

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΦΟΡΕΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛ. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΟΙ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑ
ΚΑΤΑ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ 2 ΜΕΡΟΣ 1-2

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΜΑΡΚΑΝΤΩΝΗ ΣΤΑΥΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΖΕΡΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	v
1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΟΡΕΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	1
1.1 Χρήσιμη ορολογία και ορισμοί	1
1.2 Περιγραφή της πυρκαγιάς ως φυσικό φαινόμενο	3
1.2.1 Η επώαση	3
1.2.2 Η πλήρης ανάπτυξη	4
1.2.3 Η απόσβεση	5
1.3 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες κατά EN 1992-1-2: 2004....	6
1.3.1 Μηχανικές ιδιότητες	6
1.3.2 Θερμικές και φυσικές ιδιότητες.....	9
1.4 Συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σε αυξημένες θερμοκρασίες κατά EN 1-2: 2004	13
1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες	13
1.4.2 Θερμικές και φυσικές ιδιότητες.....	14
1.5 Θερμικές δράσεις.....	16
1.5.1 Ονομαστική καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου.....	16
1.5.2 Καμπύλη εξωτερικής πυρκαγιάς	17
1.5.3 Καμπύλη υδρογονανθράκων	17
1.6 Φιλοσοφία δομοστατικού σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς	18
1.7 Ανάλυση υπό πυρκαγιά κατά Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2	20
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	23
2.1 Περιγραφή των καταστατικών προσομοιωμάτων του σκυροδέματος και του χάλυβα	23
2.2 Παραδοχές της ανάλυσης υπό πυρκαγιά	26
2.3 Περιγραφή των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ..	27
2.3.1 Ραβδωτό στοιχείο κατά Hughes-Liu	27
2.3.2 Τετραπλευρικό στοιχείο κελύφους Belytschko-Lin-Tsay οκτώ κόμβων	29
2.4 Μαθηματική θεωρία του προβλήματος της πυρκαγιάς	29
2.4.1 Το δυναμικό πρόβλημα	30
2.4.2 Το πρόβλημα της θερμικής διάχυσης	31
2.5 Μέθοδοι επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων	33
2.5.1 Η αριθμητική μέθοδος των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών	33

2.5.2	Η άρρητη αριθμητική μέθοδος Euler	35
2.6	Συζευγμένη μηχανική και θερμοκρασιακή ανάλυση	36
2.7	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ LS-DYNA	40
2.7.1	Αποκλειστικά θερμοκρασιακή ανάλυση	40
3	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	47
3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων με διαγράμματα του Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2.....	47
3.1.1	Δοκός διαστάσεων h x b: 150 x 80.....	48
3.1.2	Τετραγωνικό υποστύλωμα πλάτους b = 300 mm.....	49
3.1.3	Δοκός διαστάσεων h x b: 300 x 160.....	49
3.1.4	Κυκλικό υποστύλωμα διαμέτρου 150 mm	50
3.2	Σύγκριση έκθεσης σε ονομαστική καμπύλη και σε καμπύλη υδρογονανθράκων...	51
4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	55
4.1	Επαλήθευση του πειράματος.....	55
4.1.1	Δεδομένα του πειράματος	55
4.1.2	Προσομοίωση του πειράματος στο LS-DYNA	56
4.1.3	Αριθμητικά δεδομένα του προβλήματος.....	59
4.1.4	Αναλύσεις.....	63
4.2	Διερεύνηση απόκρισης αμφίπακτης δοκού υπό πυρκαγιά	70
4.2.1	Γεωμετρία και αρχικά στοιχεία	70
4.2.2	Προσομοίωση της δοκού στο LS-DYNA.....	72
4.2.3	Κατασκευή διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών της δοκού	73
4.2.4	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων:	78
4.2.5	Έκθεση της δοκού στην πρότυπη πυρκαγιά για 240 min	82
4.2.6	Έκθεση της δοκού στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων για 240 min.....	85
4.2.7	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αναλύσεων	89
4.3	Επίλυση δίστηλου πλαισίου υπό πυρκαγιά	90
4.3.1	Γεωμετρία και δράσεις στον φορέα.....	90
4.3.2	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών του πλαισίου για t = 0 min	93
4.3.3	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών του πλαισίου για t = 60 min	96
4.3.4	Επίλυση με μη συζευγμένη ανάλυση	99
4.3.5	Υπολογισμός μετατοπίσεων του πλαισίου	104
4.3.6	Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων.....	105
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΝΤΑΟΡΟΦΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	107
5.1	Αρχικά Στοιχεία.....	107
5.1.1	Υπολογισμός κατακόρυφων φορτίων ανά όροφο του κτιρίου	109

5.1.2	Υπολογισμός της αντοχής σε τέμνουσα των δοκών.....	112
5.2	Εντατικά μεγέθη πριν την έκθεση στην πυρκαγιά.....	113
5.3	1 ^ο Σενάριο Πυρκαγιάς	114
5.3.1	Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστυλώματος	116
5.3.2	Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστυλώματος 117	
5.3.3	Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος	119
5.3.4	Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος	121
5.3.5	Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	123
5.3.6	Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος.....	124
5.3.7	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$:	129
5.4	2 ^ο Σενάριο Πυρκαγιάς	130
5.4.1	Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του τρίτου υποστυλώματος	132
5.4.2	Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστυλώματος 133	
5.4.3	Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος	135
5.4.4	Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος	136
5.4.5	Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	139
5.4.6	Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος.....	140
5.4.7	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$	143
5.5	3 ^ο Σενάριο Πυρκαγιάς	144
5.5.1	Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστυλώματος	147
5.5.2	Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστυλώματος 149	
5.5.3	Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος	151
5.5.4	Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων των δοκών του πυροδιαμερίσματος.....	153

5.5.5	Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	157
5.5.6	Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος.....	160
5.5.7	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$	168
5.6	4 ^ο Σενάριο Πυρκαγιάς	169
5.6.1	Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστυλώματος.....	172
5.6.2	Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του πρώτου υποστυλώματος.....	174
5.6.3	Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	176
5.6.4	Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	180
5.6.5	Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος.....	184
5.6.6	Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος.....	188
5.6.7	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$	194
5.7	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών στην οριακή κατάσταση αστοχίας	195
5.8	Σύγκριση – Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων	196
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	207
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	209

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση φορέων από ωπλισμένο σκυρόδεμα υπό αυξημένες θερμοκρασίες, οι οποίες προσομοιώνουν το θερμικό/θερμοκρασιακό αποτέλεσμα μίας πυρκαγιάς. Η ανάλυση αυτή γίνεται με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό LS-DYNA, η διαδικασία της οποίας θα περιγραφεί σε αντίστοιχο κεφάλαιο.

Για να είναι αυτή η διαδικασία όσον το δυνατόν πιο ρεαλιστική, λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της θερμοκρασίας στις μηχανικές αλλά και στις θερμικές-φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα. Οι σχέσεις των παραπάνω είναι δοσμένες από τον Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2 και είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων.

Ένα σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης είναι η επίλυση του προβλήματος της διάχυσης της θερμοκρασίας καθ' ύψος διατομής του δομικού μέλους. Για την επαλήθευση αυτής της ανάλυσης γίνεται σύγκριση με επιλύσεις θερμικής διάχυσης σε διατομές που έχουν παρουσιαστεί στο Παράρτημα Α του EN 1992-1-2.

Για την επαλήθευση της μεθόδου ανάλυσης που θα παρουσιασθεί, γίνεται σύγκριση με αποτελέσματα πειραμάτων, στα οποία η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται ταυτόχρονα με την εφαρμογή των κατακόρυφων φορτίων, όπως θα συμβεί και σε μία αναμενόμενη πυρκαγιά σε ένα κτήριο. Επίσης παρουσιάζονται επιλύσεις απλών φορέων και τα αποτελέσματά τους ελέγχονται για την ορθότητά τους.

Η διατήρηση της ακεραιότητας ενός φορέα έπειτα από μία πυρκαγιά είναι μείζονος σημασίας καθώς θα πρέπει να διασφαλίζεται η ασφαλής έξοδος των ατόμων από αυτήν αλλά και η δυνατότητα των πυροσβεστικών σωμάτων να εισέλθουν σε αυτή και να επιχειρήσουν την κατάσβεσή της. Ανάλογα λοιπόν με το είδος των αντικειμένων που φυλάσσονται σε μία κατασκευή, θα πρέπει να ορίζεται και ο βαθμός διατήρησης της ανθεκτικότητάς της έναντι πυρκαγιάς. Για παράδειγμα μία αποθήκη που προορίζεται για την φύλαξη εύφλεκτων ή ακόμα εκρηκτικών υλικών, που σημαίνει ότι η πιθανότητα ανάπτυξης πυρκαγιάς είναι υψηλή, είναι απαραίτητο να είναι ικανή να φέρει τα θερμικά φορτία. Επομένως είναι απαραίτητο να υπάρχει μία ακριβής μεθοδολογία για τον έλεγχο ενός φορέα έναντι πυρκαγιάς, έτσι ώστε από την μία να είναι δυνατόν από την φάση του σχεδιασμού να έχει μελετηθεί το ενδεχόμενο της πυρκαγιάς αλλά από την άλλη να είναι εφικτός ο έλεγχος υφιστάμενων κατασκευών υπό αυξημένες θερμοκρασίες.

Ωστόσο, δεν είναι σπάνιο, το φαινόμενο της πυρκαγιάς να εμφανίζεται έπειτα από έναν σεισμό. Η σεισμική δόνηση θα προκαλέσει ταλάντωση στην κατασκευή. Η ταλάντωση αυτή μπορεί με την σειρά της να προκαλέσει καταστροφές ή διαρροές σε εξοπλισμό εντός της κατασκευής, ο οποίος περιέχει εύφλεκτα υλικά, για παράδειγμα σε αγωγούς φυσικού αερίου. Η ανάφλεξη των υλικών αυτών μπορεί να προκύψει εύκολα από έναν σπινθήρα.

Το αποτέλεσμα της πυρκαγιάς έπειτα από έναν ισχυρό σεισμό είναι πολύ πιθανό να είναι πιο σημαντικό από αυτό που θα είχε η πυρκαγιά από μόνη της.

Καταρχάς, τυχόν καταστροφές στην γύρω περιοχή λόγω του σεισμού θα δυσκολέψουν την πρόσβαση της πυροσβεστικής και μπορεί να έχει υποστεί βλάβες και το αστικό υδρευτικό σύστημα, επομένως μπορεί να μην λειτουργήσουν τα παθητικά μέτρα πυρασφάλειας. Επίσης, η ρηγμάτωση του δομικού μέλους έχει μεγάλη σημασία στην διάχυση της θερμοκρασίας σε αυτό. Η πρόσθετη ένταση που θα προκληθεί από έναν ισχυρό σεισμό θα προκαλέσει και πρόσθετη ρηγμάτωση στα δομικά μέλη, επομένως η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας θα είναι εντονότερη.

Μέχρι στιγμής ο αντισεισμικός κανονισμός δεν περιλαμβάνει το φαινόμενο της πυρκαγιάς. Το πρώτο βήμα για την κατανόηση της σημασίας μίας πυρκαγιάς έπειτα από έναν σεισμό, είναι η κατανόηση της ίδιας της πυρκαγιάς. Δηλαδή πώς τα δομικά υλικά (σκυρόδεμα και χάλυβας) συμπεριφέρονται στην αύξηση της θερμοκρασίας, πώς η αύξηση της θερμοκρασίας ανακατανέμει την ένταση του φορέα και τί είδους παραμορφώσεις προκαλεί σε αυτόν.

1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΟΡΕΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

1.1 Χρήσιμη ορολογία και ορισμοί

Οι ορισμοί δίνονται από τον Ευροκώδικα 2: “Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα”
Μέρος 1-2: Γενικοί Κανόνες: Δομοστατικός σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς.

καύση

οποιαδήποτε χημική αντίδραση που συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας ίσως και φωτός και συνδυάζεται με την εμφάνιση φλόγας, με θερμά αέρια προϊόντα ή λάμψη. Οι καύσεις είναι εξώθερμες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, μεταξύ ενός τουλάχιστον καυσίμου και ενός τουλάχιστον οξειδωτικού παράγοντα.

καύσιμη ύλη

τα στερεά, υγρά ή αέρια σώματα που με την καύση τους παράγουν εκμεταλλεύσιμη θερμότητα.

πυροδιαμέρισμα

χώρος μέσα σε ένα κτήριο, ο οποίος εκτείνεται σε έναν ή περισσότερους ορόφους και ο οποίος περιβάλλεται από διαχωριστικά στοιχεία με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται η εξάπλωση της πυρκαγιάς πέρα από το πυροδιαμέρισμα κατά τη διάρκεια της σχετικής έκθεσης σε πυρκαγιά.

ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά

ικανότητα ενός φορέα, ενός τμήματος μιας κατασκευής ή ενός μέλους να πληροί τις απαιτούμενες λειτουργίες του (λειτουργία φέρουσας ικανότητας και/ή παρεμπόδιση της πυρκαγιάς) για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης, για συγκεκριμένη έκθεση σε πυρκαγιά και για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

ακεραιότητα (E)

ικανότητα του διαχωριστικού στοιχείου μιας κτηριακής κατασκευής, όταν εκτίθεται σε πυρκαγιά σε μία πλευρά, να αποτρέπει το πέρασμα φλογών στην μη εκτιθέμενη πλευρά.

μόνωση (I)

ικανότητα του διαχωριστικού στοιχείου μιας κτηριακής κατασκευής, όταν εκτίθεται σε πυρκαγιά σε μία πλευρά, να περιορίζει την άνοδο της θερμοκρασίας της μη εκτιθέμενης πλευράς σε καθορισμένα όρια.

διατήρηση της φέρουσας ικανότητας (R)

ικανότητα ενός φορέα ή ενός μέλους να αντιστέκεται σε συγκεκριμένες δράσεις κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, σύμφωνα με καθορισμένα κριτήρια.

σενάριο πυρκαγιάς

ποιοτική περιγραφή της πορείας μιας πυρκαγιάς με χρονικά αναγνωρίσιμα γεγονότα κλειδιά, τα οποία χαρακτηρίζουν την πυρκαγιά και την διαφοροποιούν από άλλες πιθανές πυρκαγιές. Τυπικά ορίζει την διαδικασία ανάφλεξης και επώασης της πυρκαγιάς, το στάδιο της απόσβεσης σε συνδυασμό με το κτηριακό περιβάλλον και τα συστήματα τα οποία θα επιδράσουν στην πορεία της πυρκαγιάς

καύσιμο φορτίο

σύνολο των θερμικών ενεργειών οι οποίες απελευθερώνονται/ εκλύονται από την καύση όλων των καυσίμων υλικών σε έναν χώρο (περιεχόμενα κτηρίου και στοιχεία κατασκευής).

πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά

κατάσταση πλήρους εμπλοκής όλων των καυσίμων επιφανειών σε μία πυρκαγιά μέσα σε έναν καθορισμένο χώρο.

φούντωμα

ταυτόχρονη ανάφλεξη όλων των καυσίμων φορτίων σε ένα διαμέρισμα

πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου

ονομαστική καμπύλη η οποία ορίζεται στο prEN 13501-2 για την αναπαράσταση ενός προσομοιώματος μιας πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς σε ένα διαμέρισμα.

πρότυπη ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά

ικανότητα ενός φορέα ή ενός τμήματος αυτού (συνήθως μόνο μελών) να πληροί τις απαιτούμενες λειτουργίες (διατήρηση φέρουσας ικανότητας και/ ή διαχωριστική λειτουργία), κατά την έκθεση σε θερμότητα σύμφωνα με την πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό καύσιμου φορτίου και για μια δεδομένη χρονική περίοδο.

καμπύλη πυρκαγιάς από καύση υδρογονανθράκων

ονομαστική καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου η οποία αναπαριστά τις επιδράσεις μιας πυρκαγιάς από καύση υδρογονανθράκων.

περιορισμένη πυρκαγιά

πυρκαγιά στην οποία εμπλέκεται μόνο μια περιορισμένη περιοχή του καύσιμου φορτίου στο διαμέρισμα.

1.2 Περιγραφή της πυρκαγιάς ως φυσικό φαινόμενο

Όπως περιγράφεται στο βιβλίο “Πρακτικός Σχεδιασμός κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα Έναντι Πυρκαγιάς”, μία τυπική πυρκαγιά σε ένα πυροδιαμέρισμα θεωρητικά αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις.

1.2.1 Η επώαση

Μια πυρκαγιά εκδηλώνεται σε ένα πυροδιαμέρισμα όταν η καύσιμη ύλη που βρίσκεται μέσα σε αυτό αποκτήσει ένα ικανό ποσό θερμικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, όπως από διαρροή υγραερίου που χρησιμοποιείται στο σπίτι, από ένα αναμμένο μάτι της κουζίνας, από αυτανάφλεξη ή ακόμα και από εμπρησμό.

Η ανάφλεξη του καύσιμου υλικού εξαρτάται από:

- Τα χαρακτηριστικά της πηγής ενέργειας.
- Το είδος και οι γεωμετρικές διαστάσεις των εκτιθέμενων καυσίμων υλικών.
- Ο χρόνος έκθεσης στην πηγή ενέργειας.

Μετά από την αρχική έναυση, η φωτιά παράγει θερμική ενέργεια, ένα μέρος της χρησιμεύει για την διατήρηση της καύσεως. Το υπόλοιπο ποσό μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας και μεταφοράς σε άλλα υλικά, τα οποία θερμαινόμενα αναφλέγονται, συνεισφέροντας στην περαιτέρω εξάπλωση της φωτιάς.

Η διαδικασία της ανάπτυξης και της εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα εξαρτάται από:

- Το μέγεθος, τον όγκο, την κατανομή, τη τοποθέτηση και τις ιδιότητες καύσεως του καύσιμου υλικού.
- Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πυροδιαμερίσματος.
- Το μέγεθος και το σχήμα του πυροδιαμερίσματος.
- Τα συστήματα κατασβέσεως.

Κατά το στάδιο της επώασης ένα στρώμα υπέρθερμων αερίων συγκεντρώνεται κάτω από την οροφή και, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να προκαλέσει απότομη εξάπλωση της πυρκαγιάς σε μεγάλα μέρη του καύσιμου υλικού.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φούντωμα και στην ουσία διαχωρίζει το στάδιο της επώασης από αυτό της πλήρους ανάπτυξης.

1.2.2 Η πλήρης ανάπτυξη

Το στάδιο αυτό είναι πρωτεύουσας σημασίας για την συμπεριφορά των φερόντων μελών της κατασκευής, όπως και για την εξάπλωση της πυρκαγιάς από πυροδιαμέρισμα σε πυροδιαμέρισμα, από όροφο σε όροφο ή και από κτήριο σε κτήριο.

Τα χαρακτηριστικά αυτού του κτηρίου εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- Ποσότητα και είδος του καύσιμου φορτίου στο πυροδιαμέρισμα.
- Πορώδες και σχήμα των κόκκων του καύσιμου υλικού.
- Τοποθέτηση του καύσιμου υλικού στο πυροδιαμέρισμα.
- Αερισμός του πυροδιαμερίσματος (ποσότητα αέρα στην μονάδα του χρόνου που εισέρχεται στο πυροδιαμέρισμα)
- Γεωμετρία του πυροδιαμερίσματος.
- Θερμικές ιδιότητες που περικλείουν το πυροδιαμέριμα.

Οι πλήρως αναπτυγμένες πυρκαγιές μπορούν να χωριστούν σε δύο διακριτές κατηγορίες:

- Αερο-ελεγχόμενες πυρκαγιές

Σε αυτή την κατηγορία η καύση ελέγχεται από τον αερισμό του πυροδιαμερίσματος και δεν εξαρτάται από τον τρόπο τοποθέτησης του καύσιμου υλικού.

- Καυσιμο-ελεγχόμενες πυρκαγιές

Σε αυτή την κατηγορία η καύση ελέγχεται από την ποσότητα του καύσιμου υλικού και είναι ανεξάρτητη από τον αερισμό του πυροδιαμερίσματος.

1.2.3 Η απόσβεση

Το τελευταίο στάδιο μιας πλήρους ανεπτυγμένης πυρκαγιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα εξαρτάται από την κατηγορία στην οποία ανήκει.

- Στις αερο-ελεγχόμενες πυρκαγιές η απόσβεση αρχίζει όταν ο διατιθέμενος αέρας για την καύση μειωθεί κάτω από κάποιο όριο.
- Στις καυσιμο-ελεγχόμενες πυρκαγιές η απόσβεση αρχίζει όταν καεί το μεγαλύτερο μέρος του καύσιμου υλικού μέσα στο πυροδιαμέρισμα.

Σημειώνεται όμως ότι παρόλο που στο συγκεκριμένο πυροδιαμέρισμα η πυρκαγιά αποσβένει, υπάρχει πιθανότητα να έχει διαδοθεί σε ένα γειτονικό πυροδιαμέρισμα.

1.3 Συμπεριφορά σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες κατά EN 1992-1-2: 2004

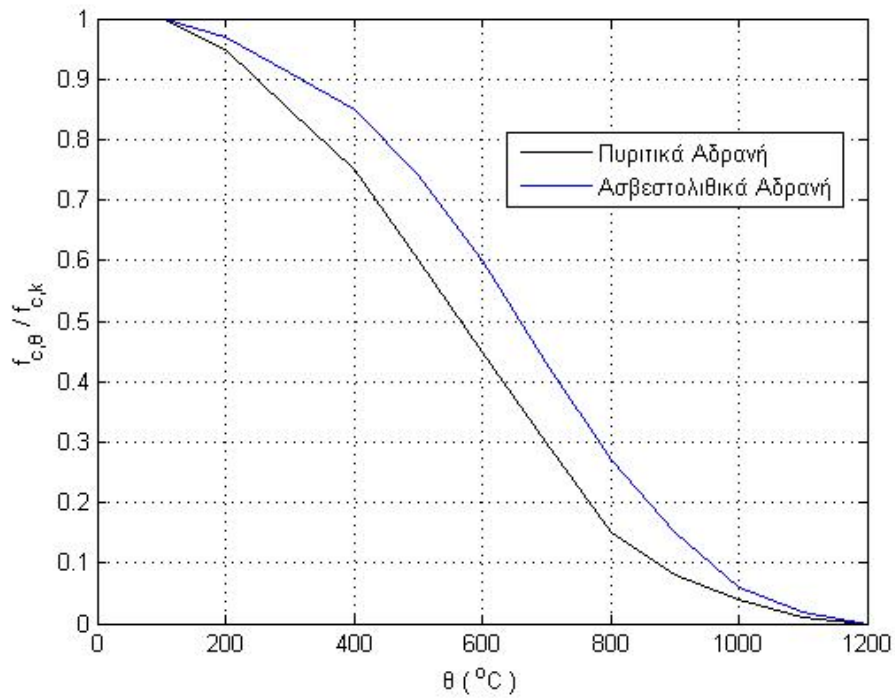
1.3.1 Μηχανικές ιδιότητες

1.3.1.1 Σκυρόδεμα σε θλίψη

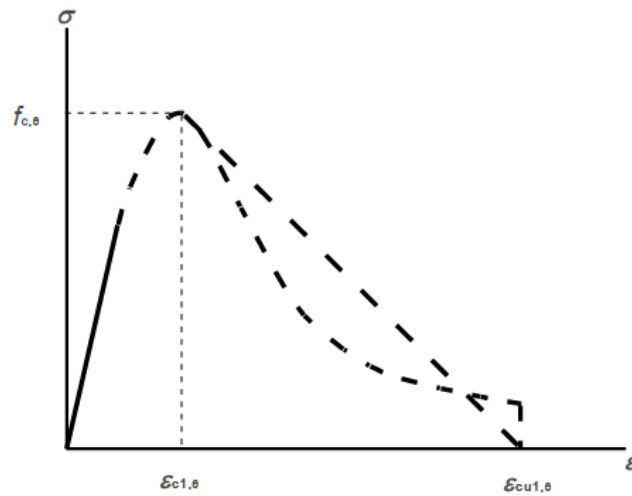
Ο Ευροκώδικας 2 Μέρος 1-2 ορίζει ότι η θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος καθορίζεται από τρία μεγέθη, τα οποία εξαρτώνται από το είδος των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν. Το είδος των αδρανών μπορεί να είναι πυριτικά ή ασβεστολιθικά, ενώ τα μεγέθη αυτά είναι η μέγιστη θλιπτική τάση $f_{c,\theta}$, η θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon_{c1,\theta}$ που αντιστοιχεί στην $f_{c,\theta}$ και η θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon_{cu1,\theta}$ που αντιστοιχεί σε μηδενική ορθή τάση του σκυροδέματος. Ο δείκτης θ συμβολίζει ότι τα παραπάνω μεγέθη μεταβάλλονται με την θερμοκρασία.

Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές αυτών δίνονται σε μορφή πίνακα.

Θερμο- κρασία θ [°C]	Πυριτικά αδρανή			Ασβεστολιθικά αδρανή		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-



Επίσης ο κανονισμός παρέχει και το μαθηματικό προσομοίωμα της σχέσης σ - ϵ του σκυροδέματος σε θλίψη, υπό υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1-1 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος

Πεδίο τιμών θλιπτικής παραμόρφωσης ϵ	Θλιπτική τάση $\sigma(\theta)$
$\epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta}$	$3 \epsilon f_{c,\theta} / [\epsilon_{c1,\theta}(2 + (\epsilon/\epsilon_{c1,\theta})^3)]$
$\epsilon_{c1,\theta} < \epsilon \leq \epsilon_{cu1,\theta}$	Υιοθετείται φθιτός κλάδος για αριθμητικούς λόγους. Επιτρέπεται η χρήση γραμμικού ή μη γραμμικού φθιτού κλάδου.

1.3.1.2 Σκυρόδεμα σε εφελκυσμό

Κανονικά, για θεωρήσεις υπέρ της ασφαλείας, η αντοχή σε εφελκυσμό πρέπει να αγνοείται. Ωστόσο, εάν είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη, αυτό γίνεται με τον εξής τρόπο.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί πτώση της εφελκυστικής αντοχής. Για αυτόν τον λόγο λοιπόν εισάγεται ο μειωτικός συντελεστής $k_{c,t}(\theta)$ και η πτώση αυτής δίνεται από την σχέση:

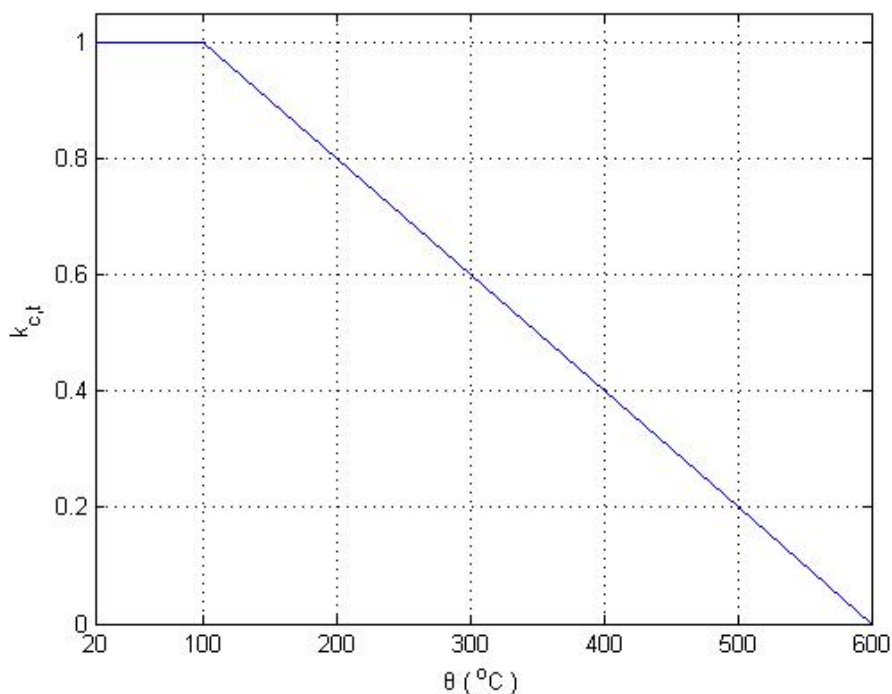
$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}$$

Όπου $f_{ck,t}$ η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή για θερμοκρασία 20 °C και $f_{ck,t}(\theta)$ η τιμή αυτής για υψηλότερη θερμοκρασία.

Εάν δεν διατίθενται ακριβέστερα στοιχεία, οι τιμές του $k_{c,t}(\theta)$ πρέπει να είναι οι εξής:

$$k_{c,t}(\theta) = 1.0 \quad \text{για } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$k_{c,t}(\theta) = 1,0 - 1,0 (\theta - 100) / 500 \quad \text{για } 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



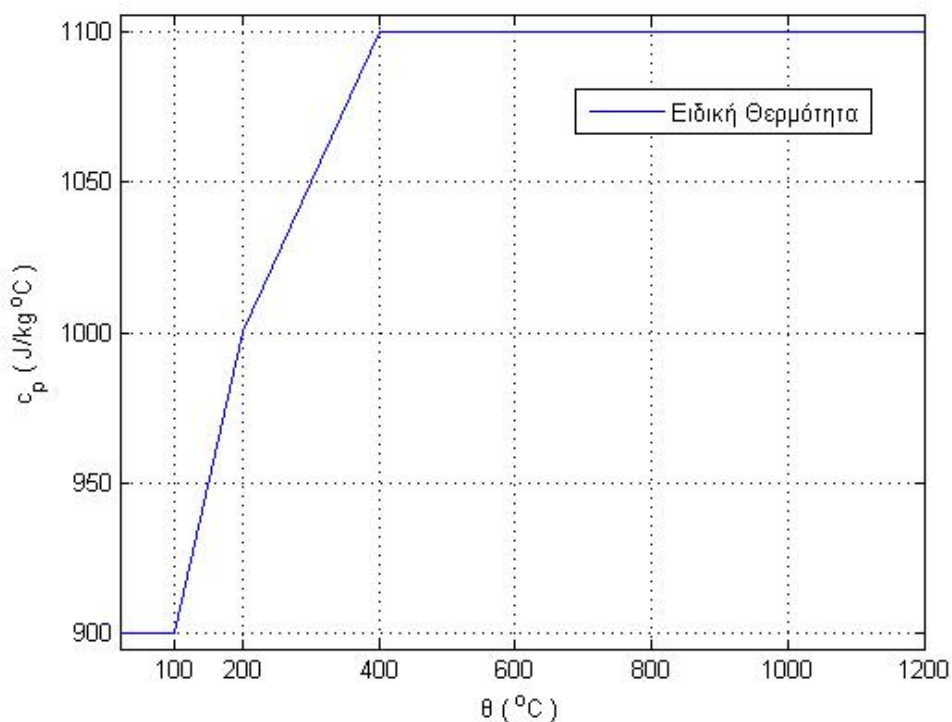
1.3.2 Θερμικές και φυσικές ιδιότητες

1.3.2.1 Ειδική θερμότητα

Η ειδική θερμότητα εκφράζει το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να αυξηθεί κατά 1 °C, 1kg του υλικού.

Η ειδική θερμότητα (specific heat) $c_p(\theta)$ ξηρού σκυροδέματος ($u=0\%$) με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή έχει τις εξής τιμές:

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



1.3.2.2 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα εκφράζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαχέεται η θερμότητα στο εσωτερικό του υλικού.

Η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) λ_c , σύμφωνα με τον κανονισμό, έχει τιμές μεταξύ ενός άνω και κάτω ορίου. Σημειώνεται ότι οι θερμικές αναλύσεις οι

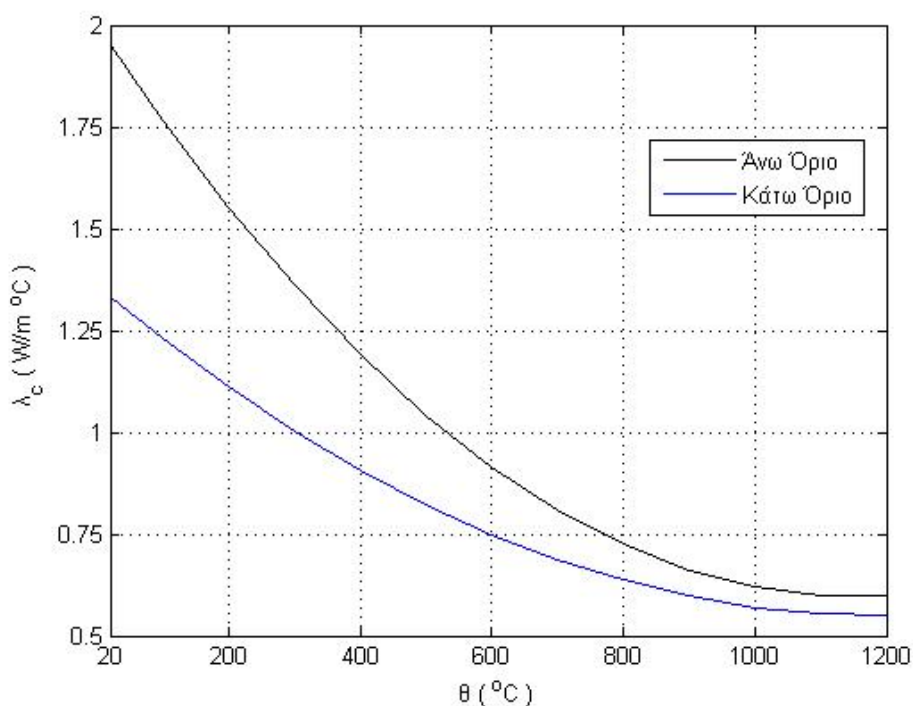
οποίες εξετάζονται σε παρακάτω κεφάλαιο όπως και αυτές του Παραρτήματος Α του EN 1992-1-2: 2004 είναι συμβατές με το κάτω όριο της θερμικής αγωγιμότητας.

Άνω όριο της θερμικής αγωγιμότητας λ_c :

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100)^2 \text{ W/m } ^\circ\text{C, για } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Κάτω όριο της θερμικής αγωγιμότητας λ_c :

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100)^2 \text{ W/m } ^\circ\text{C, για } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$



1.3.2.3 Θερμική μήκυνση

Η θερμική παραμόρφωση $\epsilon_c(\theta)$ του σκυροδέματος δίνεται από τις εξής σχέσεις:

Για πυριτικά αδρανή:

$$\epsilon_c(\theta) = -1,8 * 10^{-4} + 9 * 10^{-6} * \theta + 2,3 * 10^{-11} * \theta^3$$

$$\text{για } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_c(\theta) = 14 * 10^{-3}$$

$$\text{για } 700 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

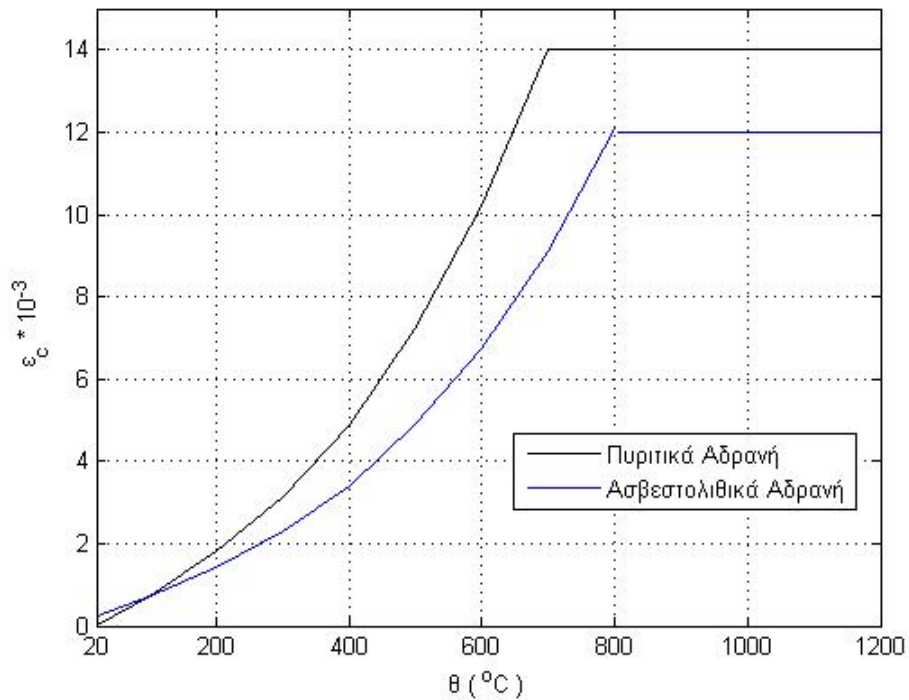
Για ασβεστολιθικά αδρανή:

$$\epsilon_c(\theta) = 1,2 * 10^{-4} + 6 * 10^{-6} * \theta + 1,4 * 10^{-11} * \theta^3$$

$$\text{για } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_c(\theta) = 12 * 10^{-3}$$

$$\text{για } 805 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Παραγωγίζοντας τις παραπάνω σχέσεις ως προς θ προκύπτει ο συντελεστής θερμικής διαστολής $\alpha_c(\theta)$ του σκυροδέματος, βασιζόμενοι στην σχέση $\varepsilon = \alpha \Delta\theta$. Προκύπτει δηλαδή ότι $\alpha(\theta) = d\varepsilon(\theta)/d\theta$

Οπότε:

Για πυριτικά αδρανή:

$$\alpha_c(\theta) = 9 * 10^{-6} + 6,9 * 10^{-11} * \theta^2$$

$$\text{για } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_c(\theta) = 0$$

$$\text{για } 700 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

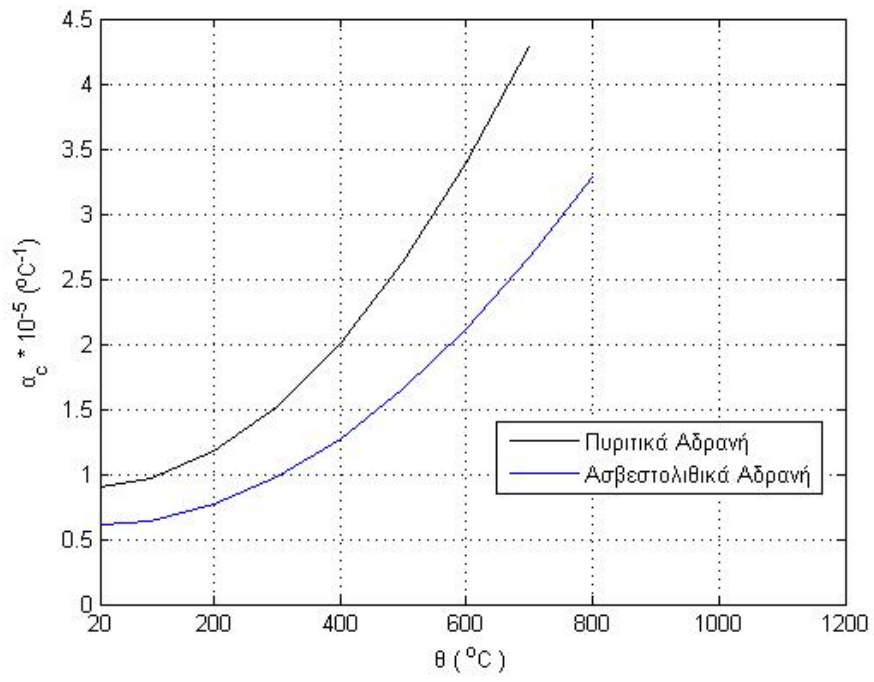
Για ασβεστολιθικά αδρανή:

$$\alpha_c(\theta) = 6 * 10^{-6} + 4,2 * 10^{-11} * \theta^2$$

$$\text{για } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 805 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_c(\theta) = 0$$

$$\text{για } 805 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$



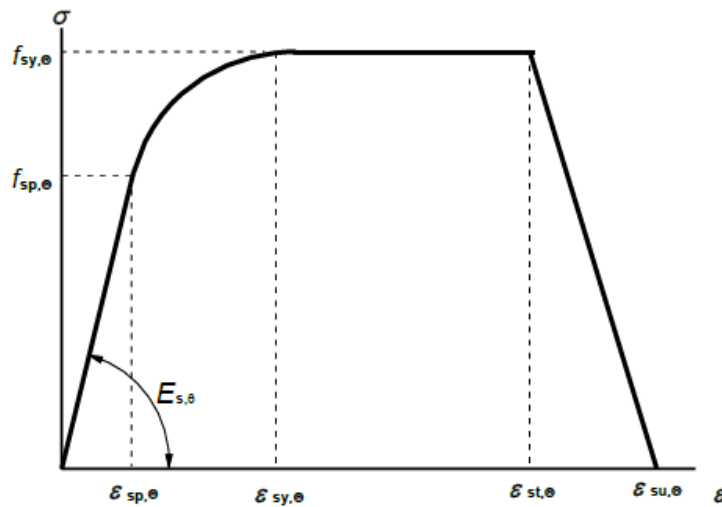
1.4 Συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σε αυξημένες θερμοκρασίες κατά EN 1-2: 2004

1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες

Ο Ευροκώδικας 2 Μέρος 1-2 δίνει σε μορφή πίνακα την πτώση της τάσης διαρροής ($f_{sy,\theta}$), της τάσης αναλογίας ($f_{sp,\theta}$) και του μέτρου ελαστικότητας ($E_{s\theta}$) του χάλυβα οπλισμού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.

