεξης. Τα προϊόντα της καύσης είναι συνήθως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και σε περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Τα στάδια μιας πυρκαγιάς είναι: το στάδιο επώασης, ανάπτυξης και απόσβεσης [1].

Στάδιο Επώασης

Αρχικά ένα μικρό μέρος της καύσιμης ύλης αρχίζει να καίγεται και δημιουργούνται τα πρώτα αέρια και καπνός. Ο καπνός μεταφέρει την καύσιμη ύλη προς τα πάνω δημιουργώντας ένα στρώμα αερίων κάτω από την οροφή της κατασκευής. Αρχικά η διαδικασία αυτή καταναλώνει το οξυγόνο όμως η ενέργεια που εκλύεται δρα σαν αντλία και τραβά τον αέρα τροφοδοτώντας την φωτιά με νέο οξυγόνο. Η θερμοκρασία της φωτιάς αρχίζει να αυξάνεται και η θερμότητα που παράγεται να μεταδίδεται στον περιβάλλον χώρο. Έτσι η φωτιά εξαπλώνεται και η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται.

Στάδιο Ανάπτυξης

Όσο η φωτιά συνεχίζει να καίει το θερμό στρώμα αερίων συνεχώς μεγαλώνει και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Λόγω της μετάδοσης της θερμοκρασίας με ακτινοβολία ο περιβάλλοντας χώρος αρχίζει να θερμαίνεται. Κάποια στιγμή, γύρω στους 500 – 600 °C, φτάνουμε σε ένα κρίσιμο σημείο όπου όλα τα καύσιμα υλικά που εκτίθενται στη θερμότητα αρχίζουν να καίγονται προκαλώντας αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας και αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι έχουμε την μετάβαση από μία τοπική εστία φωτιάς σε πυρκαγιά.

Στη συνέχεια το στρώμα αερίων αναμειγνύεται με τον αέρα και η θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι συνήθως πάνω από τους 1000 °C. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της μετάδοσης της θερμότητας όλα τα υλικά και οι επιφάνειες στον χώρο καλύπτονται από την φωτιά. Ο χρόνος διάρκειας αυτού του σταδίου εξαρτάται από την ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου και από την ποσότητα της καύσιμης ύλης που τροφοδοτεί την φωτιά.

Στάδιο Απόσβεσης

Το στάδιο της απόσβεσης ξεκινάει όταν το μεγαλύτερο μέρος της καύσιμης ύλης καταναλωθεί ή όταν το διαθέσιμο οξυγόνο μειωθεί κάτω από κάποιο όριο.

1.2 Βήματα ελέγχου ενός φορέα Ο.Σ. σε πυρκαγιά

Προκειμένου να ελέγξουμε αν ένας φορέας Ο.Σ. είναι κατάλληλος για να αντέξει τα φορτία μιας πυρκαγιάς ακολουθούμε τα εξής βήματα [3].

- 1) Διαλέγουμε τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς
- 2) Υπολογίζουμε την ανάπτυξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του σκυροδέματος.
- 3) Υπολογίζουμε τη μεταβολή των χαρακτηριστικών της διατομής με βάση την θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί
- 4) Υπολογίζουμε τις δυνάμεις που δέχεται ο φορέας
- 5) Ελέγχουμε αν ο φορέας μας αντέχει στη δεδομένη εντατική κατάσταση

1.2.1 Χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς

Λέγοντας για τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς εννοούμε την κατάσταση κατά την οποία αναπτύσσεται η φωτιά, δηλαδή, σε τι χώρο αναπτύσσεται (π.χ. εσωτερικό, εξωτερικό σήραγγα, κτήριο), ποια είναι η ένταση και η διάρκεια της φωτιάς. Ο τύπος της πυρκαγιάς πρέπει να επιλεγεί με βάση το πόσο πιθανό είναι να εμφανιστεί μια τέτοιου είδους πυρκαγιά και τι μέτρα υπάρχουν για την αντιμετώπιση της. Η πυρκαγιά μπορεί να περιγράφεται με βάση έναν μαθηματικό τύπο που μας δίνει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε σχέση με τον χρόνο.

1.2.2 Ανάπτυξη της θερμοκρασίας

Αφού επιλέξουμε την θερμοκρασιακή καμπύλη που μας ενδιαφέρει, πρέπει να μελετήσουμε το πώς μεταδίδεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της διατομής μας. Η ανάλυση αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την μετάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ακτινοβολία. Ο χρόνος για τον οποίο υπολογίζουμε την θερμοκρασία είναι ίδιος με την διάρκεια ζωής της φωτιάς που επιλέξαμε νωρίτερα.

1.2.3 Μηχανική ανάλυση

Αφού υπολογίσουμε την θερμοκρασία στο εσωτερικό της διατομής, αναλύουμε το πώς μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και του χάλυβα όπως, η αντοχή τους, το μέτρο ελαστικότητας, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα, η πυκνότητα, αλλά και το πώς παραμορφώνονται τα υλικά. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την αντοχή της διατομής μας αλλά και τις δυνάμεις που δέχεται.

1.2.4 Έλεγχος της αντοχής του φορέα

Για να είναι κατάλληλος ένας φορέας θα πρέπει η αντοχή του να είναι μεγαλύτερη από τα φορτία που δέχεται για όλο τον χρόνο που αναπτύσσεται η πυρκαγιά.

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

Όπου $E_{d,fi}$ είναι τα φορτία που δέχεται ο φορέας όπως προκύπτουν από την ανάλυση και

$R_{d,t,fi}$ είναι η αντίστοιχη αντοχή σε κατάσταση φωτιάς.

Στα επόμενα κεφάλαια θα μελετηθεί η επίδραση που έχει η αύξηση της θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα και τον χάλυβα. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται τα χαρακτηριστικά του μέλους μεταβάλλονται. Η αντοχή και η ακαμψία του σκυροδέματος μειώνονται και το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης τροποποιείται. Τα θερμικά χαρακτηριστικά, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα αλλάζουν με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι αλλαγές αυτές δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τον χάλυβα καθώς η ποσότητα του δεν είναι αρκετή για να μεταβάλλει την μετάδοση της θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά θα μελετηθούν με βάση τον Ευροκώδικα (EN 1992 – 1- 2). Η συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα επίσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όμως δεν θα ασχοληθούμε με το φαινόμενο αυτό στην παρούσα εργασία [1].

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών που μεταβάλλεται είναι η θερμική παραμόρφωση που αυξάνεται με την θερμοκρασία. Η τιμή της παραμόρφωσης φτάνει μέχρι το 1,4% στους 700 οC περίπου. Δηλαδή αν είχαμε ένα δοκάρι 1 μέτρου το μήκος του θα αυξανόταν κατά 1,4 εκατοστά λόγω θερμικής παραμόρφωσης.

1.3 Εμποδιζόμενη Παραμόρφωση

Η εμποδιζόμενη παραμόρφωση του φορέα σε συνθήκες πυρκαγιάς έχει μεγάλη σημασία για την συμπεριφορά του. Τα αποτελέσματά της μπορεί να είναι τόσο μεγάλα που να επισκιάζουν τα υπόλοιπα αποτελέσματα που προέρχονται από το σχήμα και το μέγεθος του φορέα, τον τύπο των αδρανών, τον οπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, ακόμα και τη κατάσταση φόρτισης του. Για να έχουμε αυτό το φαινόμενο το υπόλοιπο της κατασκευής θα πρέπει να είναι αρκετά σταθερό ώστε να αναπτυχθούν δυνάμεις παρεμπόδισης. Το φαινόμενο είναι πιο εμφανές σε περίπτωση που μόνο ένα μέρος της κατασκευής μας εκτίθεται στη φωτιά αφήνοντας ένα μεγάλο μέρος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για να εξηγήσουμε το φαινόμενο καλύτερα ας θεωρήσουμε πως έχουμε μία δοκό που με δύο στηρίξεις στα άκρα που επιτρέπουν την στροφή αλλά όχι την μήκυνση της δοκού. Αν το κάτω μέρος της δοκού έρθει σε επαφή με μια φωτιά θα θερμανθεί και θα προσπαθήσει να επιμηκυνθεί, όμως αυτό δεν είναι δυνατό λόγω των στηρίξεων. Έτσι αναπτύσσεται μία αξονική δύναμη T . Λόγω της εκκεντρότητας e μεταξύ της δύναμης που αναπτύσσεται και του ουδετέρου άξονα έχουμε την εμφάνιση μιας ροπής T^*e που είναι πιθανό να καταπονεί την κατασκευή μας ή να είναι ευνοϊκή σε σχέση με τα εξωτερικά φορτία. Στην περίπτωση που η ροπή είναι ευνοϊκή η ροπή σχεδιασμού γίνεται $M_{R,total} = M_{R,fire} + T^*e$, όπου $M_{R,fire}$ είναι η ροπή σχεδιασμού για συγκεκριμένη θερμοκρασία του φορέα. Σε αυτή την περίπτωση είναι ακόμη πιθανόν η ροπή σχεδιασμού $M_{R,fire}$ να μηδενιστεί και να μην έχουμε την κατάρρευση της κατασκευής. Αν όμως η ροπή που δημιουργείται καταπονεί την κατασκευή, τότε η συνολική αντοχή θα μειωθεί [4].

2. Το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις θερμοκρασιακές καμπύλες και το πώς μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και του χάλυβα με βάση τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη διατομή μας. Οι τιμές που θα υπολογίσουμε με βάση τα παρακάτω θα χρειαστούν για τον υπολογισμό της αντοχής και για τον υπολογισμό των φορτίων που δέχεται ο φορέας μας είτε χρησιμοποιηθούν απλές είτε πιο σύνθετες μέθοδοι. Οι απλές μέθοδοι υπολογισμού χρησιμοποιούν μόνο τη αντοχή του σκυροδέματος και του χάλυβα ενώ άλλες πιο σύνθετες λαμβάνουν υπόψη τα θερμικά χαρακτηριστικά και την παραμόρφωση που δέχονται τα υλικά μας.

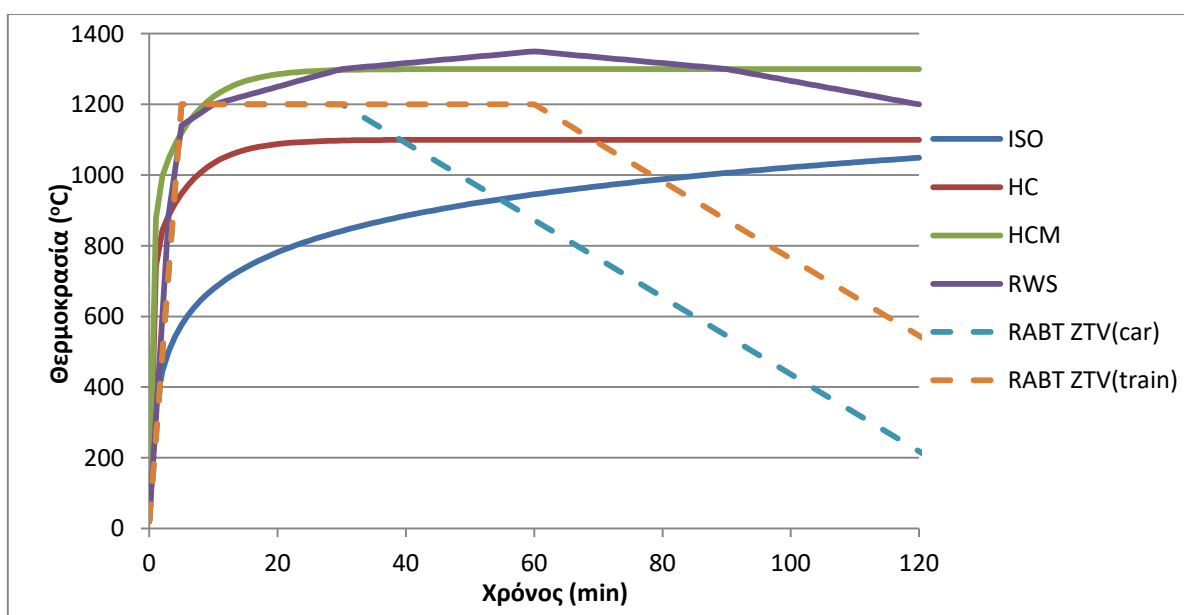
Συγκεκριμένα θα αναλύσουμε τους μαθηματικούς τύπους που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ή θα δούμε πως μεταβάλλονται οι τιμές τους με βάση τις αρχικές τους στους 20 °C

2.1 Καμπύλες Θερμοκρασίας

Σε μία διατομή Ο.Σ. τα βασικά χαρακτηριστικά μιας πυρκαγιάς είναι

Ο ρυθμός ροής θερμότητας, ο οποίος επηρεάζει την ανάπτυξη της θερμοκρασίας και της πίεσης των πόρων μέσα στο σκυρόδεμα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας, η διάρκεια της πυρκαγιάς, ο τρόπος απόσβεσης. Τα τελευταία χρόνια βάση δεδομένων από πειράματα έχουν αναπτυχθεί καμπύλες χρόνου – θερμοκρασίας που περιγράφουν διάφορους τύπους πυρκαγιάς.

Παρακάτω βλέπουμε 6 πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες [5]



Σχήμα 2-1: Γραφικές Παραστάσεις Θερμοκρασιακών Καμπυλών

Καμπύλη ISO (ISO – 834): Η καμπύλη αυτή βασίζεται στην ταχύτητα καύσης των υλικών που συναντώνται σε κατοικίες και εμπορικά κέντρα και καθορίζει μια μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής στη φωτιά των διάφορων στοιχείων της κατασκευής. Η θερμοκρασία μετά από 30min φτάνει τους 842 °C. Η πυρκαγιά διαρκεί για τρεις ώρες και φτάνει στους 1110 °C.

Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση:

$$T = 20 + 345 \log(8t+1)$$

όπου t: χρόνος (min)

T: θερμοκρασία (°C)

Καμπύλη υδρογονανθράκων (HC): Ο ρυθμός καύσης για ορισμένα υλικά όπως βενζίνη, χημικά κλπ. είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με άλλα. Προέκυψε λοιπόν η ανάγκη για μια εναλλακτική καμπύλη με σκοπό τη διεξαγωγή δοκιμών σε κατασκευές και υλικά που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία πετροχημικών. Έτσι αυτή η καμπύλη αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη την καύση πετρελαίου, ή άλλων χημικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην πετρελαϊκή βιομηχανία και δεν συναντώνται σε συνήθη οικοδομικά έργα. Συνεπώς η καμπύλη αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πυρκαγιών που προέρχονται από καύσιμες ύλες. Η θερμοκρασία φτάνει στους 1100 °C από τα πρώτα 15min και διατηρείται σε ισορροπία στην συγκεκριμένη θερμοκρασία για τις τρεις ώρες της πυρκαγιάς.

Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση:

$$T = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$$

όπου t: χρόνος (min)

T: θερμοκρασία (°C)

Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM): Η διαφορά της καμπύλης αυτής με την προηγούμενη είναι η μέγιστη θερμοκρασία της πυρκαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμοκρασία φτάνει στους 1300 °C. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τα πρώτα λεπτά της καμπύλης είναι τόσο απότομη όσο σε όλες τις καμπύλες υδρογονανθράκων πιθανώς προκαλώντας ένα θερμοκρασιακό σοκ στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την αποφλοιώσή του.

Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση:

$$T = 20 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$$

όπου t: χρόνος (min)

T: θερμοκρασία (°C)

Καμπύλη RWS: Η καμπύλη αυτή αναπτύχθηκε από το υπουργείο συγκοινωνιών της Ολλανδίας και πρόκειται για την δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Βασίζεται στο σενάριο ότι πραγματοποιείται πυρκαγιά σε ένα φορτηγό με 50 m³ πετρέλαιο, ή οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, και η ισχύ είναι της τάξης των 300MW ενώ η διάρκεια είναι

120min . Η μέγιστη θερμοκρασία καμπύλης είναι 1350 °C. Η διαφορά της καμπύλης αυτής από εκείνη των υδρογονανθράκων είναι ότι πρόκειται για πυρκαγιά σε κλειστό χώρο όπως σε σήραγγες κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις άλλες καμπύλες. Αποτελεί την πιο απαιτητική καμπύλη θερμικών φορτίων σχεδιασμού, που όμως προσομοιώνει καλύτερα την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς οδηγεί σε καταστροφή της επένδυσης της.

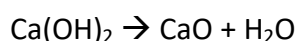
Καμπύλες RABT ZTV: Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναπτύχθηκαν στη Γερμανία ως αποτέλεσμα μιας σειράς πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο προγραμμάτων όπως το EUREKA project. Στις καμπύλες αυτές η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 1200 °C πραγματοποιείται μέσα σε 5 λεπτά. Η διάρκεια έκθεσης στη μέγιστη θερμοκρασία είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες πυρκαγιές με την θερμοκρασία να αρχίζει να μειώνεται στα 30min για πυρκαγιά σε αυτοκίνητο και στα 60min για πυρκαγιά σε τραίνο. Η φάση της απόσβεσης είναι και για τις δύο περιπτώσεις 110min.

2.2 Το Ο.Σ. υπό υψηλές θερμοκρασίες

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται από το σκυρόδεμα και τον χαλύβδινο οπλισμό. Το σκυρόδεμα θεωρείται από τα πιο κατάλληλα υλικά και η συμπεριφορά του σε συνθήκες φωτιάς είναι εξαιρετική σε σύγκριση με άλλα υλικά καθώς δεν καίγεται, δεν διαδίδει την φωτιά, δεν παράγει καπνό και τοξικά προϊόντα. Καθώς η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια αυξάνεται το εσωτερικό κομμάτι του σκυροδέματος που διατηρεί χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να δεχτεί τα φορτία της κατασκευής, επιπλέον προστατεύει τον οπλισμό για σημαντικό χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματα το σκυρόδεμα, όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, είναι ένα σύνθετο υλικό και οι μηχανικές του ιδιότητες μπορούν να αλλάξουν δραματικά όταν αυτό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το σκυρόδεμα παράγεται από την ανάμιξη τσιμέντου, άμμου, νερού και αδρανών υλικών. Όταν η θερμοκρασία του αυξηθεί επέρχονται αλλαγές στις θερμικές, μηχανικές ιδιότητες του και στην μικροδομή του. Αυτές οι αλλαγές στις ιδιότητες του σκυροδέματος μπορεί να είναι μη αναστρέψιμες, στη περίπτωση αυτή μετά την πυρκαγιά η αντοχή του θα είναι κατά πολύ μικρότερη ακόμα και αν δεν υπάρχουν εμφανή σημάδια ζημιάς.

Αρχικά όταν η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνεται έχουμε μόνο διόγκωση του υλικού και συνήθως δεν εμφανίζεται σημαντική ζημιά. Η πρώτη αλλαγή που έχουμε είναι η εξάτμιση του ελεύθερου νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος που συμβαίνει γύρω στους 100 – 140 °C. Κάποια στιγμή το χημικά δεσμευμένο νερό θα αρχίσει να εξατμίζεται επίσης μέχρι την θερμοκρασία των 800 °C. Ξεκινώντας από τους 300 °C το τσιμέντο αρχίζει και συρρικνώνεται ενώ τα αδρανή διαστέλλονται με αποτέλεσμα να μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στη περιοχή των 400 – 600 °C το υδροξύλιο του ασβεστίου διασπάτε σε οξείδιο του ασβεστίου και νερό.



Η διάσπαση αυτή έχει ως αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη εξάτμιση του νερού και μπορεί να οδηγήσει σε αποφλοίωση του σκυροδέματος. Από την υψηλή θερμοκρασία επηρεάζονται και τα αδρανή που περιέχει το σκυρόδεμα. Στην περίπτωση πυριτικών αδρανών έχουμε την διόγκωση τους λόγω μεταμόρφωσης του α-χαλαζία σε β-χαλαζία περίπου στους 575 °C, ενώ αν το σκυρόδεμα περιέχει ασβεστολιθικά αδρανή έχουμε την διάσπασή τους στους 800 °C [1],[4].

Όλες οι φυσικές και χημικές αλλαγές τόσο κατά την διάρκεια της ανόδου όσο και της καθόδου της θερμοκρασίας εξαρτώνται από τον τύπο του τσιμέντου, τον τύπο των αδρανών και από την συνοχή και αλληλεπίδραση των δύο. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι τα φορτία που δέχεται ο φορέας μας, και τα επίπεδα υγρασίας στο εσωτερικό του. Είναι επόμενος φανερό πως υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων στις οποίες πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή.

Εκτός από τις χημικές αλλαγές στο σκυρόδεμα έχουμε και αλλαγές στα θερμικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλονται η πυκνότητα η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος και μειώνεται η μέγιστη θλιπτική αντοχή του.

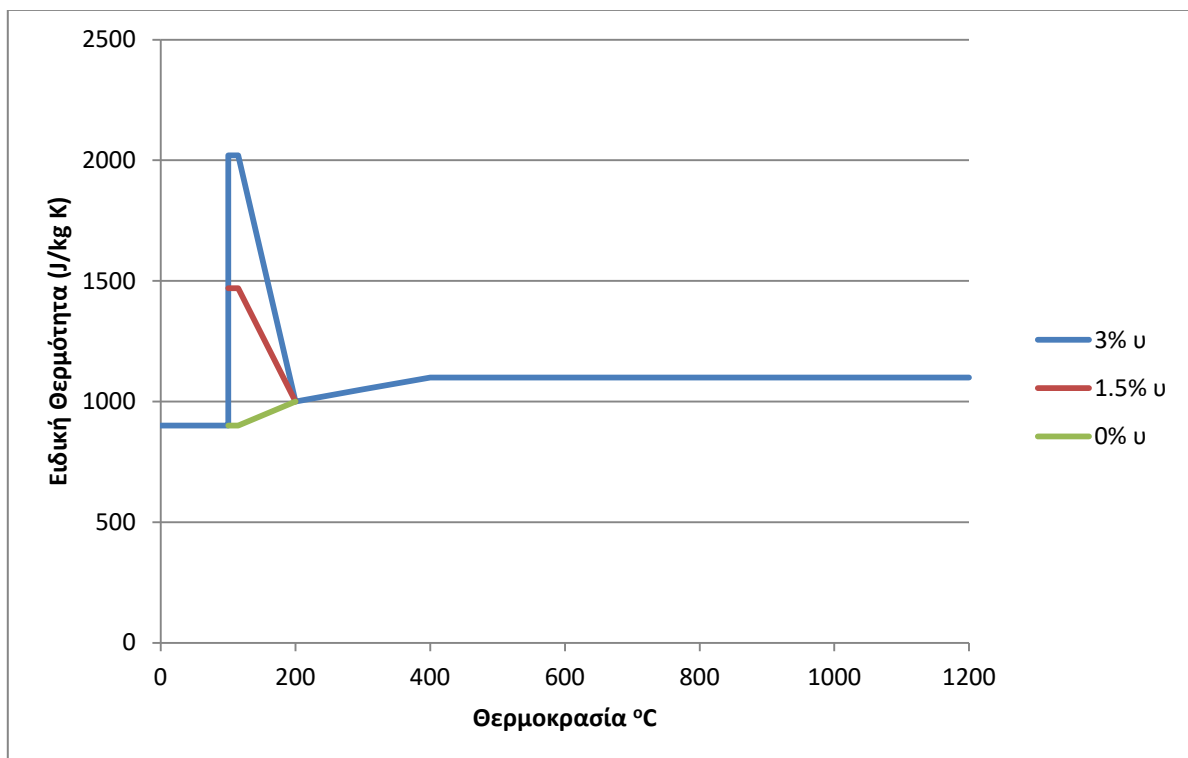
2.2.1 Ειδική Θερμότητα

Η ειδική θερμότητα μας δείχνει το ποσό της ενέργειας που χρειάζεται για να θερμανθεί 1 kg σκυροδέματος κατά 1 βαθμό Kelvin. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 Μέρος 2 προκειμένου για ξηρό σκυρόδεμα η ειδική θερμότητα c_p μπορεί να υπολογιστεί ανάλογα με την θερμοκρασία θ στην οποία βρίσκεται ως εξής:

$$\begin{aligned} c_p &= 900 \text{ (J/kg K)} & 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p &= 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)} & 100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 200 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p &= 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg K)} & 200 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 400 \text{ }^\circ\text{C} \\ c_p &= 1100 \text{ (J/kg K)} & 400 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Η ειδική θερμότητα για θερμοκρασία από 100 °C έως 115 °C μπορεί να πάρει μία μέγιστη σταθερή τιμή c_{peak} ανάλογα με την υγρασία του σκυροδέματος.

Για υγρασία 0%, 1.5% και 3% κατά βάρος η τιμή του c_{peak} είναι 900, 1470 και 2020 J/KgK αντίστοιχα, από τους 115 °C έως τους 200 °C θεωρούμε ότι έχουμε γραμμική μείωση. Για άλλες τιμές υγρασίας επιτρέπεται γραμμική παρεμβολή.



Σχήμα 2-2: Γραφική παράσταση Ειδικής Θερμότητας (c_p) για υγρασία 3, 1.5 και 0 %

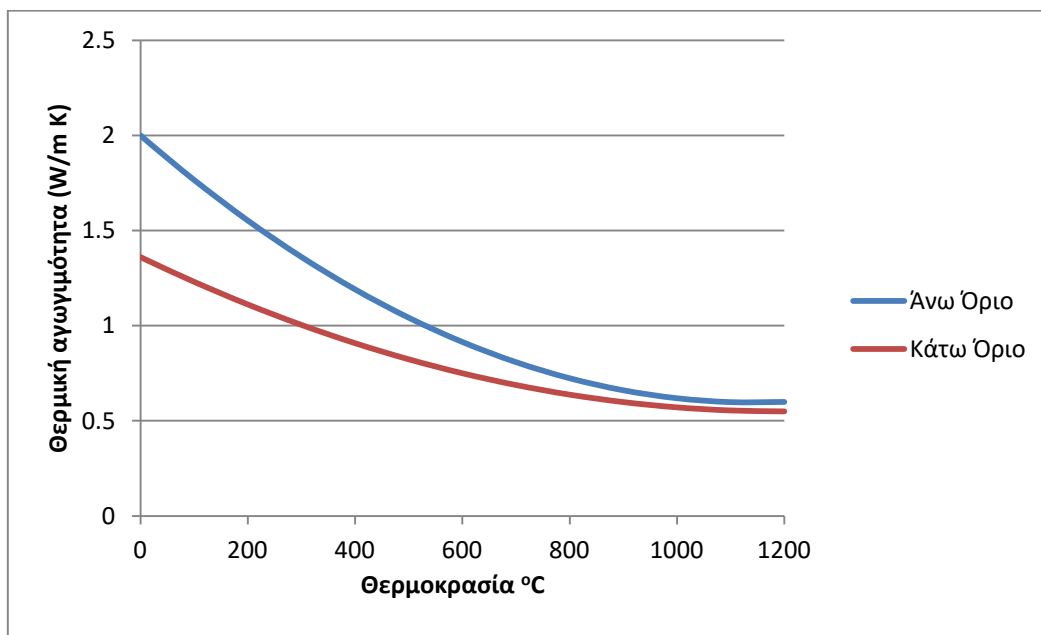
2.2.2 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα είναι το ποσό της ενέργειας που χρειάζεται για να διαδοθεί η θερμοκρασία μέσα σε ένα υλικό κατά ένα μέτρο κατά έναν βαθμό Kelvin. Δηλαδή μας δείχνει το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαδίδεται η θερμοκρασία μέσα σε ένα σώμα.