Θερμο- κρασία θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s\theta} / E_s$	
	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	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	0,9	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Επίσης ο κανονισμός δίνει το μαθηματικό προσομοίωμα του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού

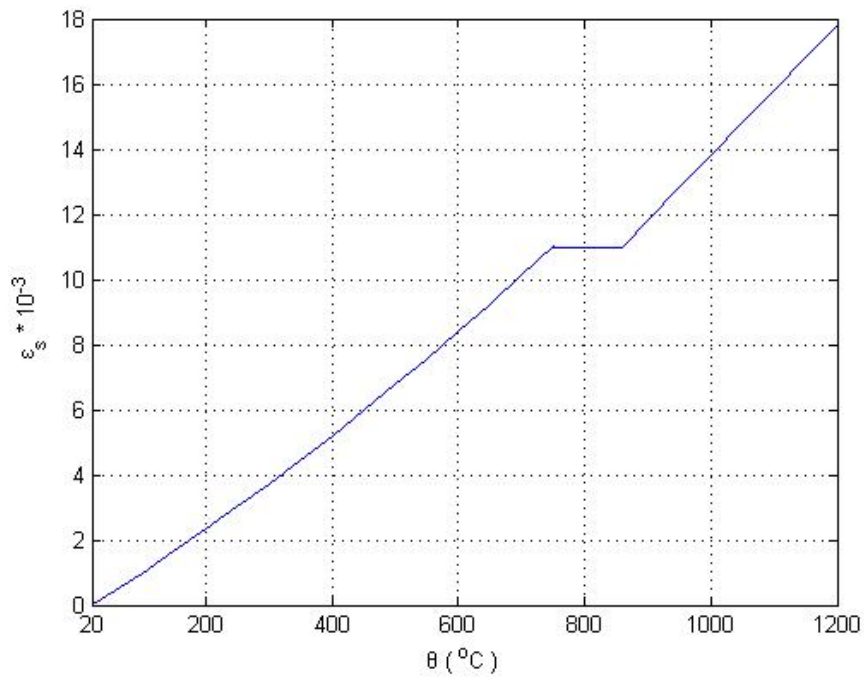
Πεδίο τιμών ε	Τάση $\sigma(\theta)$	Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/\alpha)[\alpha^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{\alpha[\alpha^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0

1.4.2 Θερμικές και φυσικές ιδιότητες

1.4.2.1 Θερμική μήκυνση

Η θερμική μήκυνση $\varepsilon_s(\theta)$ του χάλυβα οπλισμού, με αναφορά το μήκος του στους 20 °C, μπορεί να ληφθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(\theta) &= -2,416 * 10^{-4} + 1,2 * 10^{-5} * \theta + 0,4 * 10^{-8} * \theta^2 && \text{για } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750 \text{ }^\circ\text{C} \\ \varepsilon_s(\theta) &= 11 * 10^{-3} && \text{για } 750 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 860 \text{ }^\circ\text{C} \\ \varepsilon_s(\theta) &= -6,2 * 10^{-3} + 2 * 10^{-5} * \theta && \text{για } 860 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Ομοίως, παραγωγίζοντας ως προς θ:

$$\alpha_s(\theta) = 1,2 * 10^{-5} + 0,4 * 10^{-8} * \theta$$

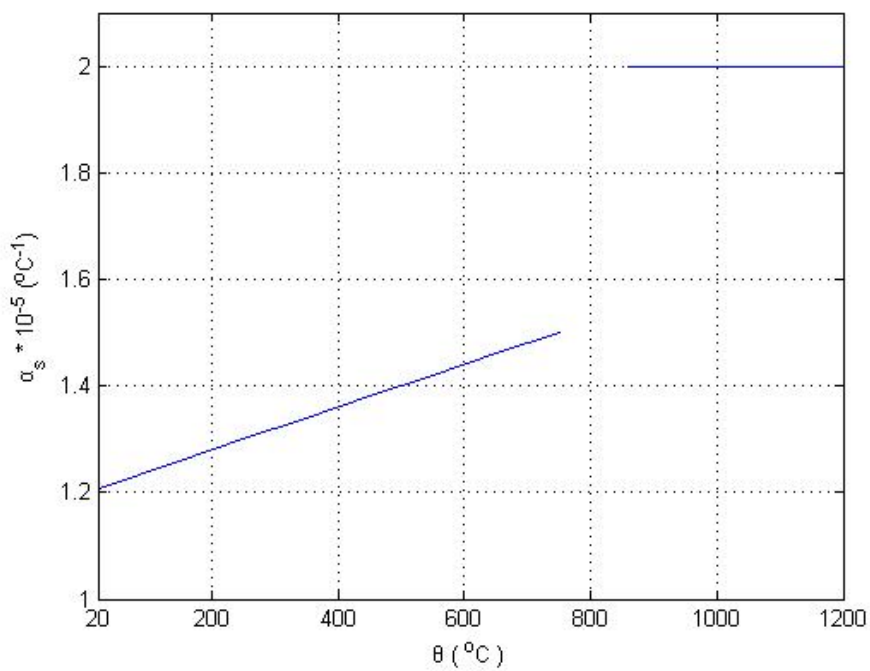
$$\text{για } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_s(\theta) = 0$$

$$\text{για } 750 \text{ } ^\circ\text{C} < \theta \leq 860 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_s(\theta) = 2 * 10^{-5}$$

$$\text{για } 860 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$



1.5 Θερμικές δράσεις

Ο κανονισμός αναφέρει ότι οι θερμικές δράσεις δίνονται από την καθαρή θερμική ροή στην επιφάνεια του μέλους, η οποία προκύπτει μέσω αγωγής και ακτινοβολίας από το καύσιμο υλικό.

Στην συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται η παραδοχή ότι στην επιφάνεια του μέλους που εκτίθεται σε πυρκαγιά, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι ίση με την θερμοκρασία των αερίων στο πυροδιαμέρισμα. Σύμφωνα με τον κανονισμό, οι θερμοκρασίες αερίων περιγράφονται από τις πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου. Η ονομαστική πρότυπη καμπύλη περιγράφει μία τυπική πυρκαγιά, ενώ η πρότυπη καμπύλη υδρογονανθράκων περιγράφει την πυρκαγιά που προέκυψε από καύση υδρογονανθράκων.

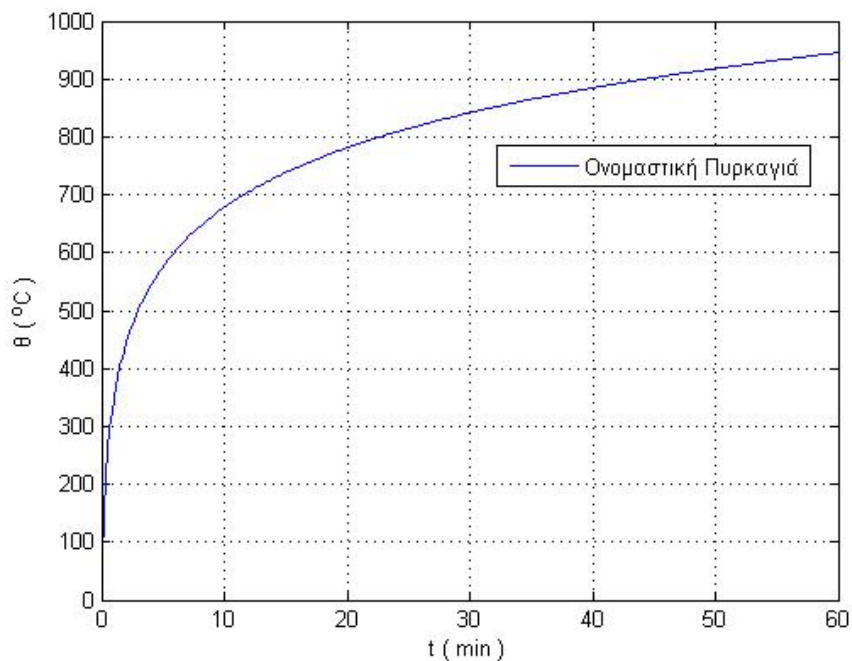
1.5.1 Ονομαστική καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου

$$\theta_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1.1)$$

Όπου:

$\theta_g(t)$ η συνάρτηση της θερμοκρασίας των αερίων εντός του πυροδιαμερίσματος

t ο χρόνος έκθεσης σε λεπτά (min)

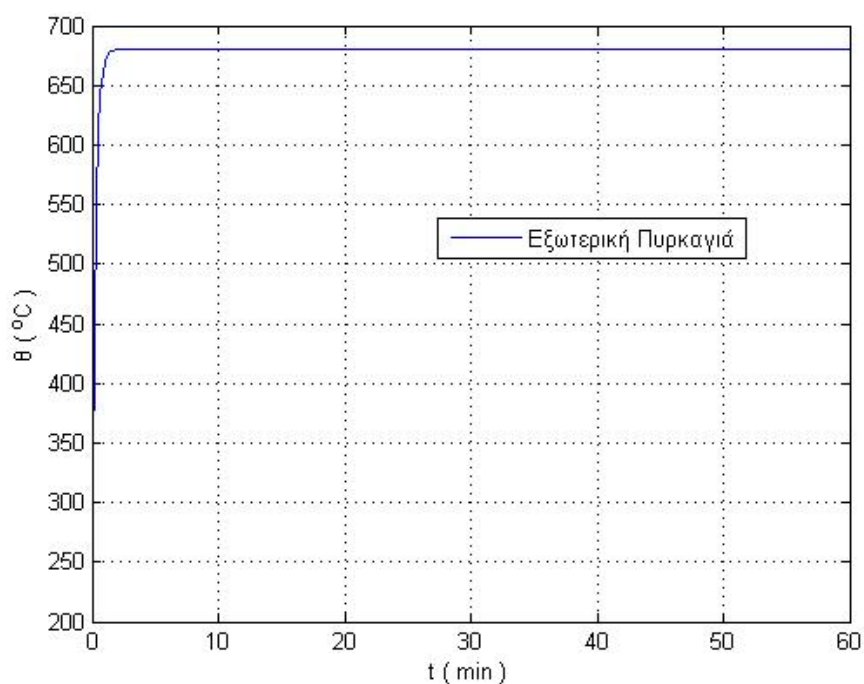


1.5.2 Καμπύλη εξωτερικής πυρκαγιάς

$$\theta_g(t) = 660 (1 - 0,687 e^{-32t} - 0,313 e^{-3,8t}) + 20 \quad (1.2)$$

Όπου:

$\theta_g(t)$ η συνάρτηση της θερμοκρασία των αερίων εντός του πυροδιαμερίσματος
t ο χρόνος έκθεσης σε λεπτά (min)

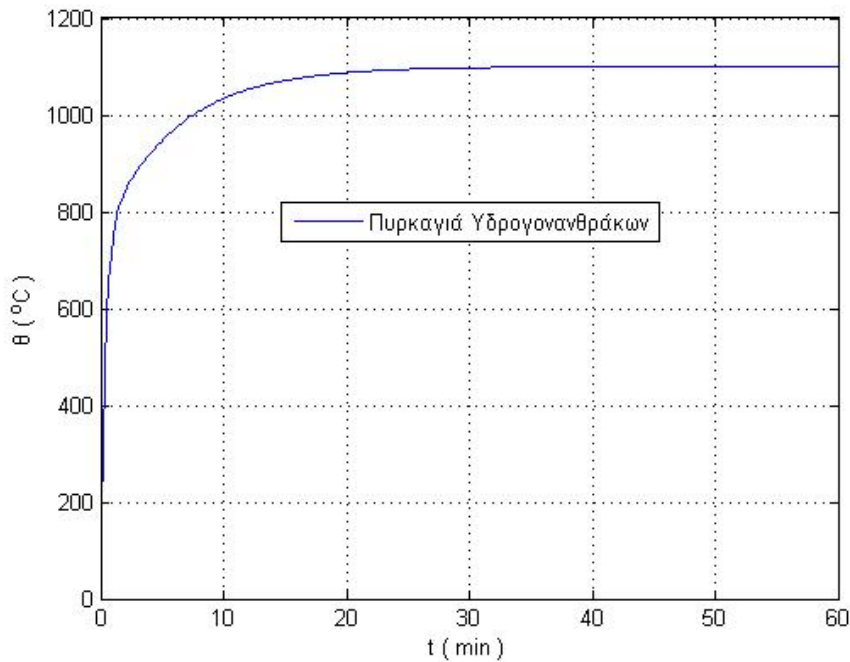


1.5.3 Καμπύλη υδρογονανθράκων

$$\theta_g(t) = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,625 e^{-2,5t}) + 20 \quad (1.3)$$

Όπου:

$\theta_g(t)$ η συνάρτηση της θερμοκρασία των αερίων εντός του πυροδιαμερίσματος
t ο χρόνος έκθεσης σε λεπτά (min)



1.6 Φιλοσοφία δομοστατικού σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς

Η ανάλυση του δομοστατικού σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς θα πρέπει να ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Την επιλογή των σχετικών σεναρίων σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς

Η επιλογή αυτή γίνεται με βάση της εκτίμησης του κινδύνου πυρκαγιάς. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς προκύπτει από την πιθανότητα πρόκλησης πυρκαγιάς ή ακόμα και έκρηξης σε ένα πυροδιαμέρισμα. Η πιθανότητα αυτή βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το είδος των υλικών που φυλάσσονται στον συγκεκριμένο χώρο, με την (μέγιστη) θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν αλλά και στην ύπαρξη ενός τουλάχιστον οξειδωτικού παράγοντα.

- Τον προσδιορισμό των αντίστοιχων πυρκαγιών σχεδιασμού .

Ανάλογα με το σενάριο πυρκαγιάς που έχει επιλεγεί, επιλέγεται και η αντίστοιχη πυρκαγιά σχεδιασμού. Η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου αντιπροσωπεύει μία τυπική πυρκαγιά ενώ η καμπύλη εξωτερικής πυρκαγιάς την εξάπλωση της φωτιάς στις εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου. Η καμπύλη καύσης των υδρογονανθράκων αντιπροσωπεύει το φαινόμενο ανάφλεξης υγρών καυσίμων όπως το πετρέλαιο και αερίων όπως το φυσικό αέριο. Ωστόσο μία τέτοια ανάφλεξη υδρογονανθράκων ή ακόμα και άλλων υλικών είναι αρκετά πιθανόν να συνοδεύεται από έκρηξη.

Το φαινόμενο της έκρηξης παρόλο που μπορεί να έχει οδυνηρά αποτελέσματα στην κατασκευή, δεν συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα ανάλυση.

- Τον υπολογισμό της εξέλιξης της θερμοκρασίας στα δομικά μέλη.

Ο υπολογισμός της εξέλιξης της θερμοκρασία στα δομικά μέλη γίνεται με την χρήση υπολογιστικών μεθόδων (πεπερασμένα στοιχεία), η οποία περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Εάν έχει επιλεγθεί μία από τις ονομαστικές καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου, η θερμοκρασιακή ανάλυση του φορέα γίνεται για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, χωρίς φάση ψύξης.

- Τον υπολογισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του φορέα που εκτίθεται σε πυρκαγιά.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί σε υπερστατικούς φορείς επιπρόσθετη ένταση αλλά και επιπρόσθετες μηκύνσεις. Η ένταση αυτή μπορεί να επιβαρύνει τις στηρίξεις αλλά να ανακουφίζει το άνοιγμα όσον αφορά τις ροπές (παράδειγμα: μία αμφίπακτη δοκός στην οποία η κάτω παρειά εκτίθεται σε πυρκαγιά).

Η μηχανική συμπεριφορά του φορέα θα είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης των συνηθισμένων φορτίων που φέρει χωρίς την ύπαρξη πυρκαγιάς μαζί με τα αποτελέσματα που θα έχει η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτόν, όπως η πτώση της αντοχής των υλικών και η ύπαρξη θερμικών διαστολών. Για την ρεαλιστική προσομοίωση του φαινομένου, η μηχανική και η θερμική ανάλυση πρέπει να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, συνυπολογίζοντας την επιρροή της θερμοκρασίας στις ιδιότητες των υλικών.

Καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς, η ανθεκτικότητα του φορέα θα πρέπει να διασφαλίζεται,

εξετάζοντας τον χρόνο:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

ή την ανθεκτικότητα:

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

ή την θερμοκρασία:

$$\Theta_d \geq \Theta_{cr,d}$$

όπου:

$t_{fi,d}$ η τιμή σχεδιασμού της ανθεκτικότητας στην πυρκαγιά

$t_{fi,requ}$ ο απαιτούμενος χρόνος ανθεκτικότητας στην πυρκαγιά

$R_{fi,d,t}$ η τιμή σχεδιασμού της ανθεκτικότητας στην πυρκαγιά του μέλους σε κατάσταση πυρκαγιάς σε χρόνο t

$E_{fi,d,t}$ η τιμή σχεδιασμού των συναφών αποτελεσμάτων των δράσεων σε κατάσταση πυρκαγιάς σε χρόνο t

Θ_d η τιμή σχεδιασμού της θερμοκρασίας των υλικών

$\Theta_{cr,d}$ η τιμή σχεδιασμού της κρίσιμης θερμοκρασίας των υλικών

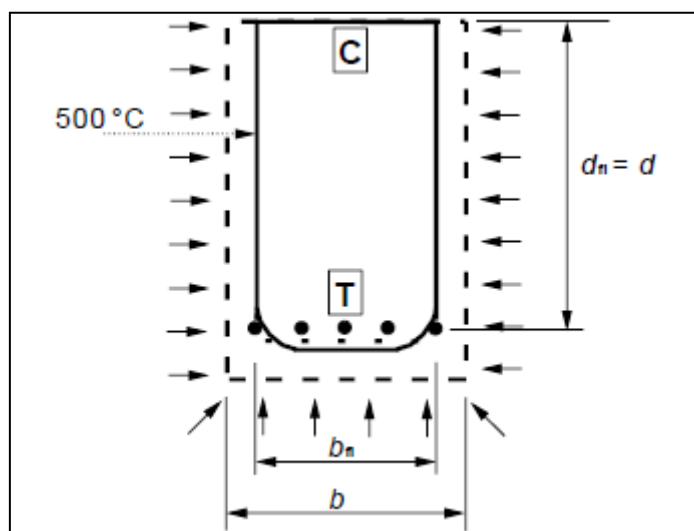
1.7 Ανάλυση υπό πυρκαγιά κατά Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2

Ο κανονισμός διακρίνει τις μεθόδους ανάλυσης υπό πυρκαγιά σε απλοποιημένες και σε προχωρημένες.

Στο Παράρτημα Β του Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2 περιγράφεται η μέθοδος της ισόθερμης των 500 °C, η οποία ανήκει στις απλοποιημένες μεθόδους.

Η μέθοδος αυτή γίνεται στο επίπεδο της διατομής του εκτιθέμενου μέλους σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή της πυρκαγιάς.

Αρχικά γίνεται η θερμοκρασιακή ανάλυση της διατομής μέσω της οποίας προσδιορίζεται η ισόθερμη των 500 °C. Γίνεται η θεώρηση ότι όταν η θερμοκρασία του σκυροδέματος υπερβεί αυτή την θερμοκρασία η (θλιπτική και εφελκυστική) αντοχή του μηδενίζεται. Επομένως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-3 μεταβάλλεται το πάχος (b) και το στατικό ύψος (d) της διατομής ελέγχου ενώ παράλληλα πρέπει να τροποποιηθεί αντίστοιχα και η αντοχή του οπλισμού.



Σχήμα 1-3: Διατομή ελέγχου στην Μέθοδο της Ισόθερμης των 500 °C

Η ροπή αντοχής σε συνδυασμό με την επιβαλλόμενη αξονική δύναμη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις ισοδυναμίας των δυνάμεων και ροπών, έχοντας ως παραδοχή την επιπεδότητα της διατομής.

Οι προχωρημένες μέθοδοι υπολογισμού περιλαμβάνουν τον έλεγχο ενός μέλους του φορέα, ένα τμήμα του ή το σύνολό του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την συνολική ανάλυση του φορέα.

Στον Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2 αναφέρεται:

“ Όταν γίνεται συνολική ανάλυση του φορέα στην κατάσταση πυρκαγιάς, θα λαμβάνονται υπόψη ο πιθανός τρόπος αστοχίας υπό συνθήκες έκθεσης σε πυρκαγιά, η μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών και της δυσκαμψίας των μελών με τη θερμοκρασία και το αποτέλεσμα των θερμικών διαστολών και παραμορφώσεων (έμμεσες δράσεις πυρκαγιάς).”

Από το απόσπασμα αυτό συνάγεται ότι τα καταστατικά προσομοιώματα των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών θα πρέπει καταρχάς να έχουν τέτοιες σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων ώστε να προσεγγίζουν τις αντίστοιχες σχέσεις που δίνονται από τον Ευροκώδικα 2, αλλά παράλληλα να έχουν ενσωματωμένη την επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας στην αντοχή και στις θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα).

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Περιγραφή των καταστατικών προσομοιωμάτων του σκυροδέματος και του χάλυβα

Όπως προκύπτει και από το 1^ο κεφάλαιο, ένα ρεαλιστικό καταστατικό προσομοίωμα για κάθε ένα δομικό θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επιρροή της μεταβολής της θερμοκρασίας στις μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες αυτού.

Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος που επηρεάζονται από την μεταβολή (αύξηση στην συγκεκριμένη περίπτωση) είναι η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή όπως και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις. Οι θερμικές ιδιότητες που μεταβάλλονται είναι η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα. Ενώ επίσης μεταβάλλεται και ο συντελεστής θερμικής διαστολής.

Στην πραγματικότητα μεταβάλλονται και άλλες ιδιότητες, όπως η υγρασία του σκυροδέματος, μιας και λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας εξατμίζεται το νερό που βρίσκεται στο σώμα του. Λόγω της μείωσης της υγρασίας του σκυροδέματος, επηρεάζεται και το φαινόμενο του ερπυσμού. Ωστόσο η προσομοίωση αυτών των μεταβολών δεν είναι εφικτή προς το παρόν.

Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι το MAT_EC2, όπως ονομάζεται από το LS-DYNA. Ο χρήστης εισάγει την πυκνότητα του υλικού, την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και το είδος του σκυροδέματος και εάν πρόκειται για περισφυγμένο σκυρόδεμα, την αυξημένη θλιπτική αντοχή.

Τα είδη του σκυροδέματος που περιλαμβάνει το MAT_EC2 είναι τα εξής:

1. με πυριτικά αδρανή
2. με ασβεστολιθικά αδρανή
3. ανεπηρέαστο από μεταβολή της θερμοκρασίας
4. ελαφροσκυρόδεμα
5. ινοπλισμένο σκυρόδεμα
6. ανεπηρέαστο από μεταβολή της θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τον κώδικα Mander

Τα δύο πρώτα είδη χρησιμοποιούν τις σχέσεις του Ευροκώδικα 2 που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, δηλαδή:

1. τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης

2. τις τιμές μείωσης της αντοχής με αύξηση της θερμοκρασίας ανάλογα με το είδος του υλικού
3. τις τιμές της θερμικής μήκυνσης συναρτήσει της θερμοκρασίας

Για να πραγματοποιηθεί όμως η θερμοκρασιακή ανάλυση πρέπει να οριστούν οι θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος (ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα) οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο MAT_EC2. Για τον λόγο αυτό ορίζεται το ισότροπο υλικό MAT_THERMAL_ISOTROPIC_TD_LC στο οποίο ο χρήστης ορίζει δύο πίνακες με τις τιμές της θερμοκρασίας και τις αντίστοιχες τιμές της ειδικής θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται από τις αντίστοιχες σχέσεις του Ευροκώδικα 2.

Είναι δυνατόν να ορισθεί ένα παρόμοιο υλικό στο οποίο οι δύο θερμικές ιδιότητες είναι σταθερές. Για να είναι όμως πιο ρεαλιστική η προσομοίωση, λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της θερμοκρασίας σε αυτά.

Η συμπεριφορά του χάλυβα υπό αυξημένες θερμοκρασίες μπορεί να προσομοιωθεί με δύο τρόπους.

Ο πρώτος είναι χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό MAT_EC2 στο οποίο όμως οι παραπάνω ιδιότητες του σκυροδέματος θα έχουν την τιμή μηδέν και θα οριστούν από τον χρήστη το μέτρο ελαστικότητας, η τάση διαρροής, ο λόγος Poisson και το είδος του χάλυβα οπλισμού σε θερμοκρασία 20 °C.

Τα είδη του χάλυβα οπλισμού που περιλαμβάνονται είναι τα εξής:

1. θερμής εξέλασης
2. ψυχρής κατεργασίας
3. ανεπηρέαστο από μεταβολή της θερμοκρασίας

Οι δύο πρώτες επιλογές χρησιμοποιούν τις αντίστοιχες σχέσεις του Ευροκώδικα 2 για τις μηχανικές ιδιότητες και την επιρροή της θερμοκρασίας σε αυτές. Ομοίως, οι ιδιότητες αυτές είναι:

1. οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης
2. οι τιμές μείωσης της αντοχής με αύξηση της θερμοκρασίας ανάλογα με το είδος του υλικού
3. οι τιμές της θερμικής μήκυνσης συναρτήσει της θερμοκρασίας

Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας το MAT_EC2 είναι δυνατόν να προσομοιωθεί το οπλισμένο σκυρόδεμα εισάγοντας τα μεγέθη του σκυροδέματος, του χάλυβα και το γεωμετρικό ποσοστό του χάλυβα στην διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του

στοιχείου, προσομοιώνοντας έτσι τον διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό αντίστοιχα. Η επιλογή μπορεί όμως να έχει μικρότερο υπολογιστικό κόστος καθώς δεν θα χρησιμοποιηθούν ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία για τον οπλισμό, η ακρίβεια της λύσης είναι σαφώς μικρότερη καθώς δεν είναι δυνατό να ορισθεί η απόσταση του οπλισμού από τις παρειές αλλά και η δύναμη που θα παραλάβει αυτός. Επομένως για την προσομοίωση του χάλυβα εισάγεται η τιμή μηδέν στις ιδιότητες του σκυροδέματος, οι επιθυμητές τιμές στις ιδιότητες του χάλυβα και το ποσοστό του οπλισμού θα είναι 100%. Τέλος, το προσομοίωμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε πεπερασμένα στοιχεία κελύφους και σε ραβδωτά στοιχεία κατά Hughes-Liu, κάτι το οποίο περιορίζει το πώς γίνεται η ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι ενότητα 3.3 περιγράφει αυτή τη διαδικασία.

Ο δεύτερος τρόπος προσομοίωσης του χάλυβα οπλισμού είναι μέσω του καταστατικού προσομοιώματος `MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL`. Στο προσομοίωμα αυτό ο χρήστης εισάγει οκτώ τιμές της θερμοκρασίας που αναμένεται να συναντήσει ο οπλισμός κατά την έκθεσή του στην πυρκαγιά και τις αντίστοιχες τιμές της τάσης διαρροής, του μέτρου ελαστικότητας, του μέτρου κράτυνσης, του λόγου Poisson και του συντελεστή θερμικής διαστολής. Οι τιμές των μεγεθών αυτών λαμβάνονται από τις αντίστοιχες σχέσεις του Ευροκώδικα 2.

Όπως αναφέρθηκε για το προσομοίωμα του σκυροδέματος, έτσι και για τον χάλυβα, θα πρέπει να οριστεί ένα υλικό για τις θερμικές ιδιότητες αυτού. Επειδή γίνεται η θεώρηση ότι ο χάλυβας έχει την ίδια θερμοκρασία με το περιβάλλον σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται οι ίδιοι πίνακες για το `MAT_ISOTROPIC_TD_LC`.

Το `MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL` χρησιμοποιείται για ραβδωτά στοιχεία κατά Hughes-Liu και για ραβδωτά στοιχεία αξονικής έντασης-παραμόρφωσης. Παρόλο που η κατηγορία των ραβδωτών στοιχείων αξονικής έντασης-παραμόρφωσης (truss elements) έχει πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος από την κατηγορία Hughes-Liu δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα καθώς αυτό το ορίζει μία άλλη εντολή του λογισμικού, με την οποία αφαιρούνται τα φορτία της βαρύτητας (`LOAD_GRAVITY`).

Οι δύο τρόποι προσομοίωσης του χάλυβα είναι σε αρκετό βαθμό ισοδύναμοι.

2.2 Παραδοχές της ανάλυσης υπό πυρκαγιά

Οι παραδοχές της ανάλυσης έχουν επιλεχθεί έτσι ώστε η προσομοίωση του φαινομένου να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική.

- Οι επιφάνειες του φορέα που εκτίθενται στην πυρκαγιά αναπτύσσουν θερμοκρασία ίση με αυτή των θερμών αερίων του πυροδιαμερίσματος.
- Οι επιφάνειες του φορέα που δεν εκτίθενται στην πυρκαγιά έχουν σταθερή θερμοκρασία και ίση με αυτή του περιβάλλοντος αέρα (20 °C).
- Δεν λαμβάνεται υπόψη η ροή θερμότητας από την καύση εντός του πυροδιαμερίσματος.
- Δεν υπάρχει (εκ των πραγμάτων) παραγωγή θερμότητας από τα μέλη που εκτίθενται στην πυρκαγιά.
- Δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί η εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος.
- Η θερμική ανάλυση γίνεται ταυτόχρονα με την μηχανική ανάλυση (συζευγμένη ανάλυση).
- Είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η μεταβολή των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων των υλικών με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία πρέπει να είναι όσον το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα.
- Δεν είναι εφικτό να γίνει προσομοίωση τρισδιάστατων κατασκευών, μόνο επίπεδων φορέων. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοναδικό υλικό του LS-DYNA που προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες εφαρμόζεται σε πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements).
- Η πυρκαγιά είναι τυχηματική δράση, οπότε τα κατακόρυφα φορτία προκύπτουν από τον συνδυασμό $G + \psi Q$ ($\psi = 0,3$).
- Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει και την τάση συνάφειας, μιας και αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και από την μορφή του χάλυβα οπλισμού (ύπαρξη οδοντώσεων οι οποίες αλλοιώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας). Το φαινόμενο αυτό δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με το συγκεκριμένο λογισμικό, επομένως θεωρείται πλήρης συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα καθ' όλη την διάρκεια της πυρκαγιάς.
- Η διατομή του χάλυβα οπλισμού είναι πολύ μικρή σε σχέση με ολόκληρη την διατομή του μέλους ($\rho \approx 0,01\%$) οπότε θεωρείται ότι η θερμοκρασία του χάλυβα είναι ίση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος σκυροδέματος και επίσης η θερμοκρασία του χάλυβα δεν μεταβάλλεται καθ' ύψος της διατομής του. Οπότε οι

θερμικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού (ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα) ταυτίζονται με αυτές του σκυροδέματος.

2.3 Περιγραφή των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.1, μία ανάλυση με ταυτόχρονη επίλυση του δυναμικού και του θερμικού προβλήματος δεν είναι εφικτό (προς τη στιγμή που γράφεται η παρούσα διπλωματική εργασία) να γίνει με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, είναι εφικτό να γίνει με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Επομένως το σκυρόδεμα προσομοιώνεται με τετραπλευρικά στοιχεία κελύφους και ο χάλυβας με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία.

2.3.1 Ραβδωτό στοιχείο κατά Hughes-Liu

Το ραβδωτό στοιχείο κατά Hughes-Liu βασίζεται στον εκφυλισμό του ισοπαραμετρικού εξαεδρικού στοιχείου οκτώ κόμβων. Οι εξισώσεις σχήματος του ισοπαραμετρικού εξαεδρικού στοιχείου είναι:

$$x(\xi, \eta, \zeta) = N_\alpha(\xi, \eta, \zeta) x_\alpha \quad (2.1)$$

$$N_\alpha(\xi, \eta, \zeta) = \frac{(1 + \xi_\alpha \xi)(1 + \eta_\alpha \eta)(1 + \zeta_\alpha \zeta)}{8} \quad (2.2)$$

όπου x είναι ένα αυθαίρετο σημείο του στοιχείου, (ξ, η, ζ) είναι οι παραμετρικές συντεταγμένες, x_α είναι οι καθολικές συντεταγμένες του σημείου α , και N_α οι συναρτήσεις σχήματος υπολογισμένες στο σημείο α .

Στην γεωμετρία του ραβδωτού στοιχείου, το ξ καθορίζει τον άξονα κατά μήκος του στοιχείου και το ζεύγος (η, ζ) καθορίζει ένα σημείο στην διατομή του στοιχείου. Για τον εκφυλισμό της γεωμετρίας του εξαεδρικού στοιχείου οκτώ κόμβων σε αυτή ενός ραβδωτού στοιχείου δύο κόμβων, οι τέσσερις κόμβοι για $\xi = -1$ και για $\xi = 1$ συνδυάζονται σε έναν μοναδικό κόμβο με τρεις μεταφορικούς και τρεις στροφικούς βαθμούς ελευθερίας.

Ο μετασχηματισμός του εξαπλευρικού στοιχείου σε ραβδωτό διακρίνεται σε τρία μέρη:

$$x(\xi, \eta, \zeta) = \bar{x}(\xi) + X(\xi, \eta, \zeta) = \bar{x}(\xi) + X_\zeta(\xi, \zeta) + X_\eta(\xi, \eta) \quad (2.3)$$

όπου \bar{x} το διάνυσμα θέσης ενός σημείου του άξονα αναφοράς του ραβδωτού στοιχείου, X_ζ και X_η τα διανύσματα θέσης στο σημείο \bar{x} του άξονα που ορίζουν τις διευθύνσεις της ίνας στο σημείο αυτό.

Πιο συγκεκριμένα,

$$\bar{x}(\xi) = N_\alpha(\xi) \bar{x}_\alpha \quad (2.4a)$$

$$X_\eta(\xi, \eta) = N_\alpha(\xi) X_{\eta\alpha}(\eta) \quad (2.4b)$$

$$X_\zeta(\xi, \zeta) = N_\alpha(\xi) X_{\zeta\alpha}(\zeta) \quad (2.4c)$$

Με αυτή την περιγραφή, οποιοδήποτε σημείο του άξονα αναφοράς \bar{x} παρεμβάλλονται από συνάρτηση σχήματος $N(\xi)$. Σημεία εκτός του άξονα \bar{x} παρεμβάλλονται επιπλέον από παρόμοιες συναρτήσεις σχήματος, $X_{\eta\alpha}(\eta)$ και $X_{\zeta\alpha}(\zeta)$ όπου

$$X_{\eta\alpha}(\eta) = z_\eta(\eta) \hat{X}_{\eta\alpha} \quad (2.5a)$$

$$z_\eta(\eta) = N_+(\eta) z_{\eta\alpha}^+ + N_-(\eta) z_{\eta\alpha}^- \quad (2.5b)$$

$$N_+(\eta) = \frac{(1+\eta)}{2} \quad (2.5c)$$

$$N_-(\eta) = \frac{(1-\eta)}{2} \quad (2.5d)$$

$$X_{\zeta\alpha}(\zeta) = z_\zeta(\zeta) \hat{X}_{\zeta\alpha} \quad (2.6a)$$

$$z_\zeta(\zeta) = N_+(\zeta) z_{\zeta\alpha}^+ + N_-(\zeta) z_{\zeta\alpha}^- \quad (2.6b)$$

$$N_+(\zeta) = \frac{(1+\zeta)}{2} \quad (2.6c)$$

$$N_-(\zeta) = \frac{(1-\zeta)}{2} \quad (2.6d)$$

Όπου $z_\eta(\eta)$ και $z_\zeta(\zeta)$ καλούνται «συναρτήσεις πλάτους».

2.3.2 Τετραπλευρικό στοιχείο κελύφους Belytschko-Lin-Tsay οκτώ κόμβων

Η επιφάνεια αναφοράς του στοιχείου κελύφους ορίζεται από την θέση των τεσσάρων γωνιακών κόμβων του. Το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου σε τοπικούς άξονες ορίζεται μέσω των συντεταγμένων των γωνιακών κόμβων. Το σύστημα συντεταγμένων που λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα δευτέρας τάξης κατασκευάζεται υπολογίζοντας αρχικά το μοναδιαίο διάνυσμα στην διεύθυνση της κύριας διαγωνίου του στοιχείου:

$$\hat{e}_3 = \frac{s_3}{\|s_3\|}$$
$$\|s_3\| = \sqrt{s_{31}^2 + s_{32}^2 + s_{33}^2}$$
$$s_3 = r_{31} \times r_{42}$$

όπου το σύμβολο ($\hat{\cdot}$) δηλώνει το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

2.4 Μαθηματική θεωρία του προβλήματος της πυρκαγιάς

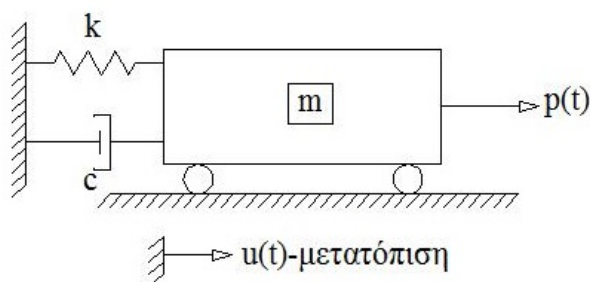
Κατά τη διάρκεια μίας πυρκαγιάς σε έναν φορέα τα είδη των φορτίσεων που ασκούνται σε αυτόν είναι δύο. Το πρώτο είναι τα κατακόρυφα φορτία που οφείλονται στο ίδιο βάρος και στα τυχόν πρόσθετα κινητά φορτία. Το δεύτερο είναι οι δράσεις που προκαλούνται στον φορέα λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Επομένως είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το πώς διαχέεται η θερμοκρασία στον φορέα που εξετάζουμε, δηλαδή πέρα από το πρόβλημα των κατακόρυφων φορτίων θα πρέπει να επιλυθεί και αυτό της διάχυσης της θερμοκρασίας σε ένα συνεχές μέσο.

Παρόλο όμως που φαίνεται ότι αυτά τα δύο προβλήματα είναι ανεξάρτητα, δηλαδή το μέγεθος των κατακόρυφων φορτίων δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία, ή το αντίστροφο, η τελική απόκριση του φορέα θα είναι απόρροια της ταυτόχρονης εφαρμογής των δύο καθώς όπως έχει αναφερθεί οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Για τον λόγο αυτό η ανάλυση χαρακτηρίζεται αρχικά ως συζευγμένη (coupled analysis), δηλαδή το μηχανικό και το θερμικό πρόβλημα επιλύεται ταυτόχρονα.

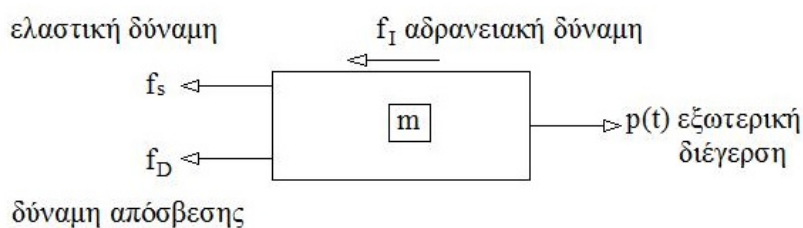
Ένα ακόμα λοιπόν χαρακτηριστικό της ανάλυσης είναι ο χρόνος. Μία πυρκαγιά, κάθε φορά, έχει χρονική διάρκεια και παράλληλα η θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι συνάρτηση του χρόνου (π.χ. πρότυπη πυρκαγιά). Επομένως είναι απαραίτητο η ανάλυση να γίνεται εν χρόνω (transient analysis), δηλαδή η εφαρμογή των κατακόρυφων φορτίων είναι ένα δυναμικό πρόβλημα.

2.4.1 Το δυναμικό πρόβλημα

Έστω ο μονοβάθμιος ταλαντωτής του Σχήματος 3-1.



Σχήμα 2-1: Μονοβάθμιος Ταλαντωτής μάζας m



Σχήμα 2-2: Δυνάμεις που ασκούνται στην μάζα m

Η εξίσωση ισορροπίας του σώματος λαμβάνεται από την αρχή του d'Alembert :

$$f_I + f_D + f_s = p(t) \quad (2.7)$$

Όπου:

$$f_I = m \ddot{u}, \quad \ddot{u} = \frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$f_D = c \dot{u}, \quad \dot{u} = \frac{du}{dt}, \quad c \text{ η σταθερά απόσβεσης}$$

$$f_s = k u \quad k \text{ η δυσκαμψία του ταλαντωτή}$$

Εάν η δυσκαμψία του ταλαντωτή είναι σταθερή, εάν δηλαδή έχει ελαστική συμπεριφορά, η εξίσωση ισορροπίας είναι γραμμική δευτέρας τάξης:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = p(t) \quad (2.8)$$

Ανάλογα με το είδος της εξωτερικής διέγερσης $p(t)$, υπάρχουν αντίστοιχες σχέσεις για την λύση $u(t)$.

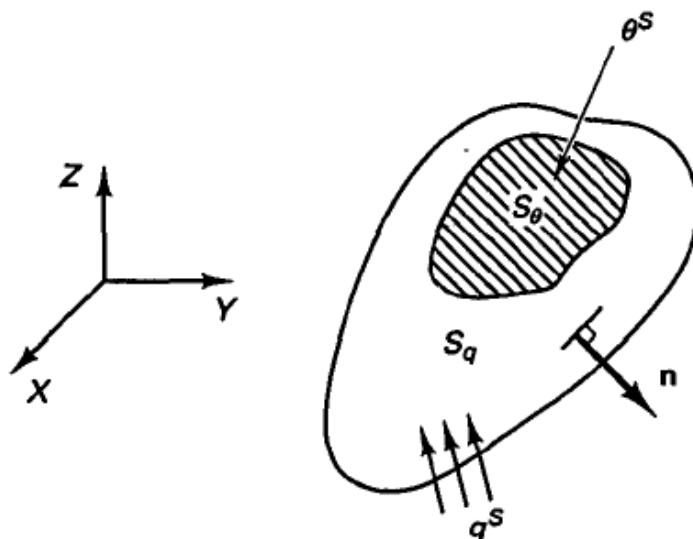
Εάν η δυσκαμψία του ταλαντωτή εξαρτάται από την μετατόπιση u , εάν δηλαδή έχει ανελαστική συμπεριφορά, η εξίσωση ισορροπίας είναι μη γραμμική δευτέρας τάξης:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + R(u) = p(t) \quad (2.9)$$

Η εξίσωση ισορροπίας ανελαστικών συστημάτων λύνεται μόνο αριθμητικά. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιεί το LS-DYNA παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5.1.

2.4.2 Το πρόβλημα της θερμικής διάχυσης

Έστω ένα σώμα στον χώρο, το οποίο συμφωνεί με τον νόμο του Fourier για την αγωγή της θερμότητας.



Σχήμα 2-3: Σώμα που υπόκειται σε εισροή θερμότητας

Επομένως η ροή της θερμότητας ανά μέτρο επιφάνειας για κάθε διεύθυνση των αξόνων θα ισούνται αντίστοιχα με:

$$q_x = k_x \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad q_y = k_y \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad q_z = k_z \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

όπου:

$\theta = \theta(x,y,z,t)$ η θερμοκρασία σε ένα σημείο του σώματος στη χρονική στιγμή t

$k_i = k_i(\theta)$ η θερμική αγωγιμότητα κατά i σε θερμοκρασία θ , όπου $i = x, y, z$

Για την θερμική ισορροπία του σώματος θα πρέπει για κάθε χρονική στιγμή η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο σώμα, να ισούται με την διαφορά της ροή θερμότητας μέσα από αυτό από την ποσότητα θερμότητας που παράγει το ίδιο.

Δηλαδή:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \nabla \cdot (k \nabla \theta) + Q \quad (2.10)$$

όπου:

ρ = η πυκνότητα του υλικού

$c = c(\theta)$ = η ειδική θερμότητα του υλικού

$k = k(\theta)$ = το μητρώο της θερμικής αγωγιμότητας

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

Για ισότροπο υλικό, κάτι το οποίο είναι εύλογη παραδοχή για το σπλισμένο σκυρόδεμα, ισχύει: $k_x = k_y = k_z = k_c$, όπου $k_c = k_c(\theta)$ η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος

άρα:

$$k = k_c I$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Q = η τιμή της θερμότητας που παράγει το υλικό. Στο πρόβλημα της πυρκαγιάς σε φορέα ωπλισμένου σκυροδέματος, λαμβάνεται ότι $Q = 0$ καθώς δεν υπάρχει παραγωγή θερμότητας από το υλικό.

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι οι εξής:

$$\theta|_{s_\theta} = \theta_s \quad (2.11)$$

$$k_n \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{S_q} = q_s \quad (2.12)$$

όπου:

$\theta_s = \theta(t)$ = η γνωστή τιμή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια S_θ , η οποία μπορεί να είναι συνάρτηση του χρόνου

q_s = η ροή θερμότητας στο σώμα μέσω της επιφάνειας S_q . Στο πρόβλημα της πυρκαγιάς, ομοίως επιλέγεται $q_s = 0$.

n = το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια S_q .

2.5 Μέθοδοι επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων

2.5.1 Η αριθμητική μέθοδος των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος.

Θεωρούμε την διαφορική εξίσωση :

$$f(x, y(x), y'(x), y''(x)) = 0, \quad x \in [a, b] \quad (2.13)$$

με συνοριακές συνθήκες:

$$y(a) = \alpha \quad y(b) = \beta \quad (2.14)$$

Έστω μία αύξουσα ακολουθία $\{x_k\}_{k=0}^n$ από $n+1$ ισαπέχουσα σημεία με $x_0 = a, x_n = b$.

Συμβολίζουμε με y_k την προσέγγιση της λύσης $y(x_k)$ στο σημείο x_k .

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, γίνονται οι εξής προσεγγίσεις των παραγώγων:

$$y'(x_k) \approx \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{2h} \quad (2.15a)$$

$$y''(x_k) \approx \frac{y_{k+1} - 2y_k + y_{k-1}}{h^2} \quad (2.15b)$$

όπου $h = \frac{a-b}{n}$ το βήμα της επίλυσης.

Το επόμενο βήμα είναι η αντικατάσταση των σχέσεων των παραγώγων στην αρχική διαφορική εξίσωση (3.4):

$$f(x, y(x), \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{2h}, \frac{y_{k+1} - 2y_k + y_{k-1}}{h^2}) = 0, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (2.16)$$

και η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών:

$$y(a) = \alpha \quad y(b) = \beta \quad (2.17)$$

Από την διαδικασία αυτή προκύπτει ένα σύστημα $n - 1$ εξισώσεων με $n - 1$ αγνώστους. Εάν η συνάρτηση f δεν είναι γραμμική, τότε και το σύστημα των εξισώσεων δεν θα είναι γραμμικό.

Μία χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί, είναι η επίλυση του δυναμικού προβλήματος σε μία ανάλυση ενός φορέα υπό πυρκαγιά.

Η εξίσωση ισορροπίας του συστήματος, όσον αφορά την μηχανική του συμπεριφορά, είναι η εξής:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P$$

Κανονικοποιώντας ως προς τις ιδιομορφές, έχουμε:

$$\varphi^T M \varphi = I$$

$$\varphi^T K \varphi = I$$

$$\varphi^T C \varphi = 2\xi\omega$$

Οπότε προκύπτει ότι:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = \underbrace{\varphi^T P}_{=Y}$$

Από την μέθοδο των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών, έχουμε:

$$\dot{x}_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2\Delta t}$$

$$\ddot{x}_n = \frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{\Delta t^2}$$

2.5.2 Η άρρητη αριθμητική μέθοδος Euler

Το θερμικό πρόβλημα διαφέρει από το δυναμικό, ως προς την τάξη της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα. Η εξίσωση του δυναμικού προβλήματος είναι δεύτερης τάξης ενώ η εξίσωση του θερμικού προβλήματος είναι πρώτης τάξης. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετική αριθμητική μέθοδος για την επίλυση του καθενός. Για το θερμικό πρόβλημα, χρησιμοποιείται η άρρητη μέθοδος αριθμητική μέθοδος Euler (implicit backward Euler method).

Θεωρούμε την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (2.18)$$

με αρχική συνθήκη:

$$y(t_0) = y_0 \quad (2.19)$$

όπου η συνάρτηση f και οι τιμές t_0 και y_0 είναι γνωστές, ενώ η εξίσωση y εξαρτάται μόνο από την μεταβλητή t και είναι άγνωστη.

Η αριθμητική αυτή μέθοδος υπολογίζει διαδοχικά τις τιμές $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ έτσι ώστε η τιμή y_k να προσεγγίζει την πραγματική τιμή της συνάρτησης $y(t_0 + kh)$, δηλαδή:

$$|y_0 - y(t_0 + kh)| \leq \text{tol} \quad (2.20)$$

όπου h το βήμα της επίλυσης, δηλαδή: $y_k = y_0 + kh$, και tol το περιθώριο σύγκλισης.

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί την σχέση για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης:

$$y_{k+1} = y_k + hf(t_{k+1}, y_{k+1}) \quad (2.21)$$

η οποία προέρχεται από την θεώρηση ότι:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y_{k+1} - y_k}{h} \quad (2.22)$$

2.6 Συζευγμένη μηχανική και θερμοκρασιακή ανάλυση

Το LS – DYNA ορίζει το χρονικό βήμα της μηχανικής ανάλυσης ως εξής:

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N\}$$

όπου N ο αριθμός των στοιχείων. Για λόγους ευστάθειας της λύσης ο συντελεστής α ισούται με 0,90.

Για ραβδωτά στοιχεία το χρονικό βήμα ορίζεται από το κριτήριο Courant:

$$\Delta t_c = \frac{L}{c}$$

όπου L το μήκος του στοιχείου και c η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων στο μέσο:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ η πυκνότητά του.

Αριθμητικό παράδειγμα για ράβδο οπλισμού:

$\rho = 7850,0 \text{ kg/m}^3$ και $E = 200 \text{ GPa}$

προκύπτει ότι:

$$c = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{7850}} = 5047,5 \text{ m/sec}$$

άρα για μήκος στοιχείου $L = 0,025 \text{ m}$ το χρονικό βήμα είναι:

$$\Delta t_c = \frac{0,025}{5047,5} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

το οποίο είναι απαγορευτικό για μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην οποία η φόρτιση θα διαρκεί 3600 sec λόγω του χρόνου επίλυσης. Εάν για παράδειγμα σε μία ανάλυση κτηρίου υπό πυρκαγιά μίας ώρας, το ένα χρονικό βήμα διαρκεί 0,1 sec, όλη η επίλυση θα διαρκέσει $3600 \cdot 0,1 \cdot 10^6 / 5 = 7,2 \cdot 10^7 \text{ sec}$ δηλαδή $2 \cdot 10^4$ ώρες (!!!).

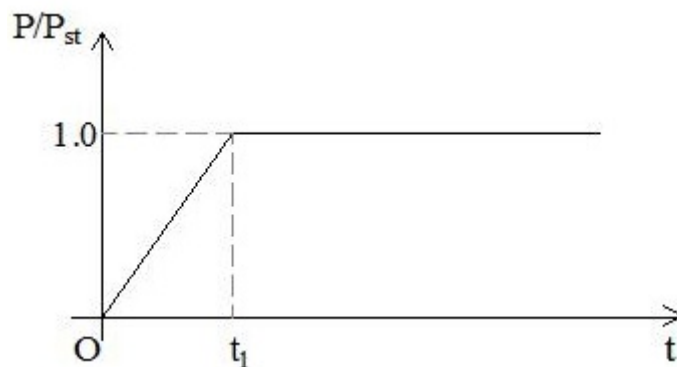
Επομένως είναι απαραίτητο να βρεθεί ένα υπολογιστικό τέχνασμα έτσι ώστε να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος επίλυσης χωρίς βέβαια να επηρεαστεί η ορθότητα της λύσης.

Το χρονικό βήμα όπως έχει αναφερθεί, εξαρτάται από το μήκος του στοιχείου, το μέτρο ελαστικότητάς του και από την πυκνότητά του. Εάν αυξηθεί το μήκος του στοιχείου, μειώνεται σημαντικά η ακρίβεια της λύσης, οπότε η αλλαγή αυτή απορρίπτεται. Εάν μειωθεί το μέτρο ελαστικότητας του υλικού συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής, κάτι το οποίο θα προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στην απόκριση του φορέα, οι οποίες θα απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα.

Ωστόσο, εάν αυξηθεί η πυκνότητα του μέλους είναι δυνατόν να αυξηθεί αρκετά το χρονικό βήμα της ανάλυσης χωρίς να επηρεαστεί η λύση.

Η διαδικασία του τεχνάσματος αυτού είναι η εξής:

- πολλαπλασιασμός της αρχικής πυκνότητας επί 10^8 , δηλαδή για τον χάλυβα η πυκνότητα που θα εισαχθεί στο LS-DYNA θα ισούται με $7,85 \cdot 10^{11} \text{ kg/m}^3$. Έτσι το χρονικό βήμα θα γίνει $\Delta t' = \Delta t_e \cdot 10^4 = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ sec}$.
- αυξάνοντας όμως την πυκνότητα του υλικού, αυξάνεται στην ουσία η μάζα της κατασκευής και κατά συνέπεια η ιδιοπερίοδός της. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να τροποποιηθεί αναλόγως και η χρονοϊστορία επιβολής των κατακόρυφων φορτίων, η οποία είναι της μορφής του Σχήματος 3-4.



Σχήμα 2-4: Χρονοϊστορία επιβολής των κατακόρυφων φορτίων

έτσι ώστε να μην υπάρχει ταλάντωση της κατασκευής, δηλαδή η δυναμική φόρτιση να προσεγγίζει την στατική. Για να επιτευχθεί αυτό, συνίσταται να ισχύει:

$$t_1 = 5 \cdot T_1$$

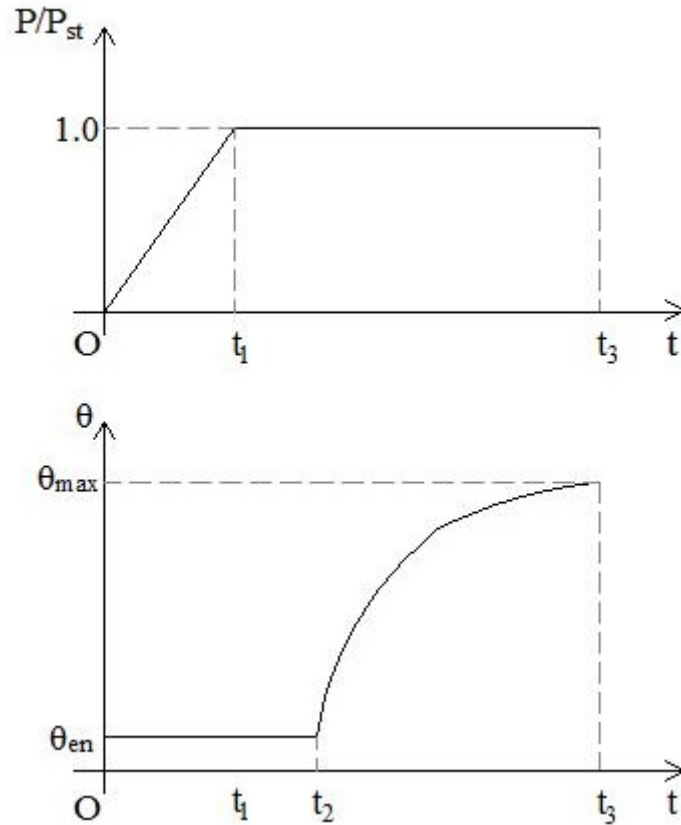
όπου T_1 η θεμελιώδης περίοδος της κατασκευής και P_{st} η τιμή του στατικού φορτίου.

Επομένως, εάν για παράδειγμα η πραγματική θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής είναι 0,10 sec, μετά τον πολλαπλασιασμό της μάζας επί 10^8 , απλοποιητικά, η τροποποιημένη ιδιοπερίοδος θα είναι $0,10 \cdot 10^4 \text{ sec} = 1000 \text{ sec}$, οπότε επιλέγεται $t_1 = 5000 \text{ sec}$.

Επειδή δεν είναι εφικτό να γίνει ανάλυση ιδιομορφών ώστε να είναι γνωστές οι ιδιοπερίοδοι, επιλέγεται δοκιμαστικά μία τιμή μεταξύ 2000 και 5000 sec. Στις περισσότερες αναλύσεις απλών δομικών φορέων η τιμή 2000 sec δίνει

ικανοποιητικά αποτελέσματα, δηλαδή πολύ μικρή έως καθόλου ταλάντωση του φορέα, ενώ για μεγαλύτερους φορείς ακόμα και για ένα πενταόροφο κτήριο η τιμή 5000 sec είναι επίσης ικανοποιητική.

- Για την αποφυγή πολύ μικρής κλίμακας ταλαντώσεων της κατασκευής λόγω των κατακόρυφων φορτίων, εισάγεται στο μοντέλο μία μικρή τιμή εξώδους απόσβεσης της τάξης $\xi = 1\%$.
- το LS-DYNA επιβάλλει το ίδιο βάρος της κατασκευής πολλαπλασιάζοντας την μάζα με την επιτάχυνση της βαρύτητας. Επομένως για να μην επιβληθούν φορτίσεις στην κατασκευή που δεν θα έχουν την πραγματική τους τιμή, θέτεται η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με μηδέν.
- η πυκνότητα του υλικού της κατασκευής πέρα από τα παραπάνω, έχει έναν ρόλο και στην διάχυση της θερμοκρασίας, καθώς στην διαφορική εξίσωση της διάχυσης της θερμοκρασίας υπάρχει ο όρος: $\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}$. Οπότε για να μην επηρεαστεί και η θερμοκρασιακή διάχυση, είναι απαραίτητο η πυκνότητα που θα εισαχθεί στο θερμικό υλικό του LS-DYNA (MAT_THERMAL_ISOTROPIC_TD_LC) να ισούται με την πραγματική και όχι με την τροποποιημένη πυκνότητα.
- Η επιβολή της μεταβολής της θερμοκρασίας στους συνοριακούς κόμβους (στις παρειές που εκτίθενται στην πυρκαγιά) γίνεται έπειτα από την εφαρμογή των στατικών φορτίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5: Διαγράμματα επιβολής των στατικών και θερμοκρασιακών φορτίσεων

Όπως έχει αναφερθεί, η χρονική στιγμή t_1 επιλέγεται έτσι ώστε, σε σχέση με την μάζα που έχει ο φορέας, η απόκρισή του να ταυτίζεται με την στατική φόρτιση, δηλαδή να μην υπάρχει ταλάντωση του φορέα.

Η χρονική στιγμή t_2 είναι η στιγμή της έναρξης της πυρκαγιάς. Επιλέγεται $t_2 > t_1$ (συνήθως $t_2 = t_1 + 100 \text{ sec}$) έτσι ώστε η φόρτιση P_{st} να προλάβει να μεταφερθεί στις στηρίξεις και ο φορέας (από ωπλισμένο σκυρόδεμα) να ρηγματωθεί. Από την χρονική στιγμή 0 μέχρι την στιγμή t_2 η θερμοκρασία στους συνοριακούς κόμβους είναι ίση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_{en} (συνήθως $\theta_{en} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Η χρονική στιγμή t_3 είναι η χρονική στιγμή της λήξης της συζευγμένης ανάλυσης. Προφανώς η επιθυμητή διάρκεια της πυρκαγιάς είναι $t_3 - t_2$. Επίσης είναι απαραίτητο, και η στατική φόρτιση να διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή t_3 .

2.7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ LS-DYNA

2.7.1 Αποκλειστικά θερμοκρασιακή ανάλυση

Η μεθοδολογία αναπτύσσεται υπό μορφή παραδείγματος.

Έστω ότι ζητάμε την επίλυση του προβλήματος της διάχυσης της θερμοκρασίας σε διατομή δοκού οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθεται στις τρεις παρειές της στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου για 60 λεπτά. Έχει διαστάσεις $h \times b = 300 \times 160$.

Η προετοιμασία του αρχείου που θα επεξεργαστεί το LS-DYNA γίνεται με το λογισμικό LS-PrePost 4.2. Σε όσες παραμέτρους του προγράμματος δεν θα γίνει αναφορά, θα εισάγονται οι προκαθορισμένες (default) τιμές.

- i. Αρχικώς ορίζονται όλες οι απαραίτητες κάρτες (“cards”) οι οποίες περιγράφουν την ανάλυση. Δηλαδή:

*CONTROL_SOLUTION

SOLN	NLQ	ISNAN	LCINT
1	0	0	0

SOLN = 1 δηλαδή μόνο θερμοκρασιακή ανάλυση

*CONTROL_TERMINATION

ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
3600.0	0	0.0	0.0	0.0

ENDTIM = 3600.0 διότι η έκθεση στην πυρκαγιά διαρκεί 60 min (3600.0 sec)

*CONTROL_THERMAL_SOLVER

ATYPE	PTYPE	SOLVER	CGTOL	GPT	EQHEAT	FWORK	SBC
1		1	0.0	0	0.0	0.0	0.0

MSGLVL	MAXITR	ABSTOL	RELTOL	OMEGA	UNUSED	UNUSED	TSF
0	500	0.0	0.0	0.0	0	0	1.0

*CONTROL_THERMAL_TIMESTEP

TS	TIP	ITS	TMIN	TMAX	DTEMP	TSCP	LCTS
0	1.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0

- ii. Επιλέγεται το καταστατικό προσομοίωμα των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Αφού πρόκειται μόνο για θερμοκρασιακή ανάλυση, επιλέγονται οι σχέσεις γραμμικής ελαστικότητας

*MAT_ELASTIC

MID	RO	E	PR	DA	DB
1	2.3e+003	30.0e+009	0.2	0.0	0.0

MID = 1 το συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα είναι ο αριθμός 1

RO = 2.30e+003 η πυκνότητα του υλικού είναι 2300.0 kg/m³

E = 30.0e+009 το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι 30 GPa

PR = 0.2 λόγος Poisson του υλικού είναι 0.20

- iii. Κατασκευάζονται οι καμπύλες που δίνουν την μεταβολή της ειδικής θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τις σχέσεις του κανονισμού.

καμπύλη της ειδικής θερμότητας:

*DEFINE_CURVE

LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
10	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0

καμπύλη της θερμικής αγωγιμότητας:

*DEFINE_CURVE

LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
------	------	-----	-----	------	------	--------

11	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0
----	---	-----	-----	-----	-----	---

- iv. Επιλέγεται το καταστατικό προσομοίωμα για την θερμική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

*MAT_THERMAL_ISOTROPIC_TD_LC

TMID	TRO	TGRLC	TGMULT
1	0.0	0.0	

HCLC	TCLC
10	11

Το Thermal Material 1 (TMID = 1) έχει ειδική θερμότητα η οποία δίνεται από την καμπύλη 10 (HCLC = 10) και θερμική αγωγιμότητα η οποία δίνεται από την καμπύλη 11 (TCLC = 11). Η πυκνότητα του Thermal Material είναι ίση με την πυκνότητα του Material 1 (MID = 1).

- v. Κατασκευάζεται η κάρτα που περιγράφει το είδος των πεπερασμένων στοιχείων

*SECTION_SHELL

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	0.0	0	1	0	0	1

T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0

ELFORM = 2 τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι ισοπαραμετρικά στοιχεία κελυφών κατά Belytschko - Lin – Tsay.

T1 = T2 = T3 = T4 = 1 κάθε πεπερασμένο στοιχείο έχει πάχος 1,0 (m).

- vi. Κατασκευάζεται η κάρτα *PART η οποία περιέχει τα καταστατικά προσομοιώματα της μηχανικής και της θερμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος και επίσης το είδος των πεπερασμένων στοιχείων.

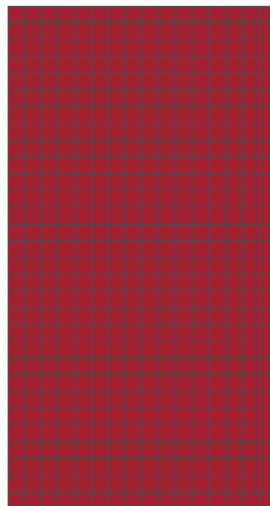
*PART

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
1	1	1	0	0	0	0	1

Το Part 1 αποτελείται από το Section 1, το Material 1 και Thermal Material 1.

- vii. Μέσω της επιλογής 2Dmesh κατασκευάζεται ο κানাβος των πεπερασμένων στοιχείων, εισάγοντας τις συντεταγμένες των ακμών της διατομής και τον αριθμό των στοιχείων σε κάθε πλευρά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι ένα τετράγωνο, πλευράς 0,01 m. Στο τέλος της διαδικασίας επιλέγεται ότι όλα τα πεπερασμένα στοιχεία ανήκουν στο σύνολο 11 (δηλαδή στο PART με PID = 11).

Ο κানাβος των πεπερασμένων στοιχείων



- viii. Γίνεται έλεγχος μήπως έχουν δημιουργηθεί διπλά σημεία, δηλαδή διαφορετικά σημεία συντεταγμένες που ταυτίζονται. Αυτή η διαδικασία γίνεται από την επιλογή DupNod, μέσω της οποίας εμφανίζονται τα σημεία αυτά και είναι δυνατόν να διαγραφούν.

- ix. Κατασκευάζεται η καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου η οποία θα αποτελέσει την συνοριακή συνθήκη στις θερμαινόμενες παρειές.

*DEFINE_CURVE

LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
1	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0

- x. Επιλέγονται οι αρχικές συνθήκες (αρχική θερμοκρασία της διατομής)

*INITIAL_TEMPERATUTE_SET

NSID	TEMP	LOC
0	20.0	0

- xi. Επιλέγονται οι συνοριακές συνθήκες.

Αρχικά επιλέγονται οι παρειές που εκτίθενται στην πυρκαγιά και η παρειά που έχει σταθερή θερμοκρασία. Αυτό γίνεται από την κάρτα *SET_NODE. Έστω ότι η κάρτα που αντιστοιχεί στις θερμαινόμενες παρειές έχει SID = 1 ενώ η παρειά με σταθερή θερμοκρασία έχει SID = 2.

Έπειτα ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες:

για τις θερμαινόμενες παρειές:

*BOUNDARY_TEMPERATUTE_SET

NSID	LCID	CMULT	LOC
1	1	1.0	0

Το σύνολο κόμβων 1 (NSID = 1) αναπτύσσει στον χρόνο θερμοκρασία η οποία δίνεται από την καμπύλη 1 (LCID = 1).

για την μονωμένη παρειά:

*BOUNDARY_TEMPERATUTE_SET

NSID	LCID	CMULT	LOC
2	0	20.0	0

Το σύνολο των κόμβων 2 (NSID = 2) έχει οποιαδήποτε χρονική στιγμή (LCID=0) θερμοκρασία ίση με 20,0 (°C).

Μονάδες των μεγεθών που χρησιμοποιούνται

Μήκος	m
Χρόνος	sec
Δύναμη	N
Τάση	N/m ² (Pa)
Θερμοκρασία	°C (K)
Ειδική Θερμότητα	J/kg K
Θερμική Αγωγιμότητα	W/m K

3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με διαγράμματα του Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2

Στο Παράρτημα Α του Ευροκώδικα 2 Μέρος 1-2 παρουσιάζονται οι κατανομές θερμοκρασιών σε διατομές δοκών, πλακών και υποστρωμάτων. Τα σχήματα αυτά βασίζονται στην τιμή του κάτω ορίου της θερμικής αγωγιμότητας και στην τιμή της ειδικής θερμότητας για ποσοστό υγρασίας 1,5%.

Χρησιμοποιώντας το LS-DYNA επιλύονται μερικές από τις διατομές του Παραρτήματος, εκτιθέμενες στις ίδιες συνοριακές συνθήκες (πρότυπη πυρκαγιά) και για τον ίδιο χρόνο έκθεσης (π.χ. R30 σημαίνει έκθεση στην πρότυπη πυρκαγιά για 30 min).

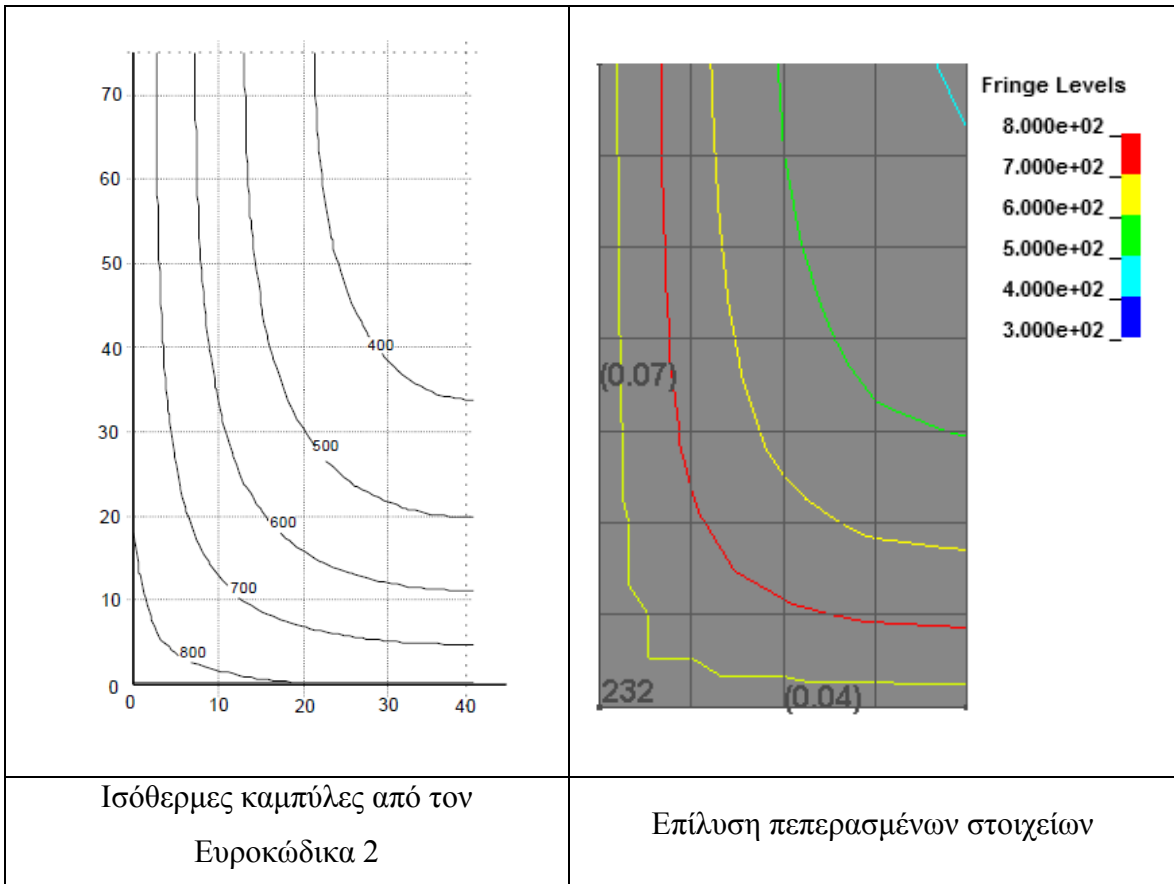
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι αρκετά ικανοποιητικά, ωστόσο υπάρχουν μικροδιαφορές ως προς την κατανομή της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα η θερμοκρασία που δίνει η πρότυπη πυρκαγιά είναι 945 °C για $t = 60$ min, όμως στο αντίστοιχο σχήμα για R60 του κανονισμού η θερμοκρασία της εκτιθέμενης παρειάς είναι 900 °C, οπότε υπάρχει μία μικρή απόκλιση των δύο αποτελεσμάτων.

Στην επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας λαμβάνεται από το κάτω όριο του Ευροκώδικα 2 ενώ οι τιμές της ειδικής θερμότητας για ποσοστό υγρασίας 0%.

Επίσης επιλύεται μία τετραγωνική διατομή υποστρώματος πλευράς 300 mm και μία διατομή πλακοδοκού ύψους 500 mm και πλάτους 300 mm, για δύο περιπτώσεις έκθεσης: στην ονομαστική πυρκαγιά και στην πυρκαγιά υδρογωναρθράκων.

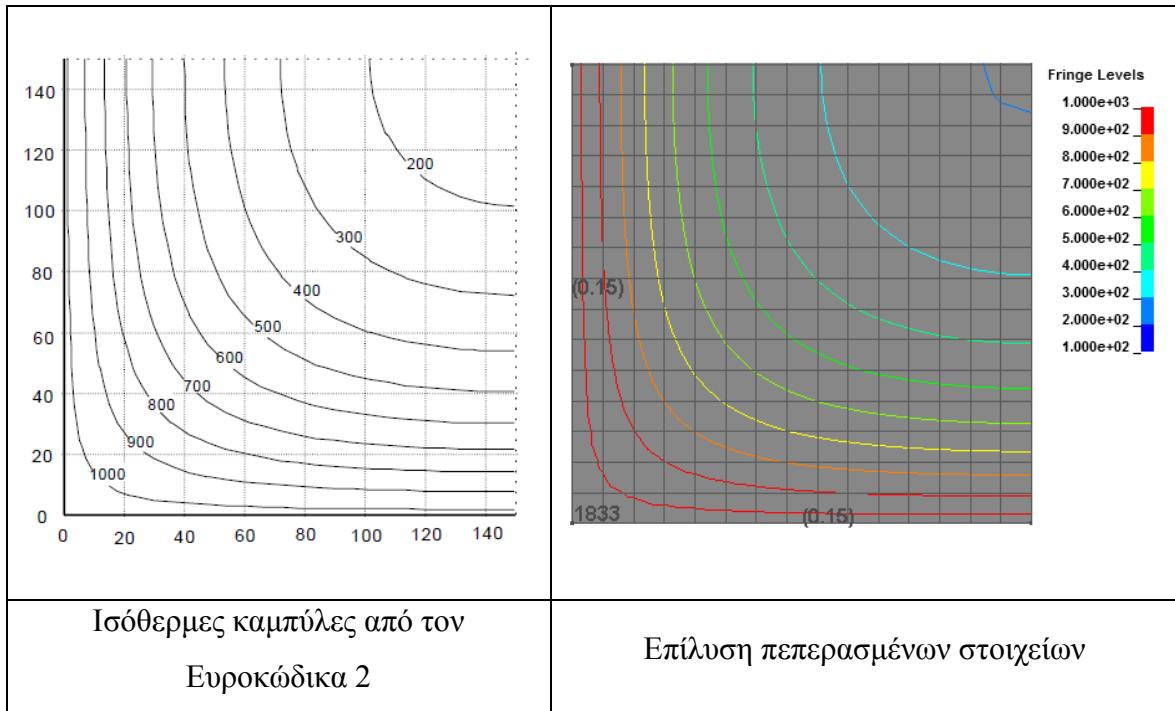
3.1.1 Δοκός διαστάσεων h x b: 150 x 80

χρόνος έκθεσης 30 min στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (R30)



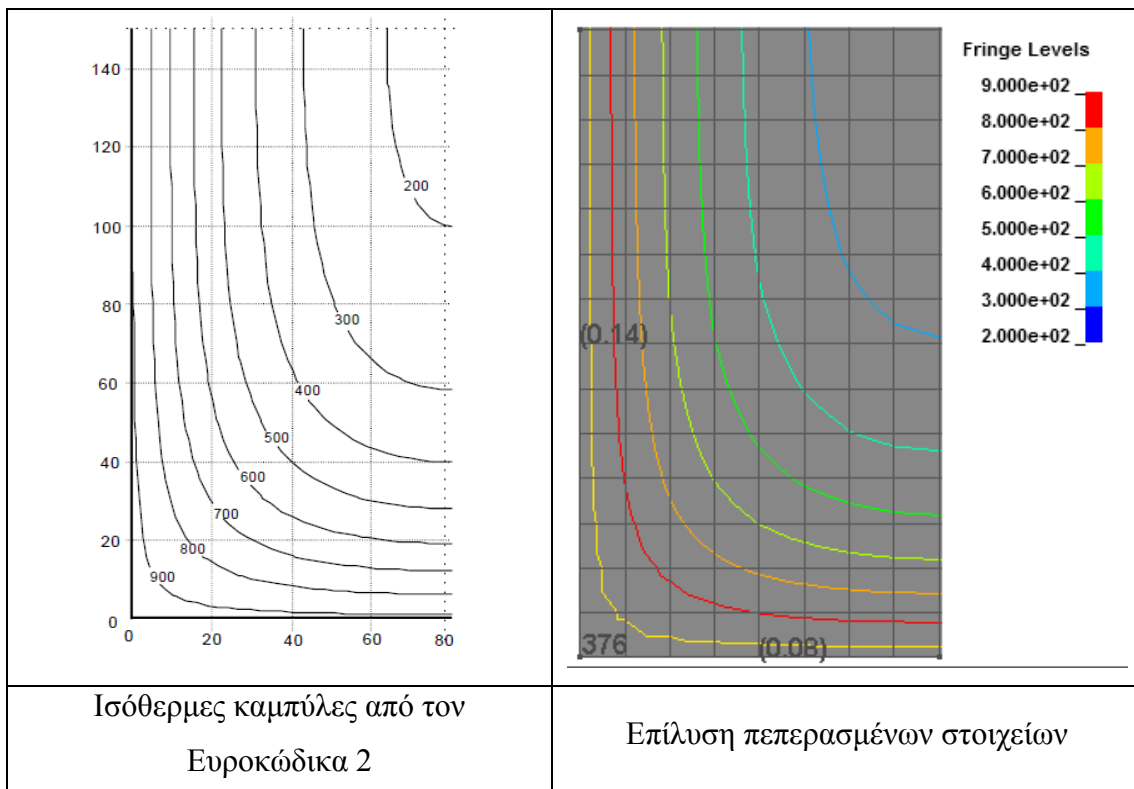
3.1.2 Τετραγωνικό υποστύλωμα πλάτους $b = 300 \text{ mm}$

χρόνος έκθεσης 120 min στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (R120)



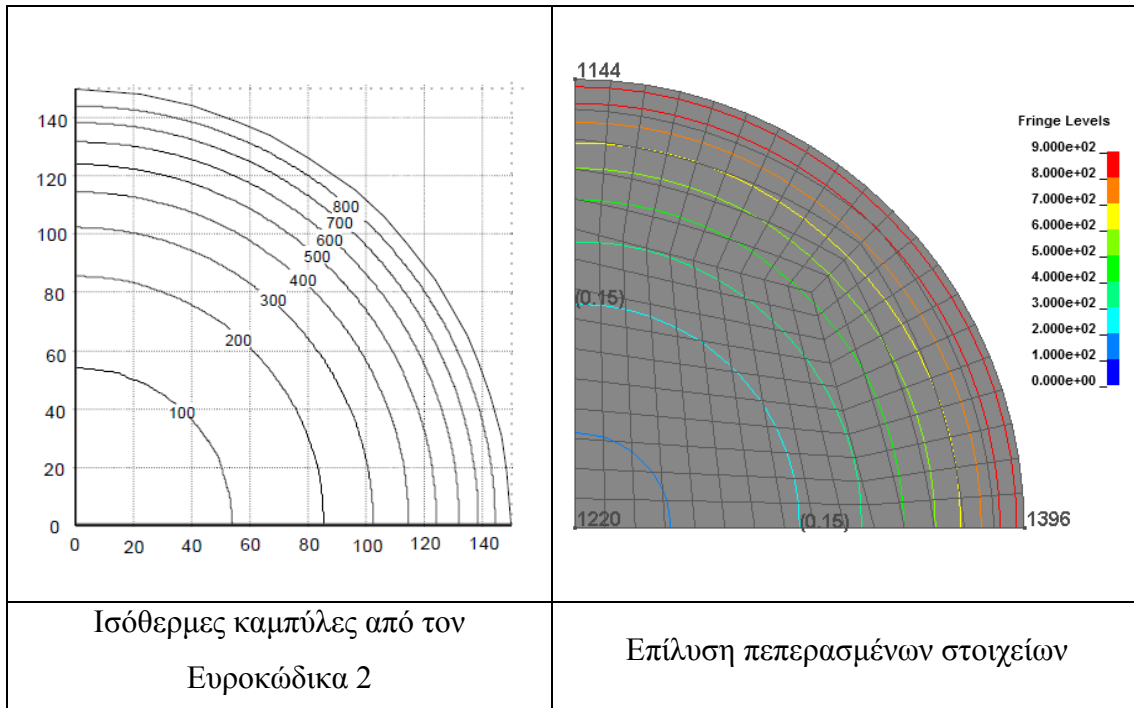
3.1.3 Δοκός διαστάσεων $h \times b: 300 \times 160$

χρόνος έκθεσης 60 min στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (R60)