Σύμφωνα με τον Ευροκώδικα (EN 1992 – 1- 2) το πάνω και το κάτω όριο της θερμικής αγωγιμότητας σκυροδέματος ανάλογα με την θερμοκρασία του φαίνονται παρακάτω.

$$\lambda_c = 2 - 0.2451 * (\theta/100) + 0.0107 * (\theta/100)^2 \text{ W/m K (άνω όριο) για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 * (\theta/100) + 0.0057 * (\theta/100)^2 \text{ W/m K (κάτω όριο) για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$



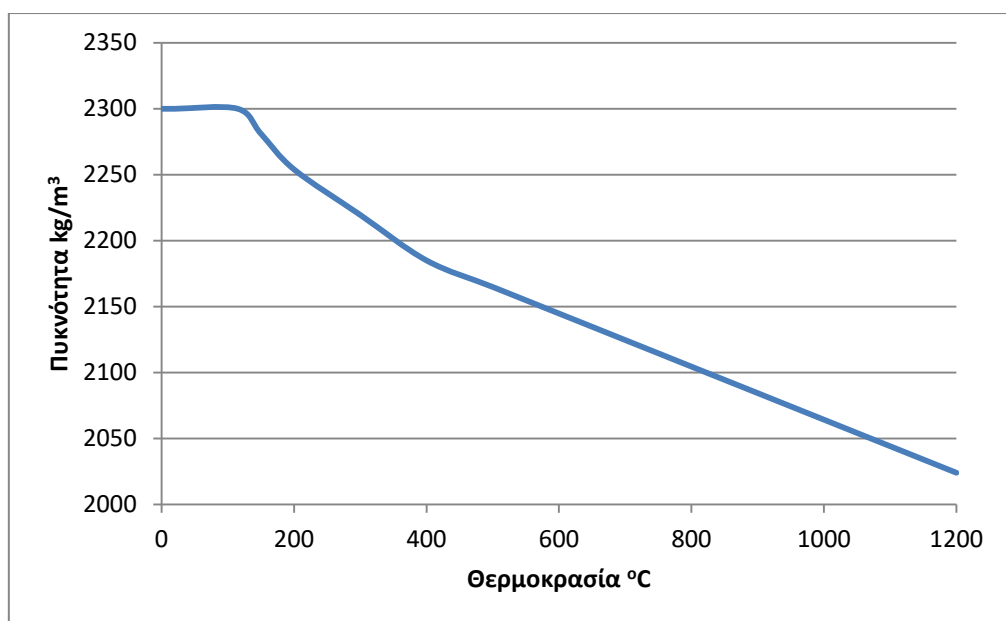
Σχήμα 2-3: Γραφική παράσταση Θερμικής αγωγιμότητας

2.2.3 Πυκνότητα

Η μεταβολή της πυκνότητας οφείλεται στην απώλεια υγρασίας από το σκυρόδεμα και επηρεάζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(20) & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho &= \rho(20) * (1 - 0.02 * (\theta - 115) / 85) & 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho &= \rho(20) * (0.98 - 0.03 * (\theta - 200) / 200) & 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho &= \rho(20) * (0.95 - 0.07 * (\theta - 400) / 800) & 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Για σκυρόδεμα πυκνότητας 2300 kg/m^3 το διάγραμμα θερμοκρασίας – πυκνότητας είναι το παρακάτω.



Σχήμα 2-4: Γραφική παράσταση πυκνότητας – θερμοκρασίας για σκυρόδεμα πυκνότητας 2300 kg/m³

2.2.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά Σκυροδέματος

Οι ιδιότητες αντοχής και παραμορφώσεων σκυροδέματος που καταπονείται μονοαξονικά μεταβάλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η σχέση θλίψης – παραμόρφωσης ορίζεται με βάση δύο παραμέτρους, την θλιπτική αντοχή f_c και την βράχυνση ϵ_{c1} που αντιστοιχεί στην θλιπτική αντοχή

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκυρόδεμα με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή με περιεκτικότητα 80% κατά βάρος τουλάχιστον.

Θερμοκρασία Σκυροδέματος θ °C	Πυριτικά αδρανή			Ασβεστολιθικά Αδρανή		
	$f_{c,\theta}/f_{c,k}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{c,k}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
20	1	0,0025	0,02	1	0,0025	0,02
100	1	0,004	0,0225	1	0,004	0,0225
200	0,95	0,0055	0,025	0,97	0,0055	0,025
300	0,85	0,007	0,0275	0,91	0,007	0,0275
400	0,75	0,01	0,03	0,85	0,01	0,03
500	0,6	0,015	0,0325	0,74	0,015	0,0325
600	0,45	0,025	0,035	0,6	0,025	0,035
700	0,3	0,025	0,0375	0,43	0,025	0,0375
800	0,15	0,025	0,04	0,27	0,025	0,04
900	0,08	0,025	0,0425	0,15	0,025	0,0425
1000	0,04	0,025	0,045	0,06	0,025	0,045
1100	0,01	0,025	0,0475	0,02	0,025	0,0475
1200	0			0		

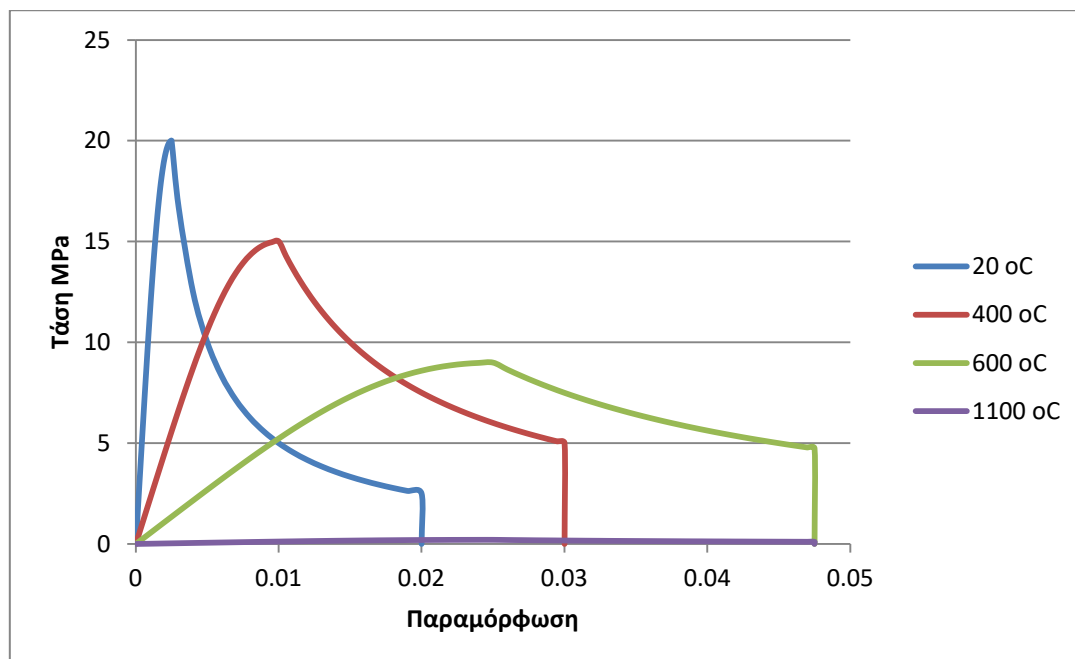
Πίνακας 6: Τιμές των κύριων παραμέτρων της σχέσης $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος κανονικού βάρους με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή σε υψηλές θερμοκρασίες

Το μαθηματικό μοντέλο της σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής

$$\sigma = 3 \cdot \varepsilon \cdot f_c / \varepsilon_{c1} \cdot (2 + (\varepsilon / \varepsilon_{c1})^3)$$

ενώ η έκταση του φθίνοντος κλάδου ορίζεται από την τιμή του ε_{cu1} . Για το φθίνοντα κλάδο επιτρέπεται η χρήση γραμμικού ή μη γραμμικού μοντέλου (EN 1992 – 1- 2), εδώ θα γίνει η χρήση μιας παραβολής.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για σκυρόδεμα χαρακτηριστικής αντοχής $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ και το πώς μεταβάλλεται η αντοχή του σε σχέση με την θερμοκρασία, αν θεωρήσουμε πως ολόκληρη η διατομή του σκυροδέματος βρίσκεται σε αυτή την θερμοκρασία.

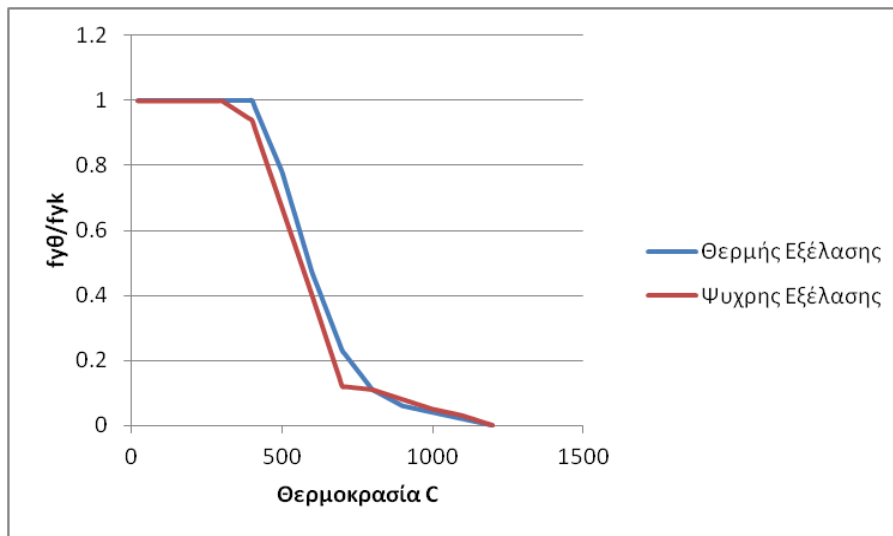


Σχήμα 2-5: Γραφική παράσταση Τάσης – Παραμόρφωσης για θερμοκρασίες 20, 400, 600 και 1100 °C

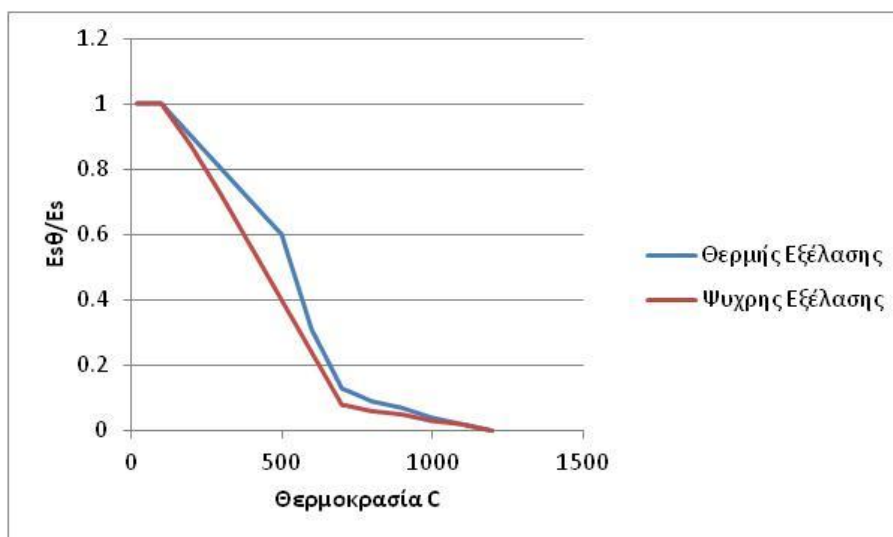
2.3 Ο χάλυβας υπό υψηλές θερμοκρασίες

Η θερμότητα που μεταφέρεται από το σκυρόδεμα στο χάλυβα έχει επίσης μεγάλη σημασία και επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος επικάλυψης που έχει εφαρμοστεί. Παρόλο που και ο χάλυβας είναι ένα άκαυστο υλικό δεν αντέχει για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς εμφανίζονται φαινόμενα ερπυσμού, χαλάρωσης και αλλαγή στη μικροδομή του. Ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία εκτέθηκε ο χάλυβας και τον τρόπο παραγωγής του (θερμή έλαση/ ψυχρή έλαση) οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι αναστρέψιμες ή μόνιμες. Τα χαρακτηριστικά του χάλυβα τα οποία κυρίως επηρεάζονται είναι το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας η τάση αστοχίας και η δυσκαμψία του.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μείωση της τάσης διαροής του χάλυβα και του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τους 20 °C με βάση τον Ευρωκώδικα (EN 1992 – 1- 2) για χάλυβα θερμής και ψυχρής εξέλασης.



Σχήμα 2-6: Γραφική παράσταση Αντοχής – Θερμοκρασίας για χάλυβα Θερμής και Ψυχρής εξέλασης



Σχήμα 2-7: Γραφική παράσταση Μέτρου ελαστικότητας – Θερμοκρασίας για χάλυβα θερμής και ψυχρής εξέλασης

Από τα παραπάνω διαγράμματα διακρίνουμε πως ο χάλυβας διατηρεί την αντοχή του μέχρι του 400 °C και το μέτρο ελαστικότητας είναι το 70% του αρχικού σε αυτή την θερμοκρασία, ενώ περίπου στους 600 °C ο χάλυβας έχει χάσει το σημαντικότερο μέρος της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.

Θερμοκρασία Χάλυβα θ	Θερμής εξέλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής εξέλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής εξέλασης	Ψυχρής κατεργασίας
°C	f _{sy,θ} / f _{yk}		F _{sp,θ} /f _{yk}		E _{sθ} /E _s	
20	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	0,96	1	1
200	1	1	0,81	0,92	0,9	0,87
300	1	1	0,61	0,81	0,8	0,72
400	1	0,94	0,42	0,63	0,7	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,6	0,4
600	0,47	0,4	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7: Κατηγορία N τιμών για τις παραμέτρους της σχέσης $\sigma - \epsilon$ ράβδων οπλισμού θερμής ή ψυχρής κατεργασίας σε υψηλές θερμοκρασίες

2.4 Παραμορφωσιμότητα

Καθώς η διατομή θερμαίνεται το σκυρόδεμα και ο χάλυβας παραμορφώνονται.

Σκυρόδεμα

Θερμική μήκυνση: Η θερμική μήκυνση του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των αδρανών που έχουν χρησιμοποιηθεί. Η θερμική μήκυνση δεν είναι ανάλογη της θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στις χημικές και φυσικές αλλαγές που εξελίσσονται κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς στα αδρανή. Η θερμική παραμόρφωση με αναφορά τους 20 οC υπολογίζεται ως:

Για πυριτικά αδρανή:

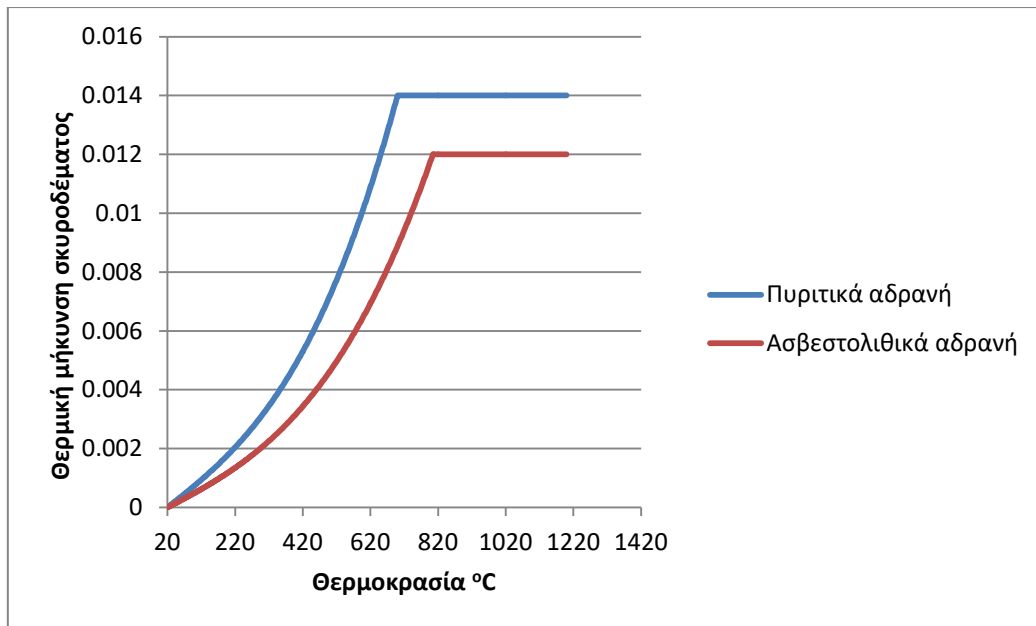
$$\epsilon_c(\theta) = -1.8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2.3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3 \quad \text{για } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_c(\theta) = 14 \cdot 10^{-3} \quad \text{για } 700 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Για ασβεστολιθικά αδρανή:

$$\epsilon_c(\theta) = 1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{για } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_c(\theta) = 12 \times 10^{-3} \quad \text{για } 805 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$



Σχήμα 2-8: Γραφική παράσταση Θερμικής μήκυνσης για σκυρόδεμα με πυριτικά και ασβεστολιθικά αδρανή

Ερπυσμός:

Ερπυσμός είναι η χρονικά εξαρτημένη παραμόρφωση ενός υλικού που φορτίζεται σταθερά χωρίς να ξεπερνάται το όριο διαρροής του. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε πολλά υλικά αλλά είναι ιδιαίτερα εμφανές στο σκυρόδεμα και εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας, τις διαστάσεις του στοιχείου και την σύνθεση του σκυροδέματος. Επηρεάζεται επίσης σημαντικά από την θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί κατά μήκος της διατομής.

Η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού μπορεί να υπολογιστεί με βάση τους Anderberg & Thelandersson από το τύπο

$$\epsilon_{tc}(\theta, \sigma) = \epsilon_{th}(\theta, \theta_0) * \beta * \sigma / f_c(20)$$

όπου ϵ_{tc} : η παραμόρφωση που δέχεται ο φορέας λόγω ερπυσμού

ϵ_{th} : η παραμόρφωση που δέχεται ο φορέας λόγω της θερμοκρασίας

β : συντελεστής υλικού, λαμβάνει τιμές από 1.8 έως 2.35

σ : η τάση που δέχεται το θλιβόμενο μέρος της διατομής

$f_c(20)$: η αντοχή του σκυροδέματος στους 20 οC.

Χάλυβας

Η θερμική μήκυνση του χάλυβα με αναφορά το μήκος του στους 20 οC μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

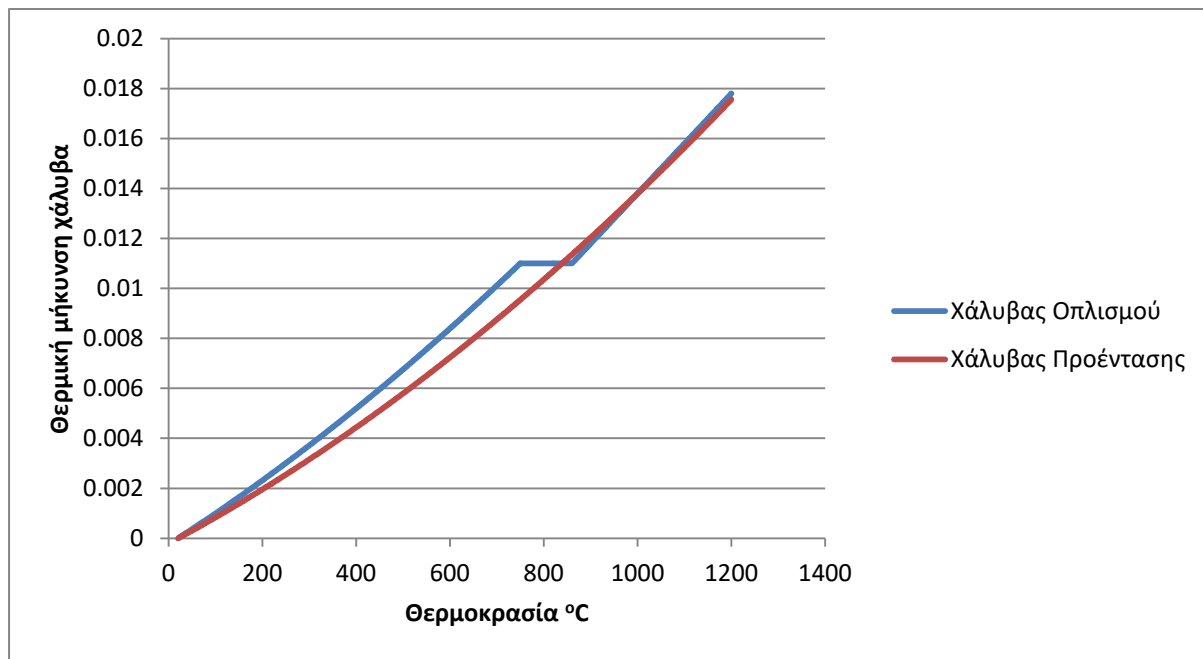
$$\epsilon_s(\theta) = -2.416 \cdot 10^{-4} + 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 \quad 20 \text{ oC} \leq \theta \leq 750 \text{ oC}$$

$$\epsilon_s(\theta) = 11 \cdot 10^{-3} \quad 750 \text{ oC} < \theta \leq 860 \text{ oC}$$

$$\epsilon_s(\theta) = -6.2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta \quad 860 \text{ oC} < \theta \leq 1200 \text{ oC}$$

και για χάλυβα προέντασης

$$\epsilon_s(\theta) = -2.016 \cdot 10^{-4} + 10^{-5} \cdot \theta + 0.4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 \quad 20 \text{ oC} \leq \theta \leq 1200 \text{ oC}$$



Σχήμα 2-9: Γραφική παράσταση Θερμικής μήκυνσης για χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης

2.5 Συντελεστής φωτιάς

Εδώ θα αναφέρουμε τα φορτία που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς. Καταρχάς τα φορτία που δέχεται ο φορέας υπό κανονικές συνθήκες θα πρέπει να συμπεριληφθούν αν είναι πιθανόν να εμφανιστούν σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι τιμές για τα μεταβαλλόμενα φορτία θα πρέπει να ληφθούν με βάση τον Ευρωκώδικα (EN 1990). Έμμεσα φορτία όπως οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα λόγω παρεμποδισμένης παραμόρφωσης εξαιτίας της θερμοκρασίας θα πρέπει να συμπεριληφθούν επίσης. Εξαιρέση στα φορτία που λαμβάνουμε είναι οι ευνοϊκές δυνάμεις που δέχεται ο φορέας, όπως και τα φορτία που προκύπτουν από κάποιο συντηρητικό μοντέλο και από συνοριακές συνθήκες.

Στη περίπτωση πυρκαγιάς θα πρέπει να εξετάσουμε γενικά για φορτία που προκύπτουν από

- Παρεμποδισμένη θερμική παραμόρφωση του φορέα
- Διαφορική θερμική παραμόρφωση που αναπτύσσεται εντός του φορέα
- Θερμική διαβάθμιση στο εσωτερικό της διατομής
- Θερμική παραμόρφωση γειτονικών φορέων

Οι τιμές των φορτίων αυτών υπολογίζονται με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος για το δεδομένο χρονικό διάστημα έκθεσης στη φωτιά. Για φορείς που εκτίθενται σε πρότυπη φωτιά υπολογίζονται μόνο οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της διατομής.

Οι δράσεις λόγω της πυρκαγιάς θεωρούνται ως τυχηματικές και ο συντελεστής με το οποίο υπολογίζονται είναι σημαντικά μικρότερος από τους συντελεστές υπό κανονικές συνθήκες. Συνήθως ο συντελεστής των δράσεων για την φωτιά είναι περίπου 70% και αυτό οφείλεται γιατί η πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς ταυτόχρονα με τις δυσμενέστερες συνθήκες που μπορεί να επικρατούν είναι πολύ μικρή.

Για τον υπολογισμό αυτού του συντελεστή (n_{fi}) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν από τους παρακάτω τύπους ανάλογα με το συνδυασμό φόρτισης του φορέα.

$$n_{fi} = G_k + \psi_{fi} * Q_k / \gamma_G * G_k + \gamma_Q * Q_{k,1}$$

ή την μικρότερη τιμή που προκύπτει από τα δύο παρακάτω

$$n_{fi} = G_k + \psi_{fi} * Q_k / \gamma_G * G_k + \gamma_Q * \psi_{0,1} * Q_{k,1}$$

$$n_{fi} = G_k + \psi_{fi} * Q_k / \xi * \gamma_G * G_k + \gamma_Q * Q_{k,1}$$

όπου

Q είναι τα μεταβαλλόμενα φορτία

G είναι τα μόνιμα φορτία

γ_G είναι ο συντελεστής των μόνιμων φορτίων

γ_Q είναι ο συντελεστής των μεταβαλλόμενων δράσεων

ψ_{fi}

ξ είναι μειωτικός συντελεστής για μη ευνοϊκές μόνιμες δράσεις

Για λόγους απλοποίησης μπορούμε να λαμβάνουμε τον συντελεστή n_{fi} ως 0,7.