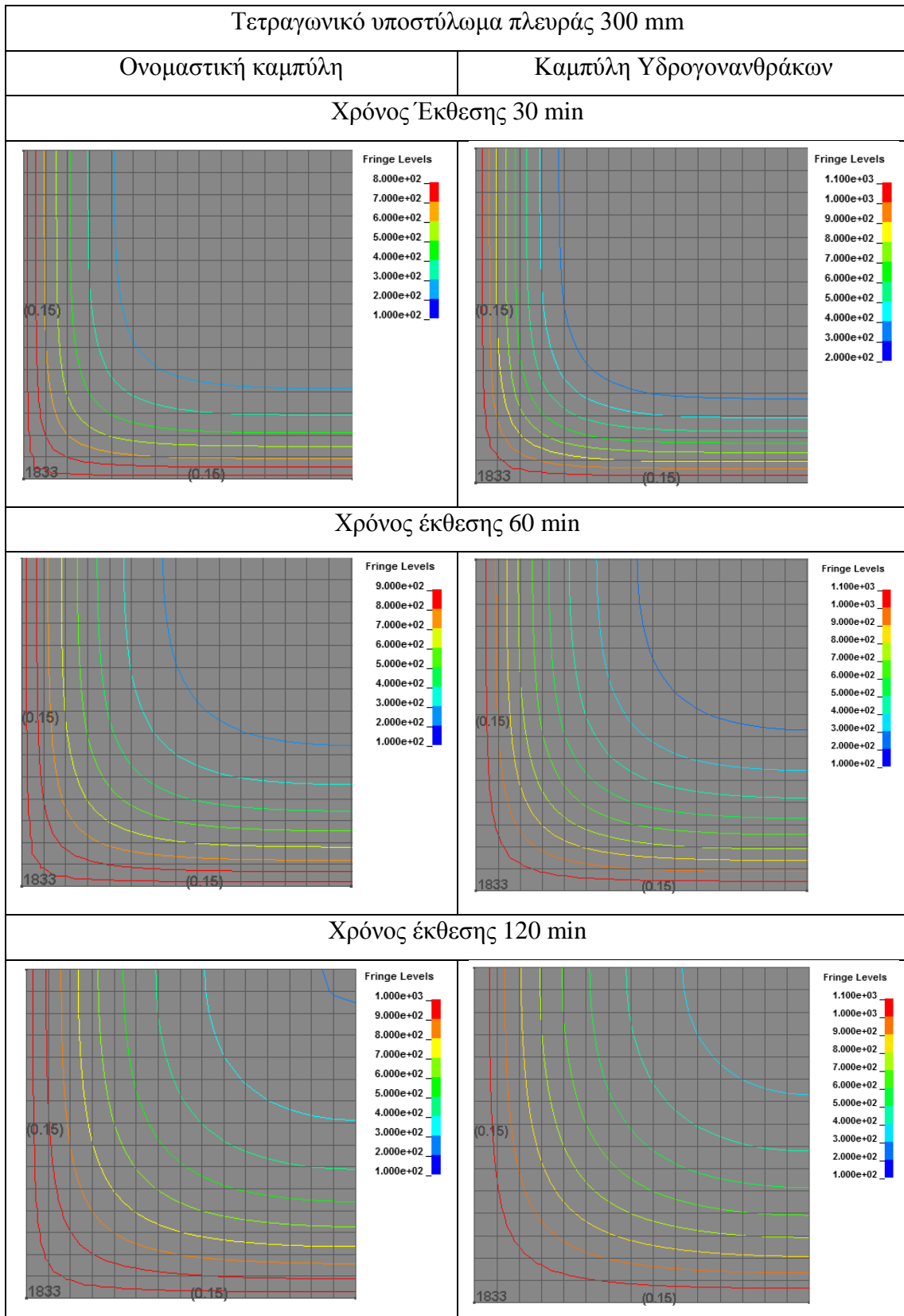


3.1.4 Κυκλικό υποστύλωμα διαμέτρου 150 mm

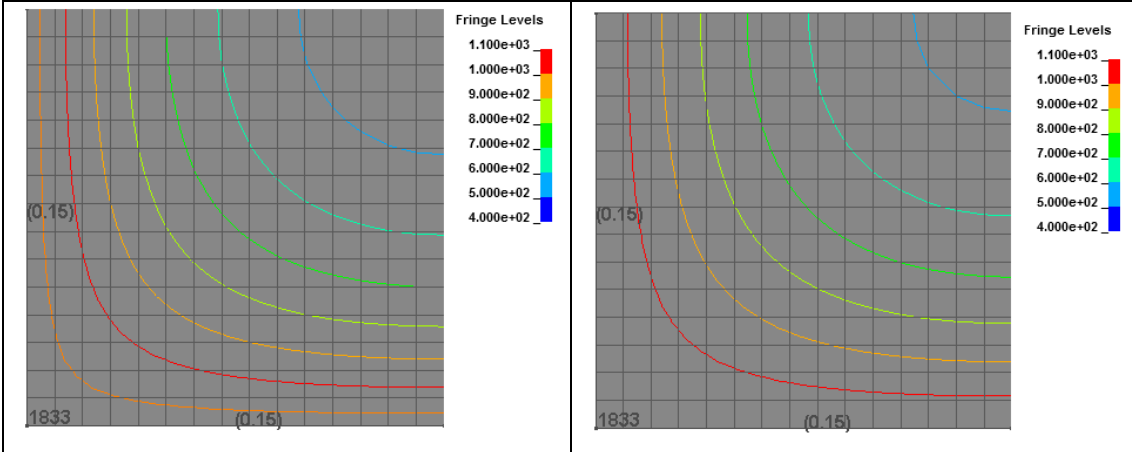
χρόνος έκθεσης 60 min στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου (R60)



3.2 Σύγκριση έκθεσης σε ονομαστική καμπύλη και σε καμπύλη υδρογονανθράκων



Χρόνος έκθεσης 240 min

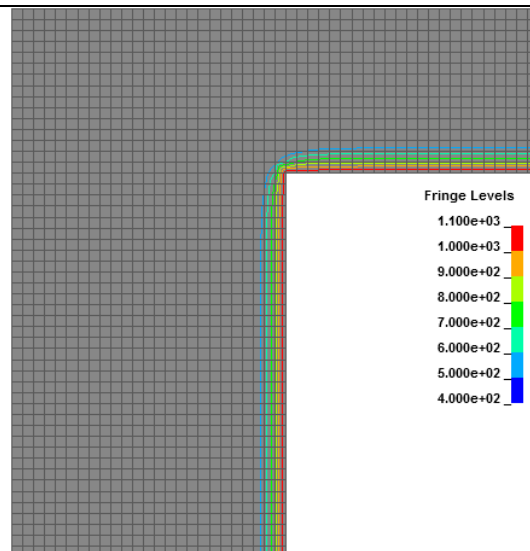
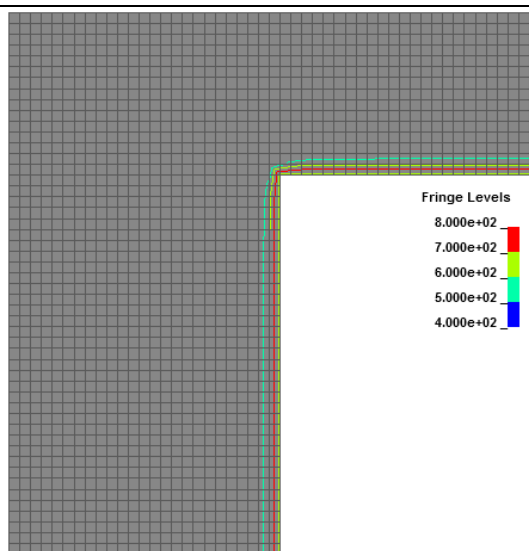


Πλακοδοκός μορφής Γ, διαστάσεων: $h \times b = 500 \times 250$

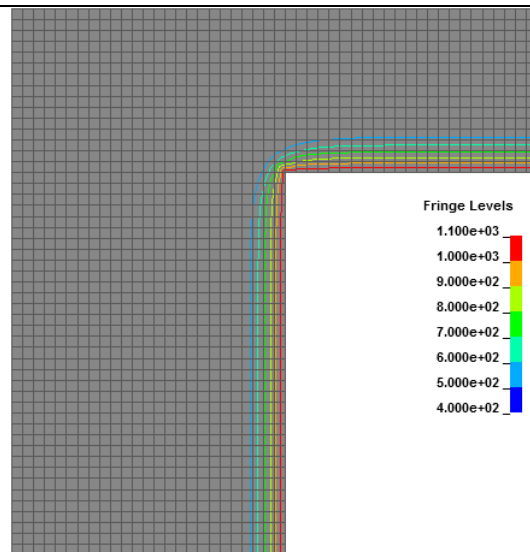
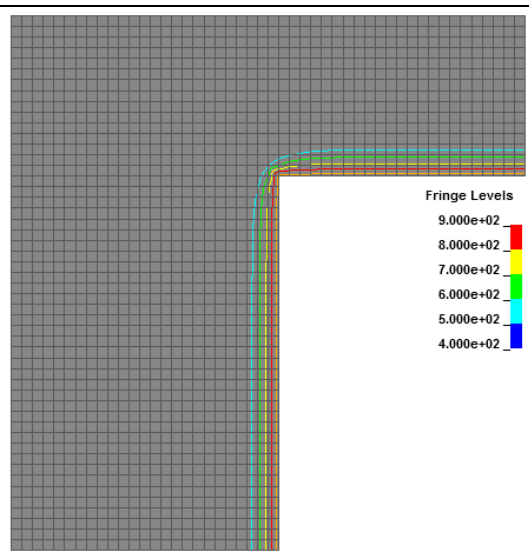
Ονομαστική καμπύλη

Καμπύλη Υδρογονανθράκων

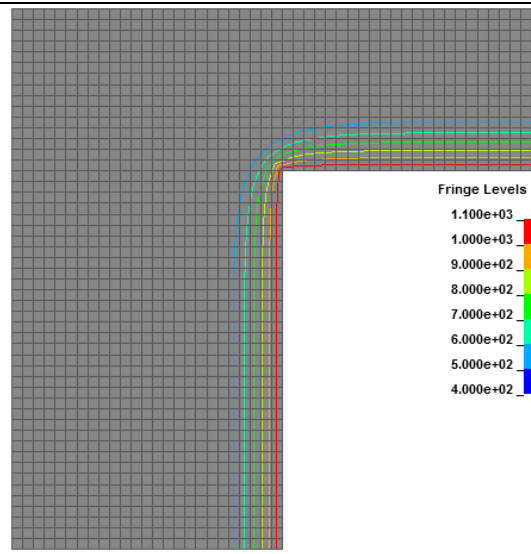
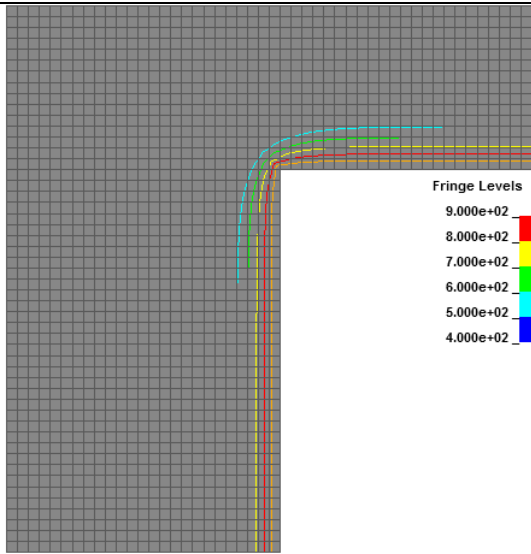
Χρόνος Έκθεσης 30 min



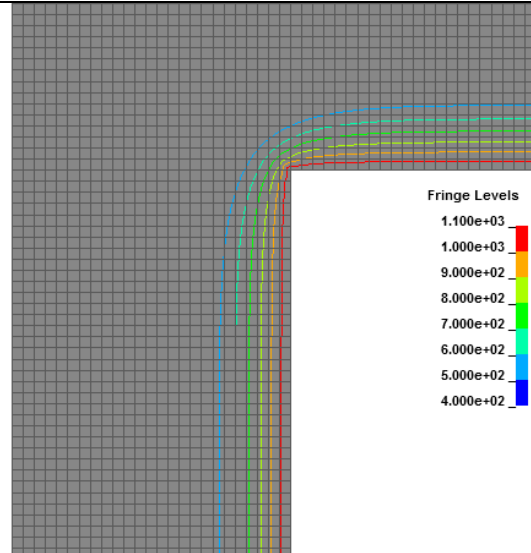
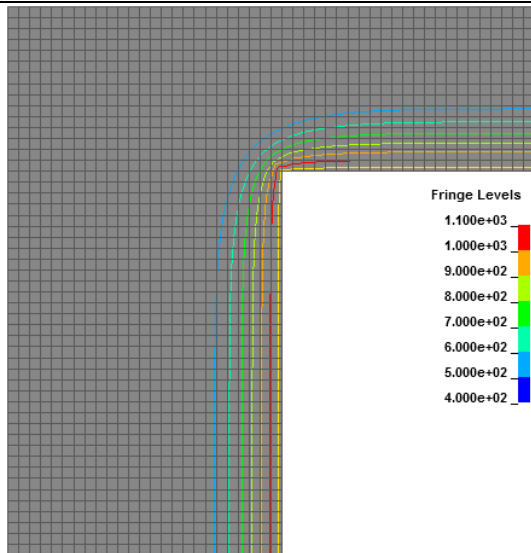
Χρόνος έκθεσης 60 min



Χρόνος έκθεσης 120 min



Χρόνος έκθεσης 240 min



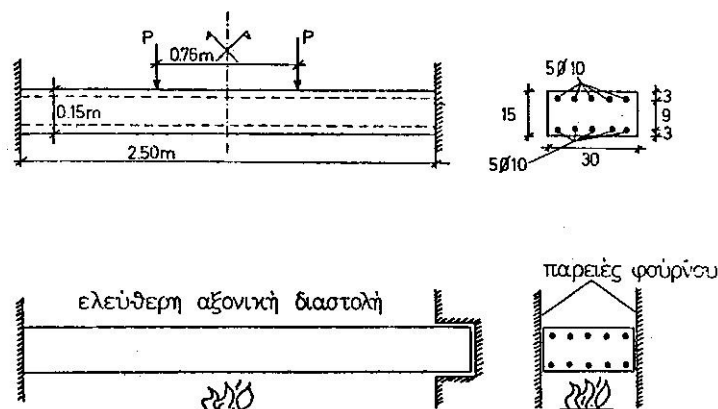
4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Επαλήθευση του πειράματος

4.1.1 Δεδομένα του πειράματος

Στο βιβλίο “Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα Έναντι Πυρκαγιάς” παρουσιάζεται γίνεται μία αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου που πρότεινε ο CEB για την ανάλυση φορέων υπό πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής επαληθεύθηκαν στο ίδιο βιβλίο με τα αποτελέσματα ενός πειράματος με τα ίδια δεδομένα.

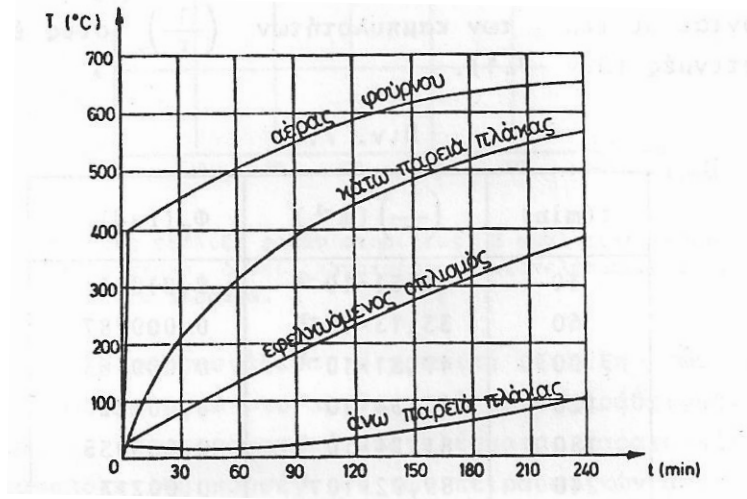
Το πείραμα πραγματοποιείται την έκθεση μίας πλάκας ωπλισμένου σκυροδέματος σε πυρκαγιά, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα. Η πλάκα φορτίζεται με δύο συγκεντρωμένα φορτία $P = 11 \text{ kN}$ σε συμμετρικές θέσεις ως προς το μέσον της. Οι ράβδοι του οπλισμού τόσο στη θλιβόμενη όσο και στην εφελκυσμένη ζώνη, είναι οι ίδιες και συνεχείς σε όλο το μήκος της πλάκας. Οι συνθήκες στηρίξεως της πλάκας επιτρέπουν την ελεύθερη αξονική διαστολή, παρεμποδίζουν δε κάθε πλευρική διαστολή.



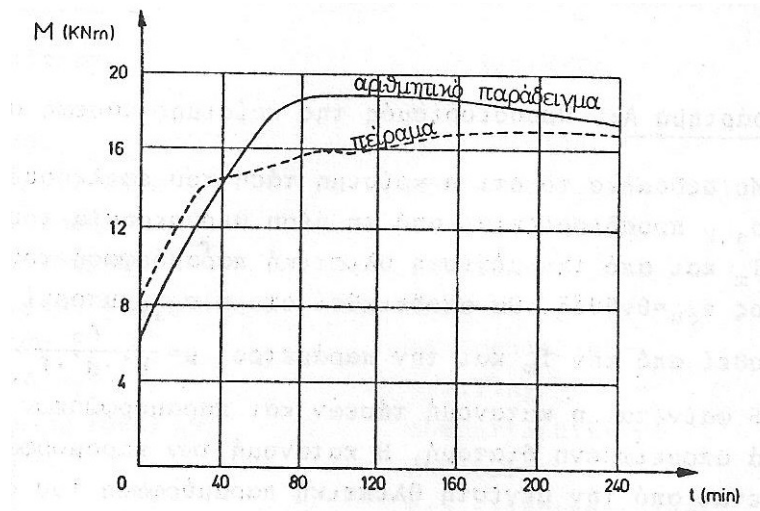
Σχήμα 4-1

Τα υλικά είναι σκυρόδεμα C20 και χάλυβας 48/70, δηλαδή $f_{yk} = 480 \text{ MPa}$ και $f_{uk} = 700 \text{ MPa}$.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου για διάφορες στάθμες καθ' ύψος της δοκού αλλά και για την θερμοκρασία του αέρα του φούρνου.

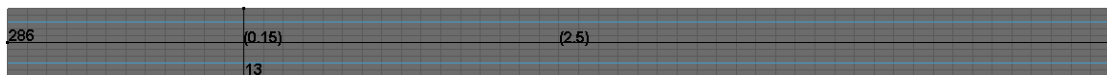


Σχήμα 4-2

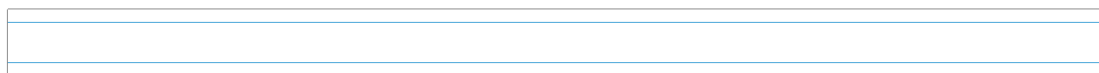


Σχήμα 4-3

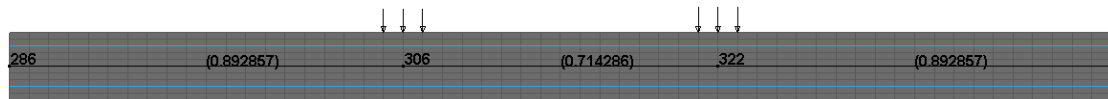
4.1.2 Προσομοίωση του πειράματος στο LS-DYNA



Σχήμα 4-4: Κάναβος Πεπερασμένων Στοιχείων

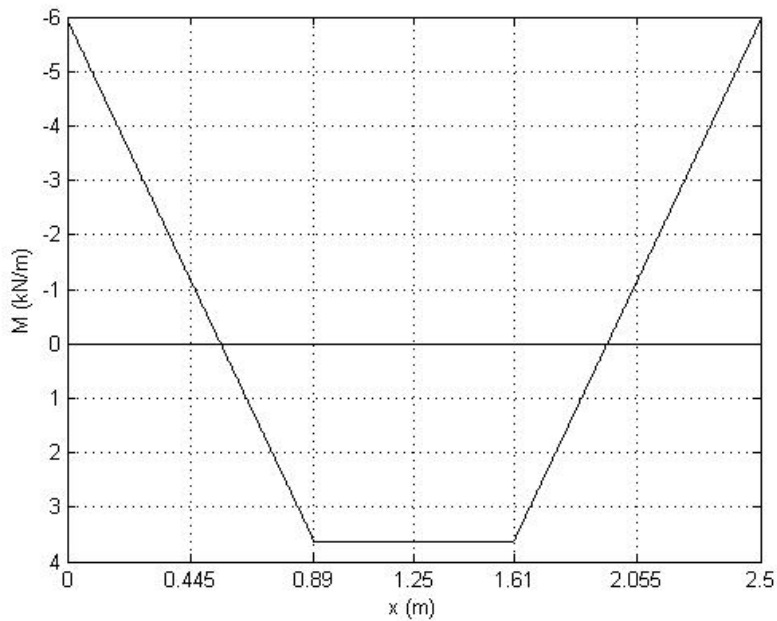


Σχήμα 4-5: Όπληση της δοκού

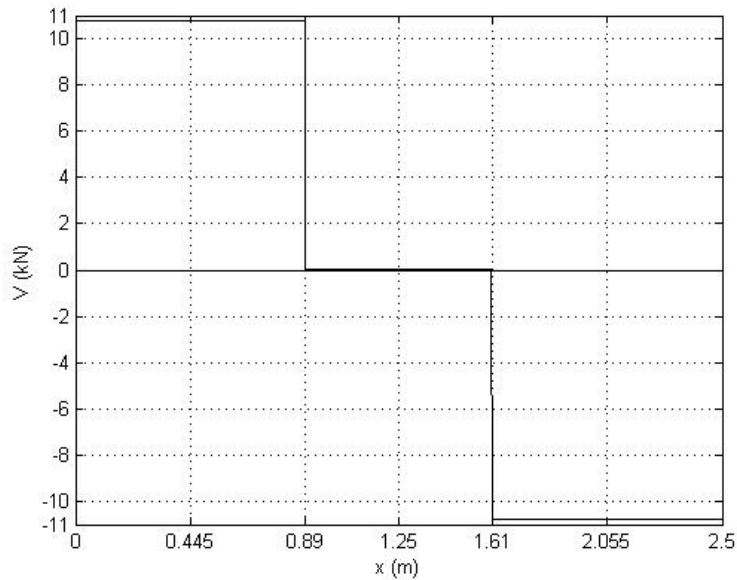


Σχήμα 4-6: Εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων

Αρχικά επιλύεται η δοκός στην οποία επιβάλλονται δύο κατακόρυφα φορτία 11 kN το καθένα, όπως αναφέρεται και στην εκφώνηση του προβλήματος. Για την αποφυγή μη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων η επιβολή του κατακόρυφου φορτίου σε κάθε θέση εφαρμογής γίνεται με την επιβολή τριών ισοδύναμων κατακόρυφων φορτίων, με τιμή $11/3=3,66$ kN. Επιλύοντας τον φορέα, τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών είναι τα εξής:

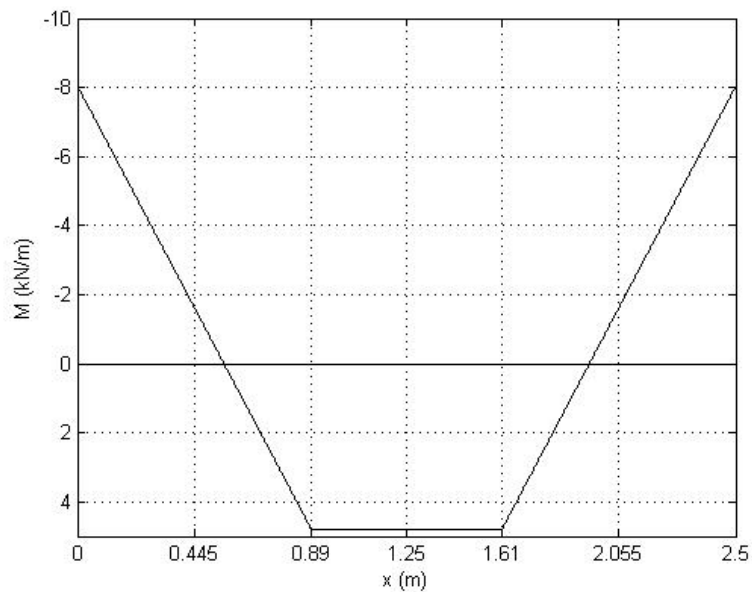


Σχήμα 4-7

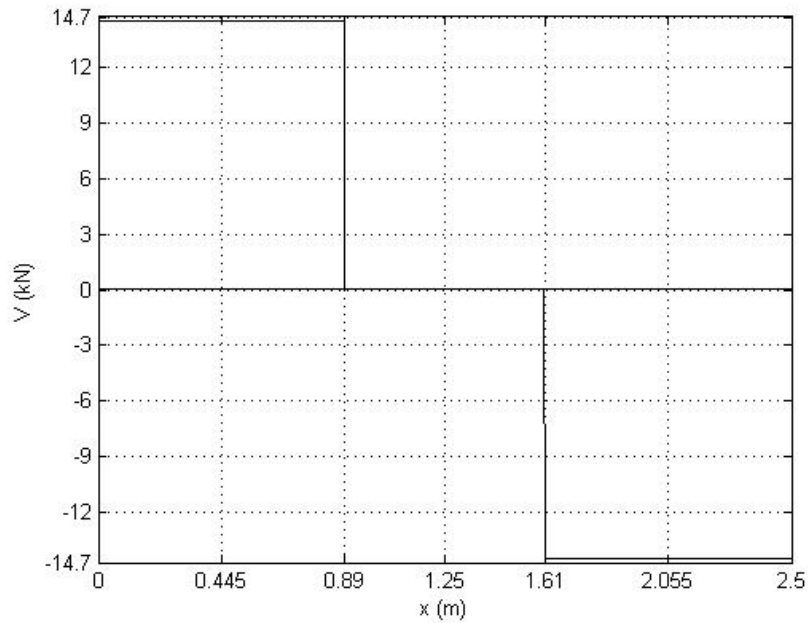


Σχήμα 4-8

Προκύπτει ότι επιβάλλοντας 11 kN η ροπή στις στηρίξεις είναι περίπου 6,0 kNm. Ωστόσο η τιμή της ροπής στην στήριξη πριν αρχίσει η έκθεση στην πυρκαγιά, δηλαδή υπό κατακόρυφα φορτία μόνο, είναι 8,0 kNm. Για να είναι λοιπόν συγκρίσιμα τα αποτελέσματα η τιμή των κατακορύφων αυξάνεται σε $11 \cdot 8/6 = 14,7$ kN, δηλαδή κάθε κατακόρυφο φορτίο θα έχει τιμή $14,7/3 = 4,89$ kN. Τα αντίστοιχα διαγράμματα εντατικών μεγεθών είναι τα εξής:



Σχήμα 4-9



Σχήμα 4-10

Επομένως στις ακόλουθες αναλύσεις υπό πυρκαγιά η τιμή των κατακόρυφων φορτίων είναι 14,7 kN και όχι 11 kN.

4.1.3 Αριθμητικά δεδομένα του προβλήματος

- Στατική φόρτιση:

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η τιμή του στατικού φορτίου σε κάθε μία από τις δύο θέσεις είναι συνολικά 14,7 kN. Για να είναι τα αποτελέσματα ρεαλιστικά, σε κάθε θέση εφαρμόζονται τρία ισοδύναμα κατακόρυφα φορτία. Η τιμή του ενός είναι $14,7 / 3 = 4,9$ kN. Επειδή οι μονάδες της δύναμης είναι σε Newton, κάθε συγκεντρωμένο φορτίο έχει τιμή 4900 N. Η θέση εφαρμογής καθενός φαίνεται στο Σχήμα 5-5.

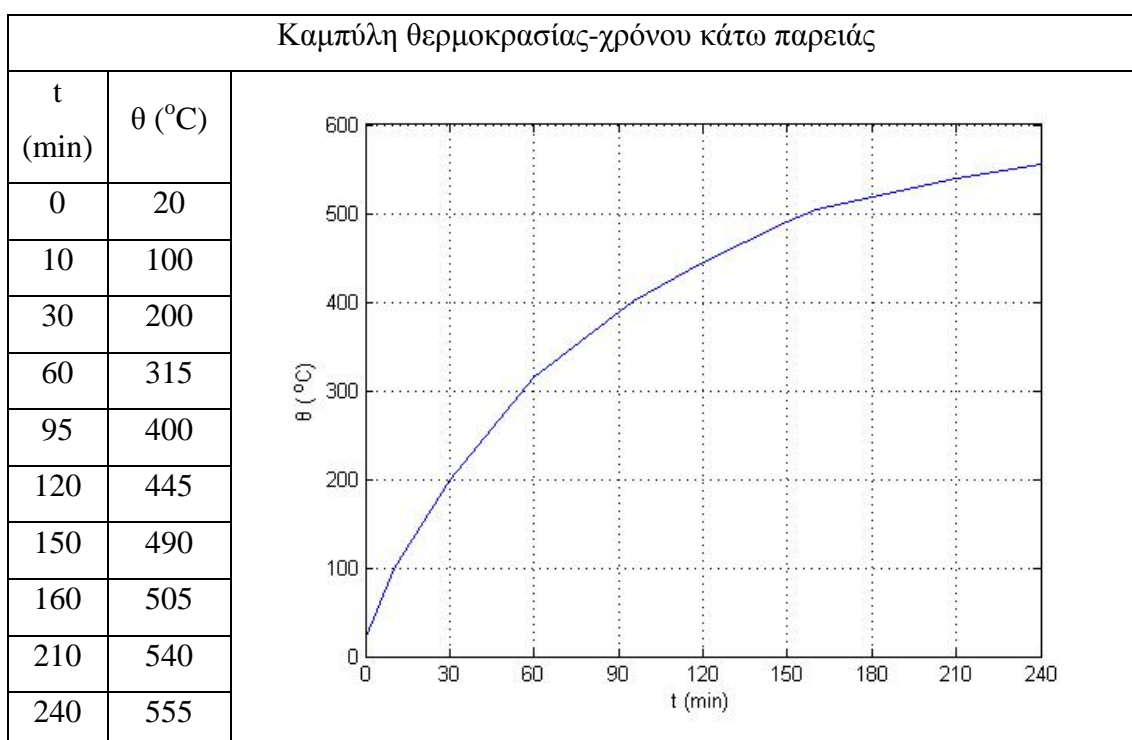
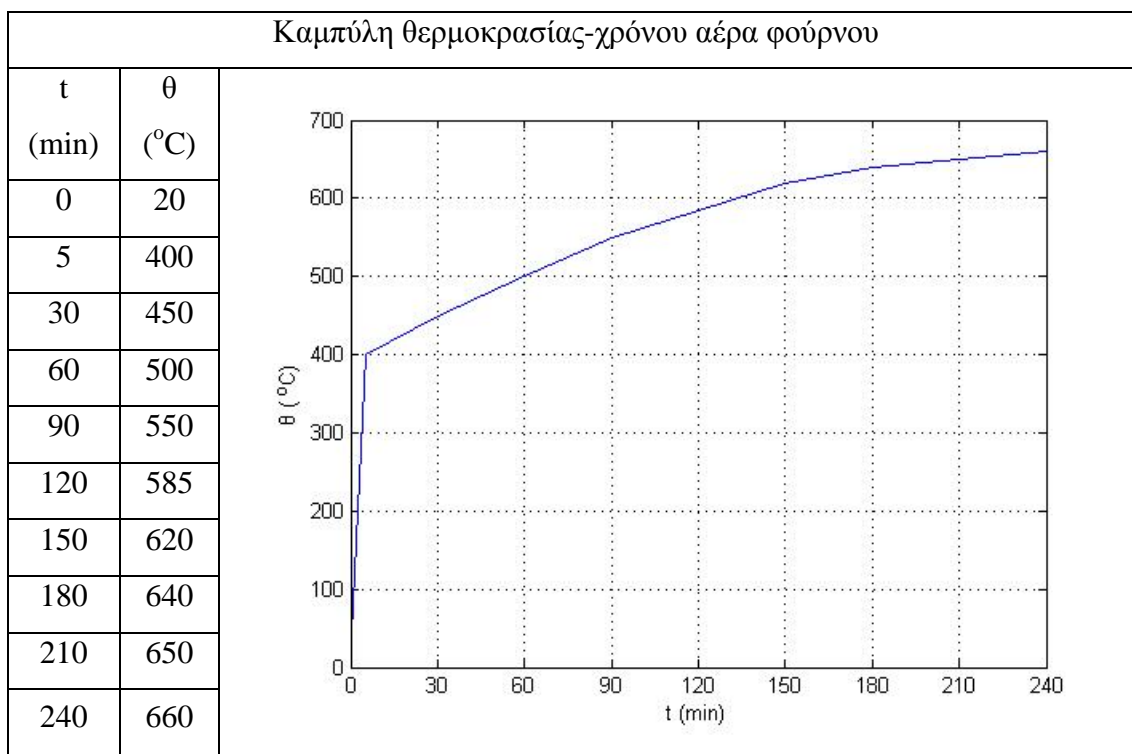
- Θερμοκρασιακή φόρτιση

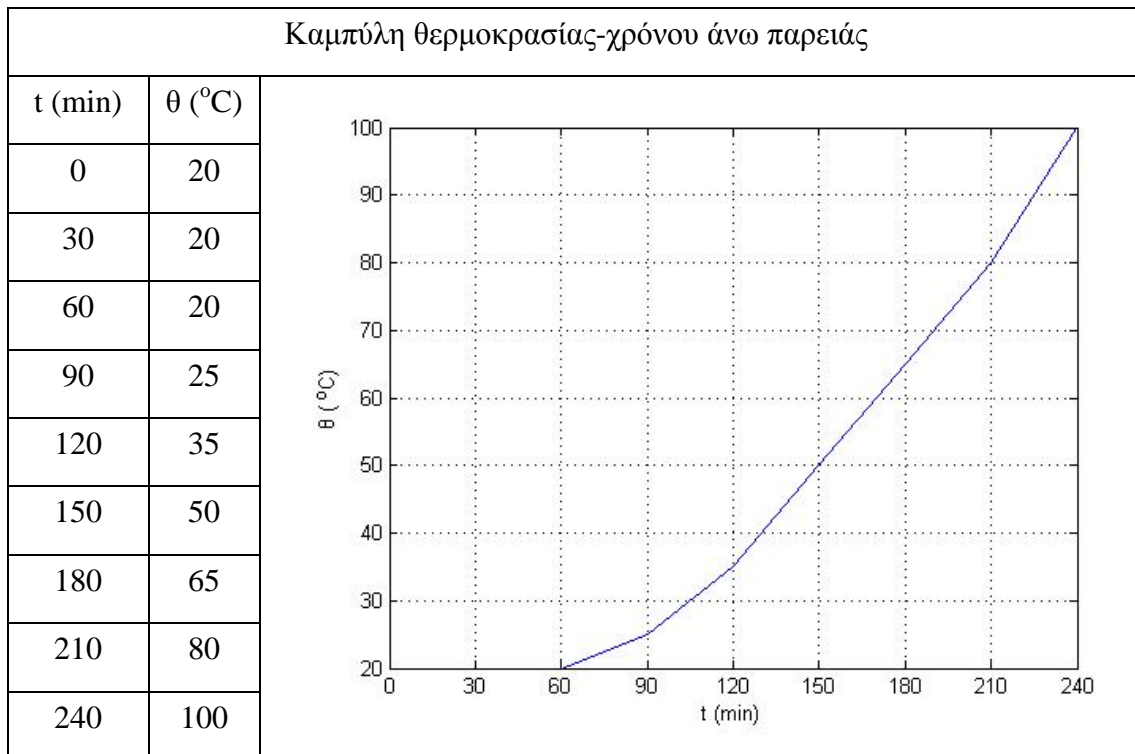
Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζονται τέσσερις καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου.

Οι τρεις από αυτές, η καμπύλη του αέρα του φούρνου, η καμπύλη της κάτω παρειάς της πλάκας και η καμπύλη την άνω παρειάς της πλάκας χρησιμοποιούνται ως συνοριακές συνθήκες σε αντίστοιχες αναλύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται ξεχωριστά στην επόμενη ενότητα, μαζί με τα αποτελέσματα κάθε μίας στην επόμενη ενότητα.

Η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου του εφελκόμενου χάλυβα χρησιμοποιείται ως μέσο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων.

Τα αριθμητικά δεδομένα για κάθε μία από τις καμπύλες είναι τα εξής:



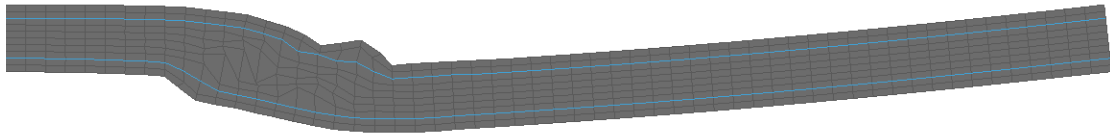


Στο Σχήμα 5-1 όπως και στην εκφώνηση της πειραματικής διαδικασίας αναφέρεται ότι καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος επιτρεπόταν η αξονική διαστολή της πλάκας. Επομένως αρχικά έγινε η ανάλυση με τις εξής παραδοχές:

- Στην κάτω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου της κάτω παρειάς.
- Οι υπόλοιπες παρειές είναι πλήρως μονωμένες, δηλαδή έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.
- Η στήριξη στο αριστερό άκρο της πλάκας είναι πλήρης πάκτωση, ενώ η στήριξη στο δεξιό άκρο της πλάκας εμποδίζει την στροφή και την κατακόρυφη μετακίνηση, επιτρέπει ωστόσο την οριζόντια μετακίνηση.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική – τελείως πλαστική.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι ότι η πλάκα αστοχεί διατμητικά, προτού ολοκληρωθεί η έκθεση των 240 λεπτών στην πυρκαγιά.

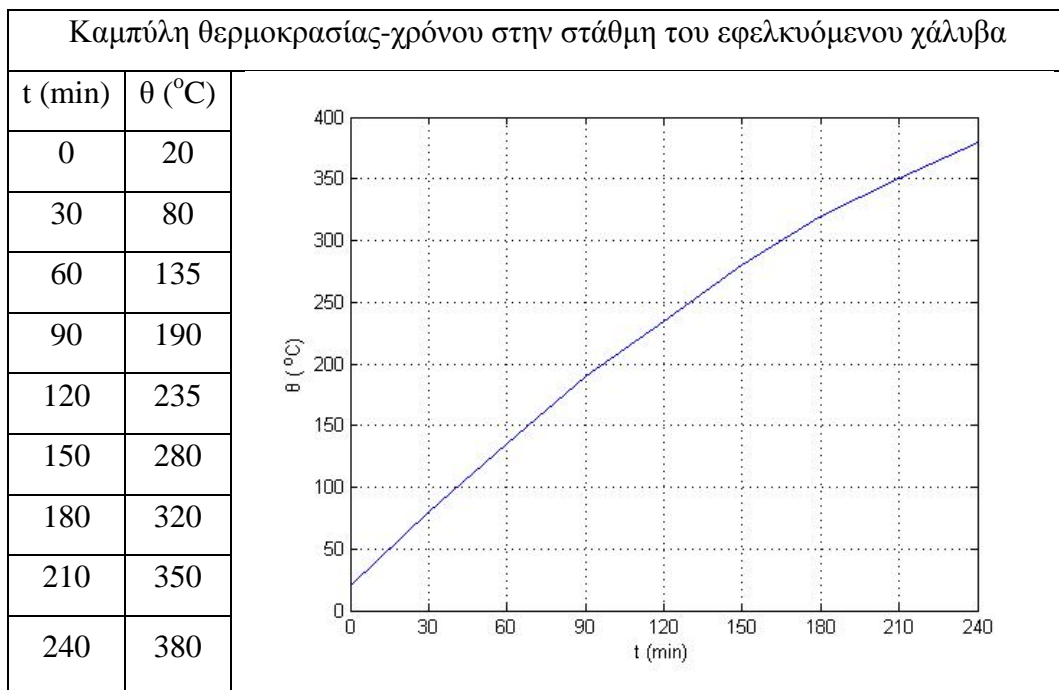
Η εικόνα της πλάκας στο 170^ο λεπτό της έκθεσης φαίνεται στο Σχήμα 5-11.



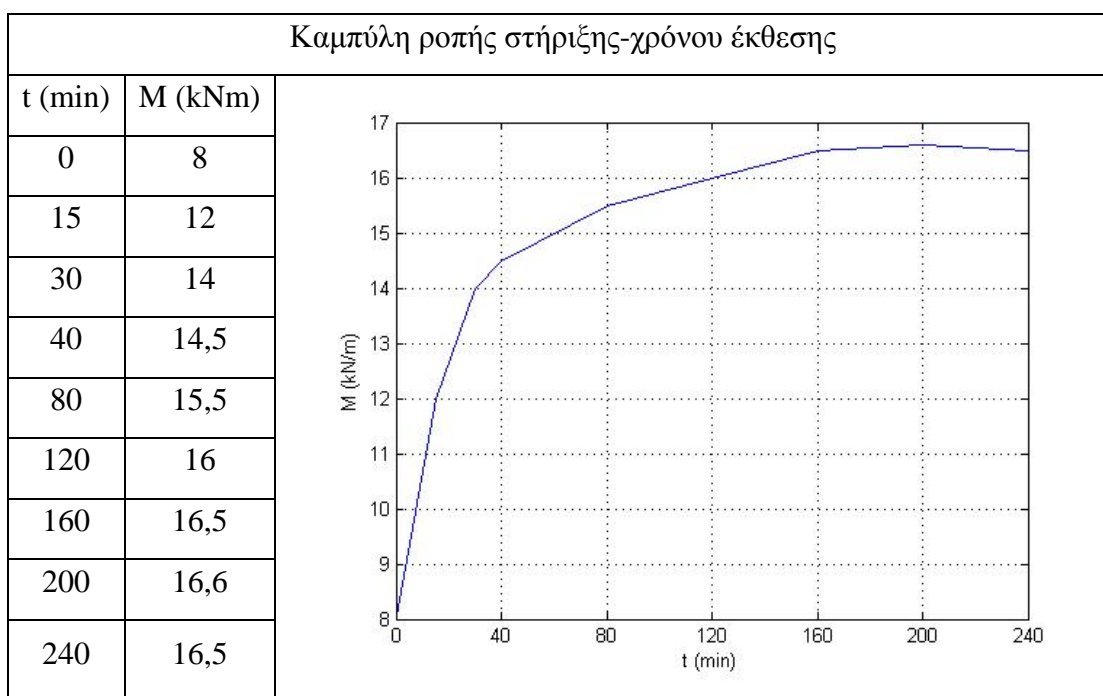
Σχήμα 4-11: Εικόνα της πλάκας στο 170^ο λεπτό της ανάλυσης επιτρέποντας την αξονική διαστολή.

Οι επόμενες αναλύσεις γίνονται με διαφορετικές παραδοχές η κάθε μία έτσι ώστε να βρεθεί αυτή που πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5-2 η θερμοκρασία στην στάθμη του εφελκόμενου (κάτω) χάλυβα που μετρήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος έχει τις εξής τιμές:



Σύμφωνα με το Σχήμα 5-3 η τιμή της ροπής της στήριξης κατά την διάρκεια της έκθεσης στην πυρκαγιά έχει τις εξής τιμές:



4.1.4 Αναλύσεις

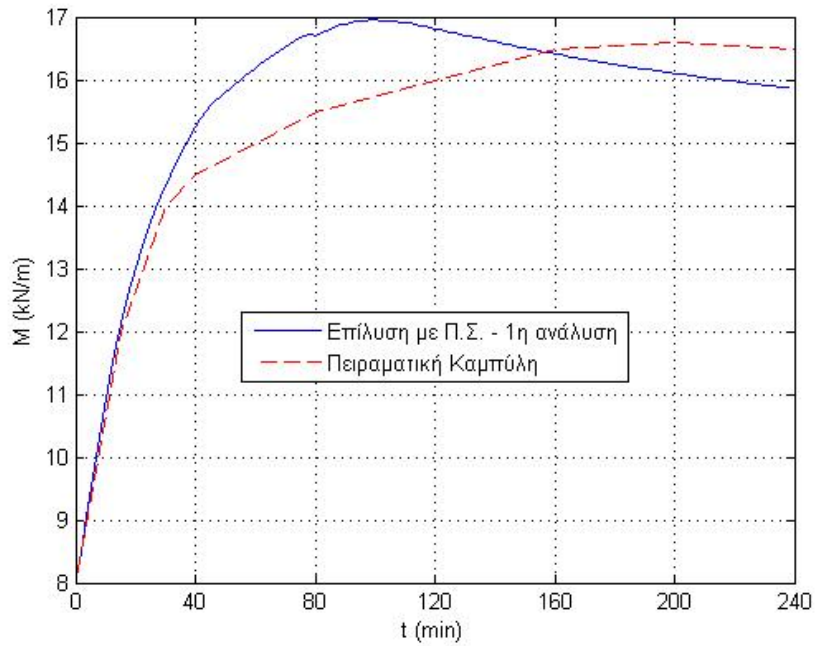
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τεσσάρων αναλύσεων υπό διαφορετικές παραδοχές. Η πιο ρεαλιστική περίπτωση είναι η δεύτερη ανάλυση.

4.1.4.1 Πρώτη ανάλυση

Παραδοχές:

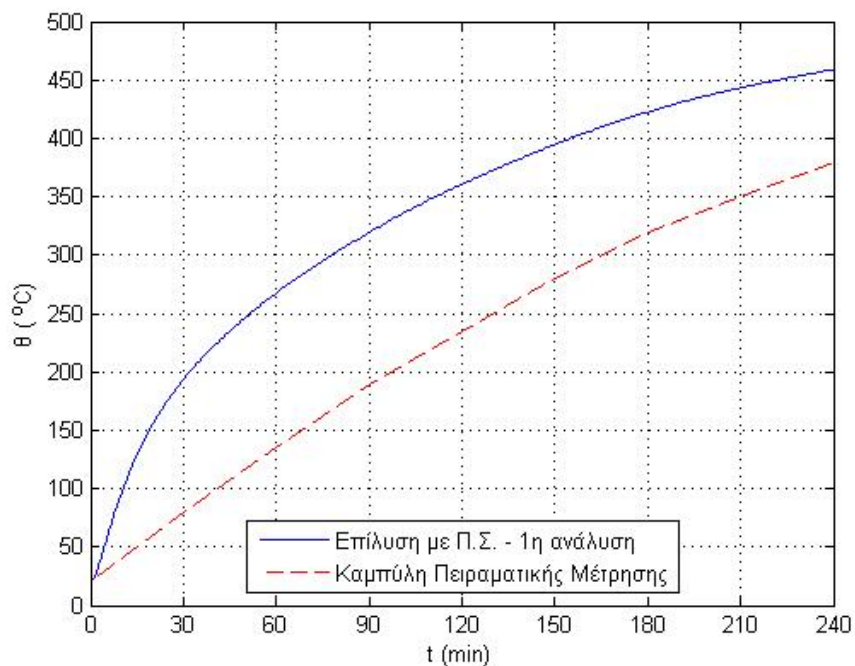
- Στην κάτω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου του αέρα φούρνου.
- Οι υπόλοιπες παρειές είναι πλήρως μονωμένες, δηλαδή έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.
- Οι συνθήκες στήριξης της πλάκας δεν επιτρέπουν την ελεύθερη αξονική διαστολή, είναι δηλαδή πλήρεις πακτώσεις.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική – τελείως πλαστική.

Το διάγραμμα της ροπής στήριξης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά που προκύπτει από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι το παρακάτω



Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες προκύπτει ότι τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Στα 30 πρώτα λεπτά οι δύο καμπύλες ταυτίζονται ενώ έπειτα η απόκλιση των δύο καμπυλών είναι λιγότερη των 2 kNm.

Το διάγραμμα της θερμοκρασίας στην στάθμη του εφελκόμενου (κάτω) οπλισμού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά είναι το εξής:

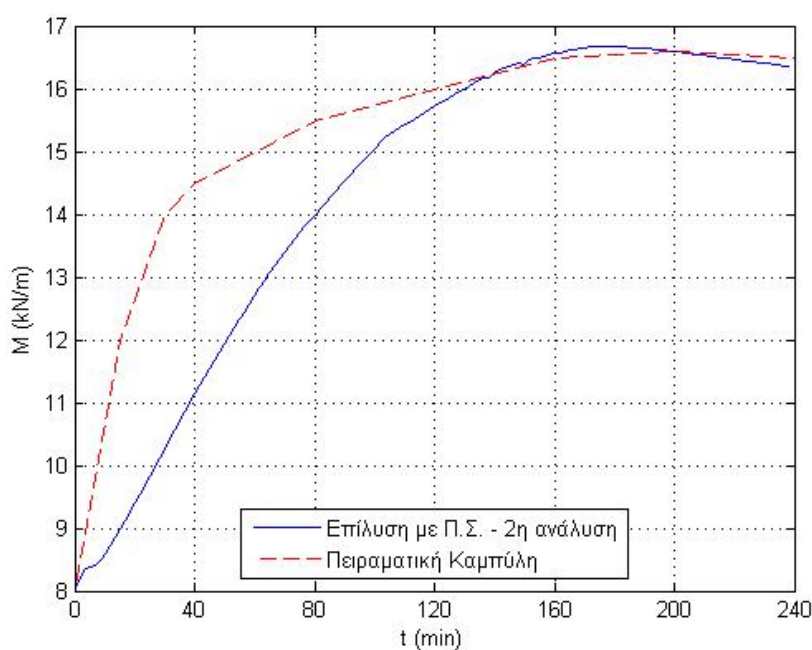


4.1.4.2 Δεύτερη ανάλυση

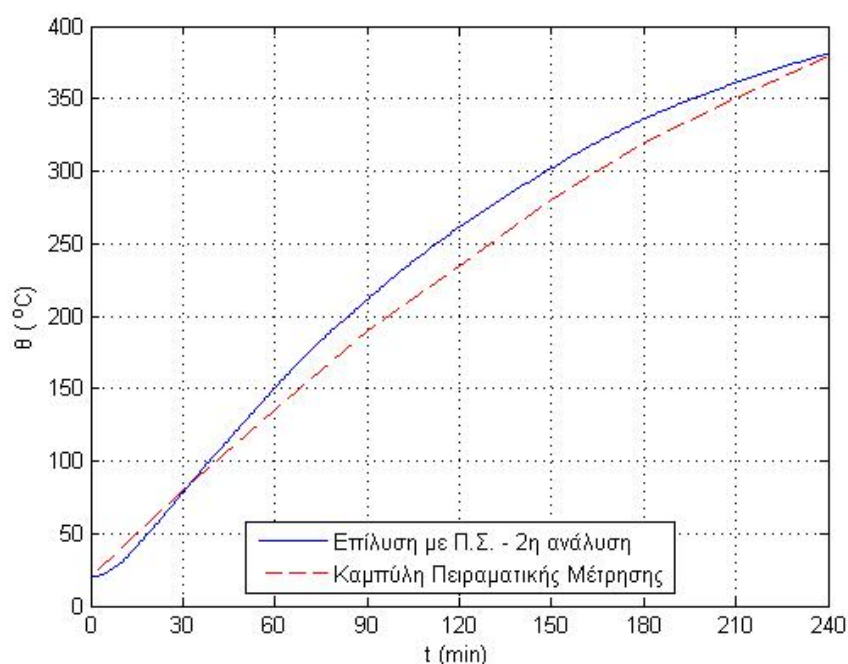
Παραδοχές:

- Στην κάτω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου της κάτω παρειάς.
- Οι υπόλοιπες παρειές είναι πλήρως μονωμένες, δηλαδή έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.
- Οι συνθήκες στηρίξεως της πλάκας δεν επιτρέπουν την ελεύθερη αξονική διαστολή, είναι δηλαδή πλήρεις πακτώσεις.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική – τελείως πλαστική.

Το διάγραμμα της ροπής στήριξης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά που προκύπτει από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι το παρακάτω



Το διάγραμμα της θερμοκρασίας στην στάθμη του εφελκυόμενου (κάτω) οπλισμού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά είναι το εξής:

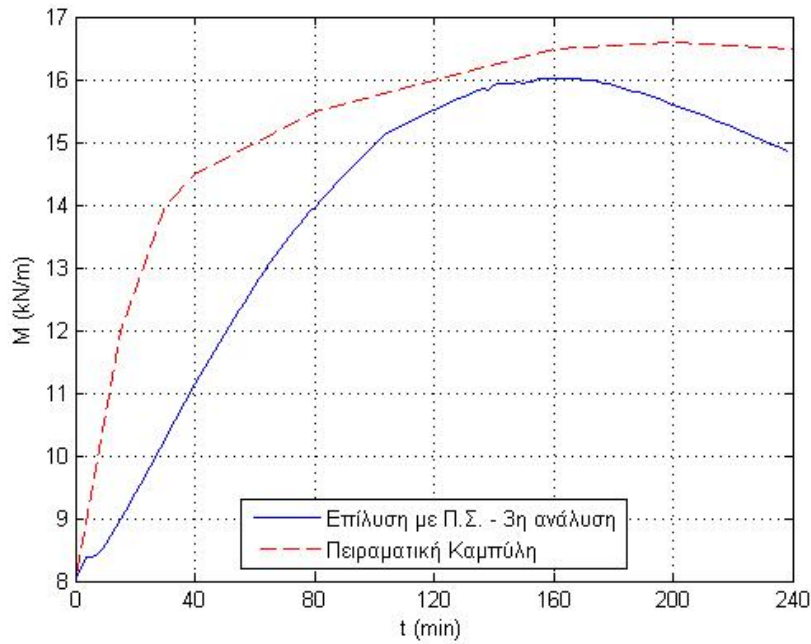


4.1.4.3 Τρίτη ανάλυση

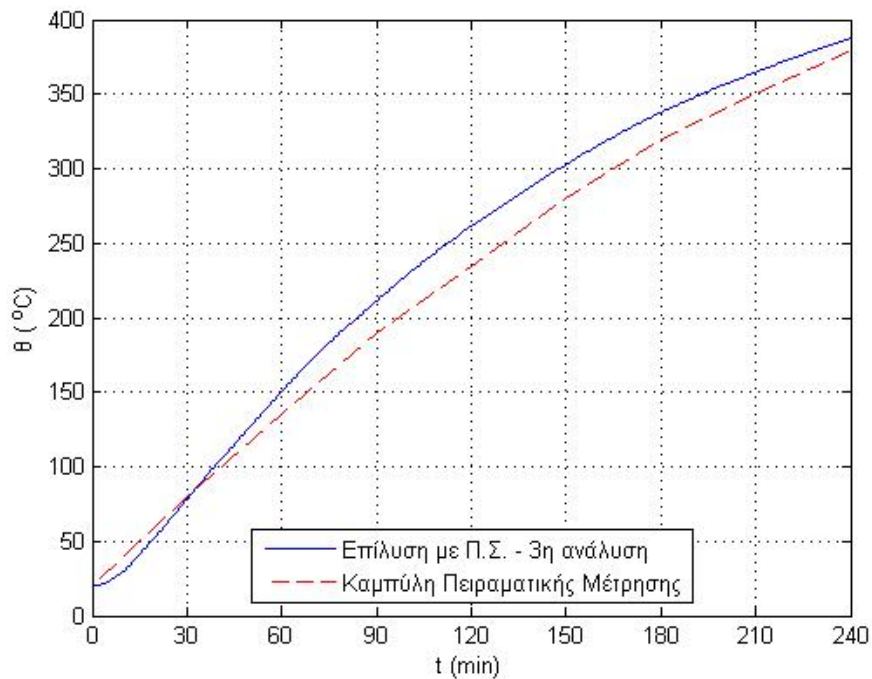
Παραδοχές:

- Στην κάτω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου της κάτω παρειάς.
- Στην άνω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου της άνω παρειάς. Οι δύο πλευρικές παρειές της πλάκας θεωρούνται πλήρως μονωμένες, δηλαδή έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.
- Οι συνθήκες στηρίξεως της πλάκας δεν επιτρέπουν την ελεύθερη αξονική διαστολή, είναι δηλαδή πλήρεις πακτώσεις.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική – τελείως πλαστική.

Το διάγραμμα της ροπής στήριξης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά που προκύπτει από την συγκεκριμένη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι το παρακάτω



Το διάγραμμα της θερμοκρασίας στην στάθμη του εφελκυόμενου (κάτω) οπλισμού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά είναι το εξής:



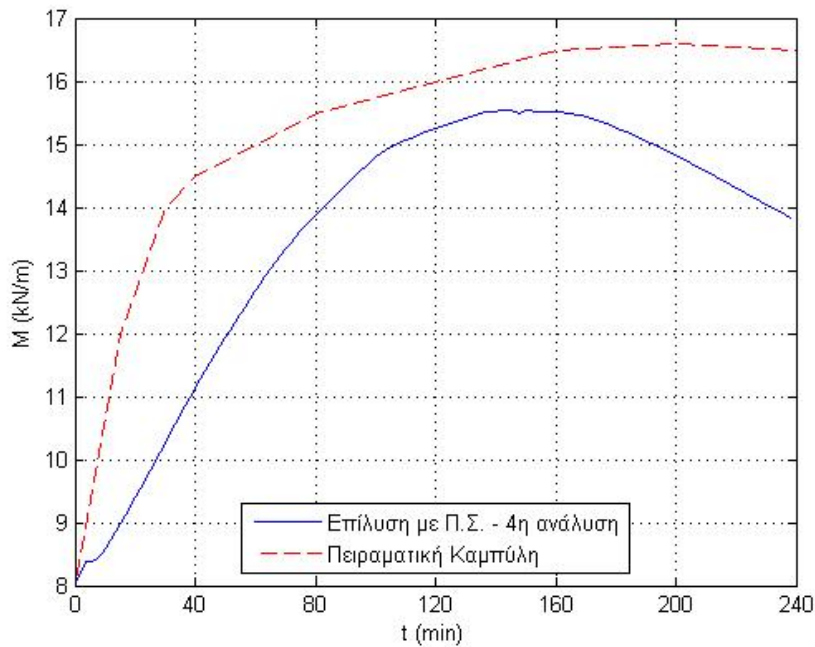
4.1.4.4 Τέταρτη ανάλυση

Παραδοχές:

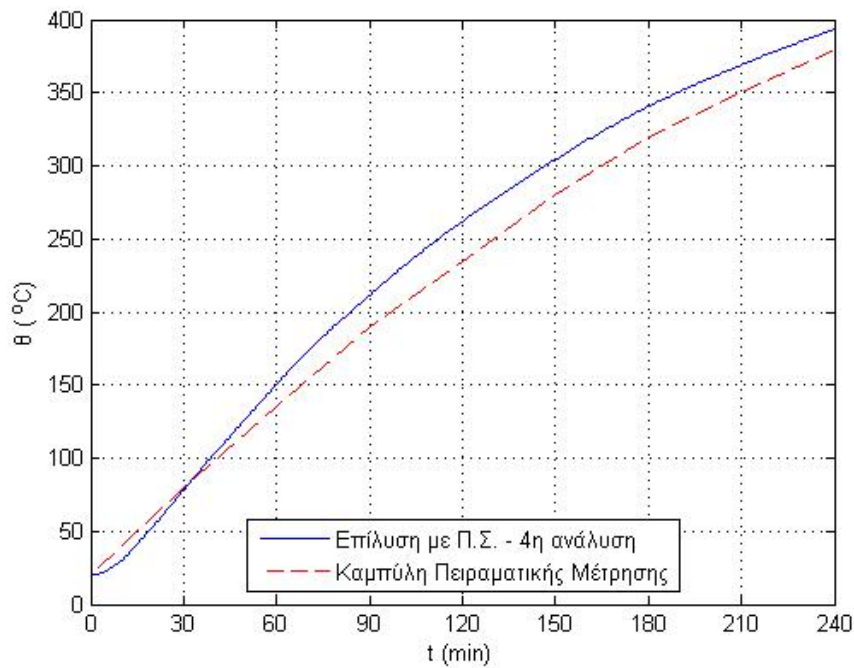
- Στην κάτω παρειά εφαρμόζεται ως συνοριακή συνθήκη η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου της κάτω παρειάς.

- Στην άνω παρειά δεν εφαρμόζεται κάποια συνοριακή συνθήκη. Οι δύο πλευρικές παρειές της πλάκας θεωρούνται πλήρως μονωμένες, δηλαδή έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.
- Οι συνθήκες στηρίξεως της πλάκας δεν επιτρέπουν την ελεύθερη αξονική διαστολή, είναι δηλαδή πλήρεις πακτώσεις.
- Η συμπεριφορά του χάλυβα είναι ελαστική – τελείως πλαστική.

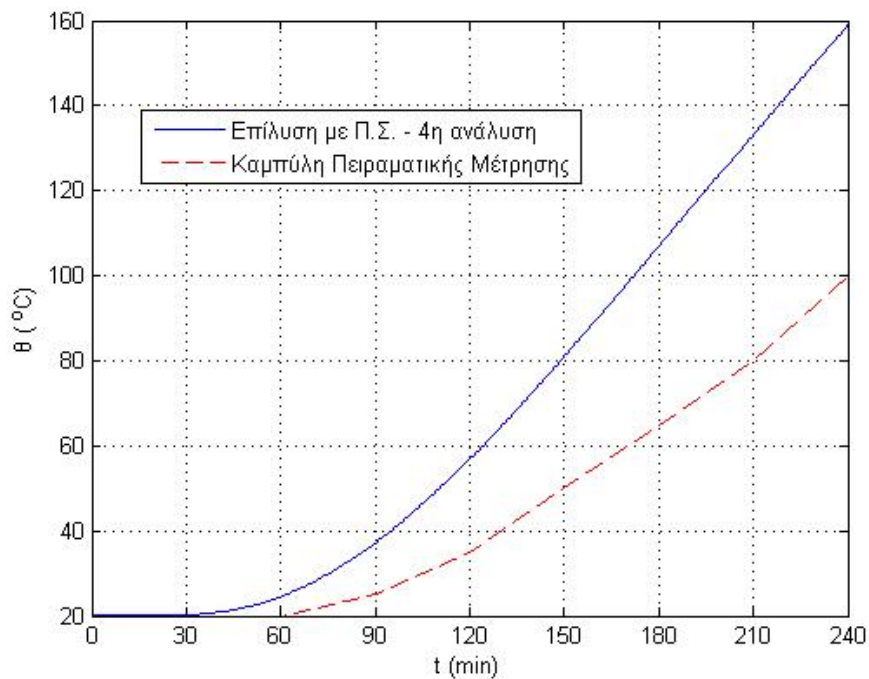
Το διάγραμμα της ροπής στήριξης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά που προκύπτει από την συγκεκριμένη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι το παρακάτω



Το διάγραμμα της θερμοκρασίας στην στάθμη του εφελκυόμενου (κάτω) οπλισμού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά είναι το εξής:

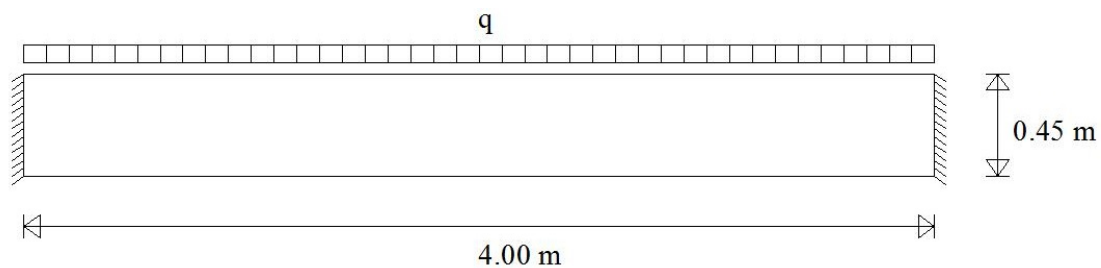


Το διάγραμμα της θερμοκρασίας στην άνω παρειά στάθμη της πλάκας συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά είναι το εξής:



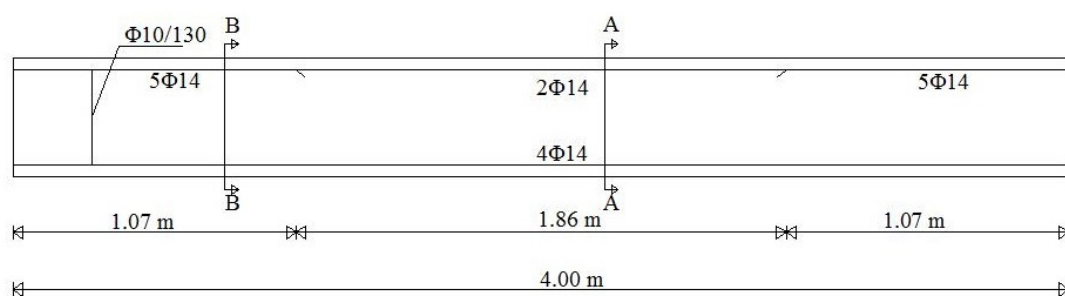
4.2 Διερεύνηση απόκρισης αμφίπακτης δοκού υπό πυρκαγιά

4.2.1 Γεωμετρία και αρχικά στοιχεία

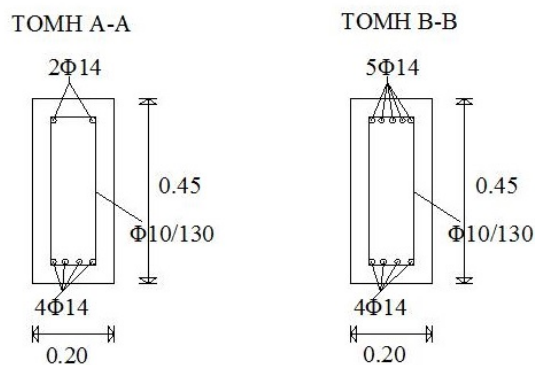


Σχήμα 4-12

Οπλιση δοκού:



Σχήμα 4-13



Σχήμα 4-14

Αντοχές υλικών:

Σκυρόδεμα: C25/30

Χάλυβας: B500C

Παραδοχές υπολογισμού της ροπής αντοχής:

- Η διατομή κατά την κάμψη διατηρεί την επιπεδότητά της, δηλαδή παραμένει επίπεδη
- Αγνοείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
- Η αστοχία του σκυροδέματος σε κάμψη γίνεται σε παραμόρφωση 3,5%, ενώ για τον χάλυβα δεν υπάρχει όριο στην παραμόρφωση
- Στην στάθμη του οπλισμού η παραμόρφωση του σκυροδέματος ισούται με την παραμόρφωση του χάλυβα, λόγω πλήρους συνάφειας μεταξύ των δύο υλικών,

Υπολογισμός ροπών αντοχής των δύο διατομών (για 20 °C):

	Mrd (+) (kNm)	Mrd (-) (kNm)
ΔΙΑΤΟΜΗ Α-Α	114,74	59,49
ΔΙΑΤΟΜΗ Β-Β	115,01	142,43

Υπολογισμός της μέγιστης τέμνουσας που μπορεί να παραλάβει η δοκός:

$$V_{rdmax} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta)$$

$$V_{rds} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9d f_{ywd}$$

όπου :

$$A_{sw} = 2 \pi 0,8^2 / 4 = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ το εμβαδό των ράβδων των συνδετήρων}$$

$s=0.13 \text{ m}$ η απόσταση δύο διαδοχικών συνδετήρων

άρα:

$$V_{rds} = \frac{1,57}{0,13} 0,9*0,405*50,0 = 220 \text{ kN}$$

$$V_{rdmax} = 0,5*0,20*0,9*0,405*0,6*25000/1,5 = 364,5 \text{ kN}$$

Επομένως η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να φέρει η δοκός είναι 220 kN. Η τέμνουσα αυτή θα προκληθεί από κατακόρυφο φορτίο ίσο με:

$$q = V * L / 2 = 220 * 2 / 4,0 = 110 \text{ kN/m.}$$

Υπολογισμός του φορτίου που μπορεί να προκαλέσει πλαστικές αρθρώσεις στις στηρίξεις της δοκού, θεωρώντας ότι το υλικό της δοκού συμπεριφέρεται ελαστικά.

Θα πρέπει:

$$q * L^2 / 12 \leq 142,43 \rightarrow q \leq 142,43 * 12 / 4^2 \rightarrow q \leq 106,8 \text{ kN/m}$$

και:

$$q * L^2 / 24 \leq 114,74 \rightarrow q \leq 114,74 * 24 / 4^2 \rightarrow q \leq 172,1 \text{ kN/m}$$

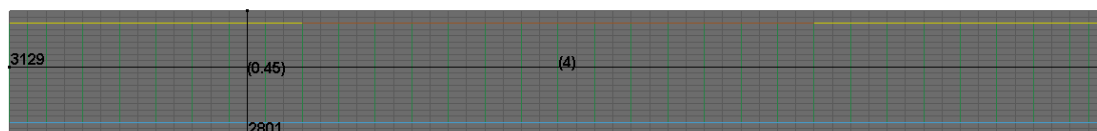
Επομένως το κατανεμημένο φορτίο που μπορεί να φέρει η δοκός χωρίς οριακά να δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις είναι 106,8 kN/m. Φορτίο μεγαλύτερο των 110 kN/m θα προκαλέσει διατμητική αστοχία.

Για $q = 106,8 \text{ kN/m}$, η ροπή στο μέσο του ανοίγματος θα είναι: $106,8 * 4^2 / 24 = 71,2 \text{ kN/m}$.

Η θεώρηση της ελαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος δεν είναι ρεαλιστική. Η μη γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος και του χάλυβα θα προκαλέσει μία ανακατανομή της έντασης, η οποία δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί με απλές πράξεις. Για τον προσδιορισμό της έντασης λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών αλλά και την επιρροή της πυρκαγιάς σε αυτή, προσομοιώνουμε την δοκό στο LS-Dyna.

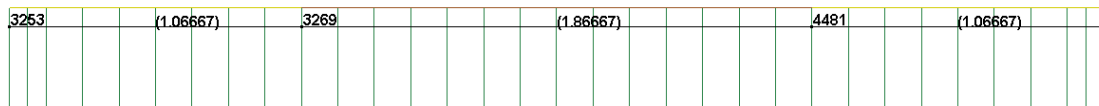
4.2.2 Προσομοίωση της δοκού στο LS-DYNA

Ο κánaβος των πεπερασμένων στοιχείων:



Σχήμα 4-15

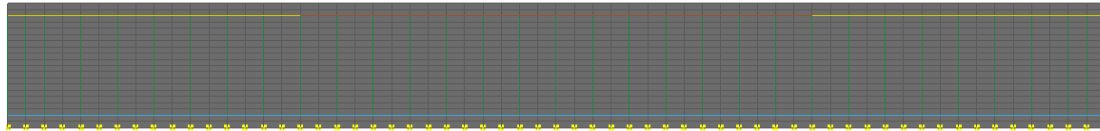
Όπλιση δοκού:



Σχήμα 4-16

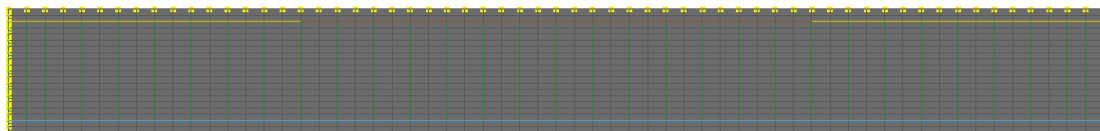
Συνοριακές συνθήκες:

παρειά που εκτίθεται στην πυρκαγιά:



Σχήμα 4-17

παρειές με πλήρη μόνωση:



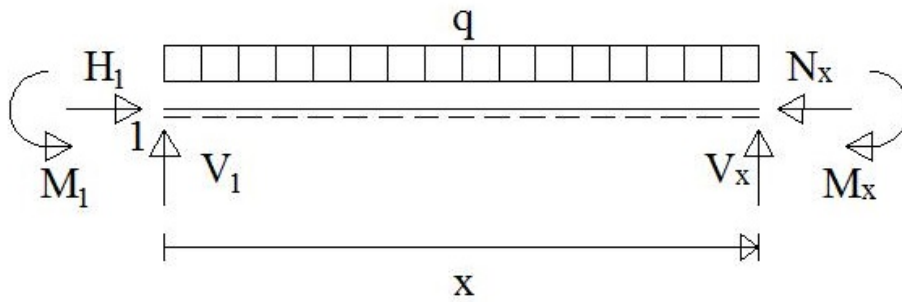
Σχήμα 4-18

4.2.3 Κατασκευή διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών της δοκού

Το λογισμικό LS-DYNA δεν έχει την δυνατότητα να παράγει διαγράμματα εντατικών μεγεθών. Ωστόσο ο χρήστης μπορεί να ορίσει συγκεκριμένες διατομές του μέλους που εξετάζει και να λάβει τις τιμές των εντατικών μεγεθών στις διατομές αυτές.

Έχοντας λοιπόν τα εντατικά μεγέθη στην διατομή της στήριξης, η κατασκευή των διαγραμμάτων των ροπών, τεμνουσών και αξονικών είναι εφικτή.

Για παράδειγμα θεωρούμε μία αμφίπακτη δοκό μήκους L , στην οποία ασκείται το κατανεμημένο φορτίο q σε όλο το μήκος της.



Σχήμα 4-19

Η τιμή της τέμνουσας δύναμης στην τυχαία θέση x είναι :

$$V(x) = V_1 - q * x$$

Η τιμή της ροπής στην τυχαία θέση x είναι:

$$M(x) = V_1 * x - q * x^2 / 2$$

Η τιμή της αξονικής δύναμης στην τυχαία θέση x είναι:

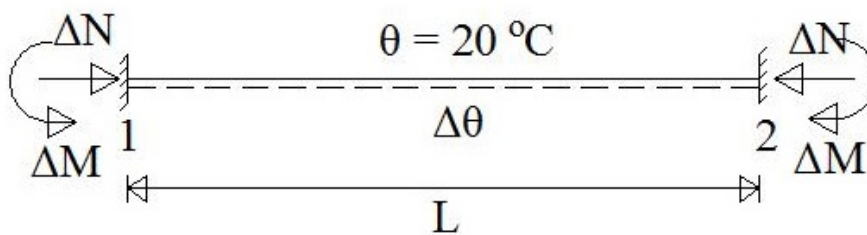
$$N(x) = - H_1$$

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB είναι δυνατή η κατασκευή των διαγραμμάτων των παραπάνω εξισώσεων.

Η διαδικασία αυτή γίνεται διακριτοποιώντας την δοκό σε m τμήματα ίσου μήκους και έπειτα υπολογίζεται η τιμή των μεγεθών εισάγοντας την αντίστοιχη απόσταση του στοιχείου από την στήριξη.

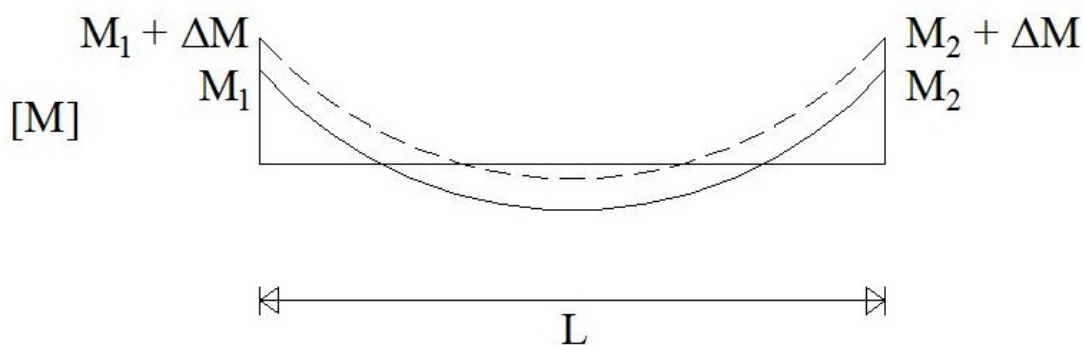
Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη λόγω της στατικής φόρτισης.

Ωστόσο, η μεταβολή της θερμοκρασίας της κάτω παρειάς της δοκού (όπως θα συμβεί σε μία πυρκαγιά) θα προκαλέσει πρόσθετη ένταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-20.



Σχήμα 4-20

Η πρόσθετη αυτή ένταση θα προκαλέσει ανακατανομή της αρχικής έντασης ($t=0$ min), κατά την οποία, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η αξονική (θλιπτική) δύναμη και η ροπή στις στηρίξεις αυξάνονται, ενώ η ροπή στο μέσον του ανοίγματος μειώνεται. Μία τυπική τέτοια ανακατανομή φαίνεται στο Σχήμα 5-21.



Σχήμα 4-21

Η τέμνουσα δύναμη στην δοκό δεν μεταβάλλεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

Έχοντας λοιπόν τα εντατικά μεγέθη της στήριξης του μέλους καθ' όλη την διάρκεια της ανάλυσης υπό πυρκαγιά, είναι εφικτή η κατασκευή του διαγράμματος ροπών τεμνουσών και αξονικών, για οποιοδήποτε χρονική στιγμή της έκθεσης στην πυρκαγιά.

Για την επαλήθευση της διαδικασίας αυτής επιλύεται η αμφίπακτη δοκός με κατανεμημένο φορτίο $q = 20 \text{ kN/m}$ και η κάτω παρειά της εκτίθεται στην πρότυπη πυρκαγιά για 60 min ενώ οι υπόλοιπες παρειές είναι πλήρως μονωμένες.

Η δοκός είναι σχεδιασμένη να φέρει φορτίο 110 kN/m. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα 20 kN/m είναι κατά πολύ λιγότερα του φορτίου αστοχίας, επομένως η ρηγμάτωση της δοκού θα είναι αρκετά περιορισμένη, άρα περιμένουμε ότι η λύση πριν αρχίσει η πυρκαγιά (για $t = 0$ min) να προσεγγίζει την ελαστική.

Για ελαστική συμπεριφορά της δοκού η ροπή στην στήριξη θα είναι:

$$q \cdot L^2 / 12 = 20 \cdot 4^2 / 12 = 26,7 \text{ kNm}$$

ενώ στο μέσον του ανοίγματος:

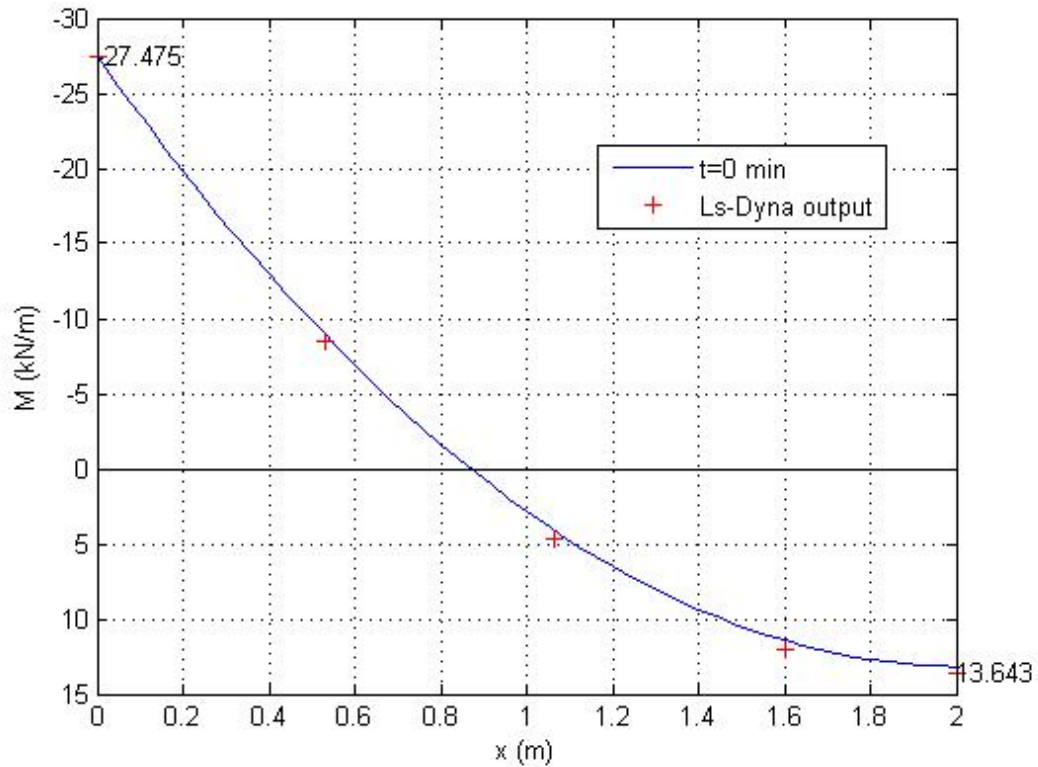
$$q \cdot L^2 / 24 = 20 \cdot 4^2 / 24 = 13,3 \text{ kNm}$$

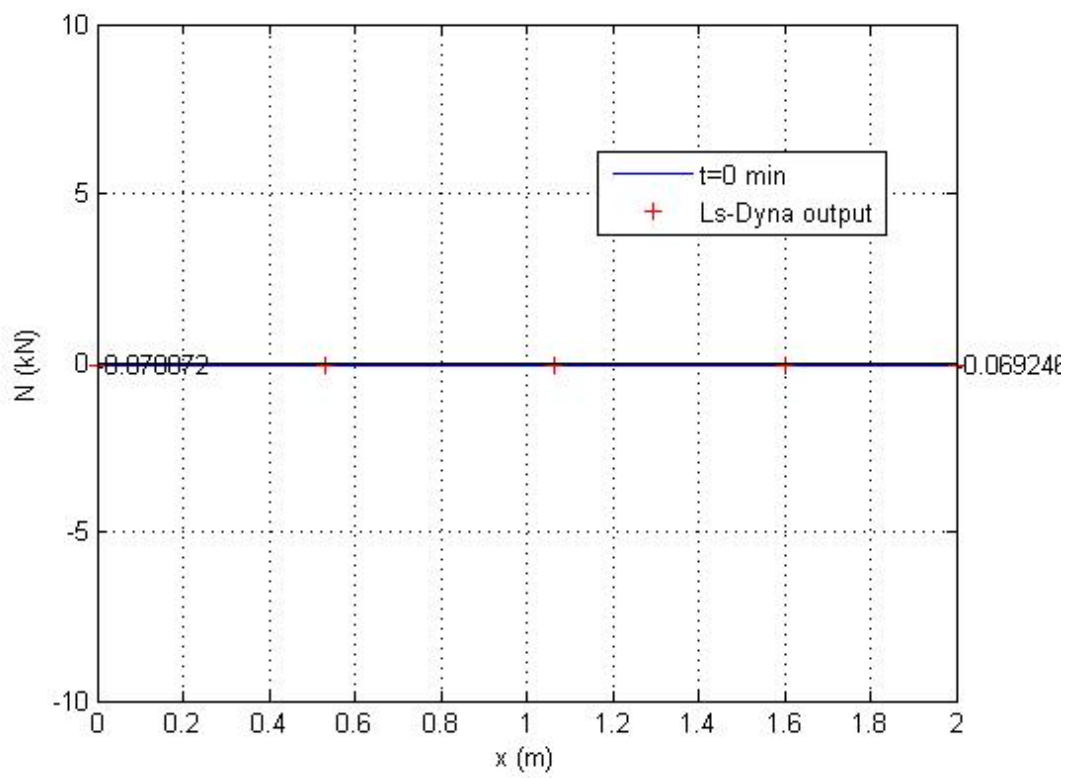
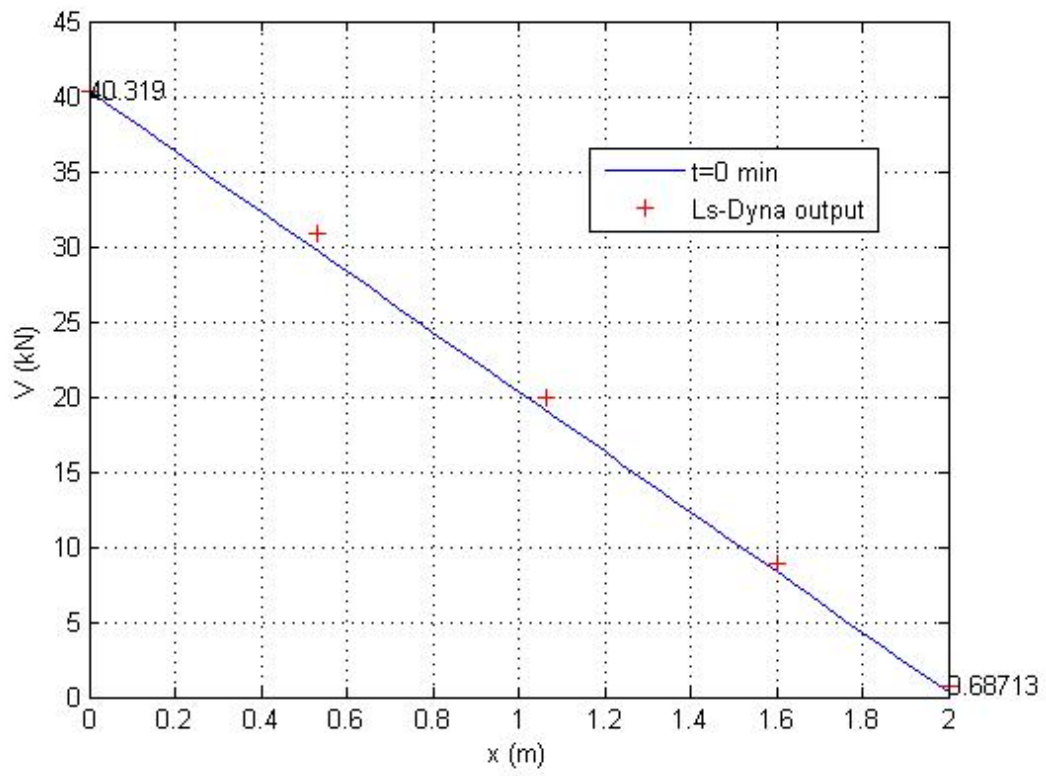
Ανεξάρτητα με το εάν η δοκός συμπεριφέρεται ελαστικά ή όχι, το άθροισμα των απόλυτων τιμών της ροπή της στήριξης και του μέσου του ανοίγματος πρέπει να ισούται με:

$$q * L^2 / 8 = 20 * 4^2 / 8 = 40,0 \text{ kNm}$$

Λόγω συμμετρίας της φόρτισης παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη στο μισό μήκος της δοκού.