2.6 Ο παράγοντας του χρόνου

Με βάση τον Ευρωκώδικα (EN 1992 – 1 – 1) η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος επηρεάζεται από τον χρόνο και υπολογίζεται ως εξής

$$f_{cd} = acc * f_{ck} / \gamma_c$$

Η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος διαιρείται με έναν συντελεστή ασφαλείας $\gamma_c = 1.5$ και πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή μακροχρόνιων δράσεων $acc = 0,85$. Η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος υπολογίζεται σε μικρό χρονικό διάστημα από την κατασκευή του, στην πραγματικότητα όμως η κατασκευή δέχεται φορτία για πολλά χρόνια γεγονός που μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος, έτσι θεωρούμε τον συντελεστή μακροχρόνιων δράσεων που μειώνει την αντοχή μας κατά 15%

Κανονικά σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν λαμβάνουμε υπόψη τις μακροχρόνιες δράσεις καθώς διαρκεί μόνο για μερικά μέχρι λίγες ώρες, αν θεωρήσουμε όμως πως η αντοχή του σκυροδέματος έχει ήδη μειωθεί από αυτές τις δράσεις θα πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και σε περίπτωση φωτιάς. Για τον λόγω αυτό η αντοχή και οι δυνάμεις που

δέχεται το σκυρόδεμα θα υπολογίζονται λαμβάνοντας και συντελεστή φωτιάς n_{fi} αλλά και τον συντελεστή των μακροχρόνιων δράσεων.

Τέλος όπως αναφέραμε νωρίτερα η πυρκαγιά είναι ένα φαινόμενο που δεν συναντάται συχνά για τον λόγο αυτό θεωρούμε συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{fi} = 1$ σχετικά με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

$$f_{cd} = a_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_{fi}$$

3. Υπολογισμός Θερμοκρασιών

3.1 Μαθηματικό μοντέλο

Η έκθεση της επιφάνειας του σκυροδέματος σε πυρκαγιά οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της, λόγω όμως της μεταφοράς της θερμότητας με αγωγή θα αυξηθεί και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος και οδηγεί στην εξάτμιση του νερού που βρίσκεται στους πόρους του με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη αποφλοιώσή του.

Παρακάτω θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος και μέσα σε αυτό και θα παρουσιάσουμε ένα σχετικά απλό μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της.

Όπως αναφέραμε παραπάνω η θερμοκρασία από την επιφάνεια του σκυροδέματος θα κατανεμηθεί στο εσωτερικό του μη γραμμικά. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα θερμοκρασίας – πάχους θα έχει την μορφή μιας παραβολής. Η κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται από το πάχος, τα υλικά με τα οποία είναι φτιαγμένο το σκυρόδεμα και την περιεκτικότητά του σε υγρασία. Παρόλα αυτά, οι ιδιότητες των υλικών και το ποσοστό της υγρασίας μέσα σε αυτό εξαρτώνται με την σειρά τους από την θερμοκρασία. Αυτό δημιουργεί μία αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών, της υγρασίας και της θερμοκρασίας. Οι ιδιότητες των υλικών και η υγρασία καθορίζουν την αύξηση της θερμοκρασίας που αυτό οδηγεί, για θερμοκρασίες άνω των 100 °C, στην αλλαγή αυτών των ιδιοτήτων. Γενικά η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι μεγαλύτερη και σε μικρότερο χρόνο όσο μειώνεται η υγρασία του σκυροδέματος.

Η εξίσωση που περιγράφει την ανάπτυξη της θερμοκρασίας σε ομογενές και ισότροπο μέσο στο οποίο δεν παράγεται θερμότητα είναι μια διαφορική εξίσωση στις τρεις διαστάσεις που φαίνεται παρακάτω [7].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_c * \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

Όπου: a_c = θερμική διαχυτότητα του σκυροδέματος [m^2/s]

$$a_c = \frac{l_c}{\rho_c c_c}$$

l_c = θερμική αγωγιμότητα [W/mK]

ρ_c = Πυκνότητα [kg/m^3]

c_c = ειδική θερμότητα [kJ/kgK]

$T(x, y, z, t)$ = θερμοκρασία [K]

x, y, z = συντεταγμένες του χώρου [m]

t = χρόνος [min]

Στην παράμετρο της θερμικής διαχυτότητας περιλαμβάνονται όλες οι ιδιότητες του σκυροδέματος που επηρεάζουν την μεταβολή της θερμοκρασίας. Όλες αυτές οι παράμετροι όμως είναι ταυτόχρονα και θερμικά εξαρτημένες. Η υγρασία και η επιρροή που έχει στην θερμοκρασία της διατομής μας δεν εξετάζεται.

Διατομές σκυροδέματος στις οποίες οι δύο διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες συγκρινόμενες με το πάχος μπορούν θεωρηθούν ως στοιχεία απείρου μήκους. Σε τέτοιου είδους στοιχεία έχουμε παρούσα μια μονοδιάστατη μεταβολή της θερμοκρασίας. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορική εξίσωση που είδαμε προηγουμένως απλοποιείται και μετατρέπεται ως:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_c * \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right].$$

Από την εξίσωση της μιας διεύθυνσης μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία της διατομής χωρίζοντας την σε στοιχεία πλάτους Δx και βρίσκοντας την θερμοκρασία στο μέσο καθενός από αυτά.

Για να γίνει ο υπολογισμός αντικαθιστούμε τις πεπερασμένες διαφορές των παρακάτω εξισώσεων στην διαφορική εξίσωση που είδαμε προηγουμένως.

Η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο φαίνονται παρακάτω

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{n,k+1} - T_{n,k}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\Delta^2 T}{(\Delta x)^2} = \frac{T_{n+1,k} + T_{n-1,k} - 2T_{n,k}}{(\Delta x)^2}$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν τα παραπάνω στην διαφορική εξίσωση καταλήγουμε με την παρακάτω σχέση

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = 2a_c \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left(\frac{T_{n+1,k} + T_{n-1,k}}{2} - T_{n,k} \right)$$

Για να έχει η εξίσωση σταθερή λύση θα πρέπει να ισχύει $2a_c \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq 1/2$

n : αναφέρεται στην θέση του στοιχείου

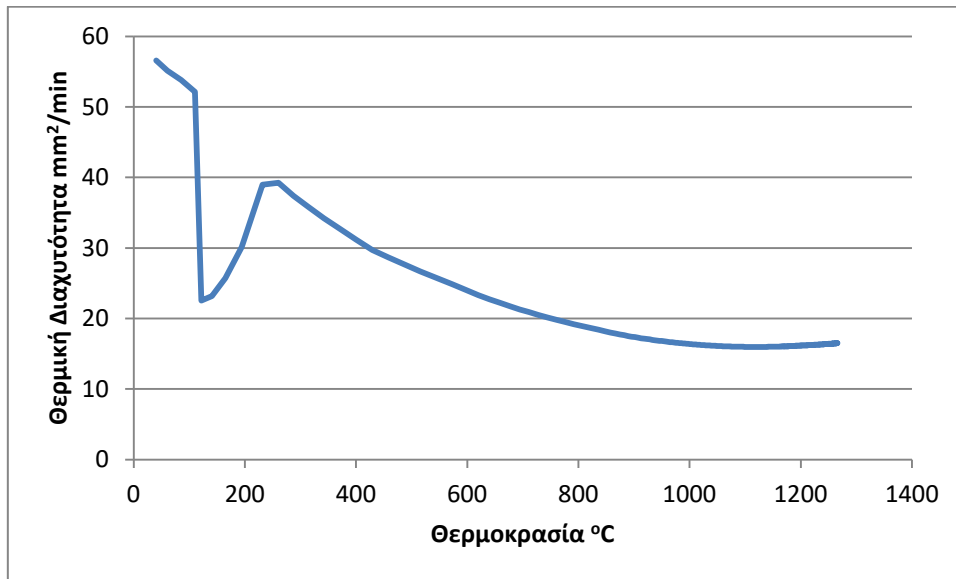
k : αναφέρεται στο χρονικό βήμα

3.2 Αριθμητικό παράδειγμα

Για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων ως αριθμητικό παράδειγμα θεωρήσαμε διατομή σκυροδέματος πάχους 600 mm με πυκνότητα και ειδική θερμότητα στους 20 °C 2300 kg/m³ και 0.9 KJ/kg K αντίστοιχα. Η υγρασία του σκυροδέματος θεωρείται 3% και η μεταβολή των ιδιοτήτων του μεταβάλλεται με βάση τον Ευρωκώδικα (EN 1992 – 1- 2).

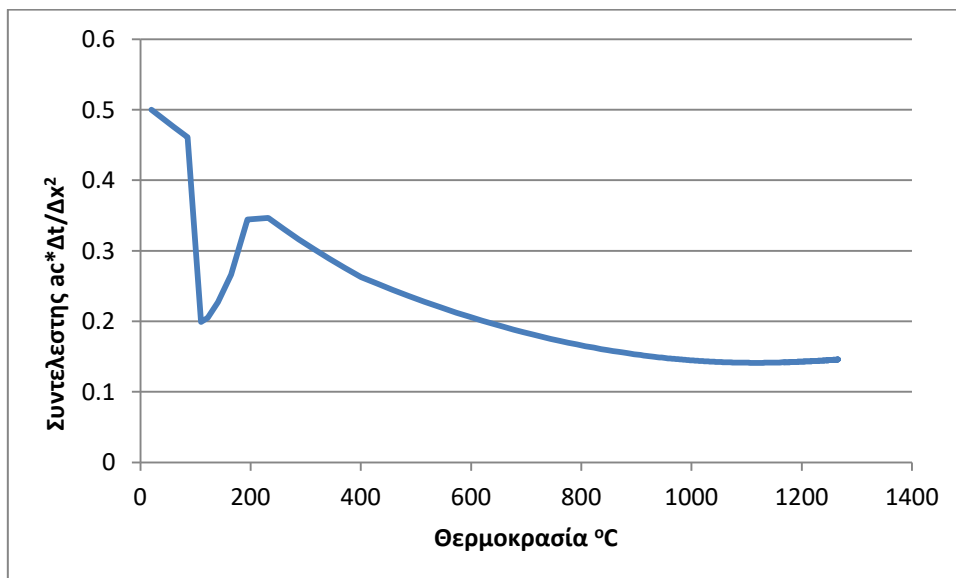
Στην επιφάνεια της διατομής έχουμε την ανάπτυξη της θερμοκρασίας με βάση μία από τις καμπύλες που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και χωρίζουμε την διατομή μας σε λωρίδες πάχους 4mm.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και τον τύπο $a_c = \frac{l_c}{\rho_c c_c}$, η θερμική διαχυτότητα για τους 20 °C θα είναι 56,5626 m²/s. Χρησιμοποιώντας αυτό και τον περιορισμό για την σταθερή λύση υπολογίζουμε το χρονικό βήμα $\Delta t = 0,1414$. Χρησιμοποιώντας σταθερό χρονικό βήμα μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμική διαχυτότητα για κάθε θερμοκρασία, από όπου προκύπτει το παρακάτω.



Σχήμα 3-1: Γραφική παράσταση Θερμικής διαχυτότητας

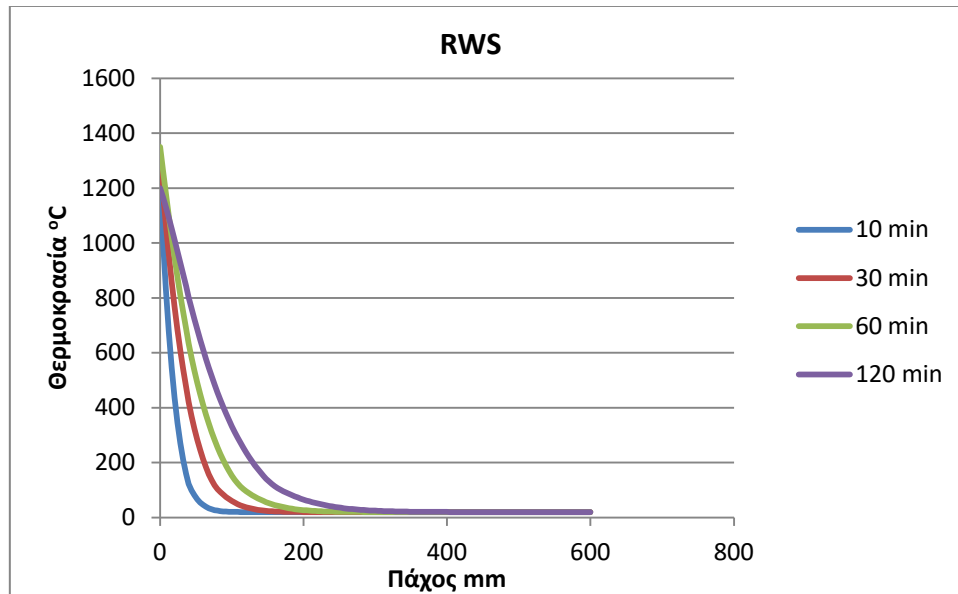
Και ο συντελεστής $a_c \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$



Σχήμα 3-2: Γραφική παράσταση του συντελεστή $a_c \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$

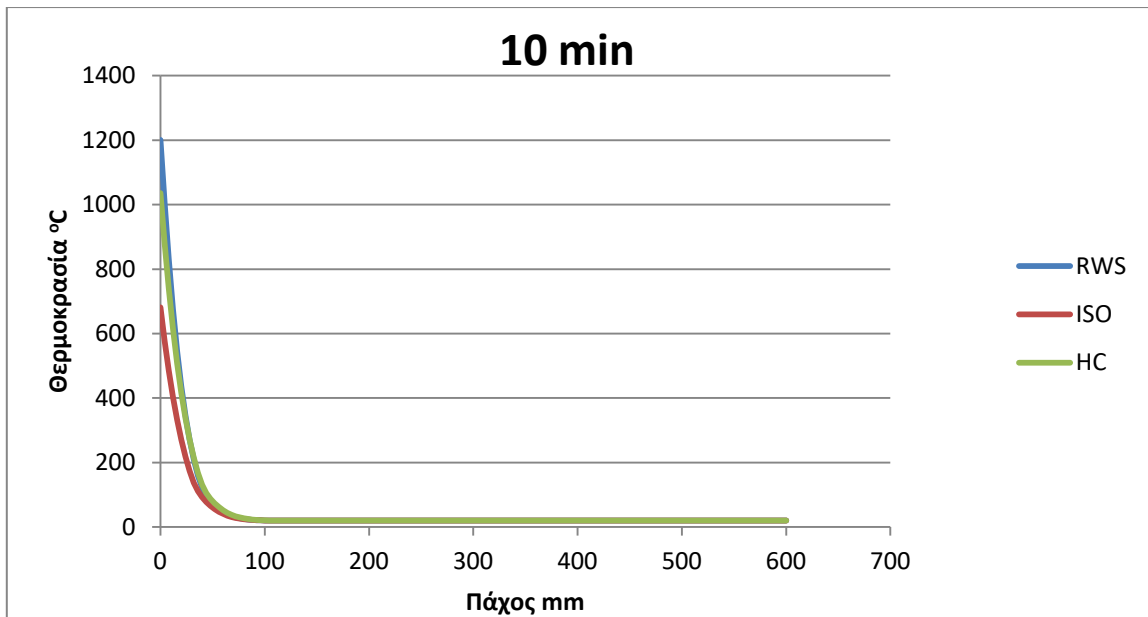
Εδώ παρατηρούμε πως η θερμική διάχυση και ο συντελεστής μειώνονται με τον ίδιο ρυθμό. Επιπλέον στην περιοχή μεταξύ των θερμοκρασιών 115 °C και 200 °C παρατηρούμε ότι έχουμε μια μεγάλη πτώση των δύο μεγεθών και ξανά άνοδο στους 200 °C, ενώ στη συνέχεια έχουμε σταθερή πτώση μέχρι το τέλος της φωτιάς. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ειδικής θερμότητας που προβλέπει ο Ευρωκώδικας (EN 1992 – 1- 2) σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Υπολογίζοντας τα παραπάνω μεγέθη για κάθε χρονικό βήμα μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία του επόμενου βήματος.

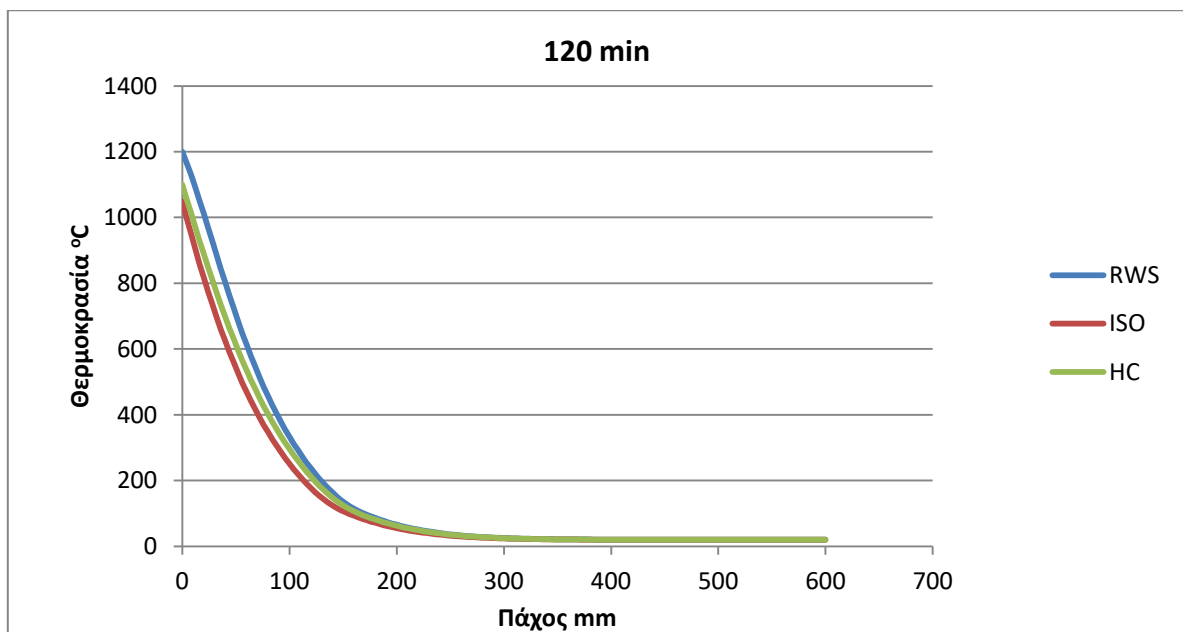


Σχήμα 3-3: προφίλ θερμοκρασιών για 10, 30, 60 και 120 λεπτά έκθεσης σε πυρκαγιά

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε το πώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία κατά το μήκος της διατομής μας με βάση την καμπύλη RWS. Παρατηρούμε ότι μέσα στα πρώτα 10 λεπτά η θερμοκρασία φτάνει τους 1200 °C και αυξάνεται έως τους 1300 °C σε χρόνο 60 λεπτά. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αρχίζει να πέφτει στην επιφάνεια αλλά συνεχίζει να αυξάνεται στο εσωτερικό της διατομής. Η θερμοκρασία επηρεάζει τη διατομή μας μέχρι το βάθος των 300mm.



Σχήμα 3-4: Προφίλ Θερμοκρασιών σε χρόνο έκθεσης 10 λεπτά για τις καμπύλες RWS, ISO και HC

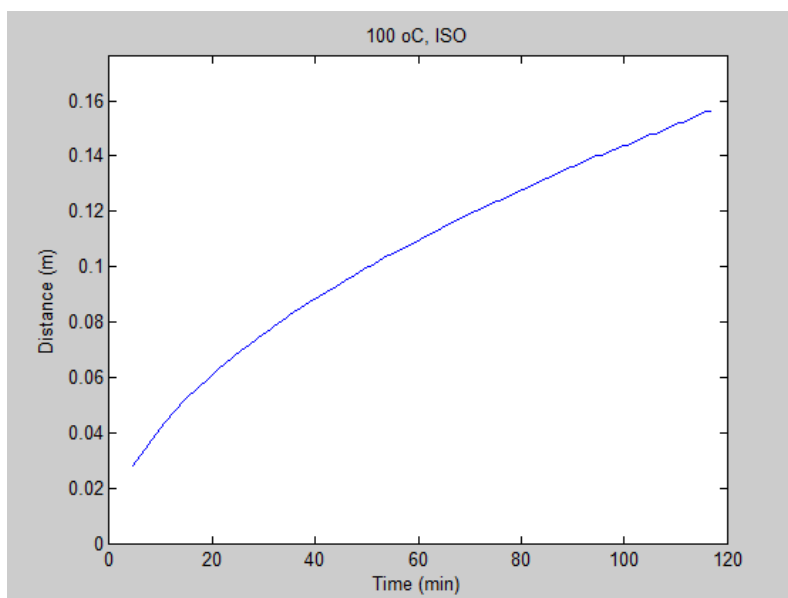


Σχήμα 3-5: Προφίλ Θερμοκρασιών σε χρόνο έκθεσης 120 λεπτά για τις καμπύλες RWS, ISO και HC

Συγκρίνοντας τις καμπύλες θερμοκρασίας RWS, ISO, και HC (υδρογονανθράκων) παρατηρούμε πως στα πρώτα 10 λεπτά η διαφορά στη θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλη και καθώς φτάνουμε στα 120 λεπτά έκθεσης του σκυροδέματος στη φωτιά η διαφορά αυτή μειώνεται. Τέλος όλες οι καμπύλες επηρεάζουν τη διατομή έως τα 300mm.

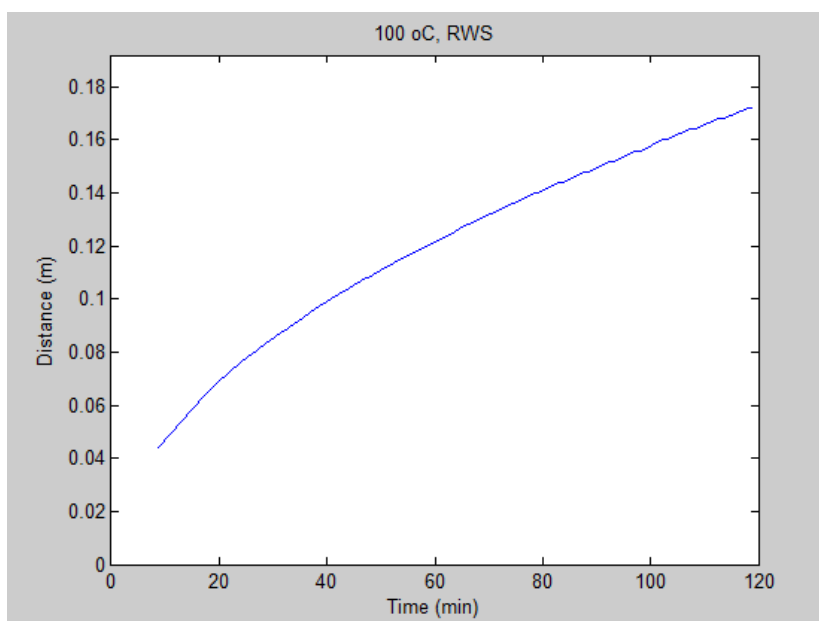
3.3 Ταχύτητα ανάπτυξης της θερμοκρασίας

Από τα διαγράμματα ανάπτυξης της θερμοκρασίας μπορούμε να παρατηρήσουμε την τη θέση του μετώπου των 100 οC μέσα στο σκυρόδεμα. Η θερμοκρασία έχει φτάσει τους 100 οC σε απόσταση 20 mm από την επιφάνεια του σκυροδέματος σε χρόνο περίπου 5 λεπτά ενώ σε χρόνο 20 λεπτά έχει φτάσει σε απόσταση 60 mm. Για μία φωτιά διάρκειας 2 ωρών βλέπουμε πως το σκυρόδεμα φτάνει τους 100 οC σε απόσταση 150 mm.



Σχήμα 3-6: Μέτωπο των 100 °C για θερμοκρασιακή καμπύλη ISO

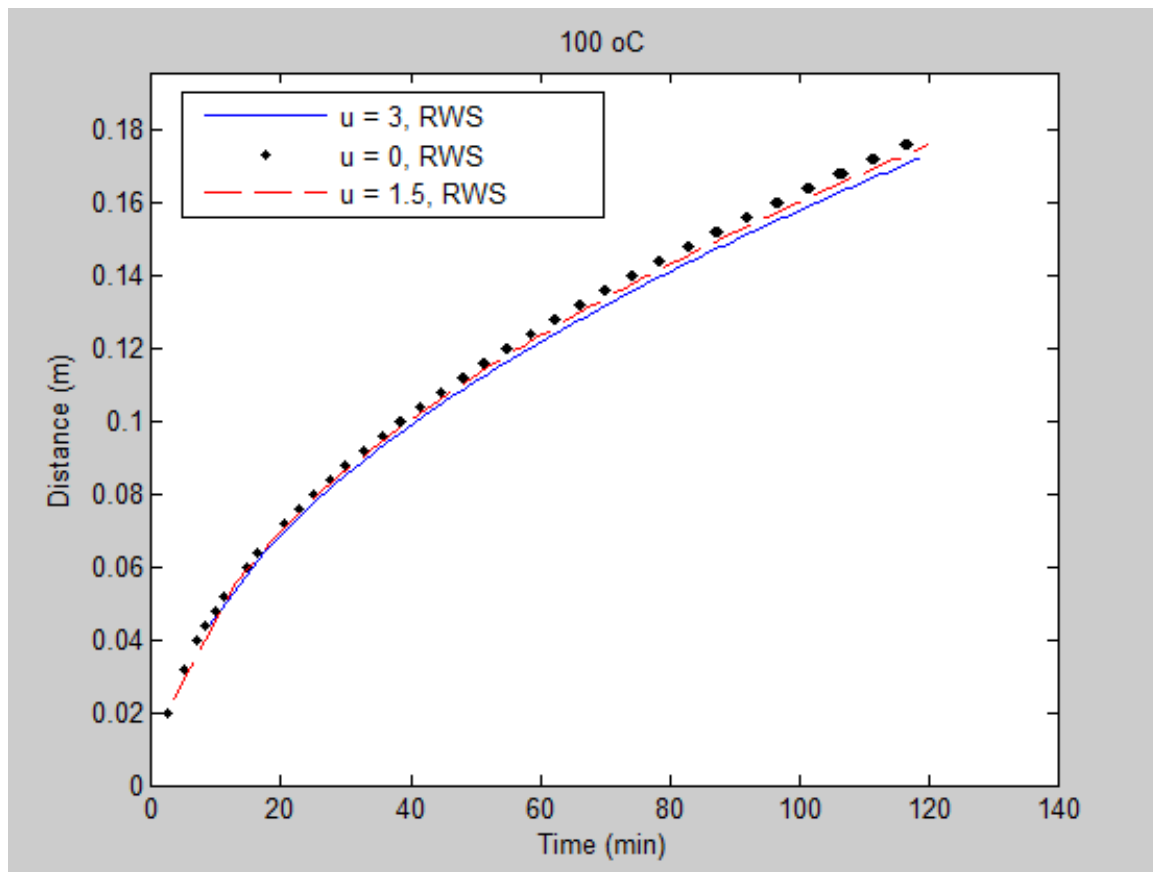
Το ίδιο μπορούμε να παρατηρήσουμε για την θερμοκρασιακή καμπύλη RWS με την μόνη διαφορά ότι η θερμοκρασία αναπτύσσεται ταχύτερα και φτάνει μέχρι τα 17 εκατοστά από την επιφάνεια του σκυροδέματος.