Τα σημεία με τον κόκκινο σταυρό είναι οι τιμές των εντατικών μεγεθών που δίνει το LS-DYNA.

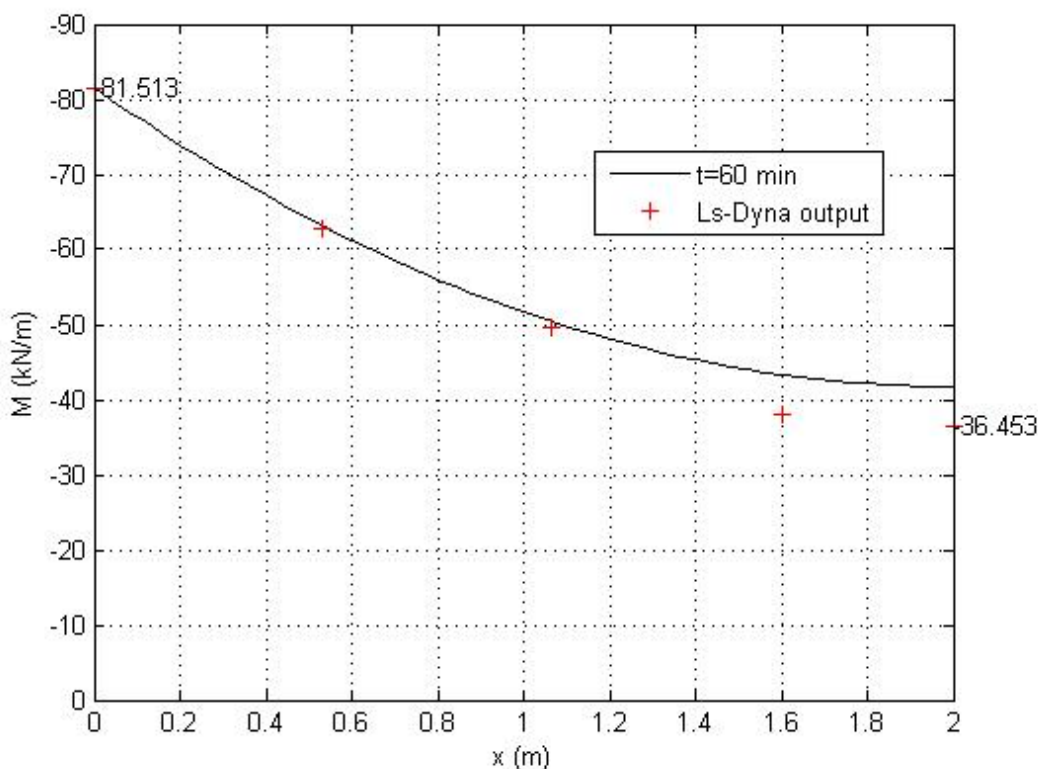


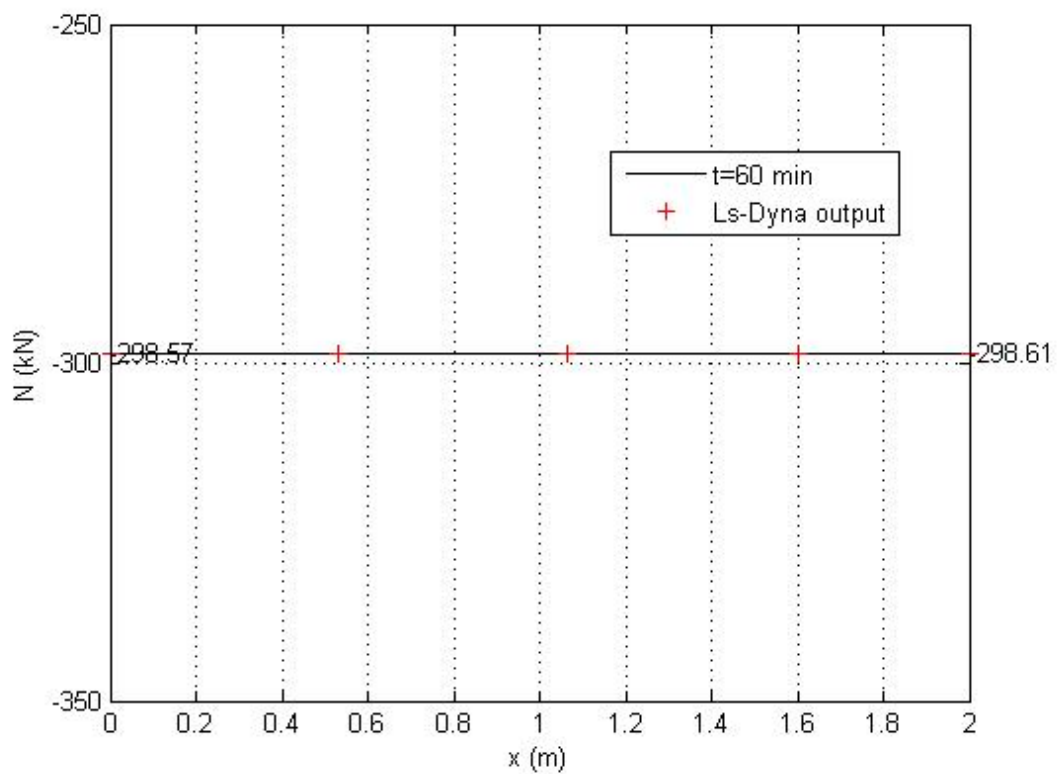
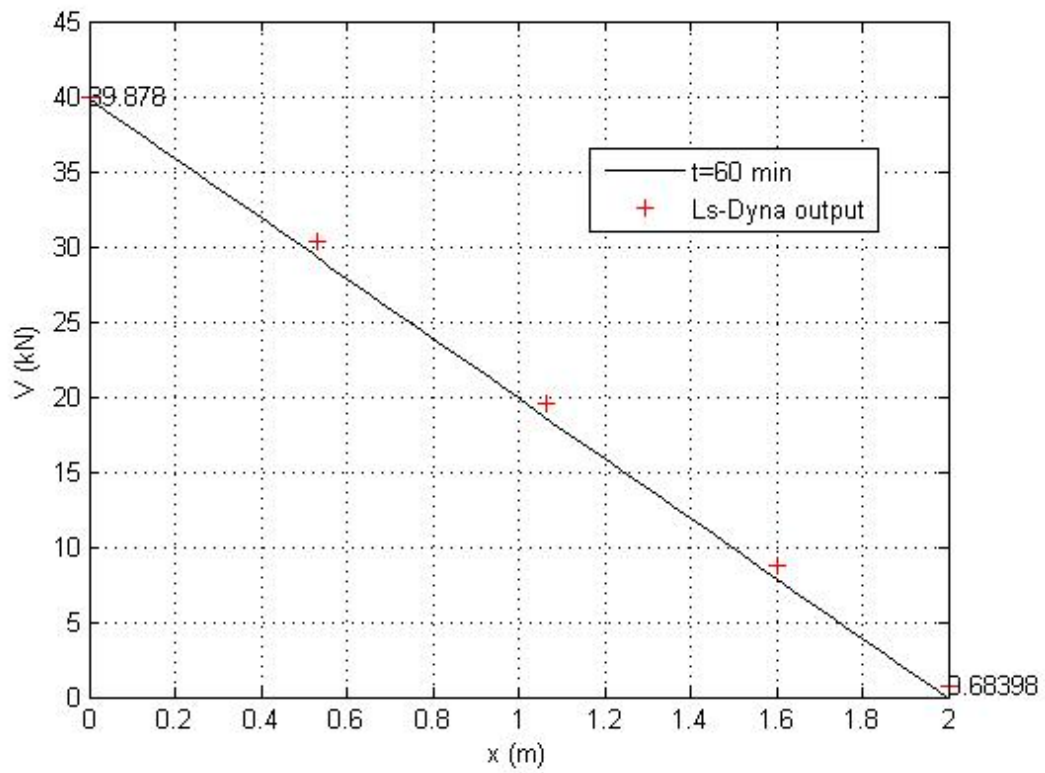


4.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων:

- Σε όλα τα διαγράμματα τα αποτελέσματα που δίνει το LS-DYNA ταυτίζονται με τις τιμές που υπολογίζονται με την μέθοδο που αναπτύχθηκε.
- Στο διάγραμμα ροπών η τιμή της ροπής στην στήριξη είναι -27,5 kNm η οποία προσεγγίζει αρκετά την τιμή της ελαστικής λύσης (-26,6 kNm), όπως επίσης και η τιμή της ροπής στο μέσον του ανοίγματος η οποία είναι 13,6 kNm ενώ η ελαστική λύση δίνει 13,3 kNm. Ένα ακόμη στοιχείο που δηλώνει την ορθότητα της λύσης είναι ότι το άθροισμα των απόλυτων τιμών των ροπών της στήριξης και του ανοίγματος ισούται με $q \cdot L^2 / 8$ ($26.6 + 13.6 = 40.2$ kNm).
- Στο διάγραμμα τεμνουσών η τέμνουσα στην στήριξη έχει τιμή 40,3 kN, όσο δηλαδή υπολογίσθηκε η τιμή του $q \cdot L / 2$ αλλά και στο μέσον του ανοίγματος ισούται με 0 kN, όπως επίσης περιμέναμε από την στατική επίλυση.
- Στο διάγραμμα αξονικών οι τιμές στην στήριξη και στο μέσον στην ουσία ταυτίζονται και ισούνται με 0 kN, όπως ορίζει και η στατική επίλυση.

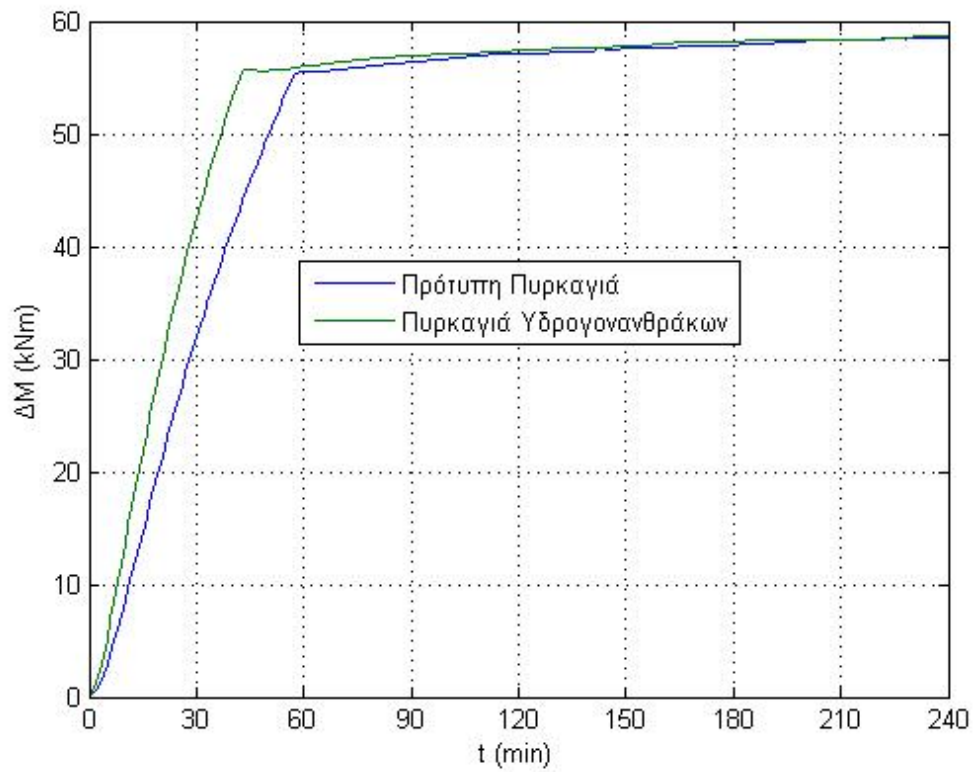
Τα αντίστοιχα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών έπειτα από 60 min έκθεσης της κάτω παρειάς της δοκού στην πρότυπη πυρκαγιά είναι τα εξής:

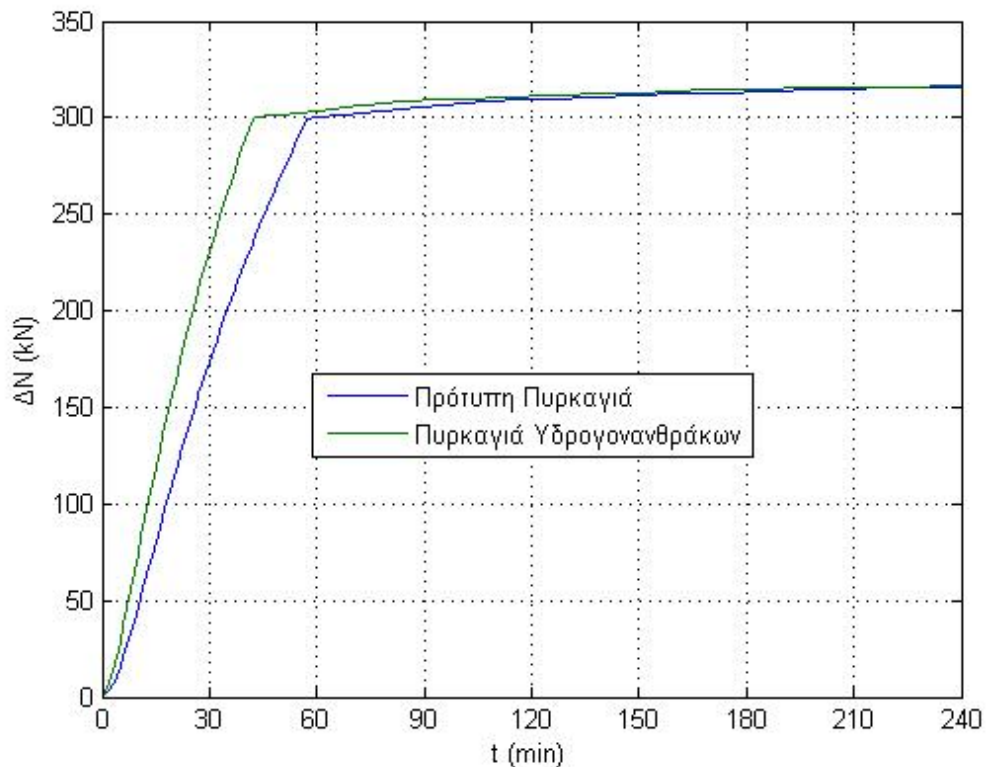




Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων είναι ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το LS-DYNA συμπίπτουν με αυτά που υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας το MATLAB.

Στην συνέχεια επιλύεται η ίδια δοκός με μηδενικό κατακόρυφο φορτίο αλλά εκτιθέμενη στην πρότυπη πυρκαγιά και στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων έτσι ώστε να προσδιοριστεί η πρόσθετη (αρνητική) ροπή που θα προκαλέσει η μεταβολή της θερμοκρασίας αλλά και την πρόσθετη (θλιπτική) αξονική δύναμη.





Έπειτα, αναλύεται η ίδια δοκός με μεγαλύτερο φορτίο, τέτοιο όμως ώστε να αποφευχθεί καταρχάς η διατμητική αστοχία πριν αρχίσει η πυρκαγιά, δηλαδή στους 20 °C. Αρχικώς λοιπόν πρέπει : $q \leq 110 \text{ kN/m}$. Το γεγονός όμως ότι η αντοχή του σκυροδέματος και του χάλυβα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, σημαίνει ότι και η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να φέρει η δοκός θα είναι μικρότερη από αυτή που δίνει το μέγιστο φορτίο 110 kN/m , δηλαδή $110 \cdot 4/2 = 220 \text{ kN}$. Η μείωση της φέρουσας ικανότητας σε διάτμηση εξαρτάται από τον χρόνο έκθεσης στην πυρκαγιά αλλά και από το είδος της πυρκαγιάς (πρότυπη ή υδρογονανθράκων).

Αρχικά επιλέγεται η τιμή 65 kN/m για το κατανεμημένο φορτίο q .

Για $q = 65 \text{ kN/m}$ η ελαστική λύση δίνει :

$$\text{ροπή στήριξης} : q \cdot L^2 / 12 = 65 \cdot 4^2 / 12 = 86,7 \text{ kNm}$$

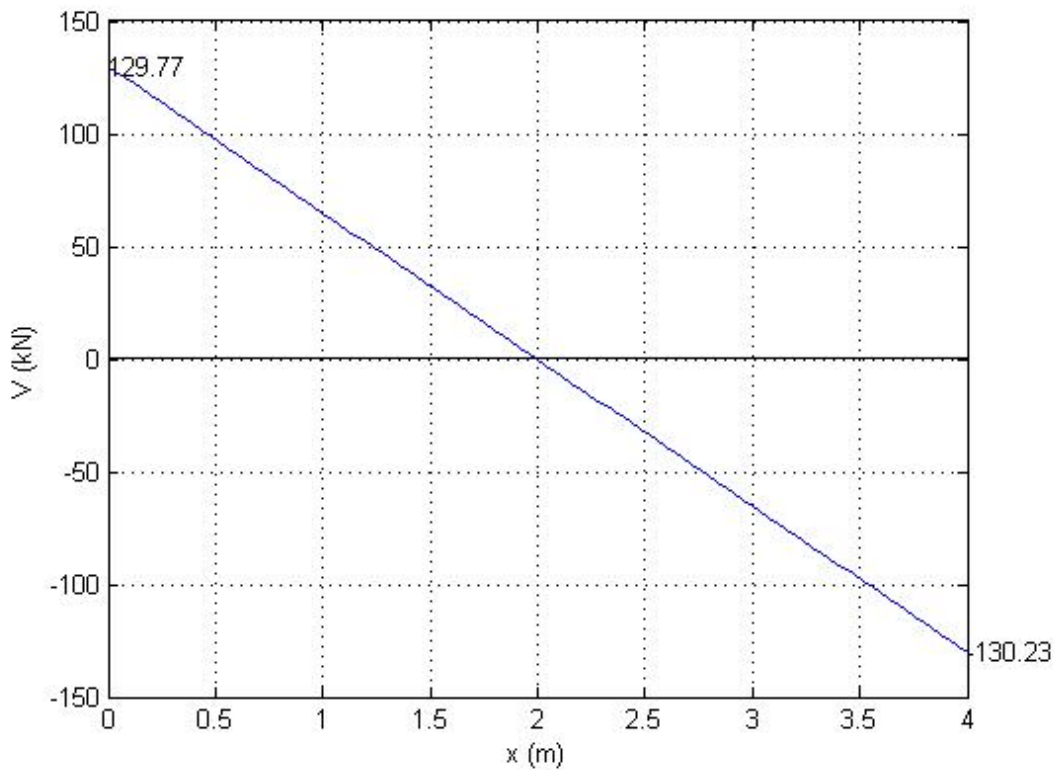
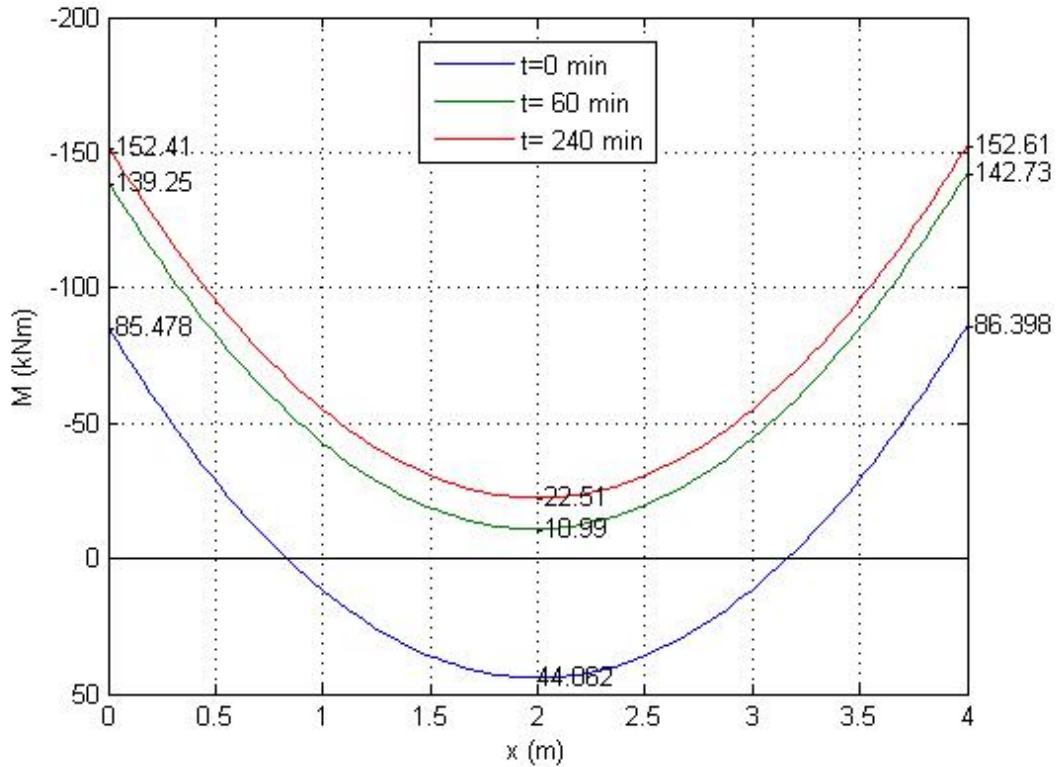
$$\text{ροπή ανοίγματος} : q \cdot L / 24 = 65 \cdot 4^2 / 24 = 43,3 \text{ kNm}$$

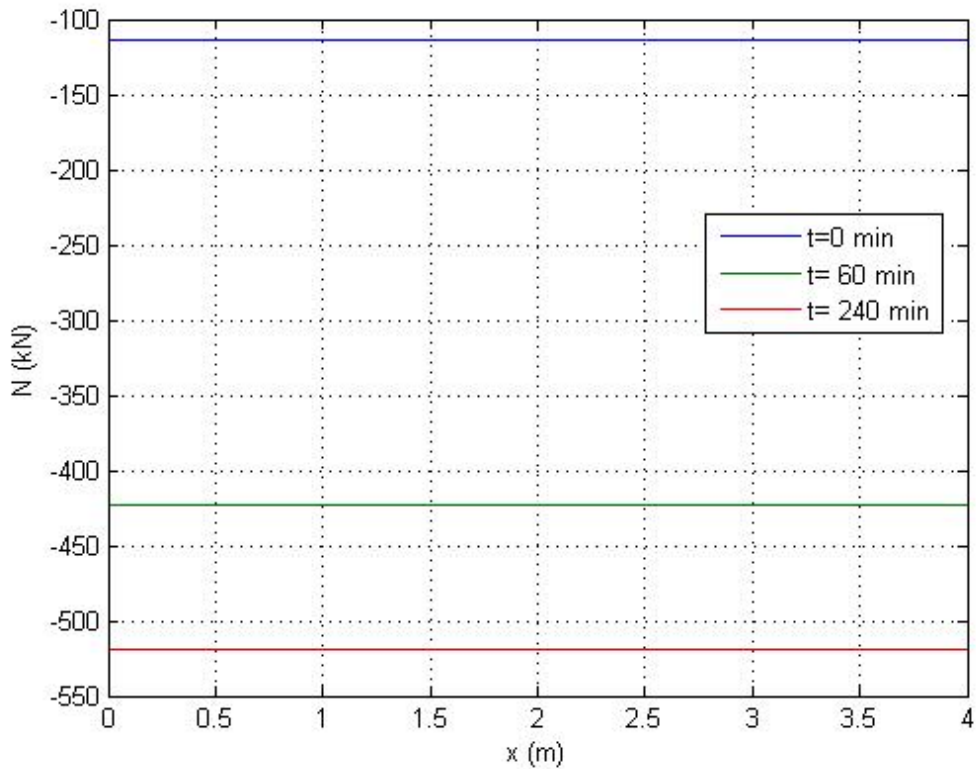
$$\text{τέμνουσα στήριξης} : q \cdot L / 2 = 65 \cdot 4 / 2 = 130 \text{ kN}$$

$$q \cdot L^2 / 8 = 65 \cdot 4^2 / 8 = 130 \text{ kNm}$$

4.2.5 Έκθεση της δοκού στην πρότυπη πυρκαγιά για 240 min

4.2.5.1 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών της αμφίπακτης δοκού στους 20 °C, σε έκθεση 60 και 240 λεπτών στην πρότυπη πυρκαγιά.





Τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών επαληθεύονται.

Η τέμνουσα στην στήριξη είναι 130 kN.

Για $t = 0 \text{ min}$ η ροπή στην στήριξη είναι 85,4 kNm ενώ στο μέσον του ανοίγματος είναι 44 kNm, νούμερα τα οποία συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με αυτά που δίνει η λύση θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά του υλικού.

Η διαφορά των απολύτων τιμών της ροπής στην στήριξη από την ροπή στο μέσον του ανοίγματος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή ισούται με $q L^2 / 8 = 130 \text{ kNm}$.

Για παράδειγμα:

- $t = 60 \text{ min}$:

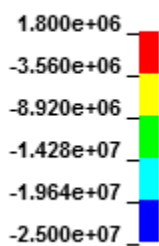
$$139,25 - 10,99 = 128,01 \text{ kNm}$$

- $t = 240 \text{ min}$:

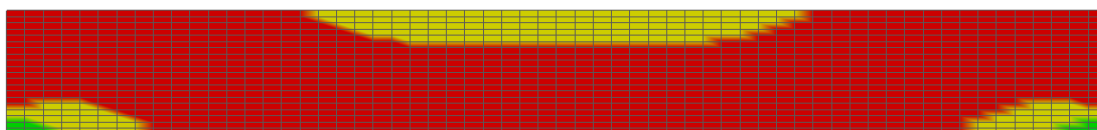
$$152,41 - 22,51 = 129,9 \text{ kNm}$$

4.2.5.2 Αποτελέσματα της ανάλυσης

Fringe Levels



Κατανομή ορθών τάσεων στην δοκό στους 20 °C



Κατανομή ορθών τάσεων στη δοκό έπειτα από 60 λεπτά έκθεσης στην πρότυπη πυρκαγιά

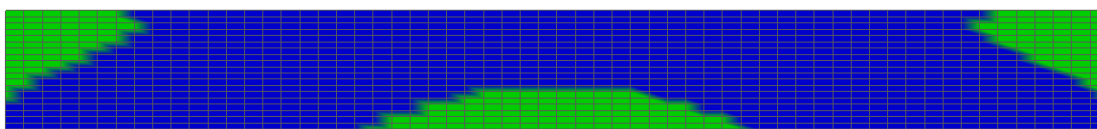


Κατανομή ορθών τάσεων στη δοκό έπειτα από 240 λεπτά έκθεσης στην πρότυπη πυρκαγιά

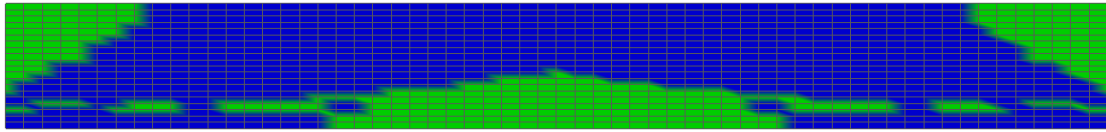


Κατανομή ορθών τάσεων στην διατομή της στήριξης

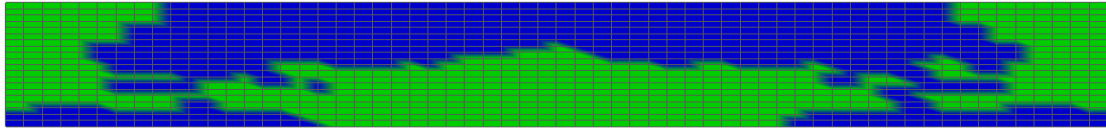
Ρηγμάτωση της δοκού στους 20 °C



Ρηγμάτωση της δοκού έπειτα από 60 λεπτά έκθεσης στην πρότυπη πυρκαγιά

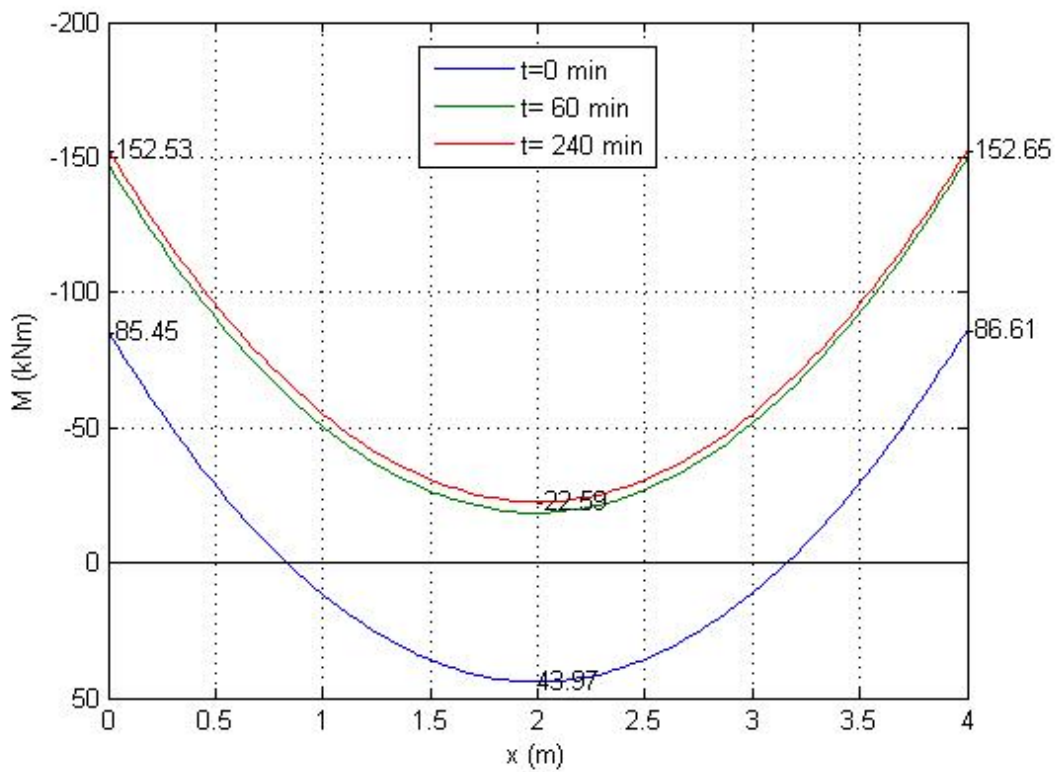


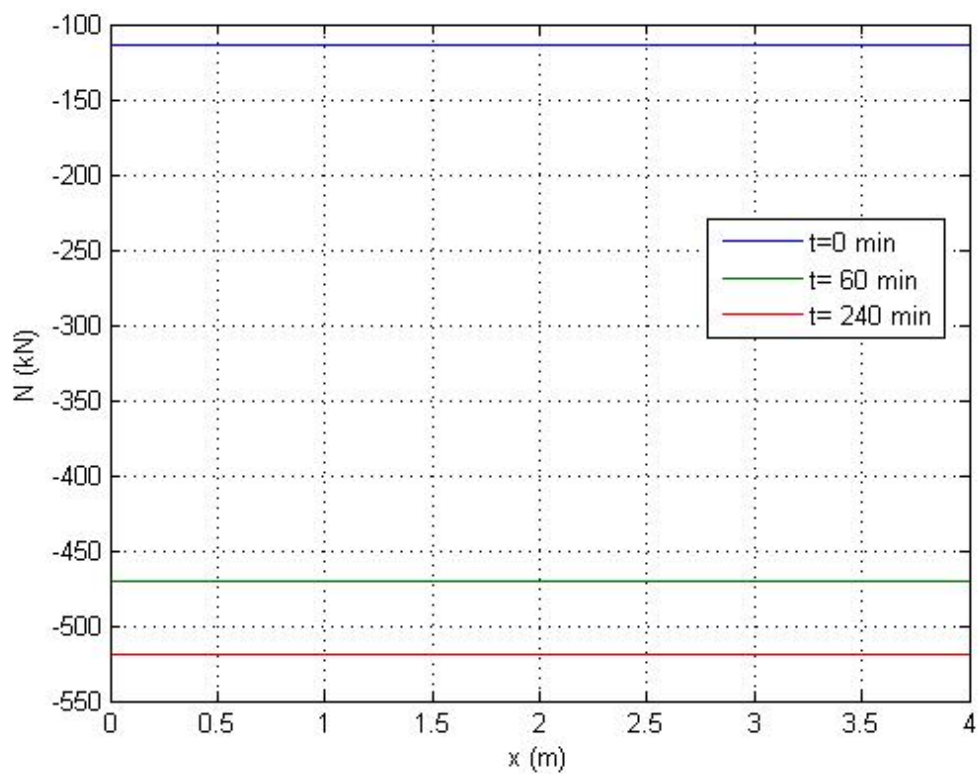
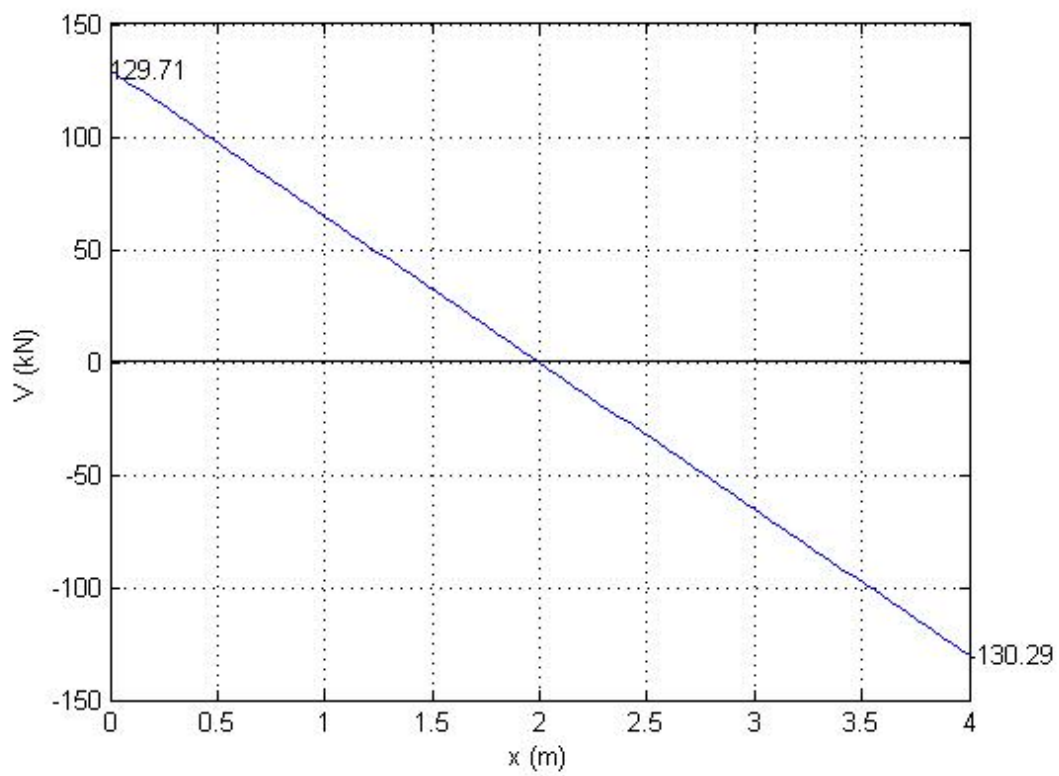
Ρηγμάτωση της δοκού έπειτα από 240 λεπτά έκθεσης στην πρότυπη πυρκαγιά



4.2.6 Έκθεση της δοκού στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων για 240 min

4.2.6.1 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών της αμφίπακτης δοκού στους 20 °C, σε έκθεση 60 και 240 λεπτών στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων





Τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών επαληθεύονται.

Η τέμνουσα στην στήριξη είναι 130 kN.

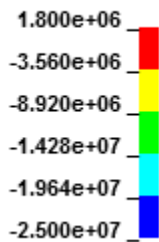
Για $t = 0 \text{ min}$ η ροπή στην στήριξη είναι $85,4 \text{ kNm}$ ενώ στο μέσον του ανοίγματος είναι 44 kNm , νούμερα τα οποία συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με αυτά που δίνει η ελαστική λύση.

Η διαφορά των απολύτων τιμών της ροπής στην στήριξη από την ροπή στο μέσον του ανοίγματος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή ισούται με $q L^2 / 8 = 130 \text{ kNm}$.

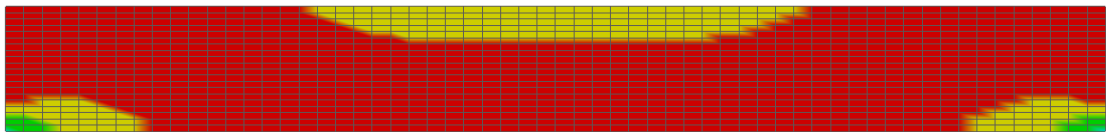
$$152,53 - 22,59 = 129,94 \text{ kNm}$$

4.2.6.2 Αποτελέσματα της ανάλυσης

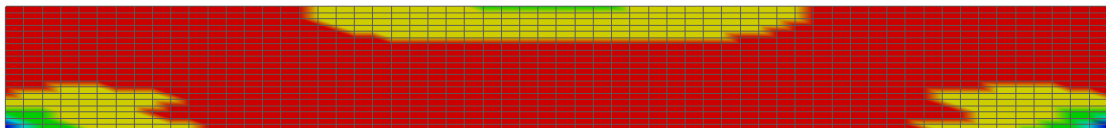
Fringe Levels



Κατανομή ορθών τάσεων στην δοκό στους $20 \text{ }^\circ\text{C}$



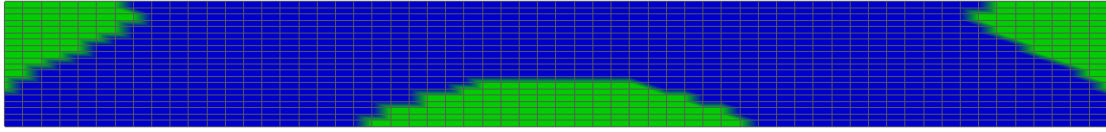
Κατανομή ορθών τάσεων στη δοκό έπειτα από 60 λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων



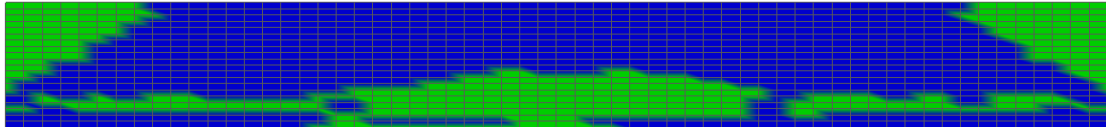
Κατανομή ορθών τάσεων στη δοκό έπειτα από 240 λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά υδρογονανθράκων



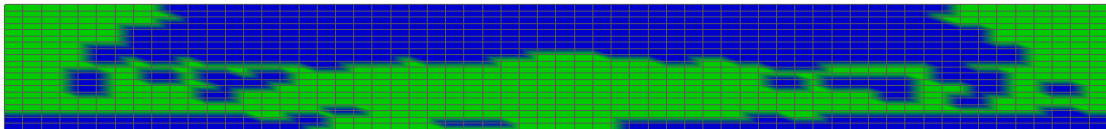
Ρηγμάτωση της δοκού στους 20 °C



Ρηγμάτωση της δοκού έπειτα από 60 λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά
υδρογονανθράκων

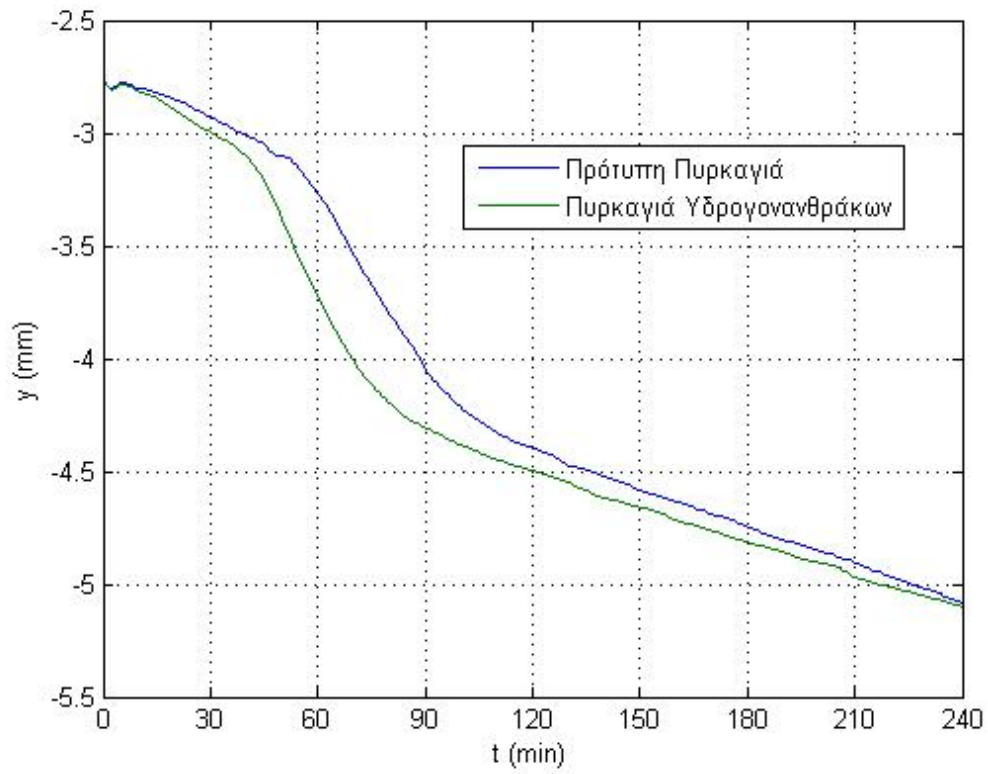


Ρηγμάτωση της δοκού έπειτα από 240 λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά
υδρογονανθράκων



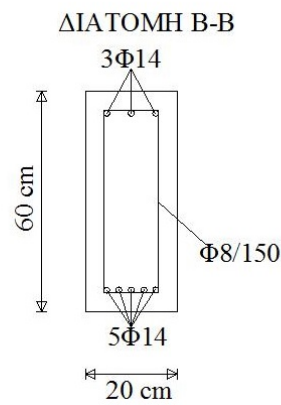
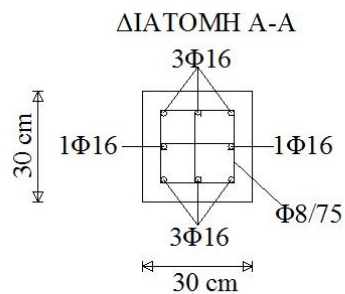
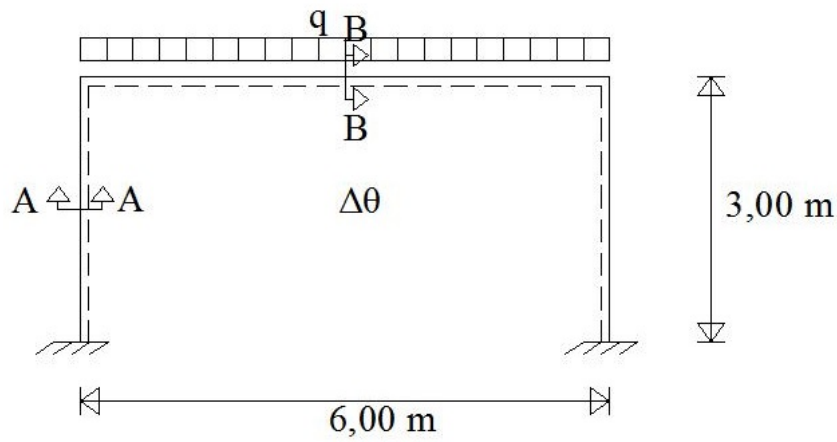
4.2.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αναλύσεων

Βύθιση στο μέσον της δοκού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης

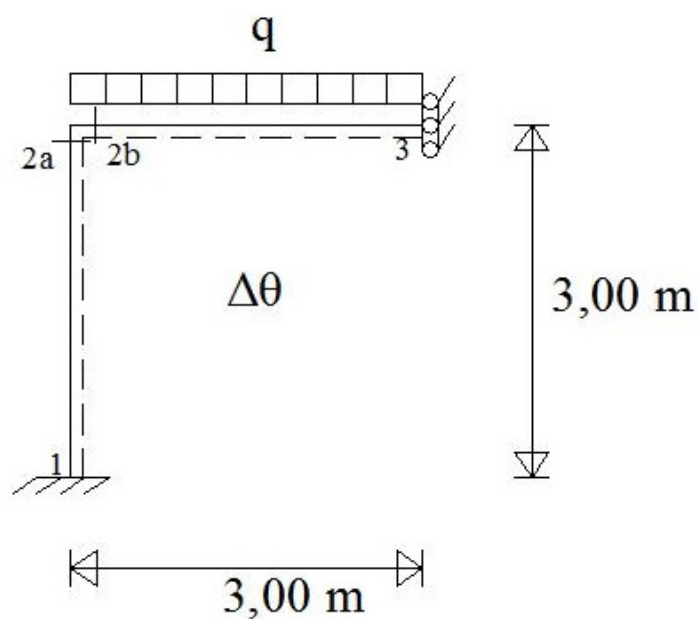


4.3 Επίλυση δίστηγλου πλαισίου υπό πυρκαγιά

4.3.1 Γεωμετρία και δράσεις στον φορέα



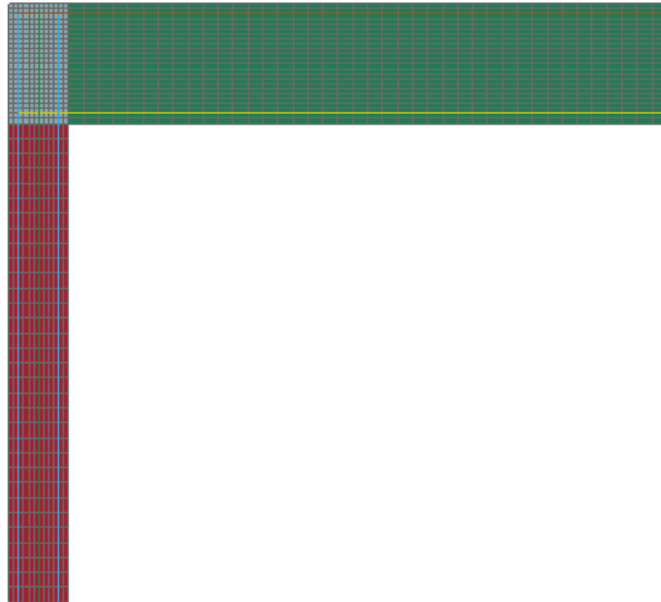
Λόγω της συμμετρίας του φορέα και των δράσεων είναι δυνατόν να επιλυθεί το εξής πρόβλημα:



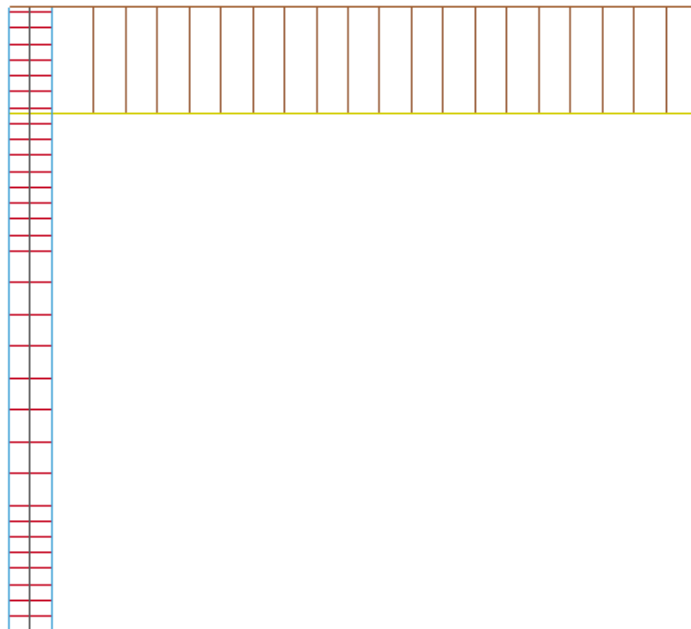
Σχήμα 4-22: Ο ισοδύναμος φορέας

Το καταναεμημένο φορτίο q έχει τιμή 20,0 kN/m.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta$ συμβολίζει την πυρκαγιά και αναπτύσσεται σε όλες τις εσωτερικές παρειές του πλαισίου. Ομοίως με τα προηγούμενα παραδείγματα γίνεται η παραδοχή της πλήρους μόνωσης του εξωτερικού χώρου του πλαισίου, δηλαδή οι εξωτερικές παρειές του πλαισίου έχουν σταθερή θερμοκρασία 20 °C.



Σχήμα 4-23: Ο Κάναβος των Πεπερασμένων Στοιχείων



Σχήμα 4-24: Η όπλιση του πλαισίου

Τα στοιχεία κελύφους της δοκού και του υποστυλώματος έχουν διαστάσεις 0,025 x 0,075, ενώ του κόμβου 0,025 x 0,025.

Το κατανεμημένο φορτίο εφαρμόζεται υπό μορφή συγκεντρωμένων φορτίων στους κόμβους των στοιχείων της δοκού. Η δοκός έχει μήκος 3,00 m, δηλαδή αποτελείται από $3,00/0,075=40$ στοιχεία κελύφους. Επομένως το συνολικό φορτίο των $20,0*3,0=60,0$ kN, κατανέμεται σε 40 κόμβους, ο καθένας των οποίων παραλαμβάνει $60,0/40=1,5$ kN, δηλαδή 1500 N. Αντίστοιχα, η άνω επιφάνεια του κόμβου αποτελείται από $0,30/0,025=12$ κόμβους, δηλαδή το ίδιο βάρος του υποστυλώματος θα κατανεμηθεί σε 12+1 κόμβους. Το ίδιο βάρος του υποστυλώματος είναι $25,0*(0,3*0,3*2,6+0,3*0,25*0,6)=6,525$ kN. Άρα κάθε κόμβος θα παραλάβει $6,525/13*1000=502$ N.

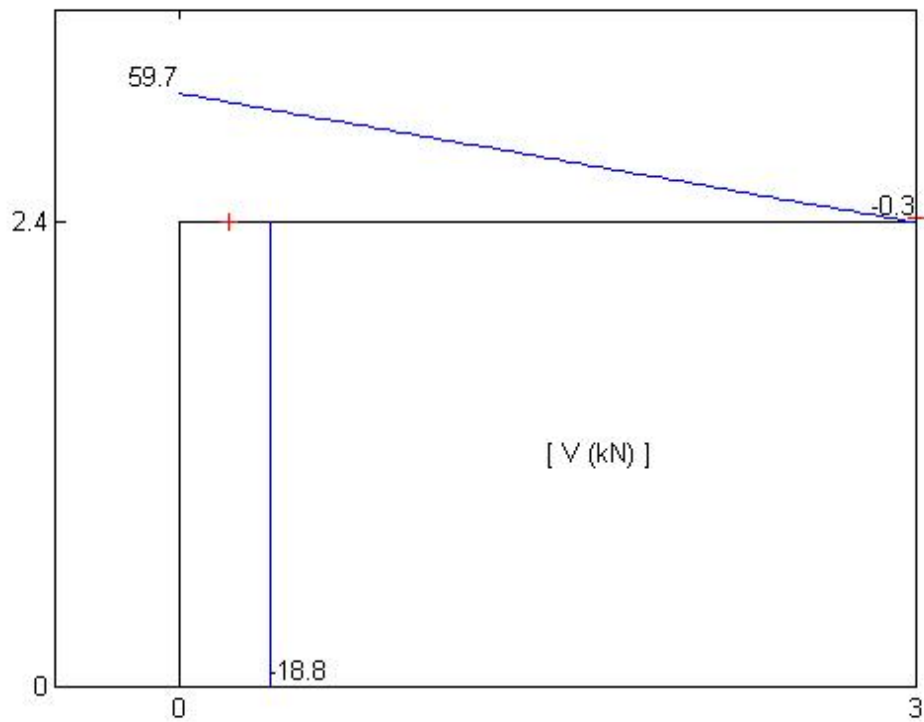
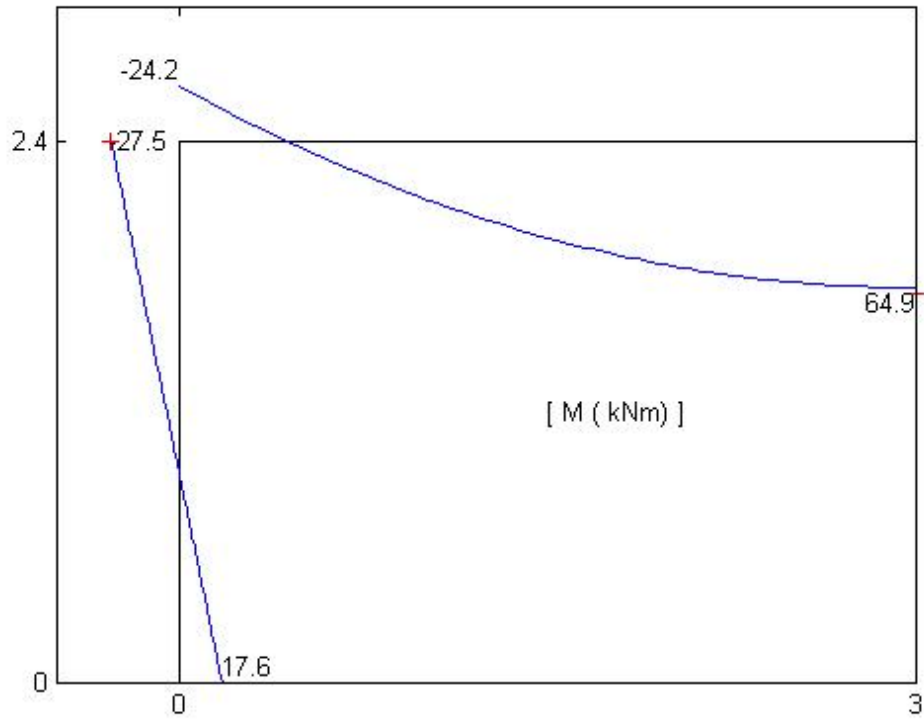
Επομένως θα περιμένουμε ότι η αξονική δύναμη στην στήριξη του υποστυλώματος θα είναι $60,0+6,525=66,525$ kN.

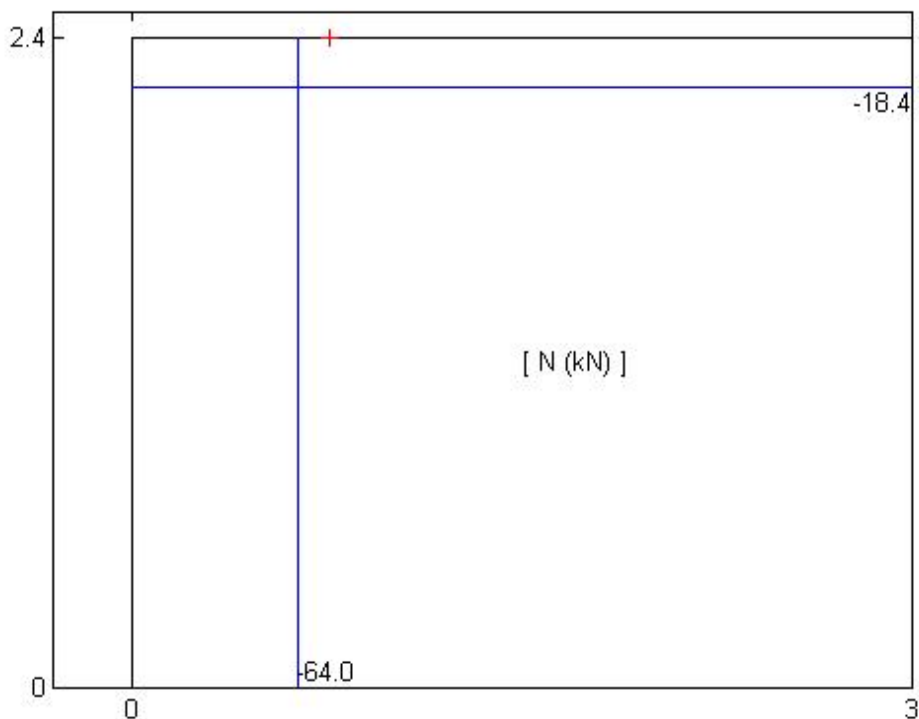
Επίσης, ένας ακόμα έλεγχος για την ορθότητα των αποτελεσμάτων είναι αυτός του διαγράμματος ροπών. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει η τιμή του αθροίσματος των απολύτων τιμών της ροπής της στήριξης και του ανοίγματος να ισούται με $q*L^2/8$. Σε αυτή την περίπτωση $q=20$ kN/m και $L=6,0$ m.

Άρα : $q*L^2/8 = 20 * 6^2 / 8 = 90$ kNm.

4.3.2 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών του πλαισίου για $t = 0 \text{ min}$

4.3.2.1 Επίλυση με ELASTIC_PLASTIC_THERMAL ως υλικό του χάλυβα





Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών επαληθεύονται.

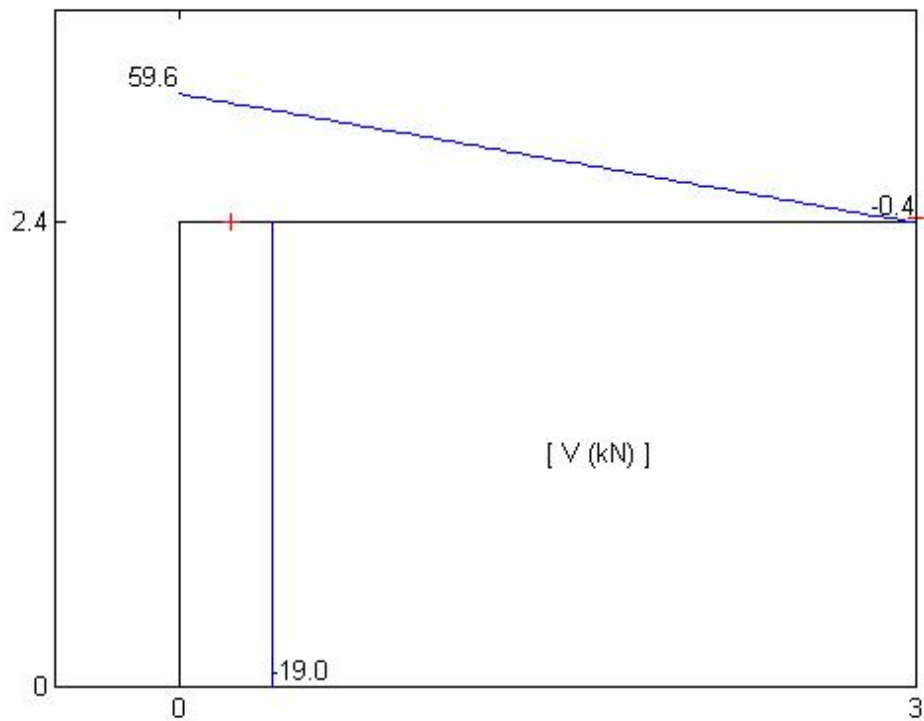
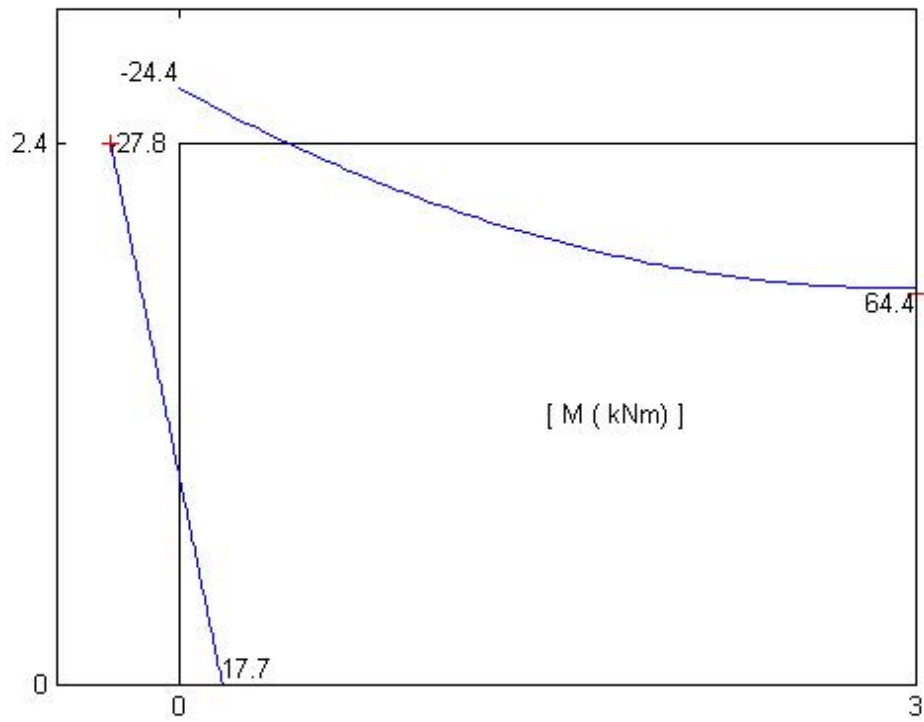
Η αξονική δύναμη του υποστυλώματος είναι 64 kN, δηλαδή είναι μικρότερη κατά 2,5 kN από την αναμενόμενη τιμή.

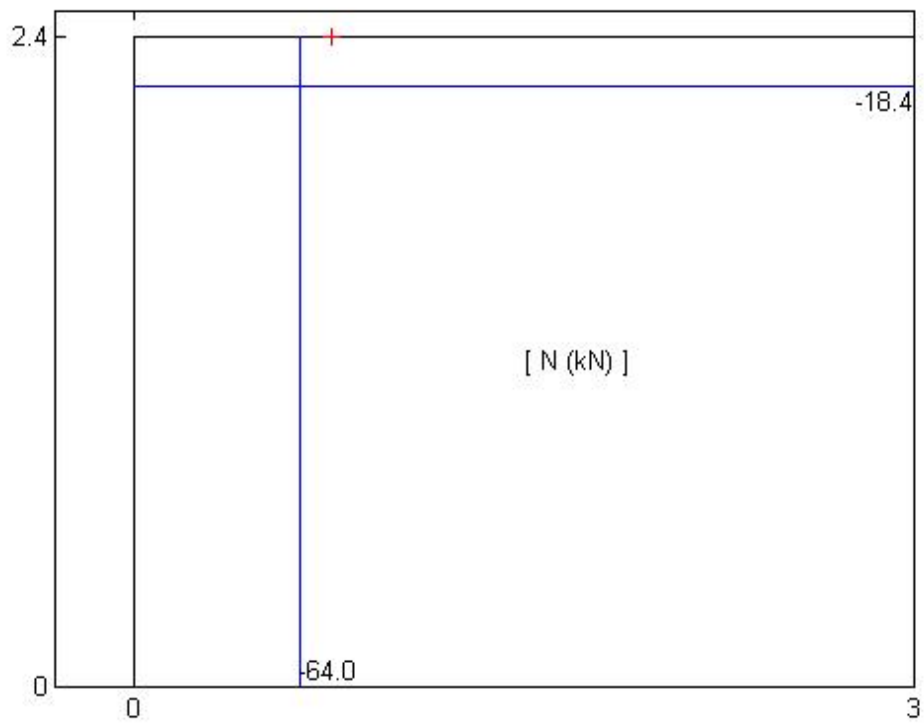
Το άθροισμα των απολύτων τιμών της ροπή στην στήριξη της δοκού και της ροπής του ανοίγματος ισούται με: $24,2 + 64,9 = 89,1$ kNm, όσο δηλαδή η ποσότητα $qL^2/8$.

Η τέμνουσα δύναμη του υποστυλώματος ισούται με την αξονική δύναμη της δοκού (18,8 kN και 18,4 kN αντίστοιχα).

Μεταξύ των δύο διατομών υπολογισμού (κορυφή του υποστυλώματος και αριστερό άκρο της δοκού) παρεμβάλλεται ο κόμβος, δηλαδή η ροπή στην κορυφή του υποστυλώματος και η ροπή στο αριστερό άκρο της δοκού δεν είναι υπολογισμένες στην ίδια διατομή και για αυτό τον λόγο οι δύο ροπές δεν ταυτίζονται.

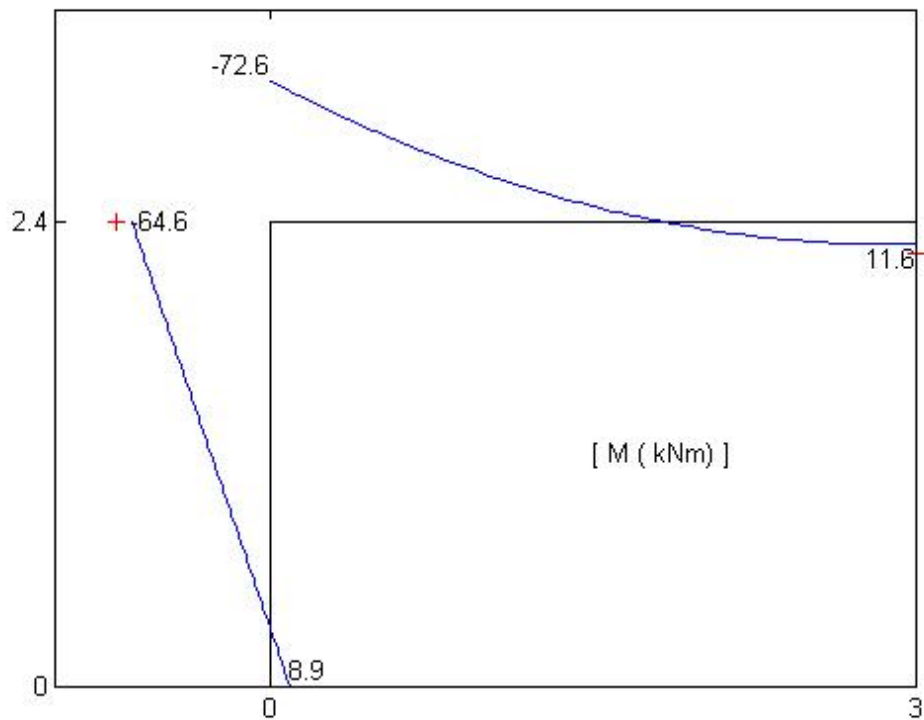
4.3.2.2 Επίλυση με CONCRETE_EC2 ως υλικό του χάλυβα

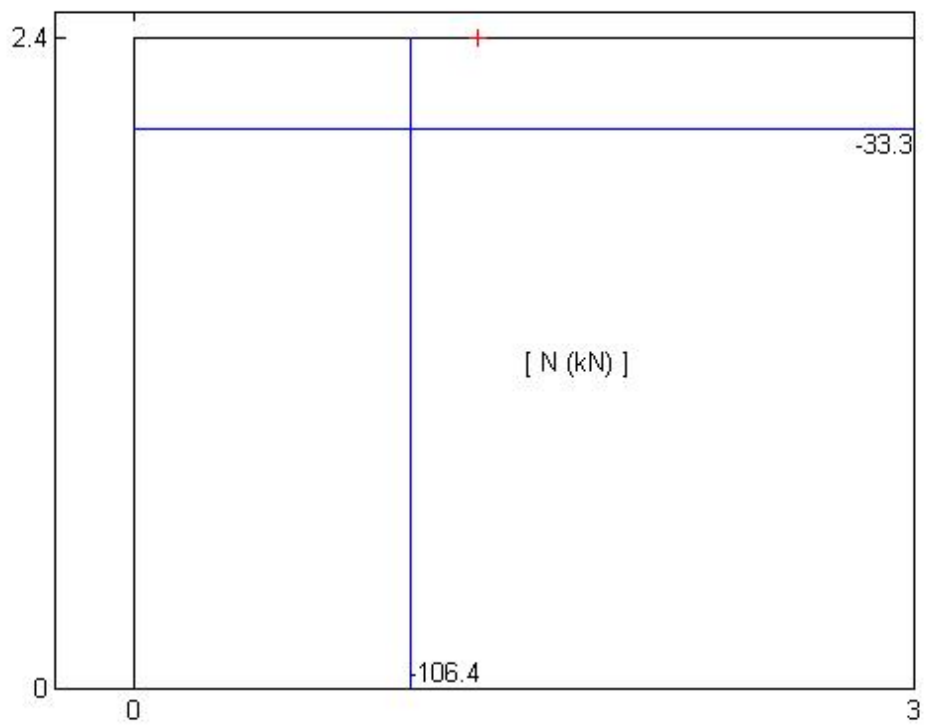
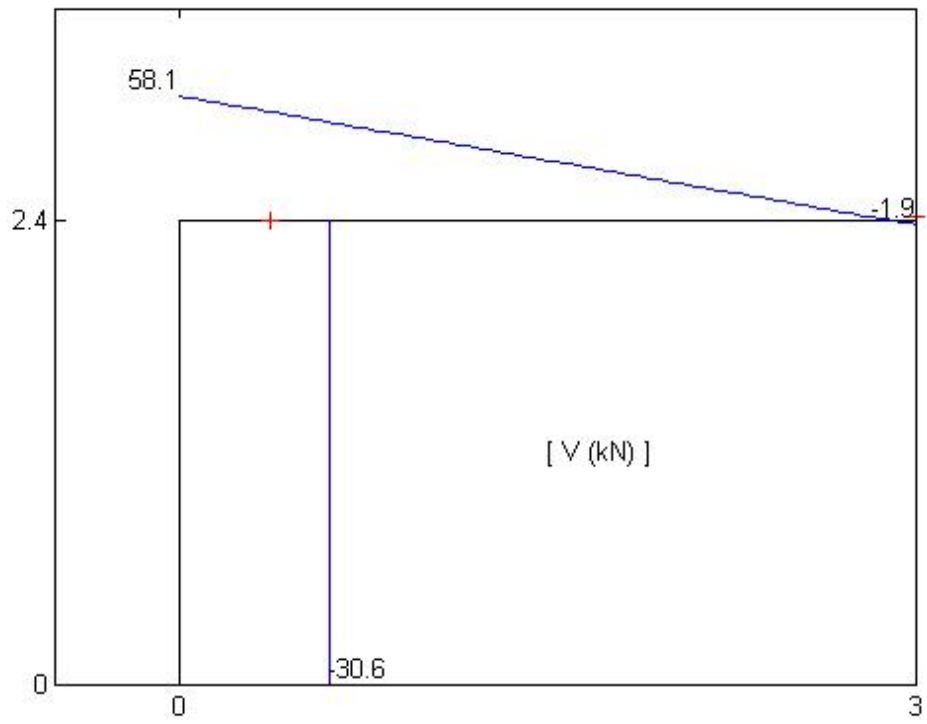




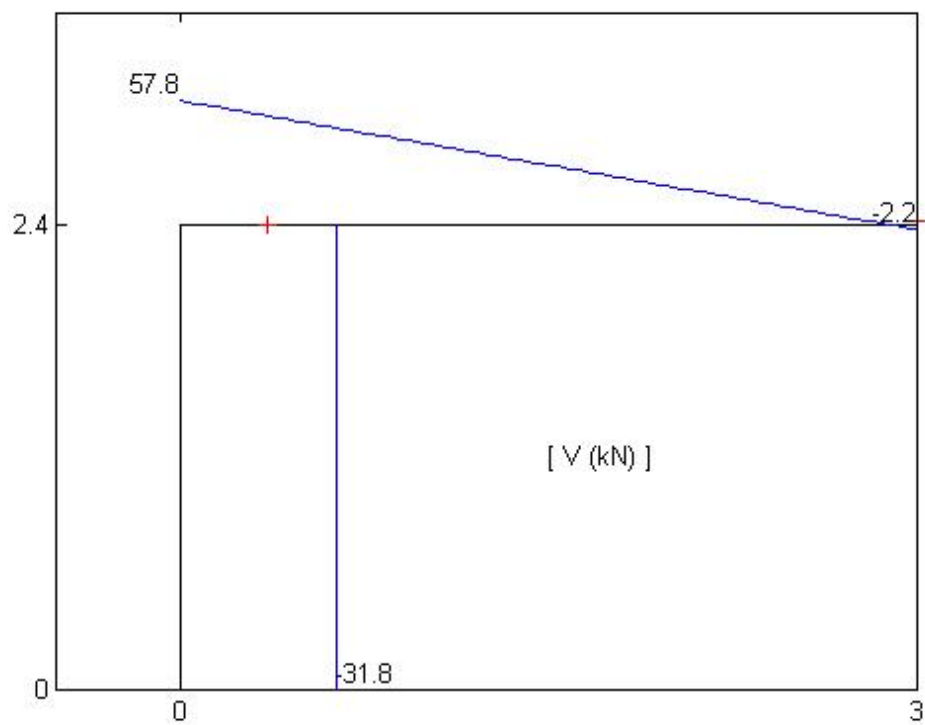
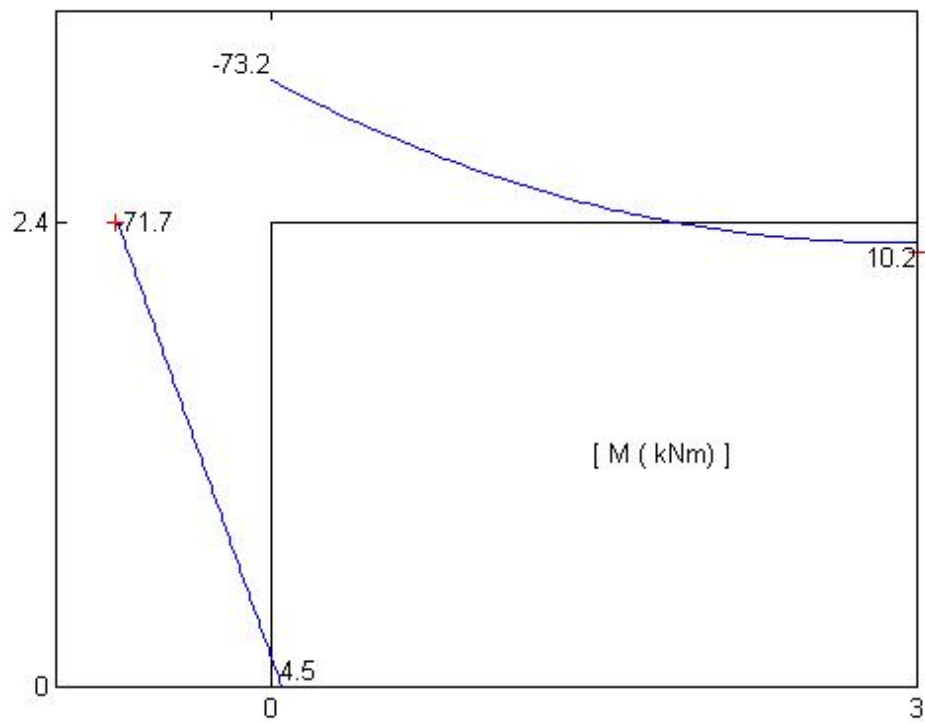
4.3.3 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών του πλαισίου για $t = 60 \text{ min}$

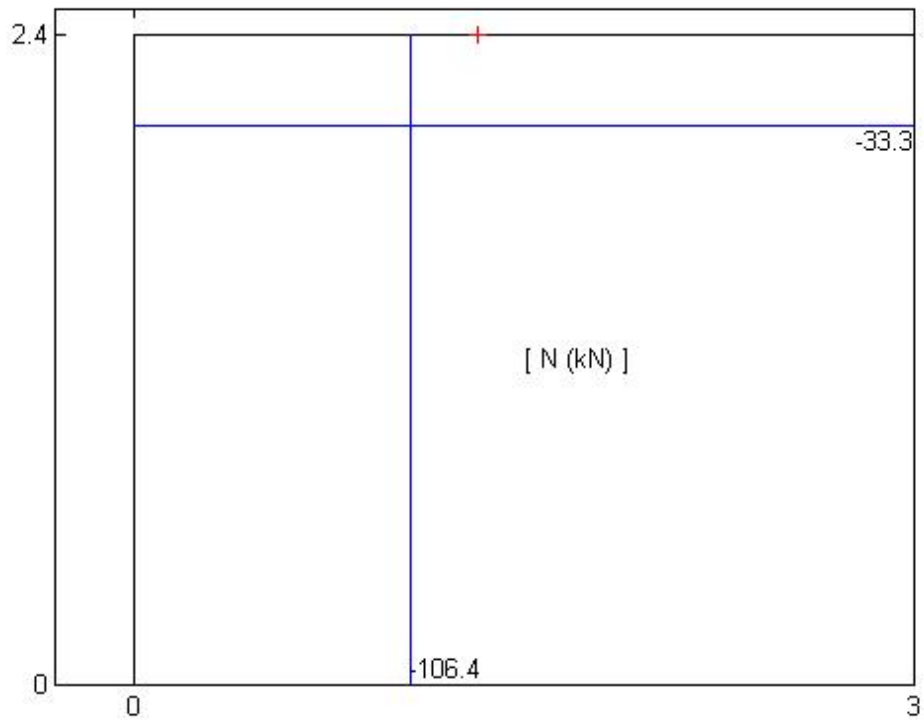
4.3.3.1 Επίλυση με ELASTIC_PLASTIC_THERMAL ως υλικό του χάλυβα





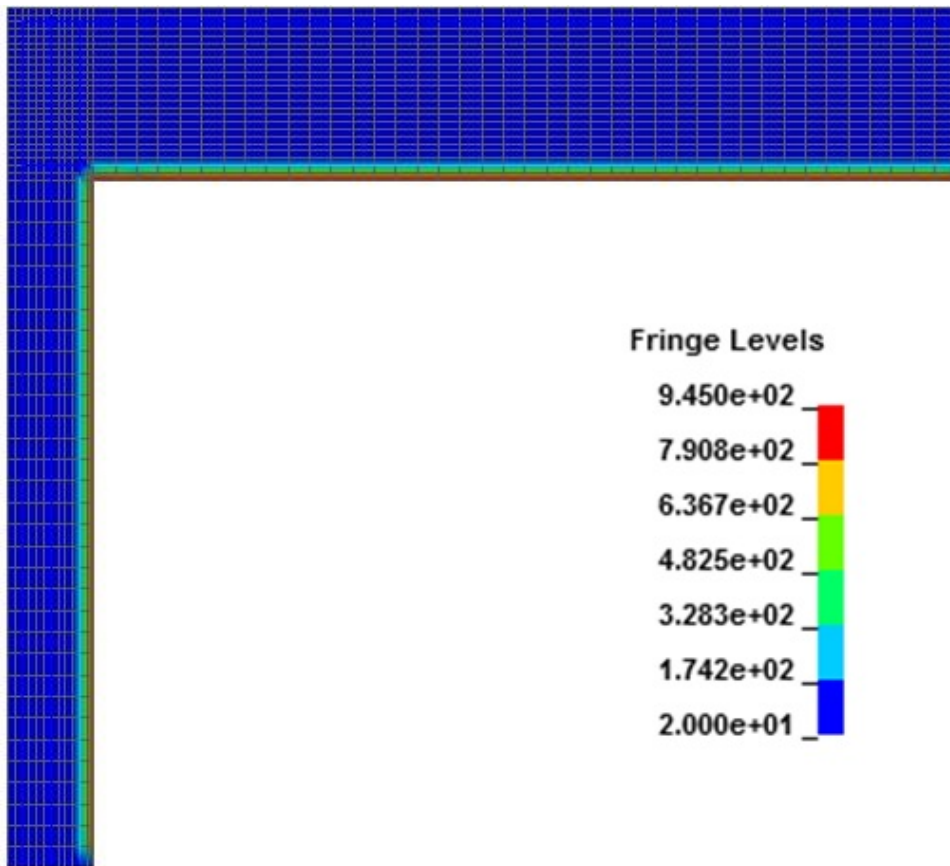
4.3.3.2 Επίλυση με CONCRETE_EC2 ως υλικό του χάλυβα



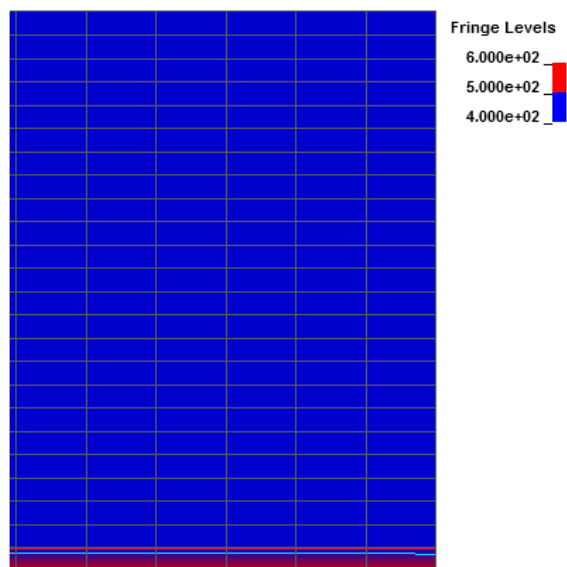


4.3.4 Επίλυση με μη συζευγμένη ανάλυση

Αρχικά γίνεται η θερμοκρασιακή ανάλυση του πλαισίου.



Η περιοχή του φορέα στην οποία η θερμοκρασία φτάνει τους 500 °C είναι η πρώτη στρώση των πεπερασμένων στοιχείων.



Η αντοχή του κάτω οπλισμού της δοκού δεν τροποποιείται στο συγκεκριμένο παράδειγμα διότι η θερμοκρασία στην στάθμη που βρίσκεται δεν ξεπερνά τους 400 °C.

Ωστόσο, η αντοχή του οπλισμού του υποστρώματος που εκτίθεται στην πυρκαγιά σύμφωνα με τον κανονισμό τροποποιείται.