Σχήμα 3-7: Μέτωπο των 100 °C για θερμοκρασιακή καμπύλη ISO

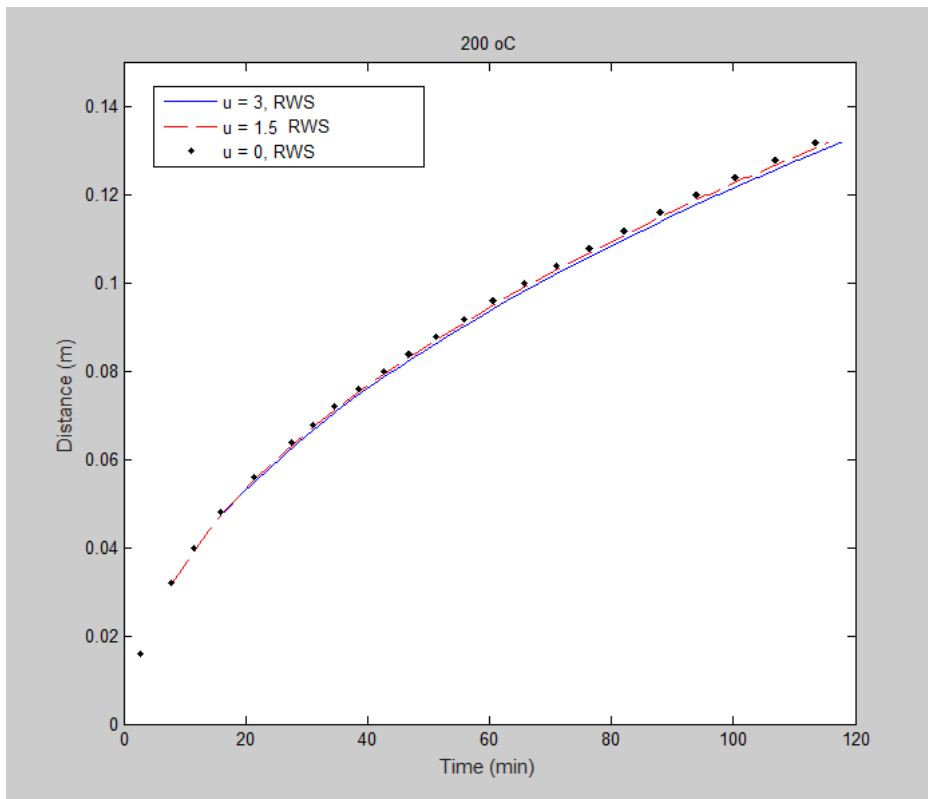
3.3.1 Η επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο η ειδική θερμότητα εξαρτάται από την υγρασία για θερμοκρασίες από 100 – 115 οC. Το γεγονός αυτό επηρεάζει την ανάπτυξη της θερμοκρασίας σε αυτή την περιοχή. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε το μέτωπο των 100 οC για σκυρόδεμα με υγρασία 3, 1.5 και 0%. Η διαφορές που δημιουργούνται είναι της τάξης του 1 mm, καταλαβαίνουμε λοιπόν πως η επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας δεν έχει ιδιαίτερο ρόλο.

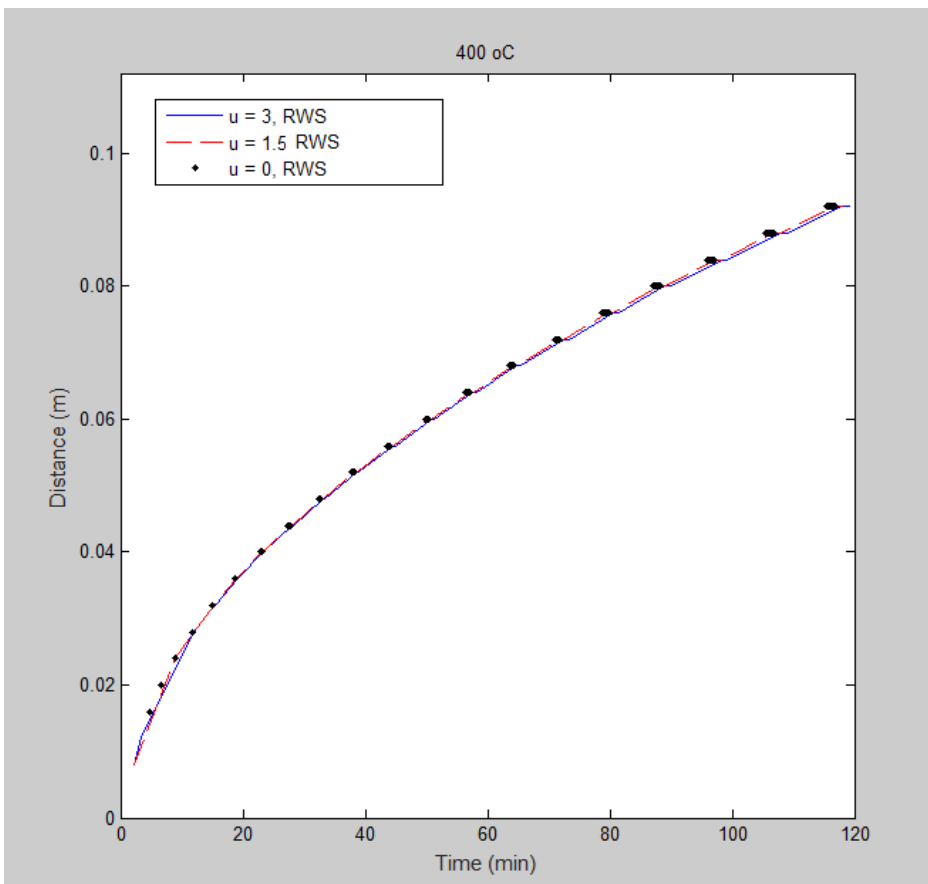


Σχήμα 3-8: Μέτωπο των 100 οC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος

Στη συνέχεια παρατηρούμε και τα μέτωπα των 200 °C και 400 °C για υγρασία 3, 1.5 και 0%. Αρχικά βλέπουμε πως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία το βάθος μέχρι το οποίο φτάνει μειώνεται. Για παράδειγμα 200 °C έχουμε μέχρι τα 13 εκατοστά και οι 400 °C φτάνουν μέχρι τα 10 εκατοστά περίπου στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Επιπλέον παρατηρούμε πως η υγρασία επηρεάζει ακόμα λιγότερο την θερμοκρασία όσο αυτή αυξάνεται και η διαφορά γίνεται μηδενική για θερμοκρασίες πάνω από τους 400 °C.



Σχήμα 3-9: Μέτωπο των 200 οC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος



Σχήμα 3-10: Μέτωπο των 400 οC για τρεις διαφορετικές υγρασίες σκυροδέματος

3.3.2 Η επίδραση της πυροπροστασίας στην ανάπτυξη της θερμοκρασίας

Μέχρι αυτό το σημείο είδαμε το πώς αναπτύσσεται η θερμοκρασία εντός ενός μέσου, του σκυροδέματος. Αν όμως μπροστά από το σκυρόδεμα υπάρχει κάποιο υλικό πυροπροστασίας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την μεταβολή της θερμοκρασίας στα δύο διαφορετικά μέσα και το πώς μεταφέρεται η θερμότητα από το ένα στο άλλο.

Ας θεωρήσουμε λοιπόν μια διατομή σκυροδέματος με θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα και ειδική θερμότητα l_c , ρ_c και c_p αντίστοιχα, και ένα υλικό πυροπροστασίας με χαρακτηριστικά l' , ρ' και c' . Η θερμική διαχυτότητα σε αυτά τα δύο υλικά θα είναι $a_c = \frac{l_c}{\rho_c c_c}$ για το σκυρόδεμα και $a' = \frac{l'}{\rho' c'}$ για την πυροπροστασία. Αν χωρίσουμε και τα δύο υλικά σε ζώνες πάχους Δx για το σκυρόδεμα και $\Delta x'$ για την πυροπροστασία θα μπορούμε να κάνουμε χρήση του παρακάτω τύπου όπως και προηγουμένως χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για το κάθε υλικό. Τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος θα μεταβάλλονται με την θερμοκρασία όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο ενώ τα χαρακτηριστικά της πυροπροστασίας θα μένουν σταθερά λόγω απλοποίησης του προβλήματος.

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = 2a_c \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left(\frac{T_{n+1,k} + T_{n-1,k}}{2} - T_{n,k} \right)$$

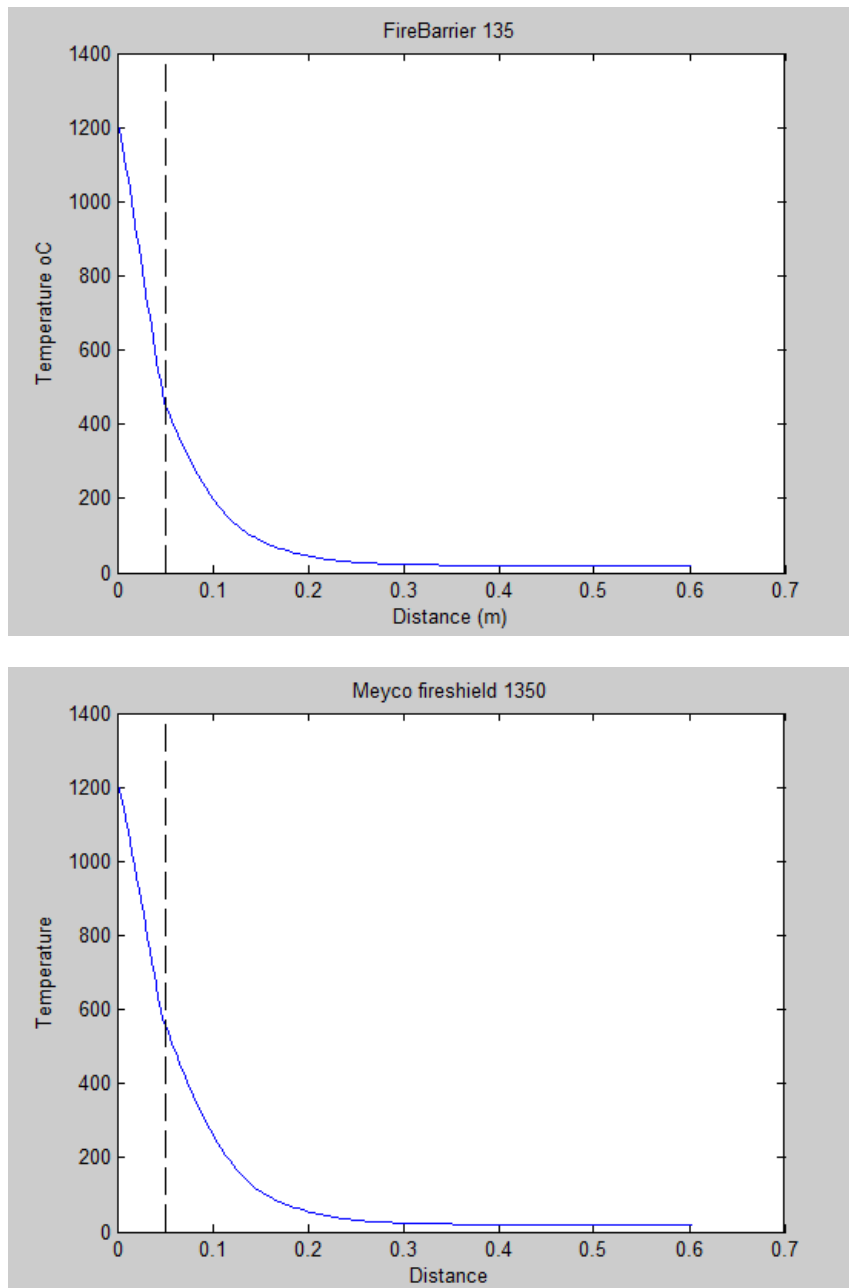
Για να γίνει όμως σωστά ο υπολογισμός των θερμοκρασιών θα πρέπει να διατηρούμε σταθερό χρονικό βήμα για όλη την διάρκεια της διαδικασίας και για τα δύο μέσα. Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει $\Delta t = \Delta t'$ και παίρνοντας τον τύπο $\Delta t = \frac{(\Delta x)^2}{2a}$ θα έχουμε $\frac{(\Delta x)^2}{2a_c} = \frac{(\Delta x')^2}{2a'}$. Διαλέγοντας ένα πάχος ζώνης για το σκυρόδεμα προκύπτει το πάχος ζώνης της πυροπροστασίας ως $\Delta x' = \Delta x \sqrt{\frac{a'}{a_c}}$

Εδώ θα μελετήσουμε δύο υλικά πυροπροστασίας το FireBarrier 135 και το Meyco fireshield 1350. Τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Data Sheet of Sikacrete 213F, [4], [10]).

Υλικά	Θερμική αγωγιμότητα ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) στους 300 K	Ειδική Θερμότητα ($J/kg \cdot K$) στους 300 K	Πυκνότητα (kg/m^3)
FireBarrier 135	0.185	765	1150
Meyco fireshield 1350	0.41	830	1200 - 1800

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των υλικών πυροπροστασίας

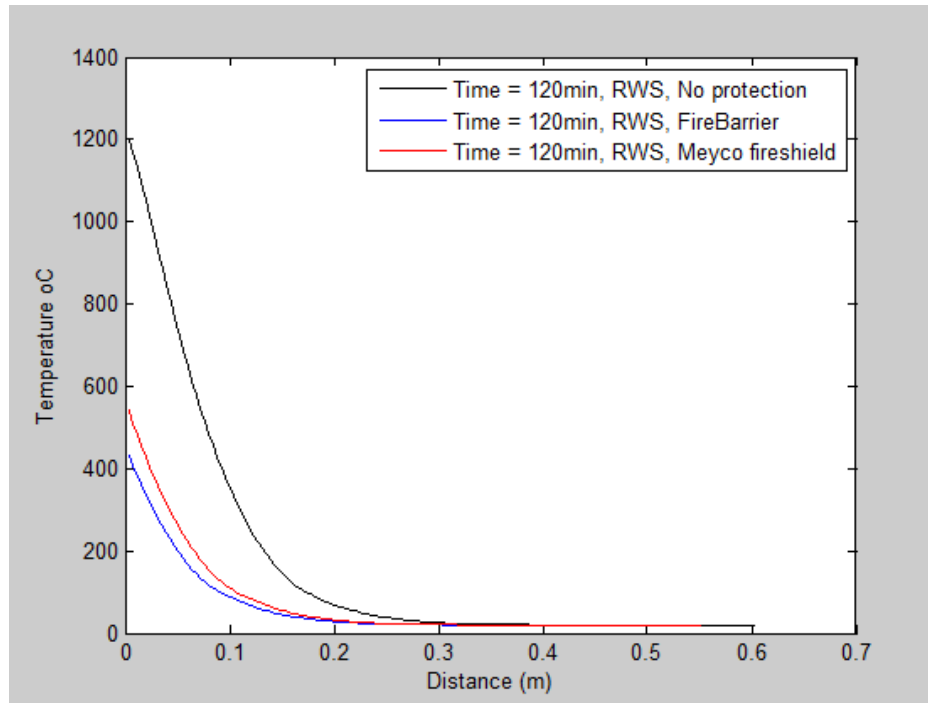
Με βάση τα παραπάνω θα δούμε πως αναπτύσσεται η θερμοκρασία σε μια διατομή σκυροδέματος 55 εκατοστά με πυροπροστασία 5 εκατοστών. Θα θεωρήσουμε ως θερμοκρασιακή καμπύλη την RWS για χρόνο έκθεσης 2 ώρες.



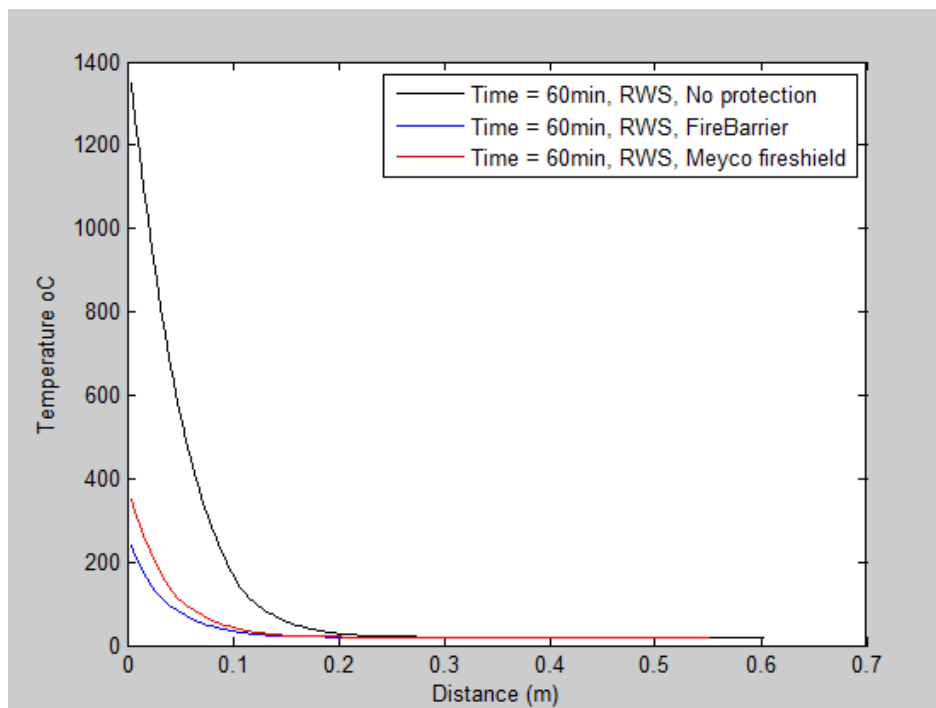
Σχήμα 3-11: Ανάπτυξη θερμοκρασίας για σκυρόδεμα με πυροπροστασία 5 εκατοστά για χρόνο έκθεσης 2 ωρών

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας στα πρώτα 5 εκατοστά που έχουμε την πυροπροστασία και παραβολική μεταβολή εντός του σκυροδέματος. Επίσης παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι 400 oC περίπου για το FireBarrier και 600 oC για το Meyco fireshield, θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από εκείνες που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα χωρίς πυροπροστασία.

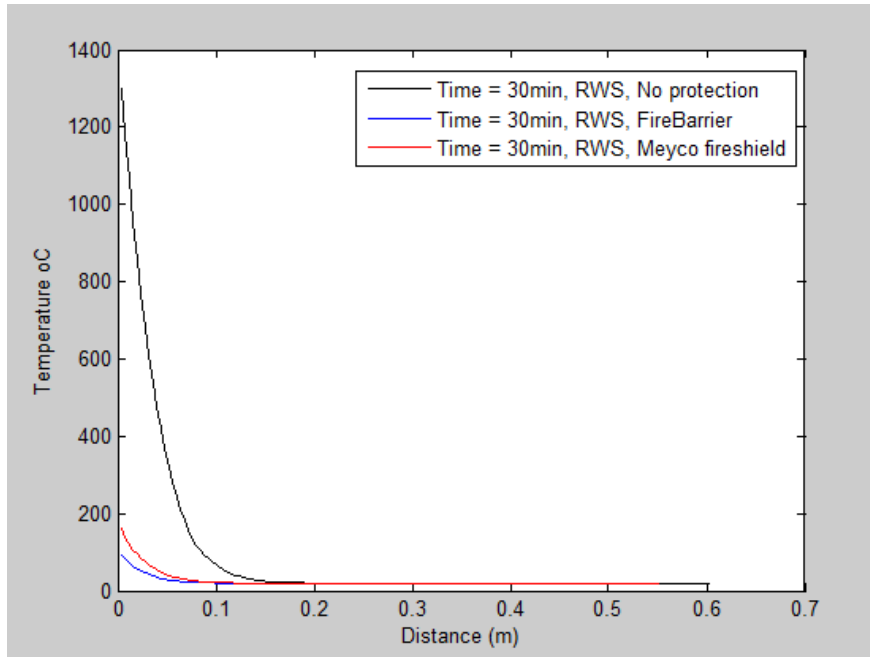
Μεγαλύτερη σημασία έχουν οι θερμοκρασίες εντός του σκυροδέματος και η σχέση που έχουν με αυτές που παρατηρούμε χωρίς την πυροπροστασία. Στα επόμενα διαγράμματα θα δούμε και θα συγκρίνουμε τις θερμοκρασίες του σκυροδέματος με πυροπροστασία τα δύο υλικά που αναφέραμε παραπάνω και χωρίς αυτά.



Σχήμα 3-12: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 2 ώρες



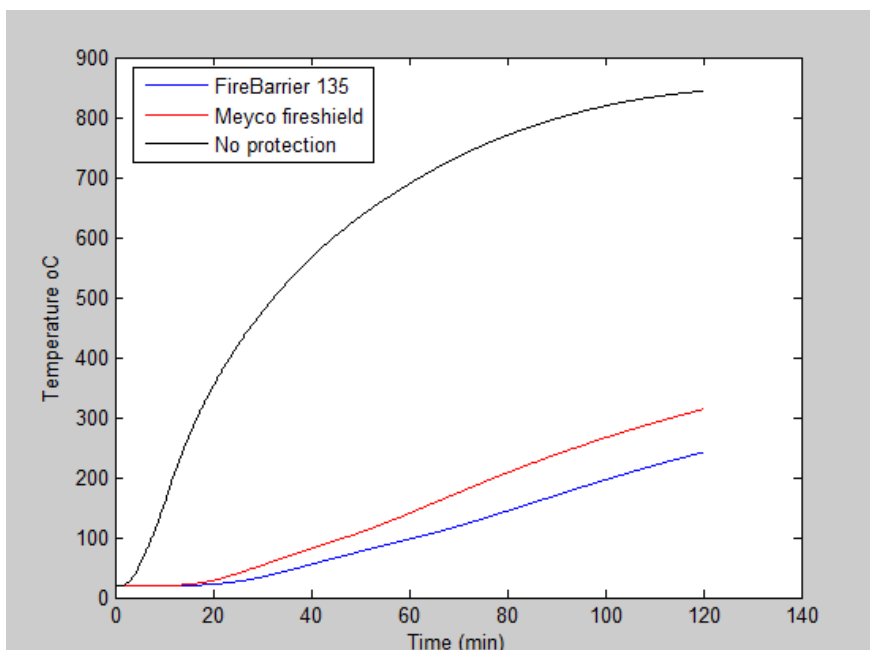
Σχήμα 3-13: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 1 ώρα



Σχήμα 3-14: Σύγκριση θερμοκρασιών για σκυρόδεμα με και χωρίς πυροπροστασία σε χρόνο έκθεσης 30 λεπτά

Όπως είδαμε και νωρίτερα η θερμοκρασία στο σκυρόδεμα χωρίς πυροπροστασία ξεπερνάει τους 1200 °C από τα πρώτα λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά. Με την πυροπροστασία η θερμοκρασία στο σκυρόδεμα έχει μειωθεί και είναι μικρότερη από 200 °C στα 30 πρώτα λεπτά, κάτω από 400 °C στη 1 ώρα και κάτω από 600 °C για τις δύο ώρες με πυροπροστασία 5 εκατοστών.

Τέλος ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμοκρασία που επικρατεί στον χάλυβα καθώς από αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η αντοχή της διατομής μας. Η επικάλυψη του χάλυβα είναι 4 εκατοστά



Σχήμα 3-15: Θερμοκρασία που επικρατεί στον εφελκυσμένο χάλυβα κατά την διάρκεια ανάπτυξης της φωτιάς

Βλέπουμε πάλι πως η θερμοκρασία στον χάλυβα φτάνει μέχρι και στους 850 °C χωρίς την πυροπροστασία και μέχρι τους 300 °C περίπου με αυτή.

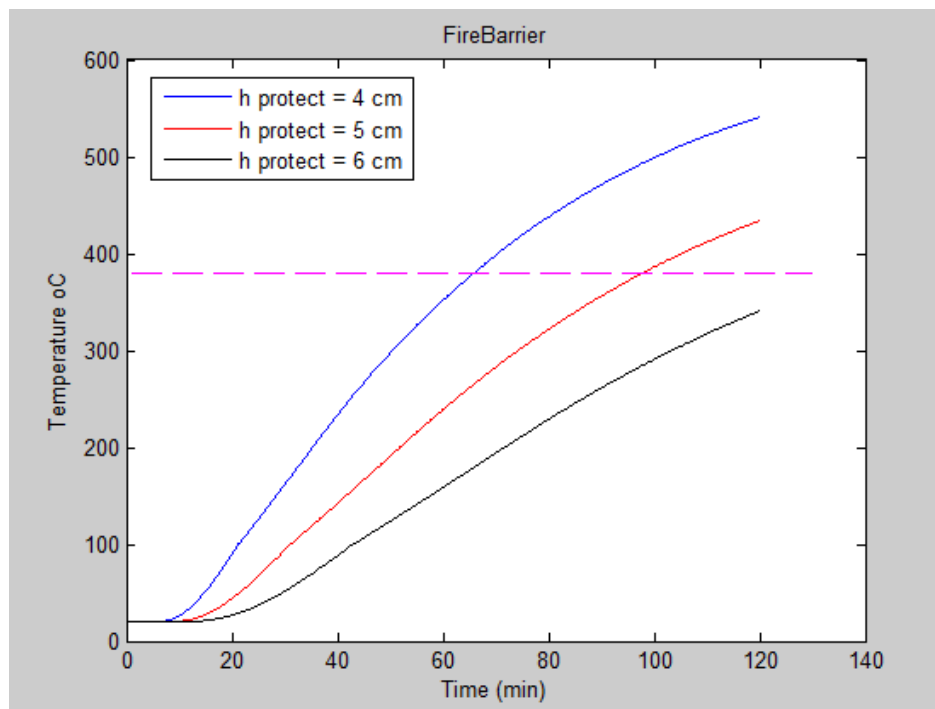
3.3.3 Απαιτήσεις παθητικής πυροπροστασίας

Για να θεωρήσουμε πως ένα υλικό πυροπροστασίας προστατεύει επαρκώς το σκυρόδεμα από την θερμοκρασία πρέπει να καλύπτει κάποιες απαιτήσεις:

- Το σκυρόδεμα να μην ξεπερνάει τους 380 °C
- Ο χάλυβας οπλισμού να μην ξεπερνάει τους 250 °C
- Να μην υπάρχει αποφλοίωση του σκυροδέματος κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς.

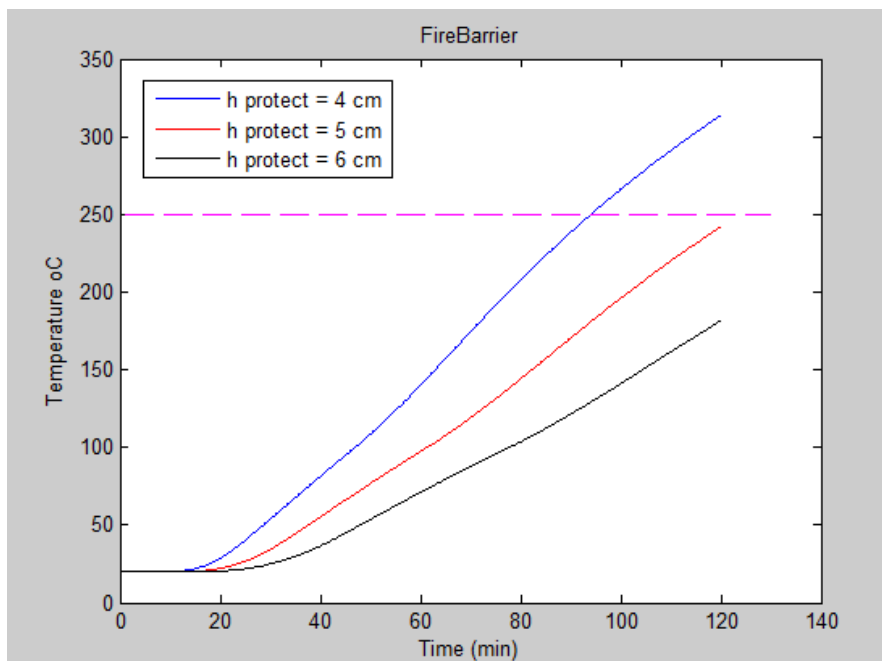
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε για ποια υλικά και ποια πάχη πυροπροστασίας ισχύουν τα παραπάνω.

Για την θερμοκρασία του σκυροδέματος αρκεί να εξετάσουμε την θερμοκρασία της επιφάνειας του η οποία δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τους 380 °C. Αν θεωρήσουμε μια διατομή σκυροδέματος 55 cm με επικάλυψη οπλισμού 4cm θα ισχύουν τα παρακάτω. Εξετάζοντας τη θερμοκρασία για διάφορα πάχη πυροπροστασίας μπορούμε να καταλήξουμε στο κατάλληλο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας. Για τις δύο ώρες έκθεσης στη θερμοκρασιακή καμπύλη RWS με πυροπροστασία FireBarrier φαίνεται ότι κατάλληλο πάχος είναι τα 6 εκατοστά τουλάχιστον καθώς δεν ξεπερνάνε τους 380 οC.



Σχήμα 3-16: Θερμοκρασία επιφάνειας σκυροδέματος για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό FireBarrier 135

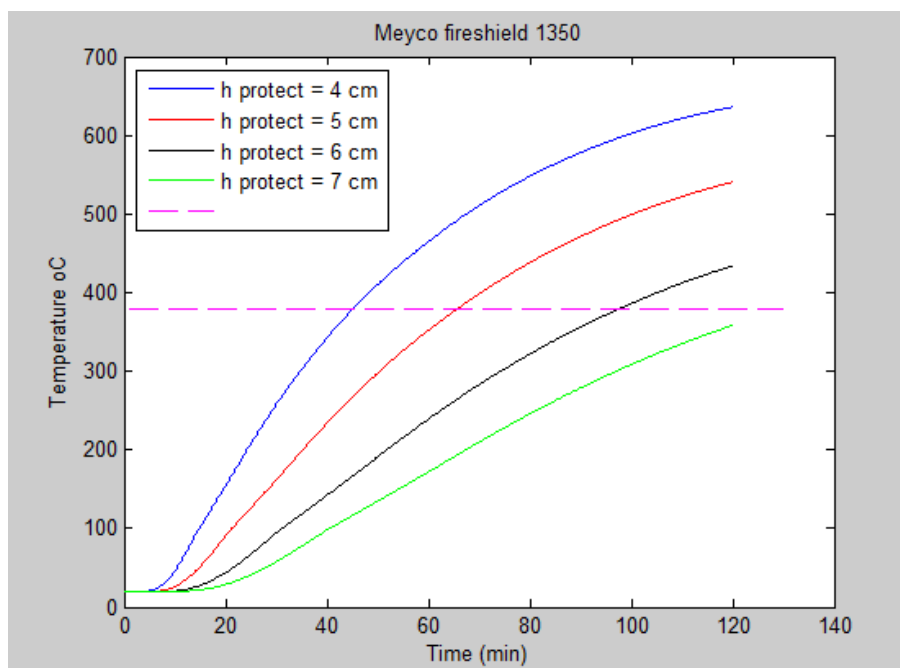
Την ίδια διαδικασία θα ακολουθήσουμε για τη θερμοκρασία του χάλυβα



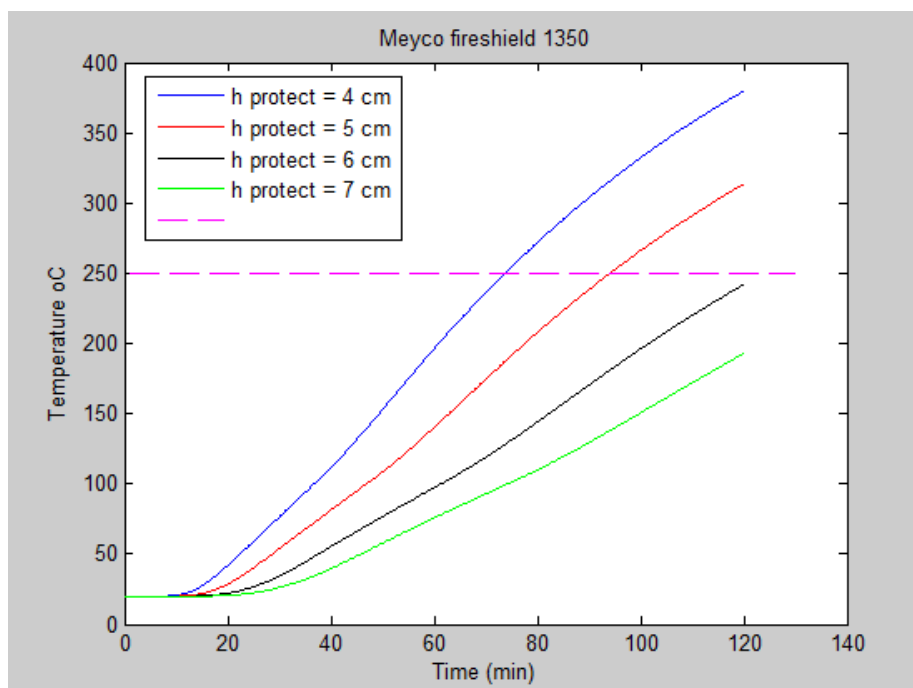
Σχήμα 3-17: Θερμοκρασία του εφελκόμενου χάλυβα για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό FireBarrier 135

Παραπάνω βλέπουμε πως πυροπροστασία 5 και 6 εκατοστών είναι αρκετή για να προφυλάξουν τον χάλυβα σε συνδυασμό όμως με το προηγούμενο κριτήριο η πυροπροστασία θα πρέπει να είναι από 6 cm και πάνω.

Θα εξετάσουμε τώρα και το υλικό Meyco fireshield 1350 με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 3-18: Θερμοκρασία επιφάνειας σκυροδέματος για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό Meyco fireshield 1350



Σχήμα 3-19: Θερμοκρασία εφελκούμενου χάλυβα για διάφορα πάχη πυροπροστασίας για το υλικό Meyco fireshield 1350

Για το Meyco fireshield παρατηρούμε πως για να ικανοποιούνται και οι δύο απαιτήσεις σχετικά με την θερμοκρασία το πάχος της πυροπροστασίας θα πρέπει να είναι 7 εκατοστά ή μεγαλύτερο.

Τα παραπάνω πάχη είναι απλώς ενδεικτικά και δεν αποτελούν συστάσεις σχεδιασμού με χρήση αυτών των υλικών πυροπροστασίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες των υλικών πυροπροστασίας που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία [4] και με βάση ορισμένα τεχνικά φυλλάδια. Οι θερμικές ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 3 θεωρήθηκαν σταθερές και αμετάβλητες με τη θερμοκρασία. Αυτή η παραδοχή γίνεται κατ' ανάγκη καθώς δεν είναι γνωστή η μεταβολή των ιδιοτήτων των εμπορικά διαθέσιμων υλικών πυροπροστασίας με τη θερμοκρασία. Εάν αυτά λαμβάνονταν υπόψη, ενδέχεται η ανάλυση να οδηγούσε σε μικρότερα απαιτούμενα πάχη για την προστασία της διατομής.

3.3.4 Αποφλοίωση

Εξετάσαμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα με πυροπροστασία και χωρίς αυτή. Σε αυτή την παράγραφο θα εξετάσουμε την περίπτωση της αποφλοίωσης του σκυροδέματος.

Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν στην εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος είναι:

Ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας επηρεάζει άμεσα την πιθανότητα εμφάνισης της εκρηκτικής αποφλοίωσης που αυξάνεται μαζί με την αύξηση του ρυθμού μεταβολής της θερμότητας.

Η επιφάνεια έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες τόσο πιο πιθανό είναι να εμφανιστεί εκρηκτική αποφλοίωση.

Το μέγεθος της διατομής. Πολύ λεπτές διατομές δεν εμφανίζουν συχνά εκρηκτική αποφλοίωση.

Η περιεκτικότητα σε υγρασία. Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως σε σκυρόδεμα με 2% κατά βάρος υγρασία και πάνω.

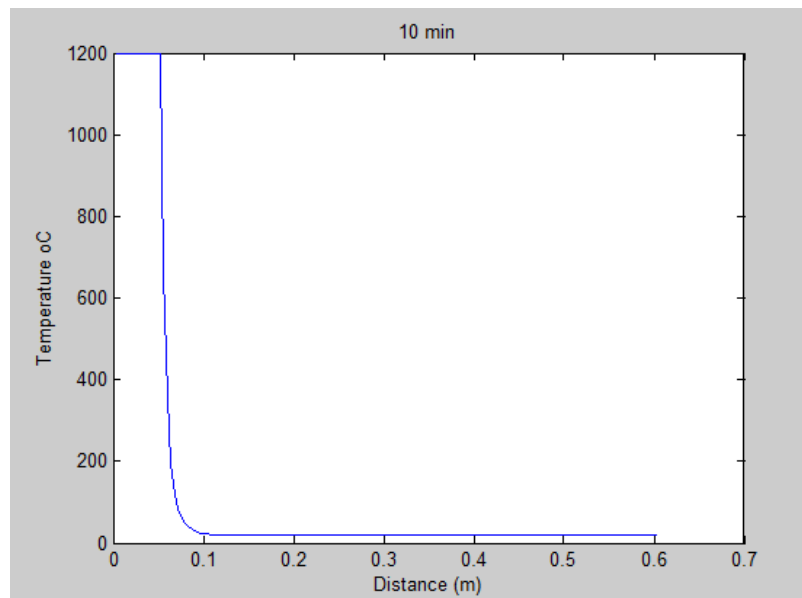
Η διαπερατότητα επηρεάζει σημαντικά την εξάτμιση του νερού και τον ρυθμό με τον οποίο απελευθερώνεται το εξατμισμένο νερό.

Ο τύπος και το μέγεθος των αδρανών. Από πειραματικά δεδομένα έχει φανεί ότι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται επηρεάζουν την εμφάνιση της εκρηκτικής αποφλοίωσης. Αδρανή με χαμηλή θερμική μήκυνση μειώνουν τις πιθανότητες εμφάνισης του φαινομένου.

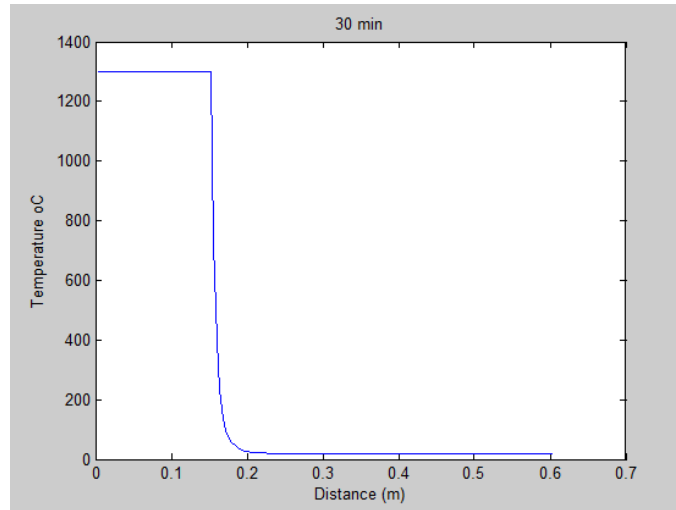
Ο σπλισμός και η επικάλυψη του. Συνήθως ο αποφλοίωση λαμβάνει χώρα μέχρι το άοπλο κομμάτι του σκυροδέματος.

Η εκρηκτική αποφλοίωση μπορεί να οφείλεται σε δύο παράγοντες ή σε συνδυασμό τους. Στη πίεση των πόρων που οφείλεται στην αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του σκυροδέματος λόγω εξάτμισης του νερού, στα θερμικά φορτία που δημιουργούνται λόγω της θερμικής μήκυνσης του σκυροδέματος. Το θερμό μέρος του σκυροδέματος δέχεται παραμορφώσεις λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας όμως το εσωτερικό μέρος της διατομής που είναι ακόμα ψυχρό δεν παραμορφώνεται οδηγώντας στην εμφάνιση θλιπτικών τάσεων.

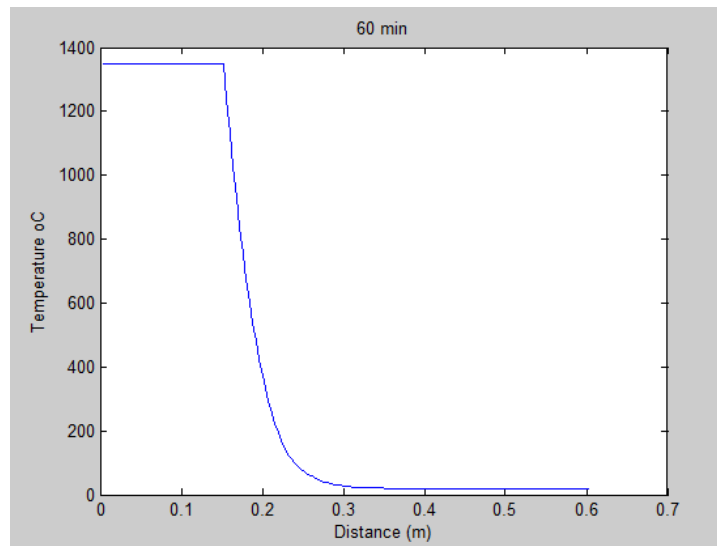
Θα θεωρήσουμε το εξής παράδειγμα, μια διατομή εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες με βάση την καμπύλη RWS στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης και έχουμε μείωση της διατομής κατά 5 χιλιοστά ανά λεπτό για την πρώτη μισή ώρα. Για την υπόλοιπη διάρκεια της πυρκαγιάς θεωρούμε πως η διατομή δεν μειώνεται παραπέρα. Με βάση αυτό το παράδειγμα θα υπολογίσουμε την θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό της διατομής για χρόνο 10, 30, 60 και 120 λεπτών.



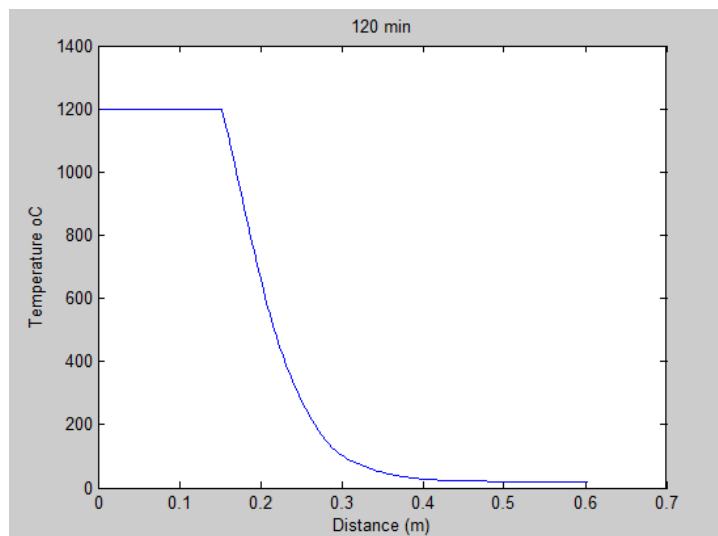
Σχήμα 3-20: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοίωση 5mm/min σε χρόνο 10 min



Σχήμα 3-21: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοίωση 5mm/min σε χρόνο 30 min



Σχήμα 3-22: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοίωση 5mm/min σε χρόνο 60 min



Σχήμα 3-23: Θερμοκρασία σκυροδέματος με αποφλοίωση 5mm/min σε χρόνο 120 min

Στα 10 και 30 λεπτά παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στο σκυρόδεμα πέφτει ακαριαία. Αυτό οφείλεται στο ότι το εσωτερικό του σκυροδέματος βρίσκεται ακόμα αρκετά κοντά στους 20 οC. Καθώς περνάει ο χρόνος η θερμότητα μεταδίδεται και το εσωτερικό της διατομής θερμαίνεται και η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται.

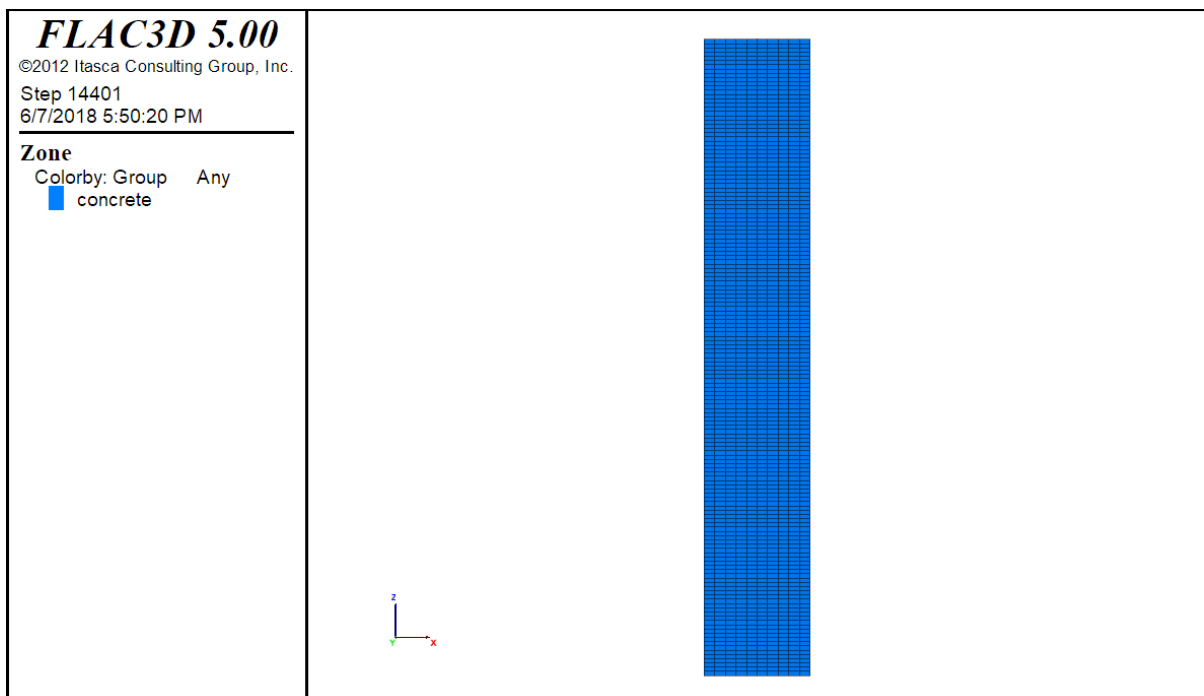
3.4 Σύγκριση με αριθμητική προσομοίωση

Για την σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC 3D.

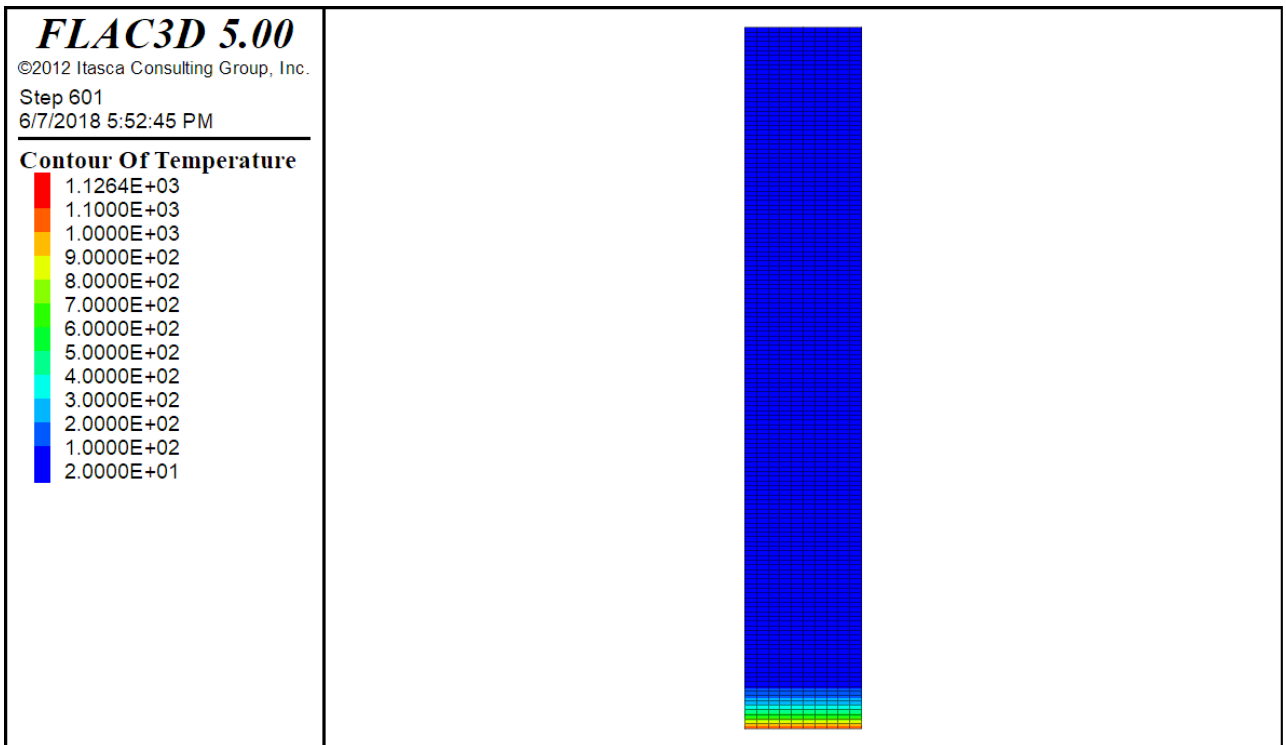
Θεωρήσαμε μια διατομή σκυροδέματος με σταθερές ιδιότητες καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία και λήφθηκαν οι εξής τιμές: πυκνότητα = 2300 kg/m^3 , θερμική αγωγιμότητα = 1.951408, συντελεστής θερμικής μήκυνσης = $6 \cdot 10^{-6}$, ειδική θερμότητα = 900. Το πάχος της διατομής ορίστηκε ως 60 cm.

Χωρίσαμε τη διατομή μας σε κάρναβο πεπερασμένων διαφορών με 10 ζώνες κατά την διεύθυνση x, 1 ζώνη κατά την διεύθυνση y, και 150 ζώνες κατά την διεύθυνση z. Προέκυψαν έτσι 150 ζώνες κατά μήκος της διατομής με 4 mm πάχος η κάθεμια.

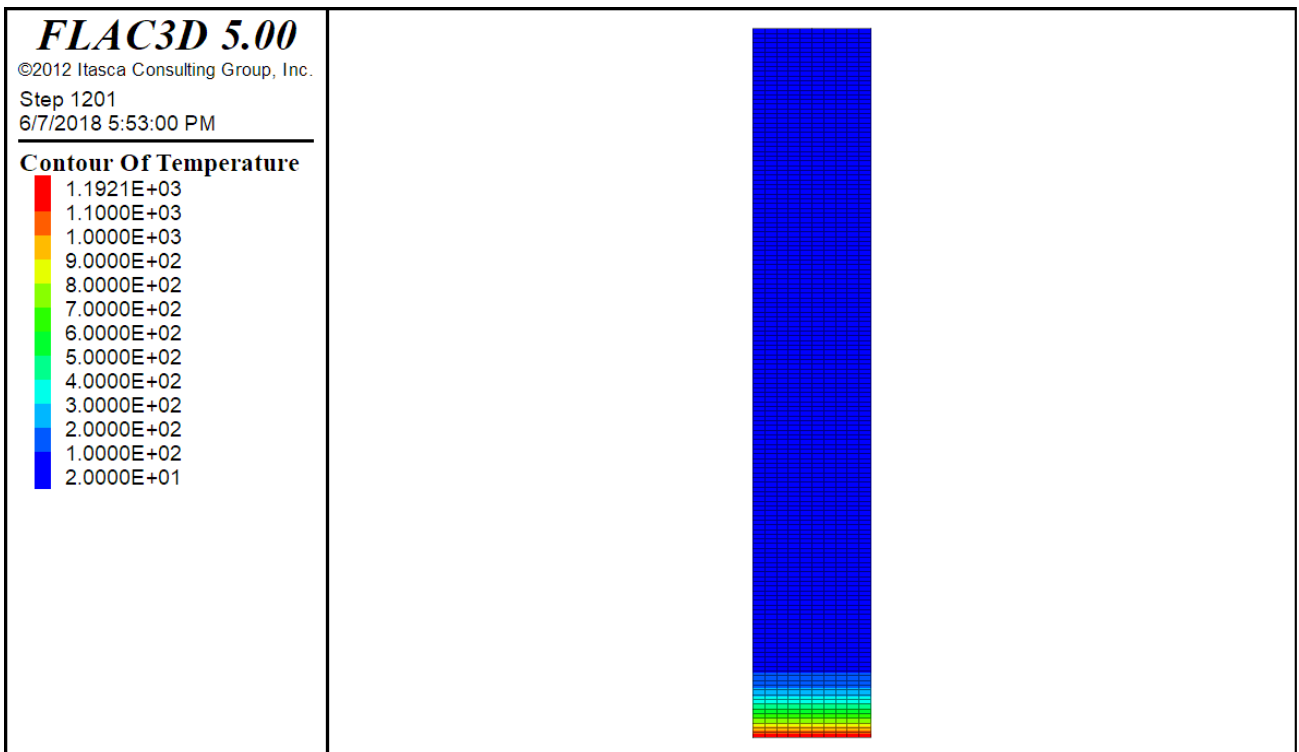
Για την ακραία μη εκτιθέμενη επιφάνεια του μοντέλου θεωρήσαμε αδιαβατικές συνθήκες και η θερμοκρασία σε αυτή την ζώνη μένει σταθερή στους 20 οC χωρίς να επηρεάζεται από την θερμοκρασία των γειτονικών ζωνών.



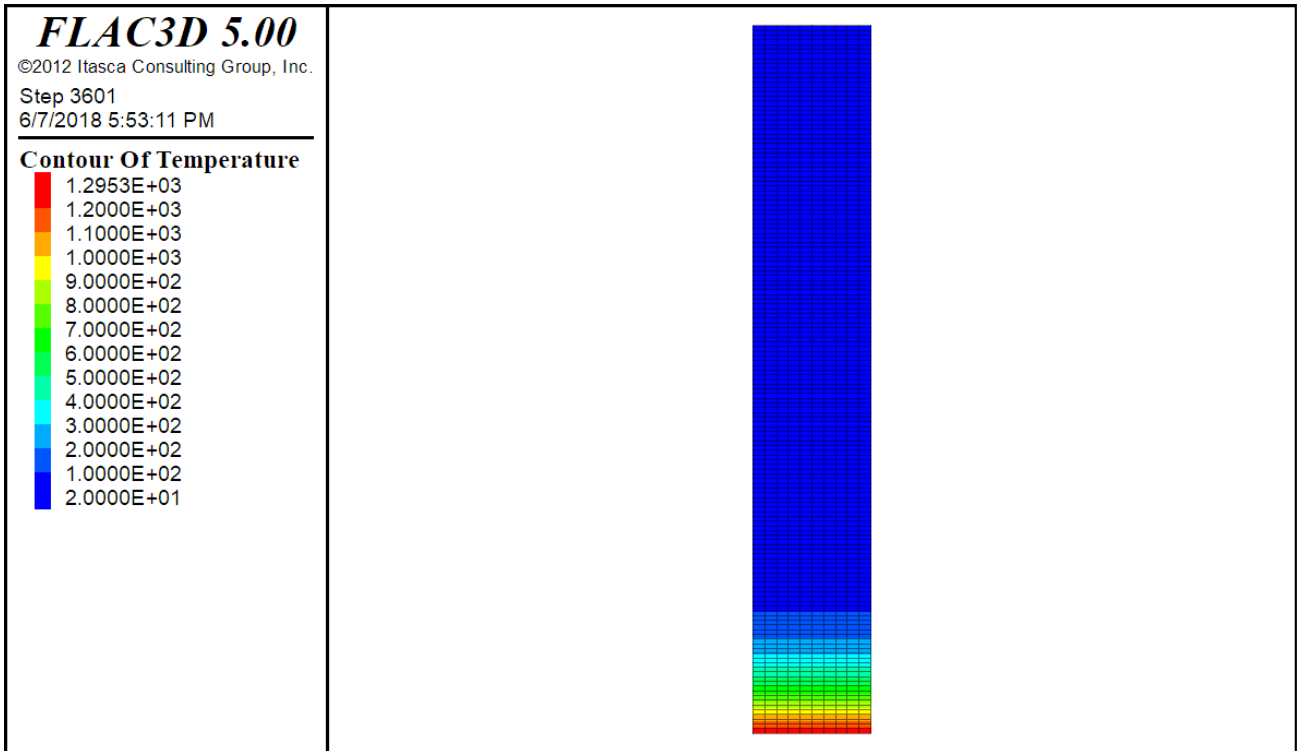
Σχήμα 3-24: Κάρναβος πεπερασμένων διαφορών



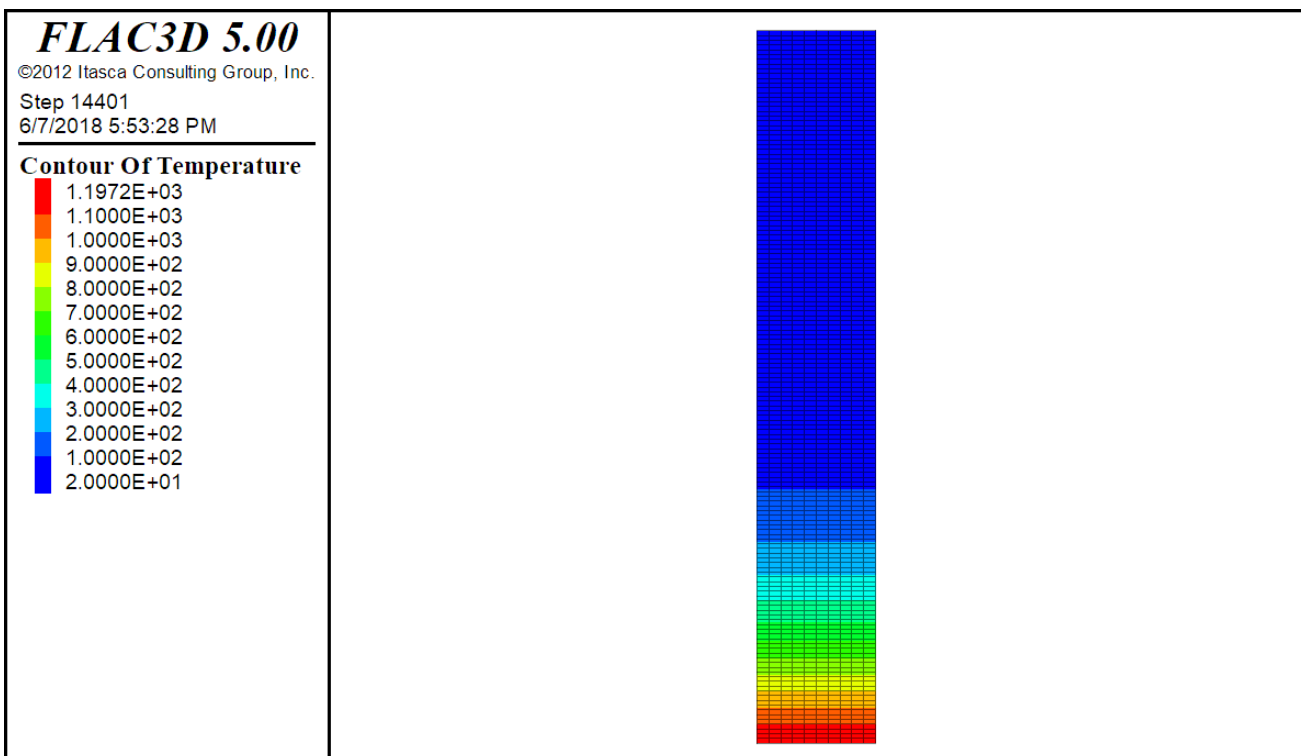
Σχήμα 3-25: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 5 \text{ min}$



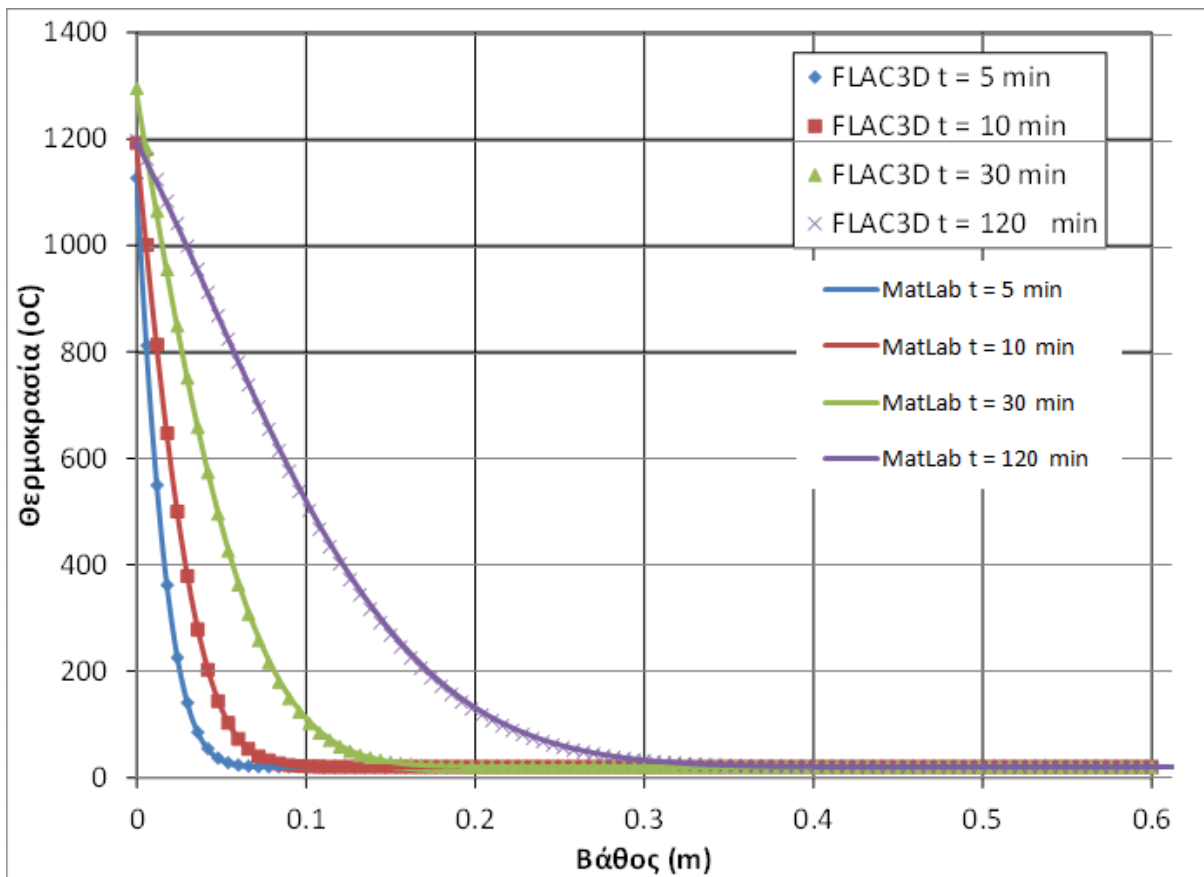
Σχήμα 3-26: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 10 \text{ min}$



Σχήμα 3-27: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 30 \text{ min}$



Σχήμα 3-28: Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο $t = 120 \text{ min}$



Σχήμα 3-29: Σύγκριση αποτελεσμάτων FLAC 3D και αλγορίθμου για χρόνο $t = 5, 10, 30$ και 120 min

4. Υπολογισμός διατομών μελών υπό κάμψη

4.1 Μέθοδος ζωνών

Σε αυτή την μέθοδο υποδιαιρούμε την διατομή σε έναν αριθμό παράλληλων ζωνών ($n \geq 3$) ίσου πάχους. Στο μέσο της κάθε μίας υπολογίζουμε την μέση θερμοκρασία, την μέση θλιπτική αντοχή f_{cd} και το μέτρο ελαστικότητας. Από αυτά τα χαρακτηριστικά βρίσκουμε την ζώνη az που έχει υποστεί βλάβη, την αγνοούμε και θεωρούμε πως δεν συνεισφέρει στην φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος.

Για να υπολογίσουμε την ζώνη βλάβης πρώτα θεωρούμε σημείο M στο μέσο της διατομής και χωρίζουμε το πλάτος (w) του σκυροδέματος σε παράλληλες ζώνες ίσου πάχους. Αν έχουμε έκθεση και από τις δύο πλευρές της διατομής τότε χωρίζουμε το μισό πλάτος του σκυροδέματος. Μετά βρίσκουμε τον συντελεστή μείωσης k_c της κάθε ζώνης με βάση την θερμοκρασία τους και την βοήθεια του Πίνακα 1 και 2 για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον μέσο συντελεστή μείωσης για το σκυρόδεμα από τον τύπο

$$k_{cm} = (1 - 0,2n)/n \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i)$$

n είναι το πλήθος των παράλληλων ζωνών στο πλάτος w

Ως w θεωρούμε:

Το πάχος μιας πλάκας

Το πάχος τοιχώματος ή υποστυλώματος εκτεθειμένο από την μία πλευρά

Το μισό πάχος κορμού μιας δοκού

Το μισό πάχος τοιχώματος ή υποστυλώματος εκτεθειμένο από 2 πλευρές

Το μισό της μικρότερης διάστασης υποστυλώματος εκτεθειμένου από 4 πλευρές.

Αφού υπολογίσουμε τα παραπάνω μπορούμε να βρούμε την ζώνη az του σκυροδέματος που υπέστη την βλάβη με βάση τον τύπο

$$az = w \left[1 - \frac{k_{cm}}{k_c(\theta_M)} \right]$$

όπου:

k_{cm} είναι ο μέσος συντελεστής μείωσης του σκυροδέματος

$k_c(\theta_M)$ είναι ο συντελεστής μείωσης στο σημείο M

Αφού βρούμε την μειωμένη διατομή και καθορίσουμε την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας στην κατάσταση πυρκαγιάς, μετά γίνεται ο σχεδιασμός ακολουθώντας διαδικασία κανονικής θερμοκρασίας

4.2 Μέθοδος της Ισόθερμης

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για πρότυπη έκθεση σε πυρκαγιά. Με βάση την αντοχή του μέλους στην πυρκαγιά και την πυκνότητα φορτίου της πυρκαγιάς προκύπτει το ελάχιστο πλάτος της διατομής για το οποίο ισχύει αυτή η μέθοδος με βάση τον Ευρωκώδικα (EN 1992 – 1 – 2).

Η Μέθοδος προβλέπει μείωση της διατομής του σκυροδέματος με βάση την θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί στο εσωτερικό του. Το πάχος του σκυροδέματος που έχει υποστεί βλάβη θεωρείται ίσο με το βάθος της ισόθερμης καμπύλης των 500°C στην θλιβόμενη ζώνη της διατομής. Το μέρος του σκυροδέματος που έχει ξεπεράσει τους 500 °C και έχει υποστεί βλάβη υποτίθεται πως δεν συνεισφέρει στην φέρουσα ικανότητα του μέλους ενώ το μέρος του σκυροδέματος που βρίσκεται κάτω από αυτή την θερμοκρασία διατηρεί τις αρχικές τιμές της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του.

Αφού λοιπόν προσδιορίσουμε την ισόθερμη των 500 °C για το χρονικό διάστημα που θέλουμε σε έκθεση σε πυρκαγιά, μειώνουμε την διατομή μας και βρίσκουμε το νέο πλάτος (bfi) της και το νέο ενεργό ύψος (dfi). Το νέο σχήμα της διατομής μπορεί να προσεγγιστεί με αυτό ενός ορθογωνίου.

Στη συνέχεια καθορίζουμε την θερμοκρασία των ράβδων οπλισμού στη ζώνη του εφελκυσμού και της θλίψης. Οι ράβδοι οπλισμού στην εφελκυσμένη περιοχή μπορεί να βρίσκονται εκτός της μειωμένης διατομής αν έχουμε έκθεση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Παρόλα αυτά μπορούν να περιλαμβάνονται στον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας της εκτεθειμένης σε πυρκαγιά διατομής. Αφού βρούμε την θερμοκρασία στο μέσο των ράβδων οπλισμού υπολογίζουμε και την μειωμένη αντοχή τους με βάση μειωτικό συντελεστεί που υποδεικνύεται στον Ευρωκώδικα(EN 1992 – 1- 2).

Εφόσον έχουμε βρει τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής που αναφέρονται παραπάνω υπολογίζουμε την οριακή φέρουσα ικανότητα στις συνθήκες πυρκαγιάς και την συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα της φόρτισης σχεδιασμού.

4.3 Υπολογισμός Φέρουσας Ικανότητας

Σε μία δοκό άοπλου σκυροδέματος οι ροπές γύρω από τον ουδέτερο άξονα εξισορροπούνται από ζεύγος θλιπτικών – εφελκυστικών τάσεων και καθώς η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος είναι κατά πολύ μικρότερη από την θλιπτική έχουμε

ρωγμάτωση της δοκού. Έτσι στο σκυρόδεμα τοποθετούνται χαλύβδινοι ράβδοι που να μπορούν να λάβουν τις δυνάμεις που απαιτούνται για την εξισορρόπηση των ροπών[6].

Για τον σχεδιασμό διατομής στην ακραία οριακή κατάσταση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα(EN 1992 – 1- 1) χρησιμοποιείται το ορθογωνικό διάγραμμα κατανομής των τάσεων που προβλέπει ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο θλιβόμενο μέρος της διατομής.

4.3.1 Απλός Οπλισμός

Κατά την κάμψη, το σκυρόδεμα δέχεται μία συνισταμένη θλιπτική δύναμη F_{cc} και μια συνισταμένη εφελκυστική δύναμη στον χάλυβα F_{st} . Θεωρώντας διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα και εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται ως:

$$F_{cc} = f_{cd} * b * \lambda * x$$

$$F_{st} = f_{yd}(\theta) * A_s$$

Όπου f_{cd} : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [MPa]

b : το πλάτος της διατομής [m]

λ : 0.8

x : το ύψος του θλιβόμενου μέρους της διατομής [m]

$f_{yd}(\theta)$: η εφελκυστική αντοχή του χάλυβα σε θερμοκρασία θ [MPa]

A_s : το εμβαδό του εφελκυσμένου οπλισμού [m²]

Από την ισορροπία των δυνάμεων έχουμε $F_{cc} = F_{st}$ από όπου προκύπτει

$$x = f_{yd}(\theta) * A_s / (f_{cd} * b * \lambda)$$

Βρίσκοντας λοιπόν το ύψος της θλιβόμενης περιοχής μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή αντοχής της διατομής ως:

$$M = F_{cc} * z \text{ ή } M = F_{st} * z$$

$$z = d - 1/2 * \lambda * x$$

z : είναι ο μοχλοβραχίονας των δύο δυνάμεων και d το στατικό ύψος της διατομής.

4.3.2 Διπλός Οπλισμός

Στην περίπτωση διπλού οπλισμού ένα μέρος της δύναμης που δέχεται ο εφελκυσμένος οπλισμός εξισορροπείται από την δύναμη που δέχεται το σκυρόδεμα και το υπόλοιπο από την δύναμη που δέχεται ο θλιβόμενος οπλισμός [6].

Επομένως αν F_{cc} η δύναμη που δέχεται το θλιβόμενο μέρος της διατομής, F_{sc} η δύναμη που δέχεται ο θλιβόμενος οπλισμός και F_{st} η δύναμη που δέχεται ο εφελκυσμένος οπλισμός, τότε θεωρώντας διαρροή του εφελκυσμένου και θλιβόμενου χάλυβα και εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος:

$$F_{sc} = f_{yd}(\theta) \cdot A_{sc}$$

$$F_{st} = f_{yd}(\theta) \cdot A_{st}$$

$$F_{cc} = f_{cd} \cdot b \cdot \lambda \cdot x$$

Και από την ισορροπία των δυνάμεων έχουμε $F_{cc} + F_{sc} = F_{st}$ και προκύπτει

$$x = \frac{f_{yd}(\theta) \cdot A_{st} - f_{yd}(\theta) \cdot A_{sc}}{f_{cd} \cdot b \cdot \lambda}$$

Από το ύψος της θλιβόμενης περιοχής υπολογίζουμε την ροπή αντοχής και την αντίστοιχη αξονική δύναμη.

$$M = F_{cc} \cdot z + F_{sc} \cdot z'$$

$z = d - \lambda x / 2$ μοχλοβραχίονας μεταξύ εφελκόμενου οπλισμού και σκυροδέματος

$z' = d - d'$ μοχλοβραχίονας μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού.

4.4 Υπολογισμός ροπών και αξονικών σε συνθήκες πυρκαγιάς

Παρακάτω θα περιγράψουμε μία μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ροπών και των αξονικών δυνάμεων που δέχεται το σκυρόδεμα κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Για την χρήση της μεθόδου αυτής πρώτα κάναμε κάποιες παραδοχές [8]

- i) Η διατομή δέχεται μέση τάση και παραμόρφωση
- ii) Έχουμε γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της διατομής
- iii) Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα έχουν τέλεια συνοχή
- iv) Η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται και δεν λαμβάνουμε υπόψη την φάση πτώσης της θερμοκρασίας.
- v) Η θερμική μήκυνση και ο ερπυσμός εκτιμούνται από την αξονική δύναμη και τροπή.

Σε αυτή την μέθοδο χωρίζουμε το σκυρόδεμα σε έναν αριθμό ζωνών που η κάθε μία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά. Έτσι η διατομή αντικαθίσταται από μία ισοδύναμη που αποτελείται από πολλές μετασηματισμένες ζώνες. Αυτό γίνεται πολλαπλασιάζοντας το εμβαδό της κάθε ζώνης με τον λόγο $E_i'(\theta, \epsilon_s) / E_c(20^\circ\text{C})$, όπου $E_i'(\theta, \epsilon_s)$ είναι το μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία θ και $E_c(20^\circ\text{C})$ είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος στους 20 οC. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που υπολογίζουμε για την κάθε ζώνη είναι το εμβαδόν $A_{c,eff}$, την πρώτη $S_{c,eff}$ και την δεύτερη ροπή αδρανείας $I_{c,eff}$.

$$A_{c,eff} = \sum_{i=1}^n b_i t_i E_i$$

$$S_{c,eff} = \sum_{i=1}^n b_i t_i y_i E_i$$

$$I_{c,eff} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i t_i^3}{12} + b_i t_i y_i^2 \right) E_i$$

$$E_i = E_i'(\theta, \varepsilon\sigma) / E_c(20^\circ\text{C})$$

Όπου n : ο συνολικός αριθμός των ζωνών

b_i : το πλάτος της κάθε ζώνης

t_i : το πάχος της κάθε ζώνης

y_i : η απόσταση της κάθε ζώνης από την πάνω ακραία ίνα

Το σκυρόδεμα και ο χάλυβας όπως είδαμε παραμορφώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η συνολική παραμόρφωση στη διατομή μπορεί να εκφραστεί ως

$$\varepsilon_{\text{tot}}(\theta, \sigma) = \varepsilon_{\sigma}(\theta, \sigma) + \varepsilon_{\text{th}}(\theta, \theta_0) + \varepsilon_{\text{ttc}}(\theta, \sigma)$$

$\varepsilon_{\sigma}(\theta, \sigma)$: η θλιπτική παραμόρφωση της διατομή σε θερμοκρασία θ για τάση σ

$\varepsilon_{\text{th}}(\theta, \theta_0)$: η θερμική παραμόρφωση της διατομής για θερμοκρασία θ σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία θ_0 .

$\varepsilon_{\text{ttc}}(\theta, \sigma)$: ο ερπυσμός που εμφανίζει η διατομή για θερμοκρασία θ και για τάση σ

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως η θερμοκρασία κατά μήκος της διατομής δεν κατανέμεται γραμμικά και ότι τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης είναι διαφορετικά. Η κάθε ζώνη δεν παραμορφώνεται ελεύθερα αλλά εμποδίζεται από τις γειτονικές της με συνέπεια να εμφανίζονται τάσεις στη διατομή λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης.

Για να δούμε πως η θερμική παραμόρφωση και ο ερπυσμός επηρεάζουν την διατομή θα πρέπει να υπολογίσουμε ισοδύναμη δύναμη και τροπή που εμφανίζεται λόγω των αντίστοιχων παραμορφώσεων.

$$N_{\text{th}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{th},i}(\theta, \theta_0) E_i'(\theta, \varepsilon\sigma) b_i t_i$$

$$M_{\text{th}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{th},i}(\theta, \theta_0) E_i'(\theta, \varepsilon\sigma) b_i t_i y_i$$

$$N_{\text{ttc}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{ttc},i}(\theta, \theta_0) E_i'(\theta, \varepsilon\sigma) b_i t_i$$

$$M_{\text{ttc}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{ttc},i}(\theta, \theta_0) E_i'(\theta, \varepsilon\sigma) b_i t_i y_i$$

Αν λάβουμε υπόψη την δύναμη N_{ext} και τροπή M_{ext} που ασκούν τα εξωτερικά φορτία στη διατομή μας προκύπτει πως η συνολική αξονική δύναμη είναι

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{ext}} + N_{\text{th}} + N_{\text{ttc}}$$

Και η συνολική τροπή

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{ext}} + M_{\text{th}} + M_{\text{ttc}}$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η συνολική παραμόρφωση και η καμπυλότητα για την πρώτη ζώνη από τον τύπο

$$\varepsilon_{\text{tot},1}(\theta) = - \frac{I_{c,eff} N_{\text{tot}} + S_{c,eff} M_{\text{tot}}}{Ec(200C)(A_{c,eff} I_{c,eff} - S_{c,eff}^2)}$$

$$\kappa(\theta) = \frac{S_{c,eff} N_{\text{tot}} + A_{c,eff} M_{\text{tot}}}{Ec(200C)(A_{c,eff} I_{c,eff} - S_{c,eff}^2)}$$

και η παραμόρφωση για κάθε ζώνη είναι

$$\varepsilon_{\text{tot},i}(\theta) + \gamma_i \kappa(\theta)$$

Αφού λοιπόν υπολογίσουμε την συνολική παραμόρφωση στη συνέχεια μπορούμε για κάθε ζώνη να βρούμε την θλιπτική παραμόρφωση και τάση ως εξής

$$\varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) = \varepsilon_{\text{tot},i}(\theta, \sigma) - \varepsilon_{\text{th},i}(\theta, \theta_0) - \varepsilon_{\text{ttc},i}(\theta, \sigma)$$

$$\sigma_i(\theta) = \varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) * E_i(\theta, \varepsilon\sigma)$$

Για να επιτύχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια υλοποιούμε την μέθοδο κάνοντας συνεχείς επαναλήψεις. Συνοψίζοντας λοιπόν τα βήματα έχουμε:

- 1) Υπολογίζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά A_c , S_c , I_c
- 2) Υπολογίζουμε την δύναμη N_{th} και N_{ttc} , και την ροπή M_{th} και M_{ttc} . Στην πρώτη επανάληψη θεωρούμε πως η παραμόρφωση λόγω του ερπυσμού θα είναι μηδέν $\varepsilon_{ttc} = 0$ και επομένως N_{ttc} , $M_{ttc} = 0$.
- 3) Υπολογίζουμε την συνολική παραμόρφωση και την καμπυλότητα στην πρώτη ζώνη $\varepsilon_{\text{tot}1}$ και $\kappa(\theta)$.
- 4) Υπολογίζουμε την συνολική παραμόρφωση σε όλα τα επίπεδα $\varepsilon_{\text{tot},i}$
- 5) Υπολογίζουμε την παραμόρφωση λόγω των τάσεων από όπου προκύπτει και η τάση στο κάθε επίπεδο.
- 6) Από τα δύο παραπάνω μεγέθη βρίσκουμε το μέτρο ελαστικότητας για την κάθε ζώνη και ελέγχουμε αν ταιριάζει με το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίσαμε αρχικά. Αν η διαφορά μεταξύ των δύο μέτρων είναι αποδέκτη τότε σταματάμε αλλιώς συνεχίζουμε τις επαναλήψεις από το βήμα 2.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω και της αριθμητικής προσομοίωσης με τον κώδικα FLAC3D δεν προέκυψαν παρόμοια ή έστω κοντινά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση πριν από τη χρήση της παραπάνω μεθοδολογίας.

5. Υπολογισμός ροπής αντοχής

Σε προηγούμενα κεφάλαια αναλύσαμε το πώς υπολογίζουμε φέρουσα ικανότητα μιας διατομής σκυροδέματος. Θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αυτή για να βρούμε την ροπή στους 20 οC και για κάθε θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το σκυρόδεμα κατά την διάρκεια έκθεσης του σε πυρκαγιά.

5.1 Απλός Οπλισμός

Για μια διατομή σκυροδέματος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά για τους 20 οC έχουμε:

Υψος Διατομής	30 cm
Πλάτος διατομής	1 m
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	35MPa
Χαρακτηριστική τάση διαρροής χάλυβα	500 MPa
Διατομή χάλυβα	25 mm
Απόσταση ράβδων οπλισμού	20 cm
Επικάλυψη	4 cm

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά διατομής με εφελκόμενο οπλισμό

Ο αριθμός των ράβδων του εφελκόμενου οπλισμού είναι $N = b/s = 1/ 0.2 = 5$ ράβδοι.

Θλιπτική αντοχή $f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_{cfi} = 0.85 * 35 / 1 = 29,75$ MPa

Τάση διαρροής χάλυβα $= f_{yk} / \gamma_{yfi} = 500 / 1 = 500$ MPa

Θεωρείται συνδετήρας $\Phi 10$ mm

$d = h - c - 0,025/2 - 0,01 = 0,3 - 0,04 = 0,2375$ m

Το ύψος της θλιβόμενης περιοχής θα βρίσκεται από τον τύπο

$$x = f_{yd}(\theta) * A_s / (f_{cd} * b * \lambda) = f_{yd}(\theta) * N * \pi * \rho^2 / (f_{cd} * b * \lambda) = 500 * 5 * 3,14 * 0.0125^2 / (29,75 * 1 * 0.8) = 0,052$$

$m = 5,2$ cm

Και η ροπή που μπορεί να αντέξει η διατομή είναι

$$M = F_{st} * z = f_{yd} * A_s * z = f_{yd} * N * \pi * \rho^2 * (d - \lambda * \chi / 2) = 500 * 5 * 3,14 * 0.0125^2 * (0,2375 - 0,8 * 0,052 / 2) = 0,265$$

MN m = 265 KN m

Ενώ για διάρκεια φωτιάς 2 ωρών που η θερμοκρασία στον χάλυβα έχει φτάσει σχεδόν στους 500 οC έχουμε:

Μειωτικός συντελεστής αντοχής του χάλυβα $k_s = 0.78$

Θλιβόμενο ύψος της διατομής θα είναι τώρα

$$x = k_s * f_{yd}(\theta) * A_s / (f_{cd} * b * \lambda) = f_{yd}(\theta) * N * \pi * \rho^2 / (f_{cd} * b * \lambda) = 0,78 * 500 * 5 * 3,14 * 0.0125^2 / (29,75 * 1 * 0.8) = 0,04$$

m = 4 cm

Και η ροπή που αντέχει το σκυρόδεμα θα είναι

$$M = F_{st} * z = k_s * f_{yd} * A_s * z = f_{yd} * N * \pi * \rho^2 * (d - \lambda * \chi / 2) = 0,78 * 500 * 5 * 3,14 * 0.0125^2 * (0,2375 - 0,8 * 0,04 / 2) = 0,211$$

MN m = 211 KN m

Παρατηρούμε πως το σκυρόδεμα έχει χάσει το $211/265 = 79\%$ της μέγιστης αντοχής του και αυτό εξαρτάται από την θερμοκρασία που έχει φτάσει ο οπλισμός της διατομής κάθε χρονική στιγμή. Αν

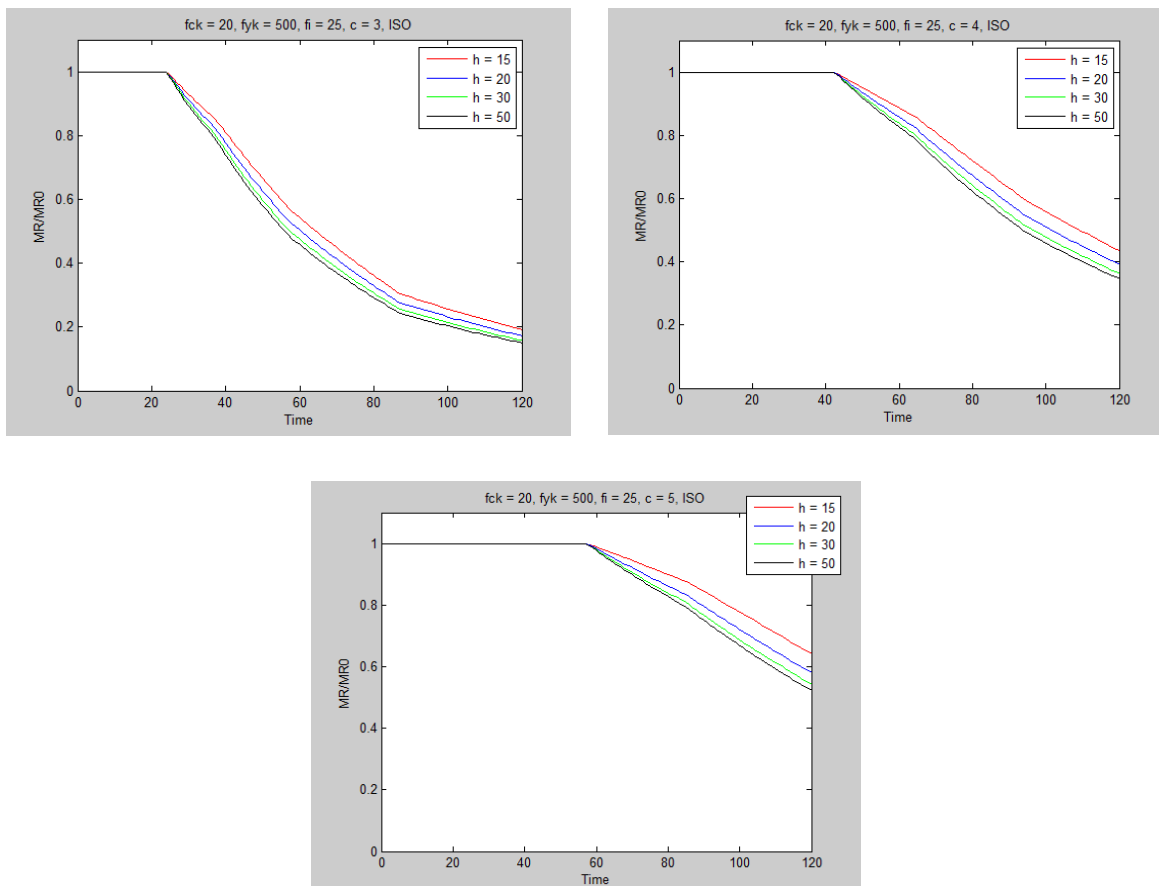
επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για όλες τις ενδιαμέσες χρονικές στιγμές μπορούμε να εξετάσουμε την μεταβολή της αντοχής.

5.2 Αριθμητικός υπολογισμός ροπής αντοχής για απλό σπλισμό

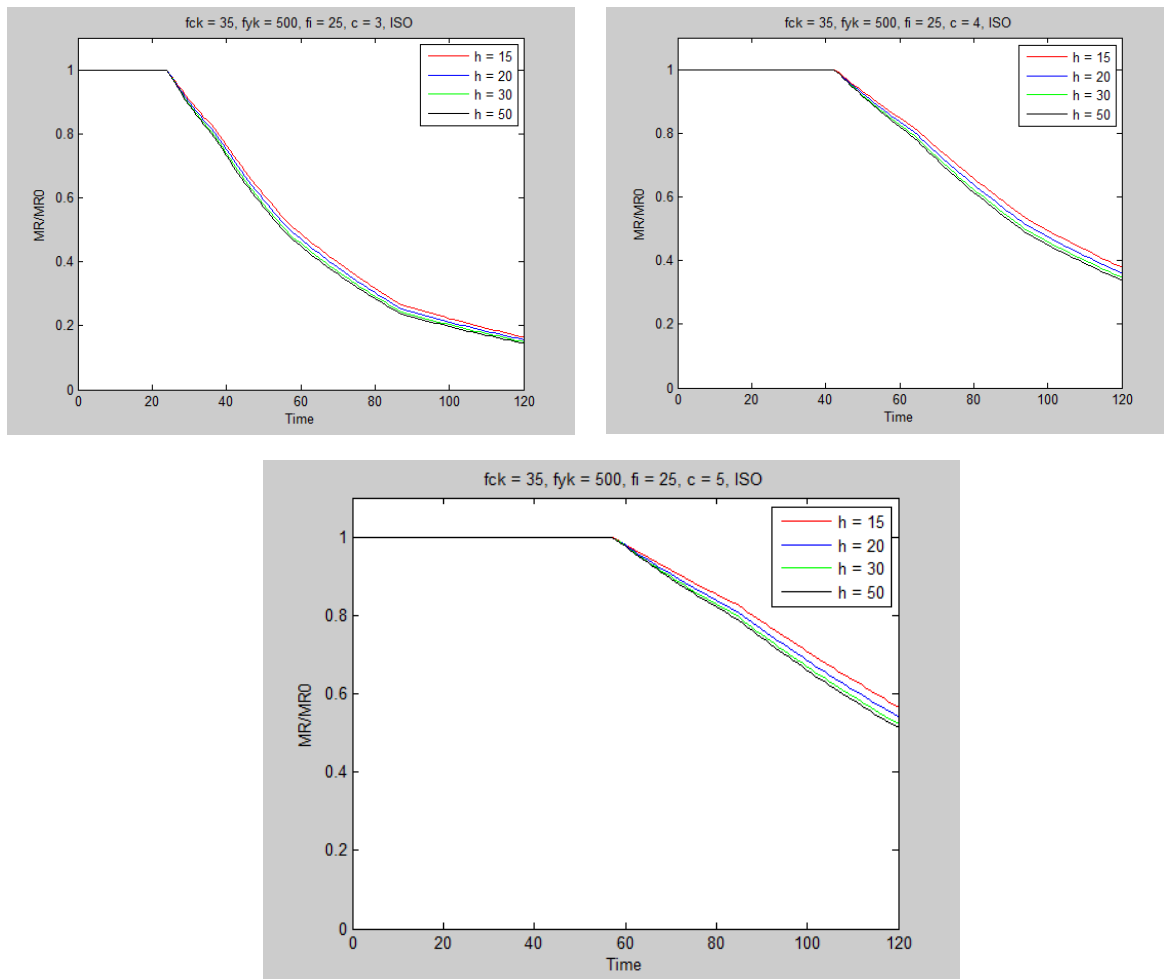
Όπως είδαμε προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή αντοχής της διατομής για τους 20 °C και για κάθε άλλη χρονική στιγμή εξέλιξης της φωτιάς. Εδώ θα επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για ύψος διατομής 15, 20, 30 και 50 εκατοστά, θα αλλάξουμε και θα συγκρίνουμε την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος $f_{ck} = 20, 35$ και 50 MPa καθώς και την επικάλυψη του σπλισμού με τιμές $c = 3, 4$ και 5 εκατοστά.

Θα εκτελέσουμε την ίδια διαδικασία για δύο θερμοκρασιακές καμπύλες την ISO και την RWS και στη συνέχεια θα επαναλάβουμε για διατομή και με θλιβόμενο σπλισμό που θα είναι ο μισός του εφελκόμενου.

Πρώτα θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα που προέκυψαν με βάση την θερμοκρασιακή καμπύλη ISO για τις διάφορες θλιπτικές αντοχές και επικαλύψεις σε ομάδες των τριών.



Σχήμα 5-1: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 20 MPa και επικάλυψη σπλισμού 3, 4 και 5 cm. Σπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm

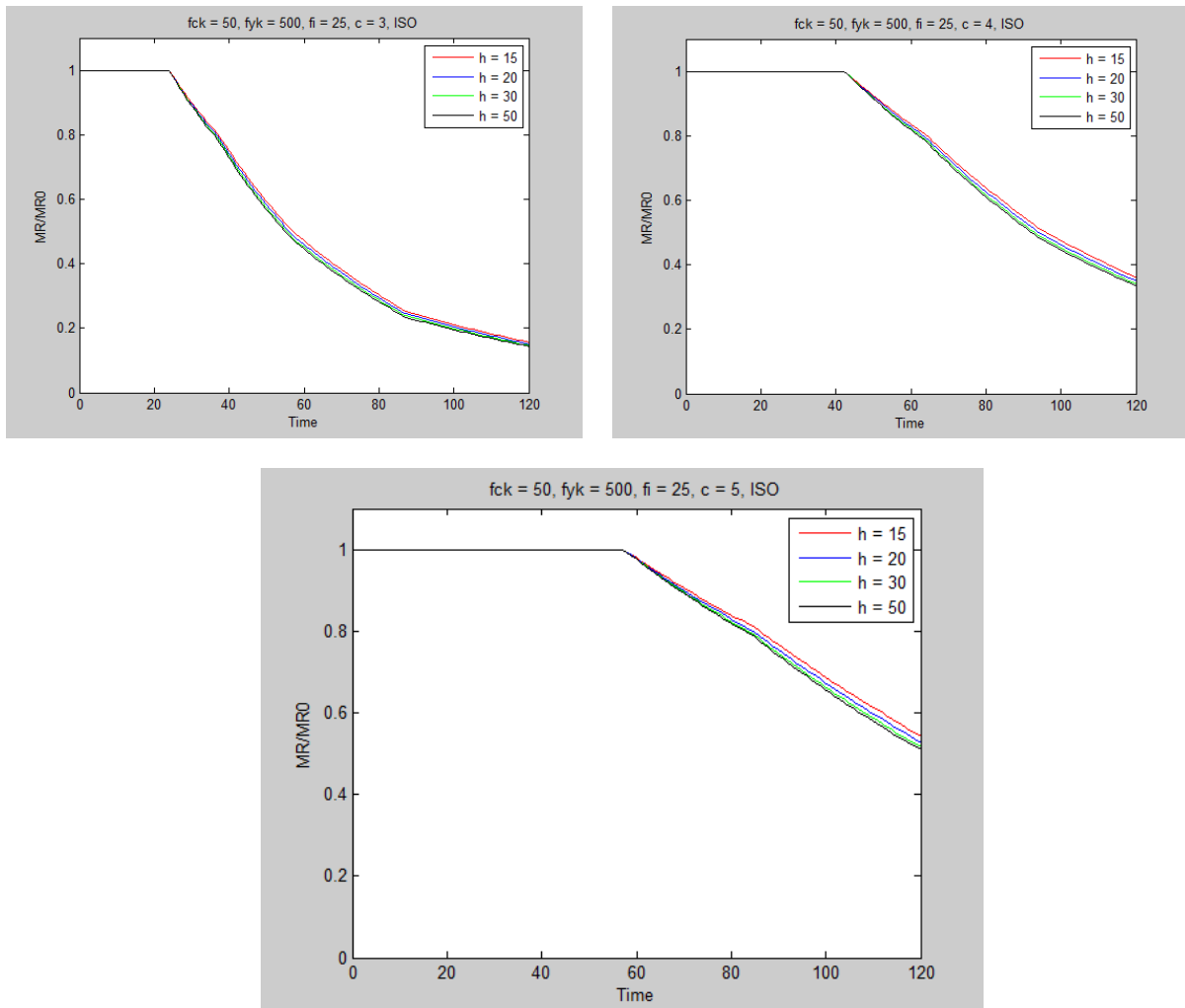


Σχήμα 5-2: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 35 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm

Στις τρεις σειρές διαγραμμάτων παρατηρούμε το πώς μεταβάλλεται η ροπή σχεδιασμού του σκυροδέματος όσο αυξάνεται η θερμοκρασία σε σχέση με την αντοχή του στους 20 οC. Η θερμοκρασιακή καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε είναι η ISO για διατομές με εφελευκόμενο οπλισμό, για θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 20, 35 και 50 MPa. Για κάθε θλιπτική αντοχή αλλάξαμε την επικάλυψη του οπλισμού του χάλυβα (3, 4 και 5 εκατοστά) και το ύψος της διατομής (15, 20, 30 και 50 εκατοστά). Με βάση αυτά τα διαγράμματα μπορούμε να δούμε πως επηρεάζεται η ροπή σχεδιασμού του σκυροδέματος σχετικά με την επικάλυψη, την θλιπτική αντοχή και το ύψος της διατομής.

Η επικάλυψη είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας και επηρεάζει την αντοχή της διατομής μας δραματικά. Όσο πιο μεγάλη είναι η επικάλυψη τόσο πιο αργά αυξάνεται η θερμοκρασία του οπλισμού. Με αύξηση της επικάλυψης κατά ένα εκατοστό παρατηρούμε πως η αντοχή μειώνεται κατά 20 λεπτά αργότερα σε κάθε περίπτωση. Αυτό ισχύει και για τα 20 και τα 35 και τα 50 MPa. Επίσης και στις τρεις περιπτώσεις η αντοχή του σκυροδέματος αρχίζει να μειώνεται στον ίδιο χρόνο για κάθε επικάλυψη. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η αντοχή της διατομής εξαρτάται από την επικάλυψη. Τέλος παρατηρούμε πως η ροπή σχεδιασμού σχεδόν

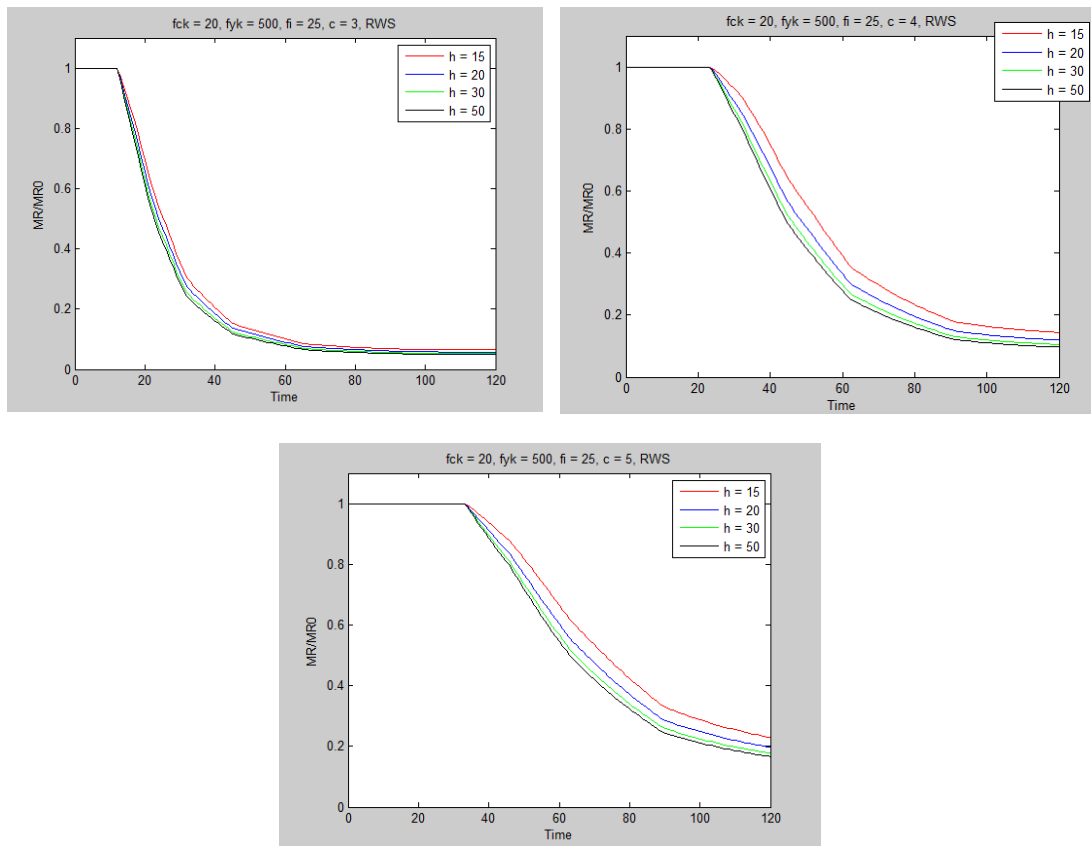
μηδενίζεται για επικάλυψη 3 εκατοστά ενώ στα 5 εκατοστά φτάνει μέχρι το 50% περίπου της αρχικής.



Σχήμα 5-3: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 50 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm

Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η αντοχή του σκυροδέματος διαφέρει ανάλογα με το ύψος της διατομής γεγονός το οποίο φαίνεται κυρίως για το σκυρόδεμα με $f_{ck} = 20$ MPa. Η διαφορά αυτή γίνεται λιγότερο αισθητή όσο η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται. Στα 50 MPa για παράδειγμα η ροπή σχεδιασμού μειώνεται σχεδόν με τον ίδιο ρυθμό για όλα τα ύψη των διατομών.

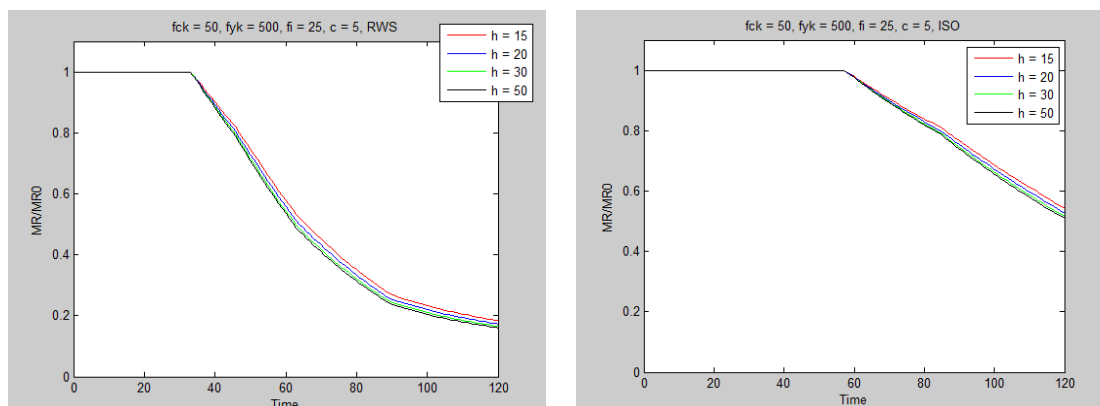
Παρακάτω θα δούμε τα διαγράμματα που προέκυψαν με βάση την θερμοκρασιακή καμπύλη RWS σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της καμπύλης ISO και θα τα συγκρίνουμε.



Σχήμα 5-4: Διαγράμματα μείωσης αντοχής σκυροδέματος για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 20 MPa και επικάλυψη οπλισμού 3, 4 και 5 cm. Οπλισμός αντοχής 500 MPa, με διάμετρο 25 mm

Εδώ παρατηρούμε ξανά την βαρύτητα που έχει η επικάλυψη στην αντοχή του σκυροδέματος. Παρόλα σε όλες τις περιπτώσεις η ροπή σχεδιασμού αρχίζει να μειώνεται πριν τα 40 λεπτά αυτό συμβαίνει καθώς η θερμοκρασιακή καμπύλη RWS είναι πολύ πιο απότομη από την ISO που είδαμε προηγούμενος. Επιπλέον Βλέπουμε πως η μείωση της αντοχής γίνεται σχεδόν ακαριαία και φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές, περίπου 10 – 20 % της αρχικής.

Για να γίνει η διάκριση μεταξύ των δύο θερμοκρασιακών καμπυλών πιο εμφανείς μπορούμε να συγκρίνουμε τα διαγράμματα που προκύπτουν από την κάθε μία για την ίδια θλιπτική αντοχή και την ίδια επικάλυψη.



Σχήμα 5-5: Σύγκριση διαγραμμάτων μείωσης αντοχής σκυροδέματος 50 MPa με επικάλυψη οπλισμού 5 cm των θερμοκρασιακών καμπυλών RWS και ISO

Για σκυρόδεμα αντοχής 50 MPA και επικάλυψη εφελκόμενου οπλισμού 5 cm βλέπουμε πως η ροπή σχεδιασμού ξεκινάει να μειώνεται περίπου στα 30 λεπτά για την καμπύλη RWS ενώ για την καμπύλη ISO περίπου στα 60 λεπτά.

5.3 Διπλός οπλισμός

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τα ίδια διαγράμματα αλλά για διατομή με θλιβόμενο οπλισμό. Αρχικά θα δούμε πως υπολογίζουμε την ροπή σχεδιασμού σε αυτή την περίπτωση. Επομένως αν θεωρήσουμε διατομή με τα παρακάτω δεδομένου για τους 20 οC έχουμε:

Ύψος Διατομής	30 cm
Πλάτος διατομής	1 m
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	20 MPa
Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα	500 MPa
Εφελκόμενος Οπλισμός	
Διάμετρος οπλισμού	25 mm
Απόσταση ράβδων οπλισμού	20 cm
Επικάλυψη οπλισμού	5 cm
Θλιβόμενος Οπλισμός	
Διάμετρος οπλισμού	25 mm
Απόσταση ράβδων οπλισμού	40 cm
Επικάλυψη οπλισμού	4 cm

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά διατομής με εφελκόμενο και θλιβόμενο οπλισμό

Ο αριθμός των ράβδων του εφελκόμενου οπλισμού θα είναι $N1 = 1/0,2 = 5$ ράβδοι ενώ του θλιβόμενου οπλισμού θα είναι $N2 = 1/0,4 = 2,5$ ράβδοι.

Θλιπτική αντοχή $f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_{cfi} = 0,85 * 35 / 1 = 29,75$ MPa

Τάση διαρροής χάλυβα $= f_{yk} / \gamma_{yfi} = 500 / 1 = 500$ MPa

θεωρείται συνδετήρας $\Phi 10$ mm

$d = h - c - 0,025/2 - 0,01 = 0,3 - 0,05 - 0,025/2 - 0,01 = 0,2275$ m

$d' = 0,04 + 0,025/2 + 0,01$ m = 0,0625 m = 6,25 cm

Το εμβαδόν των οπλισμών θα είναι:

$A_{st} = N * \pi * \rho^2 = 1/0,2 * 3,14 * 0,0125^2 = 0,00245$ m²

$A_{sc} = N * \pi * \rho^2 = 1/0,4 * 3,14 * 0,0125^2 = 0,00122$ m²

Για τους 20 °C έχουμε:

Για να υπολογίσουμε σε αυτή την περίπτωση την ροπή αντοχής θα πρέπει πρώτα να βρούμε για ποιο ύψος θλιβόμενης ζώνης οι αξονικές δυνάμεις εξισορροπούνται. Μέτα από συνεχής δοκιμές προκύπτει ότι για θλιβόμενη ζώνη ύψους $x = 0,07781$ m

Η άνω ακραία ίνα δέχεται τη μέγυστη θλιπτική παραμόρφωση 35‰

Ο χάλυβας θα διαρρέει για παραμόρφωση $\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = 500 / 200000 = 0,0025$

Ο άνω οπλισμός δέχεται παραμόρφωση $\epsilon_{sc} = 0,0035 * (x - d') / x = 0,000689 < \epsilon_{yd}$

Ο κάτω οπλισμός δέχεται παραμόρφωση $\epsilon_{st} = -0,0035 * (d - x) / x = -0,00763 > \epsilon_{yd}$ (σε απόλυτη τιμή)

Και οι δυνάμεις των οπλισμών και του σκυροδέματος υπολογίζονται ως

$$F_{cc} = 0.8 \cdot \chi \cdot b \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 0.07781 \cdot 1 \cdot 20 \cdot 0.85 = 1.058 \text{ MN} = 1058 \text{ KN}$$

$$F_{st} = -f_{yd} \cdot A_{st} = -500 \cdot 0.00245 = -1.225 \text{ MN} = -1225 \text{ KN}$$

$$F_{sc} = \epsilon_{sc} \cdot E_s \cdot A_{sc} = 0.000689 \cdot 200000 \cdot 0.00122 = 0.168 \text{ MN} = 168 \text{ KN}$$

$$N = F_{cc} + F_{st} + F_{sc} = 1058 - 1225 + 168 \approx 0$$

Άρα η ροπή αντοχής θα είναι

$$M = -F_{st} \cdot (d - h/2) + F_{sc} \cdot (h/2 - d') + F_{cc} \cdot (h/2 - 0.8 \cdot \chi/2) = 1225 \cdot (0.2275 - 0.3/2) + 168 \cdot (0.3/2 - 0.0625) + 1058 \cdot (0.3/2 - 0.8 \cdot 0.07781/2) = 235 \text{ KN m}$$

Για θερμοκρασία φωτιάς ακολουθούμε την ίδια διαδικασία λαμβάνοντας υπόψη μειωτικούς συντελεστές για τη τάση διαρροής του χάλυβα και το μέτρο ελαστικότητας του.

Για την επικάλυψη που υποθέσαμε και για δύο ώρες έκθεσης σε πυρκαγιά ο χάλυβας έχει φτάσει σε θερμοκρασία περίπου 600 °C.

Άρα θα λάβουμε μειωτικό συντελεστή για τη τάση διαρροής που προβλέπει ο EN 1992 – 1- 2

$k_s = 0.47$ και για το μέτρο ελαστικότητας $E_{s\theta} / E_s = 0.31$, ή $E_{s\theta} = 200000 \cdot 0.31 = 62000 \text{ MPa}$.

$$f_{sy,\theta} = 0.47 \cdot 500 = 235 \text{ MPa} \text{ και } \epsilon_{sy} = 0.02$$

$$f_{sp,\theta} = 0.18 \cdot 500 = 90 \text{ MPa} \text{ και } \epsilon_{sp} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta} = 90 / 62000 = 0.00145$$

Με βάση τα παραπάνω και ύστερα από δοκιμές το ύψος της θλιβόμενης ζώνης για την οποία οι αξονικές δυνάμεις εξισορροπούνται είναι $\chi = 0.04295$

Ο άνω σπλισμός που δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία δέχεται παραμόρφωση $\epsilon_{sc} = 0.0035 \cdot (\chi - d') / \chi = -0.0016 < \epsilon_{yd}$ (σε απόλυτη τιμή)

Ο κάτω σπλισμός δέχεται παραμόρφωση $\epsilon_{st} = -0.0035 \cdot (d - \chi) / \chi = -0.0167 < \epsilon_{sy}$ (σε απόλυτη τιμή)

Και οι δυνάμεις των σπλισμών και του σκυροδέματος υπολογίζονται ως

$$F_{cc} = 0.8 \cdot \chi \cdot b \cdot f_{cd} = 0.8 \cdot 0.04295 \cdot 1 \cdot 20 \cdot 0.85 = 0.584 \text{ MN} = 584 \text{ KN}$$

$$F_{st} = \sigma_{st} \cdot A_{st} = (f_{sp} - c + (b/a) \cdot [a^2 - (\epsilon_{sy} - \epsilon_{st})^2]^{0.5}) \cdot A_{st}$$

$$\text{όπου } c = (f_{sy} - f_{sp})^2 / [(\epsilon_{sy} - \epsilon_{sp}) \cdot E_{s,\theta} - 2 \cdot (f_{sy} - f_{sp})] = 24.44$$

$$b^2 = c \cdot (\epsilon_{sy} - \epsilon_{sp}) \cdot E + c^2 = 169.44$$

$$a^2 = (\epsilon_{sy} - \epsilon_{sp}) \cdot (\epsilon_{sy} - \epsilon_{sp} + c / E_{s,\theta}) = 0.01874$$

$$\text{Άρα τελικά } F_{st} = -0.192 \text{ MN} = -192 \text{ KN}$$

$$\text{και } F_{sc} = \epsilon_{sc} \cdot E_s \cdot A_{sc} = -0.391 \text{ MN} = -391 \text{ KN}$$

$$N = F_{cc} + F_{st} + F_{sc} = 0$$

$$M = F_{st} \cdot (d - h/2) - F_{sc} \cdot (h/2 - d') + F_{cc} \cdot (h/2 - 0.8 \cdot \chi/2) = 97 \text{ KN m}$$

Άρα η διατομή έχει φτάσει στο $97/235 = 41\%$ της αρχικής αντοχής της

Βιβλιογραφία

- [1] Behaviour and structural design of concrete structures exposed to fire – Annelies De Wit
- [2] Desing of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety – Μαραβέας Χρύσανθος, Βράκας Απόστολος
- [3] Fire Safety Engineering Design of Structures – John A. Purkiss
- [4] Προστασία των Μέτρων Στήριξης Σηράγγων από πυρκαγιά – Κωνσταντίνος Μιλτιάδης Γ. Σακκάς
- [5] Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά –Κ.Μ.Γ. Σακκάς , Π.Π. Νομικός, Δ. Πάνιας, Α.Ι. Σοφιανός
- [6] Στοιχεία Οπλισμένου σκυροδέματος – Π.Π. Νομικός, Α.Ι. Σοφιανός
- [7] Fire in bored tunnels – B.B.G. Lottaman
- [8] Analyses of structure under fire – L. Kwasniewski, D. Bacinskas, G. Cefarelli, C. Couto, M. Hajpál & Á. Török, M. Kaliske, D. Pintea & R. Zaharia
- [9] Graphical Methods for Temperature Distribution with Unsteady Heat Flow - Temple C. Patton
- [10] Μέτρα Στήριξης Σηράγγων – Αλέξανδρος Ι Σοφιανός
- [11] Numerical Integration Strategy for Plates and Shells – C.J. Burgoyne, M.A. Crisfield
- [12] Analysis of Reinforced Beams Subjected to Fire – Bruce Ellingwood, James R. Shaver
- [13] Data Sheet of Sikacrete 213F: www.sika.com

Παράρτημα

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι και υπολογισμοί έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB. Εδώ θα δούμε το πώς υλοποιήθηκαν, και θα εξηγήσουμε πως λειτουργούν τα πιο σημαντικά κομμάτια του προγράμματος που κατασκευάστηκε για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα δούμε τα κομμάτια του κώδικα που είναι υπεύθυνα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σκυροδέματος και το εσωτερικό του.

Εδώ βλέπουμε την συνάρτηση Initialize που υπολογίζει την θερμοκρασία στα δύο άκρα της διατομής μας

```
function [ th ] = Initialize (th, th0, t, fcurve)

[m,n] = size(th);
e = exp(1);
v = 0;
th(1,:) = th0;
th(:, n) = th0;

    for a = 1:m

        if (fcurve == 'RWS')
            th (a, 1) = 0;

            if a*t > 120
                th(a, 1) = 1200;
            elseif a*t > 90 && a*t < 120
                th(a, 1) = (1300 + (1200 -1300)/(120-90)*(a*t - 90));
            elseif a*t > 60 && a*t < 90
                th (a, 1) = (1350+(1300-1350)/(90-60)*(a*t-60));
            elseif a*t > 30 &&a*t < 60
                th (a, 1) = (1300 + (1350 - 1300)/(60 - 30)*(a*t - 30));
            elseif a*t > 10 && a*t < 30
                th (a, 1) = 1200 + (1300 - 1200)/(30-10)*(a*t - 10);
            elseif a*t > 5 && a*t < 10
                th(a, 1) = 1140 + (1200 - 1140)/(10-5)*(a*t - 5);
            elseif a*t > 3 && a*t < 5
                th (a, 1) = 890 + (1140 - 890)/(5-3)*(a*t - 3);
            elseif a*t < 3
                th(a, 1) = 20 + (890 - 20)/(3)*(a*t);
            end
        elseif (fcurve == 'ISO')
            th (a, 1) = 345 * log10(8*a*t + 1) + 20;
        end
    end
end
```

Την χρονική στιγμή 0 θεωρούμε θερμοκρασία ίση με $th_0 = 20$ οC σε όλο το μήκος της διατομής. Το ίδιο θεωρούμε και για την τελευταία ακραία ίνα και κρατάμε σταθερή την θερμοκρασία για όλο τον χρόνο έκθεσης της πυρκαγιάς.

Στην συνέχεια για υπολογίζουμε την θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος, είτε με βάση την θερμοκρασιακή καμπύλη ISO είτε με την RWS, για χρόνο από 0 λεπτά έως 120 λεπτά με χρονικό βήμα t.

Th0: η θερμοκρασία που έχει το σκυρόδεμα υπό κανονικές συνθήκες.

t: το χρονικό βήμα.

th: ο πίνακας στον οποίο αποθηκεύουμε τις θερμοκρασίες.

m: ο αριθμός των γραμμών που θα έχει ο πίνακας όπως προκύπτει από το χρονικό βήμα t.

Η συνάρτηση Calculate παίρνει τον πίνακα των θερμοκρασιών που είδαμε προηγουμένως και υπολογίζει τις τιμές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του για κάθε χρονική στιγμή.

```
function [ th ] = Calculate( dx, dt, th )

[m, n] = size(th);

for i = 2:m
    for j = 2:n - 1

        lc = ThermalConductivity(th(i - 1, j));
        pc = Density(th(i - 1, j));
        cp = SpecificHeat(th(i - 1, j));
        ac = lc / pc / cp *60 *1000;

        F = ac * dt /dx / dx;

        th(i, j) = (1 - 2*F)*th(i - 1, j) + F*(th(i- 1, j - 1) + th(i - 1, j + 1));
    end
end
end
```

Για κάθε χρονικό βήμα και κάθε σημείο στο εσωτερικό του σκυροδέματος υπολογίζουμε τις τιμές των ειδική θερμότητα, πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα και με τους τύπους που αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια υπολογίζουμε την θερμοκρασία που θα έχουμε την επόμενη χρονική στιγμή.

dx: πάχος της κάθε ζώνης σκυροδέματος

dt: χρονικό βήμα

th: πίνακας θερμοκρασιών

Βλέπουμε πως θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος υπολογίζονται κάθε φορά από 3 συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις αυτές είναι απλές και περιέχουν τις εξισώσεις από τον ευρωκώδικα (EN 1992 – 1- 2)και φαίνονται παρακάτω.

```
function [pc] = Density (th)

    if (20 <= th && th <= 115)
        pc = 2300;
    elseif (115 < th && th <= 200)
        pc = 2300*(1 - 0.02*(th - 115)/85);
    elseif (200 < th && th <= 400)
        pc = 2300*(0.98 - 0.03*(th - 200)/200);
    elseif (400 < th && th <= 1200)
        pc = 2300*(0.95 - 0.07*(th - 400)/800);
    elseif (1200 <= th)
        pc = 2300*(0.95 - 0.07*(1200 - 400)/800);
    end
function [lc] = ThermalConductivity(th)
```



```

lc = 2 - 0.2451*(th/100) + 0.0107*((th / 100)^2);

%lc = 1.36 - 0.136*(th/100) + 0.0057*((th/ 100)^2); (Πάνω και κάτω όριο της
θερμικής αγωγιμότητας, εδώ χρησιμοποιούμε το πάνω όριο)

end

function [cp] = SpecificHeat(th)

if (20 <= th && th <= 100)
    cp = 0.9;
elseif (100 < th && th <= 115)
    cp = (2020)/1000;
elseif (115 < th && th <= 200)
    cp = (-12*th + 3400)/ 1000;
elseif (200 < th && th <= 400)
    cp = (1000 + (th - 200)/2)/1000;
elseif (400 < th)
    cp = 1.1;
end

end

```

Και οι τρεις συναρτήσεις λαμβάνουν ως δεδομένο την θερμοκρασία του σκυροδέματος από τον πίνακα που κατασκευάσαμε και με βάση αυτήν υπολογίζουν την τιμή των παραπάνω χαρακτηριστικών

Παρόμοιες συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών σε διατομή με πυροπροστασία και στην περίπτωση της εκρηκτικής αποφλοιώσης.

```

function [th] = Calculate2(th, h, h_protect, dx, dx_protect, dt, u, prt )

[m,n] = size(th);

for i = 2:m
    for j = 2:n-1
        if (j*dx_protect <= h_protect*10)
            [l, c, p] = Protection(prt);
            ac = 1/p/c*60*1000;

            F = ac*dt/dx_protect/dx_protect;

            th(i, j) = (1 - 2*F)*th(i - 1, j) + F*(th(i- 1, j - 1) + th(i - 1, j + 1));

            elseif (j*dx_protect > h_protect*10)

                l = ThermalConductivity(th(i - 1, j));
                p = Density(th(i - 1, j));
                c = SpecificHeat(th(i - 1, j), u);
                ac = 1 / p / c *60 *1000;

                F = ac * dt /dx / dx;

                th(i, j) = (1 - 2*F)*th(i - 1, j) + F*(th(i- 1, j - 1) + th(i - 1, j + 1));
            end
        end
    end
end

```

```

function [ th ] = Spoling(th, dx, dt, u)

[m,n] = size(th);
vel = 5; %mm/min
a = zeros(m, n);
k = 0;

for i = 2: m
    for j = 2:n - 1
        if(i*dt < 30 && j <= vel/dx*i*dt + 1)
            a(i, j) = 1;
            k = j;
        elseif(j <= k)
            a(i, j) = 1;
        else
            a(i, j) = 0;
        end
    end
end

for i = 2:m
    for j = 2:n - 1
        lc = ThermalConductivity(th(i - 1, j));
        pc = Density(th(i - 1, j));
        cp = SpecificHeat(th(i - 1, j), u);
        ac = lc / pc / cp *60 *1000;

        F = ac * dt /dx / dx;

        if (a(i,j) == 1)
            th(i,j) = th(i, j - 1);
        else
            th(i, j) = (1 - 2*F)*th(i - 1, j) + F*(th(i- 1, j - 1) + th(i - 1, j + 1));
        end
    end
end
end

```

Στα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που αλλάζουν με την θερμοκρασία είδαμε και την παραμόρφωση του σκυροδέματος και του χάλυβα. Αυτά υπολογίζονται πάλι από δύο συναρτήσεις που λαμβάνουν ως δεδομένο τη θερμοκρασία και φαίνονται παρακάτω.

```

function [eth] = ThermalEnlongation( th )

a = 0.0001;
b = 0.000001;
c = 0.000000000001;

    if (20 <= th && th <= 700)
        eth = -1.8*a + 9 * b* th + 2.3 * c * (th^3);
    end
    if (700 < th && th <= 1400)
        eth = 0.014;
    end
end

```

Παραπάνω έχουμε την συνάρτηση που υπολογίζει την παραμόρφωση του σκυροδέματος και παρακάτω την συνάρτηση που υπολογίζει την παραμόρφωση του χάλυβα έτσι όπως δίνονται στον ευρωκώδικα.

```
function [ es ] = ThermalEnlSteel( th )

    a = 0.0001;
    b = 0.00001;
    c = 0.00000001;
    d = 0.001;
    es = 0;

    if (th >= 20 && th <= 750)
        es = -2.416*a + 1.2*b*th + 0.4*c*th*th;
    elseif (th > 750 && th <= 860)
        es = 11*d;
    elseif (th > 860)
        es = -6.2*d + 2*b*th;
    end

end
```

Με την αύξηση της θερμοκρασίας η αντοχή του σκυροδέματος και του χάλυβα μειώνονται και η παραμόρφωση που δέχονται στη μέγιστη αντοχή μεταβάλλονται. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνονται με βάση πίνακες που μας δείχνουν την μεταβολή τους για δεδομένες θερμοκρασίες. Για να υπολογίσουμε λοιπόν τα μεγέθη αυτά για κάθε θερμοκρασία χρειάστηκε να κάνουμε γραμμική παρεμβολή στους πίνακες. Αυτό έγινε με την παρακάτω συνάρτηση.

```
function [ tableout ] = Interpolation( thtable, str, tableout, column )

k = 1;
[m ,n] = size(thtable);
a = 1;

Table1 = [20 1 0.0025 0.02 1;
100 1 0.004 0.0225 1;
200 0.95 0.0055 0.0250 0.97;
300 0.85 0.007 0.0275 0.91;
400 0.75 0.01 0.03 0.85;
500 0.6 0.015 0.0325 0.74;
600 0.45 0.025 0.035 0.6;
700 0.3 0.025 0.0375 0.43;
800 0.15 0.025 0.04 0.27;
900 0.08 0.025 0.042 0.15;
1000 0.04 0.025 0.045 0.06;
1100 0.01 0.025 0.0475 0.02;
1200 0.001 0.025 0.0475 0;

TableN = [20 1 1 1 1 1 1;
100 1 1 1 0.96 1 1;
200 1 1 0.81 0.92 0.9 0.87;
300 1 1 0.61 0.81 0.8 0.72;
400 1 0.94 0.42 0.63 0.7 0.56;
500 0.78 0.67 0.36 0.44 0.6 0.4;
600 0.47 0.4 0.18 0.26 0.31 0.24;
```

```

700 0.23 0.12 0.07 0.08 0.13 0.08;
800 0.11 0.11 0.05 0.06 0.09 0.06;
900 0.06 0.08 0.04 0.05 0.07 0.05;
1000 0.04 0.05 0.02 0.03 0.04 0.03;
1100 0.02 0.03 0.01 0.02 0.02 0.02;
1200 0 0 0 0 0 0;

if(str == 'N')
    tab = TableN;
elseif(str == 'F')
    tab = Table1;
end

for i = 1:m
    for j = 1:n

        th = thtable(i,j);
        while(a == 1)
            if (th > tab(k, 1))
                k = k + 1;
            else th <= tab(k , 1);
                temp = tab(k, 1);
                a = a + 1;
            end
        end

        if (th == temp)
            tableout(i, j) = tab(k, column);
        else
            if k == 1
                k = 2;
            end
            c = (temp - th) / 100;
            tableout(i, j) = c * (tab(k - 1, column) - tab(k, column)) + tab(k, column);
        end
        a = 1;
        k = 1;
    end
end
end

```

} Βρίσκουμε την θερμοκρασία στην οποία βρισκόμαστε, στο πίνακα που κάνουμε παρεμβολή

Αρχικά έχουμε μεταφέρει τους δύο πίνακες στους οποίους χρειάστηκε να κάνουμε γραμμική παρεμβολή. Τον πίνακα 1 που μας δίνει τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και τον Πίνακα N που μας δίνει τις τιμές για τον χάλυβα. Εισάγοντας λοιπόν τον πίνακα θερμοκρασιών που κατασκευάσαμε προηγουμένως κάνουμε γραμμική παρεμβολή για κάθε θερμοκρασία του σε κάθε χρονική στιγμή.

Για να κάνουμε γραμμική παρεμβολή πρέπει πρώτα να βρούμε μεταξύ ποιων θερμοκρασιών βρισκόμαστε στον πίνακα που μας ενδιαφέρει. Αφού βρούμε την θερμοκρασία αυτή από το κομμάτι του κώδικα που υποδεικνύεται παραπάνω εφαρμόζουμε τον τύπο στη συνέχεια.

Παρακάτω θα δούμε δύο συναρτήσεις που υπολογίζουν την ροπή σχεδιασμού και την ροπή που δέχεται το σκυρόδεμα λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας αντίστοιχα.

```
function [damage, Mecold, MRcold, Mefi, MRfi] = Temp500(kstable, thtable,
time, timestep, G, Q, l, h, b, fck, fyk, f1, s1, n1, c1, As1, f2, s2, n2,
c2, As2)
```

```
[m, n] = size(thtable);
temp500 = zeros (m, n);
damage = 0;
```

```
row = fix(time / timestep);
column1 = fix(c1/4*1000);
```

```
ks1 = kstable(row, column1)
column2 = fix((h - c2)/4*1000);
```

```
ks2 = kstable(row, column2)
acc = 0.85;
```

```
gc = 1.5;
gy = 1.15;
```

```
gcf = 1;
gyf = 1;
```

```
ps = 0.3;
ks20 = 1;
```

```
p = Density(20)/100;
Gr = G + p*h*b;
r1 = f1/2;
r2 = f2/2;
d = h - c1;
```

```
As1 = pi*r1*r1*b/s1;
```

```
As2 = pi*r2*r2*b/s2;
```

Αρχικά τροφοδοτούμε τη συνάρτηση με τα απαραίτητα δεδομένα όπως η αντοχή του σκυροδέματος και του χάλυβα, καθώς και οι τιμές της διαμέτρου της επικάλυψης και της απόστασης μεταξύ των ράβδων στους δύο οπλισμούς. Επιπλέον με βάση την θερμοκρασία που επικρατεί στον χάλυβα υπολογίζουμε το μειωτικό συντελεστή με βάση τους πίνακες που είδαμε προηγουμένως. Τέλος θέτουμε κάποιες σταθερές όπως συντελεστές ασφαλείας και μειωτικούς συντελεστές για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα.

```
if (As2 == 0)
    % sxediasmou
    Wsx = 1.35 * Gr + 1.5*Q;
    Mesx = Wsx*1*1/8;

    fcd = 0.85*fck/gc;
    fyd = fyk/gy;
```

```

x = As1*fyd/fcd/b/0.8;
z = d - 0.8*x/2;

MRsx = As1*fyd*z;

% 20 bathmoi
Wcold = Gr + ps*Q;
Mecold = Wcold*1*1/8;

fydcold = ks20*fyk/gyf;
fcd = acc*fck /gcf;

xcold = As1*fydcold/fcd/b/0.8;
zcold = d - 0.8*xcold/2;

MRcold = As1*fydcold*zcold;

%thermokrasia fotias
Wfi = Gr + ps*Q;
Mefi = Wfi*1*1/8;

fydfil = ks1*fyk/gyf;
fcd = acc*fck /gcf;

xfi = As1*fydfil/fcd/b/0.8;
zfil = d - 0.8*xfi/2;

MRfi = As1*fydfil*zfil

```

Εδώ υπολογίζουμε την ροπή που μπορεί να αντέξει η διατομή μας υπό κανονικές συνθήκες, σε περίπτωση πυρκαγιάς στους 20 οC και σε περίπτωση πυρκαγιάς στη θερμοκρασία που βρίσκεται η φωτιά. Στη συνέχεια εξάγουμε τις τιμές τους και κατασκευάζουμε τα διαγράμματα χρόνου και λόγο ροπών.