Η θερμοκρασία της δεξιάς στρώσης οπλισμού έπειτα από 60 λεπτά έκθεσης είναι 250°C. Ο συντελεστής μείωσης της αντοχής δίνεται από την σχέση:

$$k_s(\theta) = 0,7 - 0,30(\theta - 400)/300 = 0,7 - 0,30(250 - 400)/300 = 0,85.$$

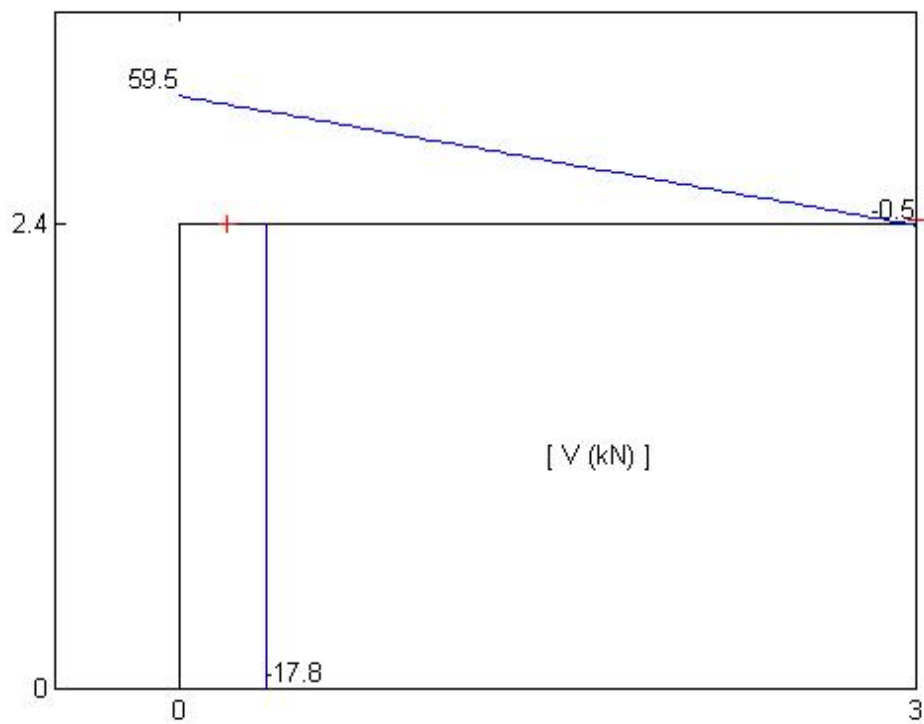
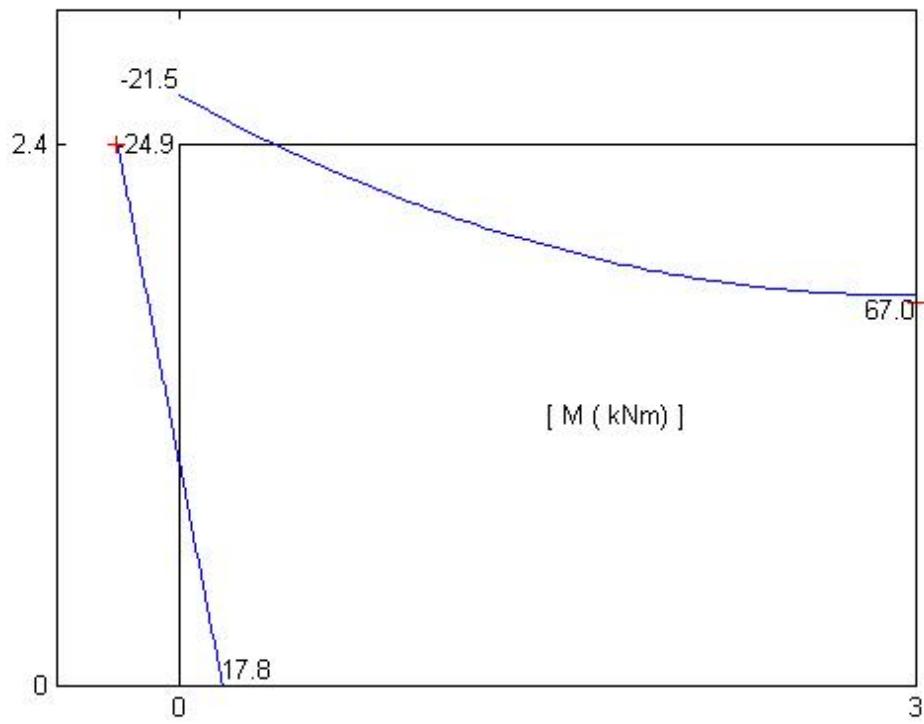
Οπότε η αντοχή του χάλυβα της δεξιάς στρώσης ισούται με : $500 \cdot 0,85 = 425$ MPa.

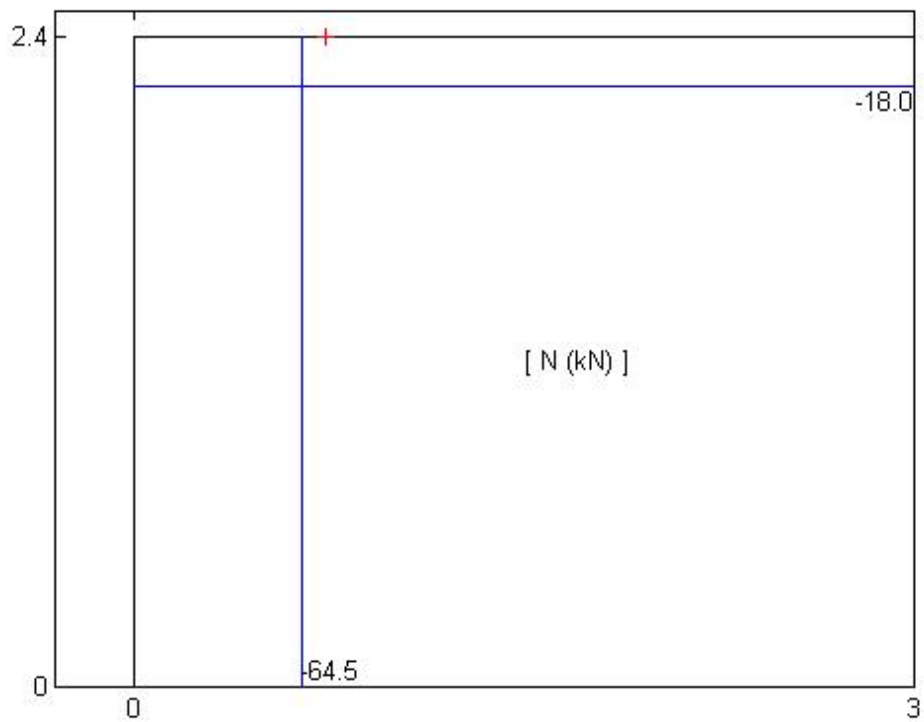
Έπειτα, αυτή την ζώνη των πεπερασμένων στοιχείων ορίζεται ότι έχει μηδενική θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και επιλύεται έχοντας ως μοναδική φόρτιση τα κατακόρυφα φορτία.

Στην διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου ο κανονισμός δεν αναφέρει εάν στην ανάλυση σχεδιασμού θα ληφθούν υπόψη οι θερμικές μηκύνσεις και άρα η ανακατανομή της έντασης.

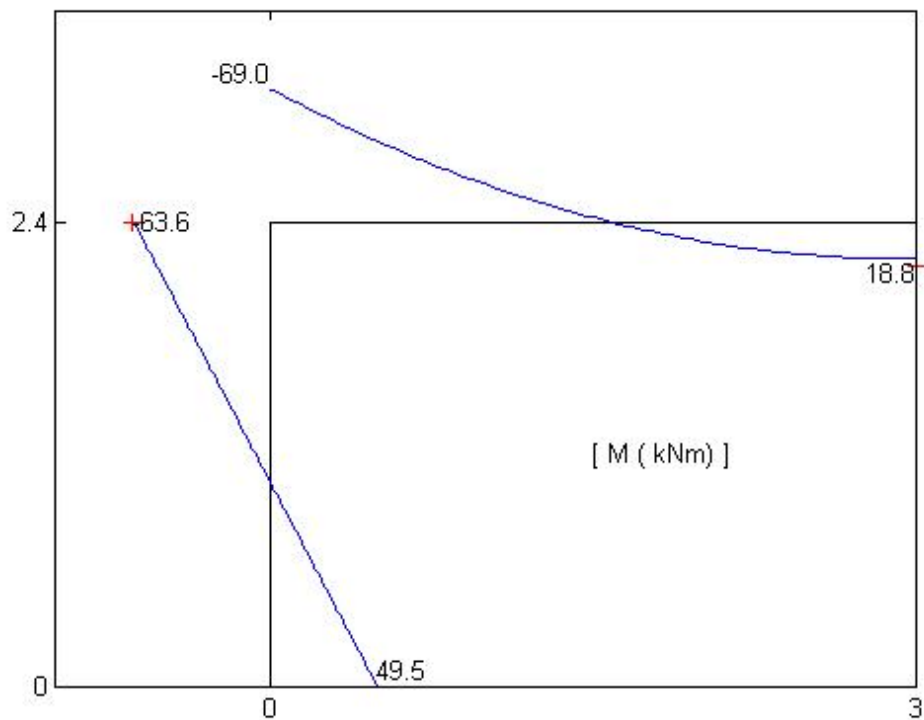
Εάν δεν ληφθεί υπόψη η θερμική μήκυνση, η οποία προκαλείται λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας επιλύεται ο φορέας έχοντας μόνο ως δράση τα κατακόρυφα φορτία.

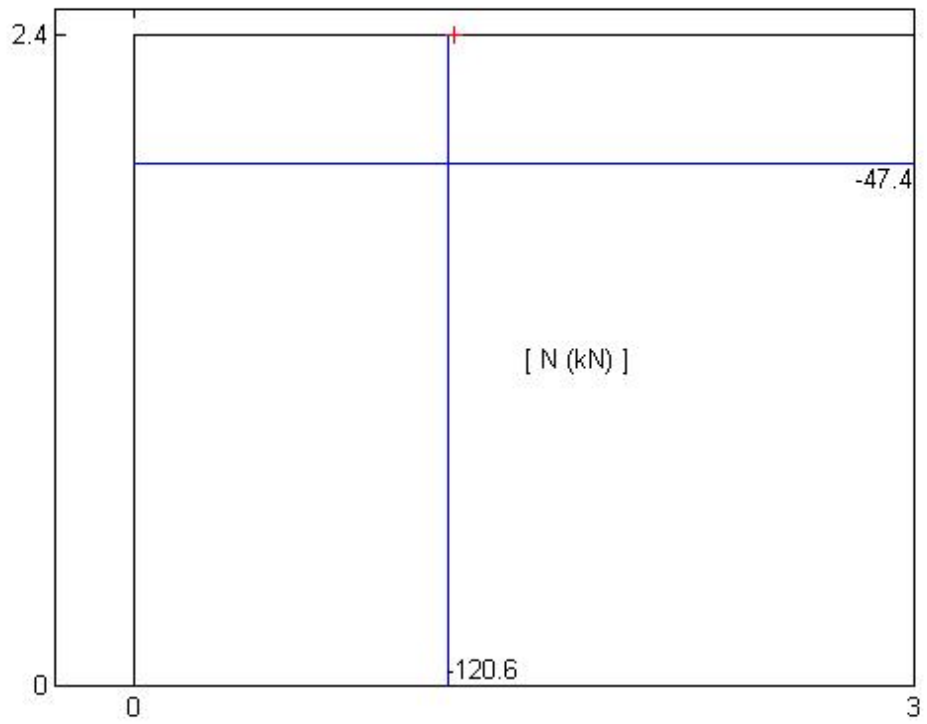
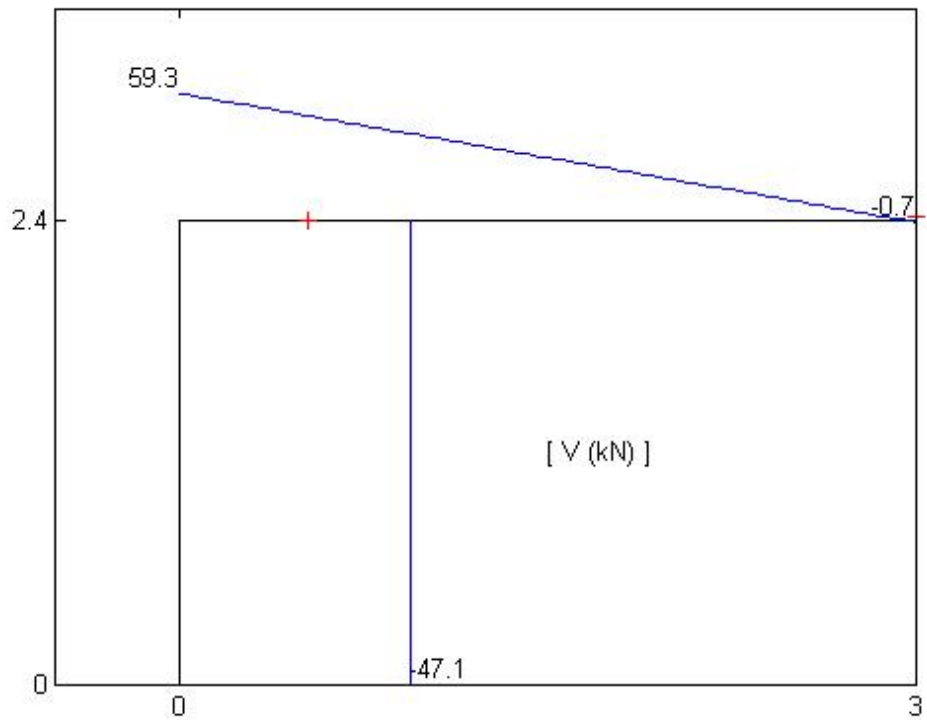
Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που προκύπτουν είναι τα εξής:



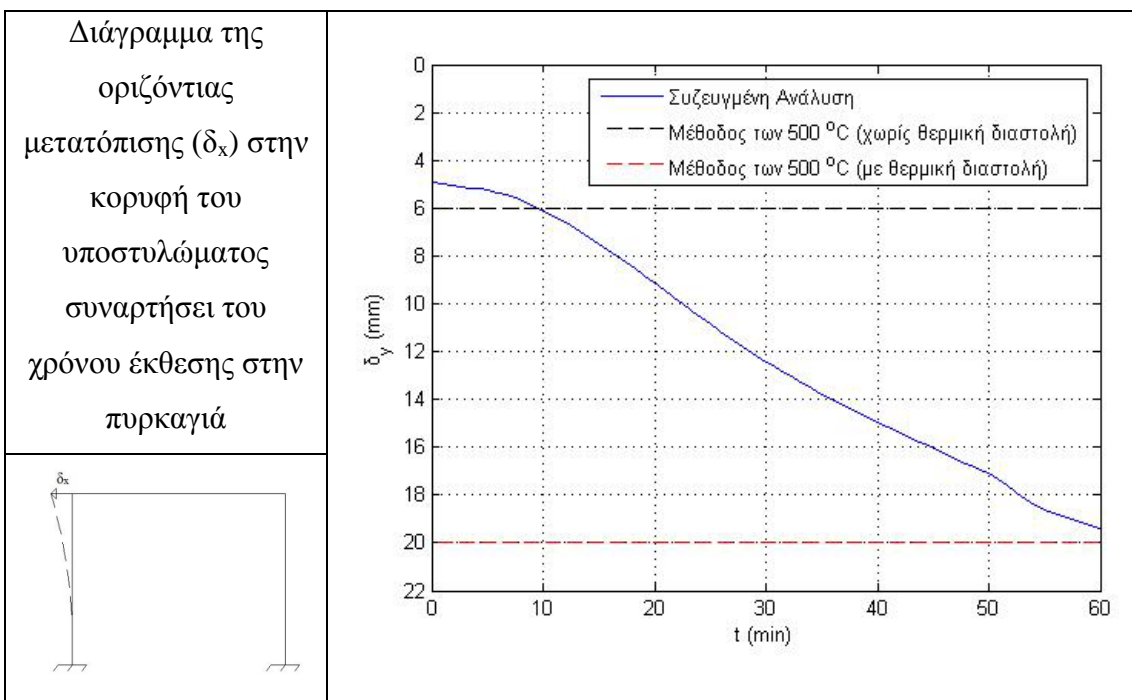
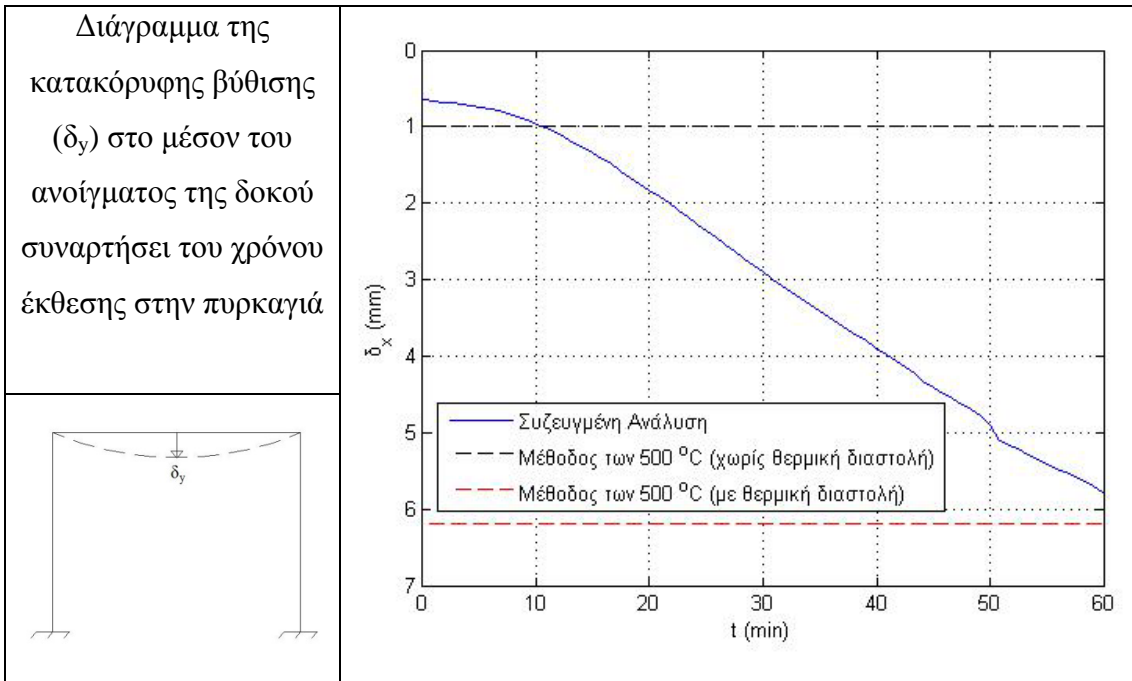


Ωστόσο, εάν ληφθεί υπόψη η θερμική διαστολή, ορίζοντας ως συνοριακές συνθήκες τις θερμοκρασίες στις αντίστοιχες στάθμες που υπολογίστηκαν από την θερμοκρασιακή ανάλυση, τα εντατικά μεγέθη είναι τα εξής:





4.3.5 Υπολογισμός μετατοπίσεων του πλαισίου



4.3.6 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

Τα δύο καταστατικά προσομοιώματα του χάλυβα (ELASTIC_PLASTIC_THERMAL και CONCRETE_EC2) είναι ισοδύναμα, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

Τα αποτελέσματα της μη συζευγμένης ανάλυσης (εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις) είναι ισοδύναμα με αυτά της συζευγμένης ανάλυσης, διότι επιβάλλοντας ως συνοριακές τις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στο βήμα του 60^{ου} λεπτού της ανάλυσης, στην ουσία επιλύεται το βήμα της συζευγμένης ανάλυσης για εκείνη την χρονική στιγμή έκθεσης. Ωστόσο, η μη συζευγμένη ανάλυση δεν μπορεί να προσομοιώσει την σταδιακή εξάπλωση της πυρκαγιάς, για παράδειγμα από διαμέρισμα σε διαμέρισμα.

Στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν εξετάστηκε ένα επίπεδο πλαίσιο, πράγμα που σημαίνει ότι δεν λήφθηκε υπόψη η πλευρική απομείωση της διατομής της δοκού καθώς στην πραγματικότητα και οι πλευρικές παρειές της δοκού εκτίθενται στην πυρκαγιά. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο θα ήταν το πιο ρεαλιστικό προσομοίωμα.

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΝΤΑΟΡΟΦΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

5.1 Αρχικά Στοιχεία

Το κτίριο που εξετάζεται είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με παλαιότερους Κανονισμούς, χρησιμοποιώντας επιτρεπόμενες τάσεις με απλοποιημένα προσομοιώματα για την ανάλυση και χωρίς τις απαραίτητες διατάξεις για ικανοτικό σχεδιασμό και όπλιση κρισίμων περιοχών. Είναι το κτίριο K60A59 από την διδακτορική διατριβή του κ. Ρεπαπή.

Είναι πενταόροφο με σταθερό ύψος ορόφων ίσο με 3,0 m και έχει τέσσερα επί τρία φατνώματα σε κάτοψη. Το μήκος κάθε φατνώματος σε κάθε διεύθυνση είναι ίσο με 3,5 m.

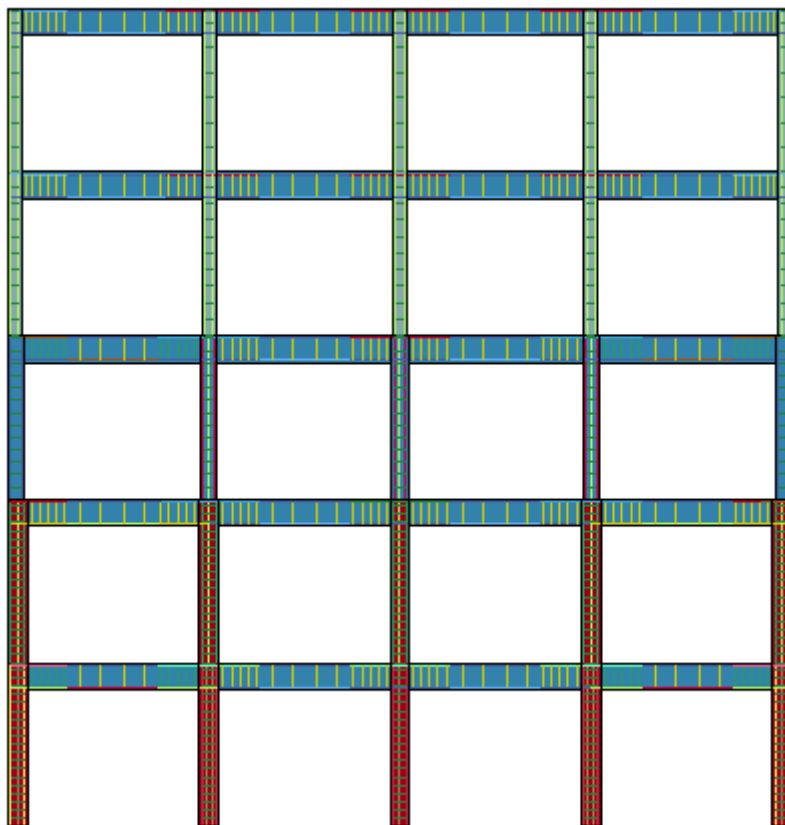
Επειδή είναι δυνατόν να αναλυθούν υπό πυρκαγιά μόνο επίπεδα πλαίσια και όχι τρισδιάστατα, αναλύεται το πλαίσιο με τα τέσσερα φατνώματα.

Στον πρώτο και στον δεύτερο όροφο τα υποστυλώματα έχουν διαστάσεις 35/35, στον τρίτο 30/30 και στους δύο τελευταίους 25/25.

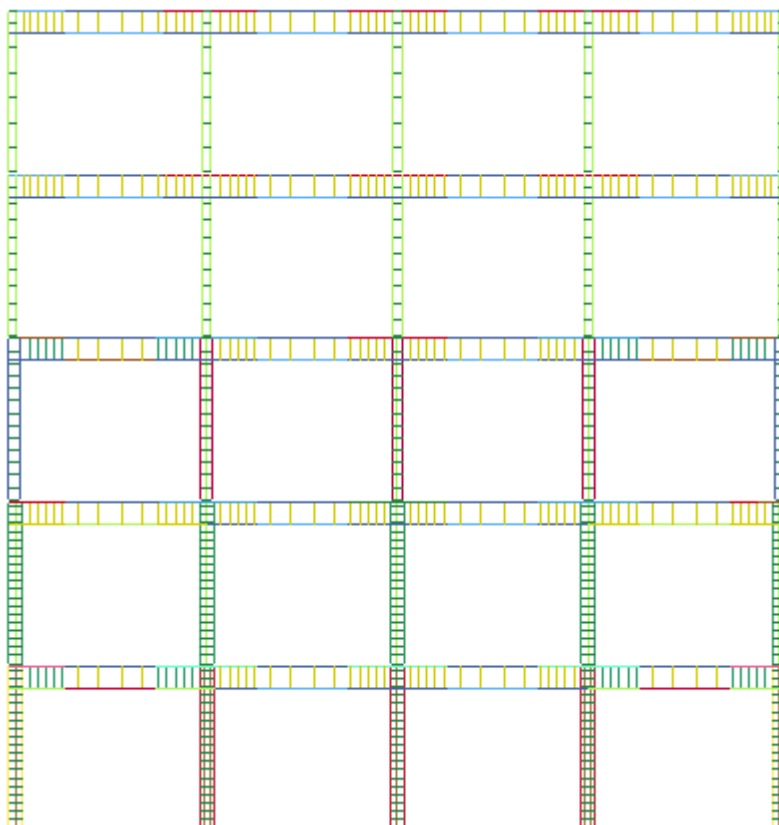
Σύμφωνα με τον συγκεκριμένο τρόπο όπλισης σε περιοχή κοντά στις στηρίξεις των δοκών οι μισές κάτω διαμήκειες ράβδοι οπλισμού κάμπτονται έτσι ώστε να αναλάβουν εφελκυστικές τάσεις στην περιοχή της στήριξης.

Στο μήκος που είναι κεκλιμένες, συνεισφέρουν και στην αντοχή σε τέμνουσα, λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας της εφεκλυστικής δύναμης. Ο υπολογισμός αυτής της πρόσθετης δύναμης γίνεται σε επόμενη ενότητα.

Τα φορτία είναι ίσα με: 0,15 t/m² επικάλυψη και 0,20 t/m² κινητό. Η εσωτερική τοιχοποιία λαμβάνεται ως φορτίο ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλες τις πλάκες ίσο με 0,10 t/m².



Σχήμα 5-1: Ο Κάναβος των Πεπερασμένων Στοιχείων



Σχήμα 5-2: Η όπλιση του κτιρίου

5.1.1 Υπολογισμός κατακόρυφων φορτίων ανά όροφο του κτιρίου

1^{ος} και 2^{ος} όροφος:

Καθαρό μήκος δοκού: $L_{net} = 3,15 \text{ m}$

Επιφάνεια επιρροής φορτίων πλάκας: $A = 3,15^2 / 2,0 = 4,96 \text{ m}^2$

Ίδιον βάρος δοκού: $g_{ιδ.β.δ} = 25,0 * 0,20 * (0,50 - 0,12) = 1,9 \text{ kN/m}$

Ίδιον βάρος πλάκας: $g_{ιδ.β.πλ} = 25,0 * 0,12 * 4,96 / 3,15 = 4,7 \text{ kN/m}$

Φορτίο επικάλυψης: $g_{επ} = 0,15 * 10 * 4,96 / 3,15 = 2,4 \text{ kN/m}$

Φορτίο τοιχοποιίας: $g_{τοιχ} = 0,10 * 10 * 4,96 / 3,15 = 1,6 \text{ kN/m}$

Κινητό φορτίο: $q = 0,20 * 10 * 4,96 / 3,15 = 3,15 \text{ kN/m}$

3^{ος} όροφος:

Καθαρό μήκος δοκού: $L_{net} = 3,20 \text{ m}$

Επιφάνεια επιρροής φορτίων πλάκας: $A = 3,20^2 / 2,0 = 5,12 \text{ m}^2$

Ίδιον βάρος δοκού: $g_{ιδ.β.δ} = 25,0 * 0,20 * (0,50 - 0,12) = 1,9 \text{ kN/m}$

Ίδιον βάρος πλάκας: $g_{ιδ.β.πλ} = 25,0 * 0,12 * 5,12 / 3,20 = 4,8 \text{ kN/m}$

Φορτίο επικάλυψης: $g_{επ} = 0,15 * 10 * 5,12 / 3,20 = 2,4 \text{ kN/m}$

Φορτίο τοιχοποιίας: $g_{τοιχ} = 0,10 * 10 * 5,12 / 3,20 = 1,6 \text{ kN/m}$

Κινητό φορτίο: $q = 0,20 * 10 * 5,12 / 3,20 = 3,2 \text{ kN/m}$

4^{ος} και 5^{ος} όροφος:

Καθαρό μήκος δοκού: $L_{net} = 3,25 \text{ m}$

Επιφάνεια επιρροής φορτίων πλάκας: $A = 3,25^2 / 2,0 = 5,28 \text{ m}^2$

Ίδιον βάρος δοκού: $g_{ιδ.β.δ} = 25,0 * 0,20 * (0,50 - 0,12) = 1,9 \text{ kN/m}$

Ίδιον βάρος πλάκας: $g_{ιδ.β.πλ} = 25,0 * 0,12 * 5,28 / 3,15 = 4,9 \text{ kN/m}$

Φορτίο επικάλυψης: $g_{επ} = 0,15 * 10 * 5,28 / 3,25 = 2,4 \text{ kN/m}$

Φορτίο τοιχοποιίας: $g_{τοιχ} = 0,10 * 10 * 5,28 / 3,25 = 1,6 \text{ kN/m}$

Κινητό φορτίο: $q = 0,20 * 10 * 4,96 / 3,15 = 3,25 \text{ kN/m}$

Συνδυασμός οιονεί μονίμων φορτίων για τις δοκούς του 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου :

$$g + \psi * q = (1,9 + 4,7 + 2,4 + 1,6) + 0,30 * 3,15 = 11,5 \text{ kN/m}$$

Συνδυασμός οιονεί μονίμων φορτίων για τις δοκούς του 3^{ου} ορόφου :

$$g + \psi * q = (1,9 + 4,7 + 2,4 + 1,6) + 0,30 * 3,20 = 11,7 \text{ kN/m}$$

Συνδυασμός οιονεί μονίμων φορτίων για τις δοκούς του 4^{ου} και 5^{ου} ορόφου :

$$g + \psi * q = (1,9 + 4,9 + 2,4 + 1,6) + 0,30 * 3,25 = 11,8 \text{ kN/m}$$

Τελικώς επιλέγεται το κατανεμημένο φορτίο να είναι ίσο με 11,6 kN/m σε κάθε δοκό.

Ίδιον βάρος κάθε υποστυλώματος του πρώτου και δεύτερου ορόφου :

$$G = 25,0 * 3,00 * 0,35^2 = 9,2 \text{ kN}$$

Ίδιον βάρος κάθε υποστυλώματος του τρίτου ορόφου

$$G = 25,0 * 3,00 * 0,30^2 = 6,75 \text{ kN}$$

Ίδιον βάρος κάθε υποστυλώματος του τέταρτου και πέμπτου ορόφου :

$$G = 25,0 * 3,00 * 0,20^2 = 3,0 \text{ kN}$$

Το φορτίο αστοχίας είναι:

$$1,35 * g + 1,50 * q = 1,35 * (1,9 + 4,7 + 2,4 + 1,6) + 1,50 * 3,15 = 19,0 \text{ kN/m}$$

Οι τιμές των οιονεί μονίμων φορτίων θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν κατά:

$$19,0 / 11,5 = 1,65$$

Φορτία στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων

Μέλος	Μήκος επιφάνειας εφαρμογής (m)	Μήκος πεπερασμένου στοιχείου (m)	Αριθμός κόμβων στην επιφάνεια εφαρμογής	Ολικό φορτίο στο μέλος (kN)	Φορτίο σε κάθε κόμβο (N)	Φορτία αστοχίας (N)
Δοκοί 1 ^{ου} και 2 ^{ου} ορόφου	3,15	0,075	41	$11,6 * 3,15 = 36,54$	891	1470
Δοκός 3 ^{ου} ορόφου	3,20	0,075	41	$11,6 * 3,20 = 37,12$	905	1495
Δοκοί 4 ^{ου} και 5 ^{ου} ορόφου	3,25	0,075	41	$11,6 * 3,25 = 37,7$	919	1518
Υπ/μα 1 ^{ου} και 2 ^{ου} ορόφου	0,35	0,025	15	9,2	613	1012
Υπ/μα 3 ^{ου} ορόφου	0,30	0,025	13	6,75	519	857
Υπ/μα 4 ^{ου} και 5 ^{ου} ορόφου	0,20	0,025	9	3,0	333	550

5.1.2 Υπολογισμός της αντοχής σε τέμνουσα των δοκών

Σε όλες τις δοκούς οι συνδετήρες είναι δίτητοι διαμέτρου Φ8 και διατάσσονται σε αποστάσεις 30/40/30.

Η αντοχή σε τέμνουσα στην περιοχή όπου δεν υπάρχουν κεκκαμμένες ράβδοι δίνεται από την σχέση:

$$V_{rds} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9 d f_{ywd}$$

Ωστόσο στην περιοχή κοντά στην στήριξη όπου υπάρχουν κεκκαμμένες ράβδοι η αντοχή σε τέμνουσα αυξάνεται κατά:

$$\Delta V = A_s f_y \cos(45)$$

όπου:

A_s το συνολικό εμβαδόν της διατομής των κεκκαμμένων ράβδων

και θεωρώντας ότι αυτές κάμπτονται σχηματίζοντας γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο.

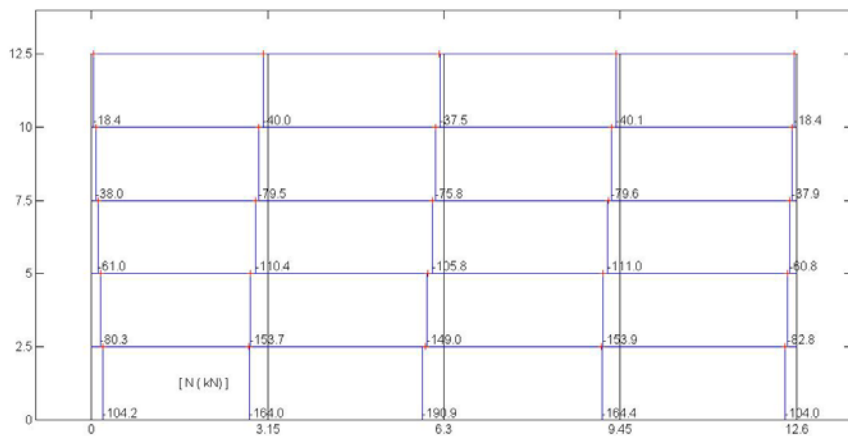
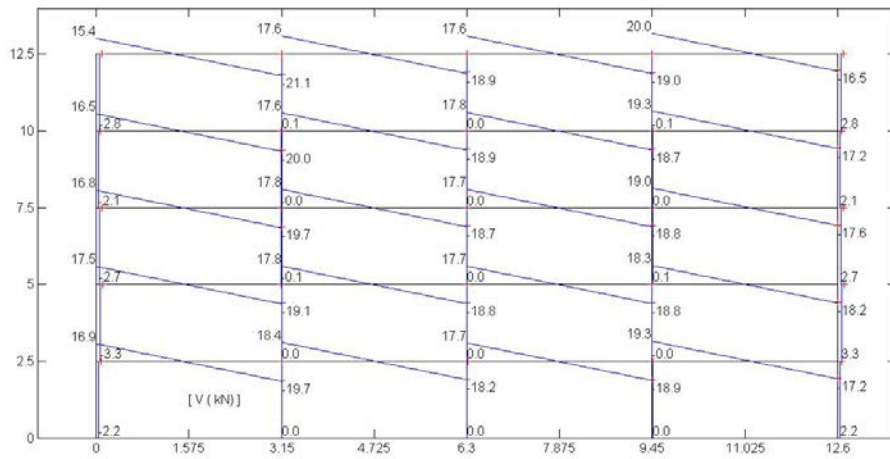
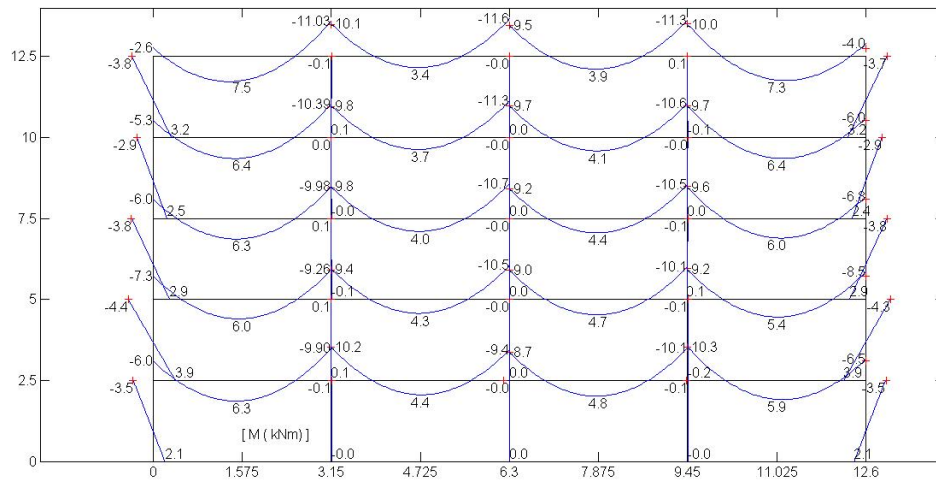
Η αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα υπολογιστικά μπορεί να επιτευχθεί με πύκνωση των συνδετήρων στις περιοχές κοντά στις στηρίξεις.

Ο νέος λόγος του εμβαδού των διατομών των συνδετήρων προς τη νέα (μειωμένη) απόσταση αυτών κοντά σε αυτές τις περιοχές δίνεται από την σχέση

$$A_{sw} / s = (V_{rds} + \Delta V) / (0.9 d f_{ywd})$$

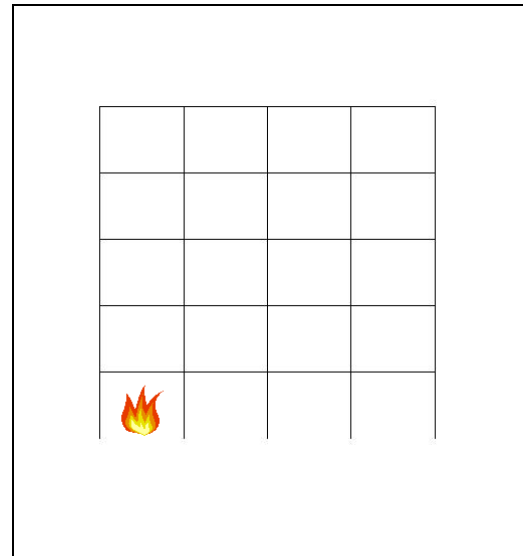
Λόγω του μήκους των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του σκυροδέματος (0,075 m), η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων θα είναι πολλαπλάσια αυτού. Επιλέγεται η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων να είναι 0,15 m. Ανάλογα με το εμβαδόν των κεκλιμένων ράβδων, προκύπτει αντίστοιχο εμβαδό για τα κατακόρυφα γραμμικά στοιχεία.

5.2 Εντατικά μεγέθη πριν την έκθεση στην πυρκαγιά

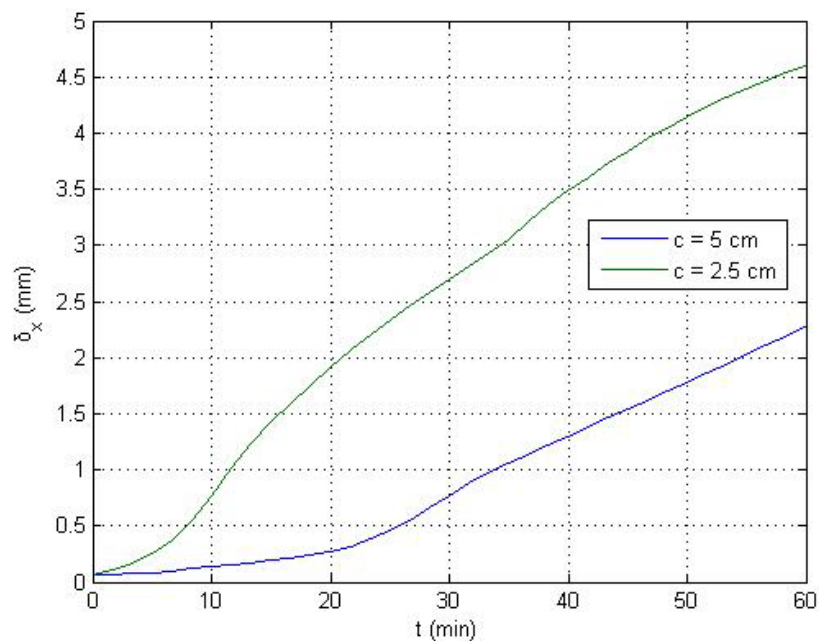
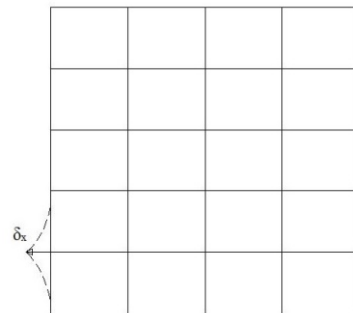


5.3 1^ο Σενάριο Πυρκαγιάς

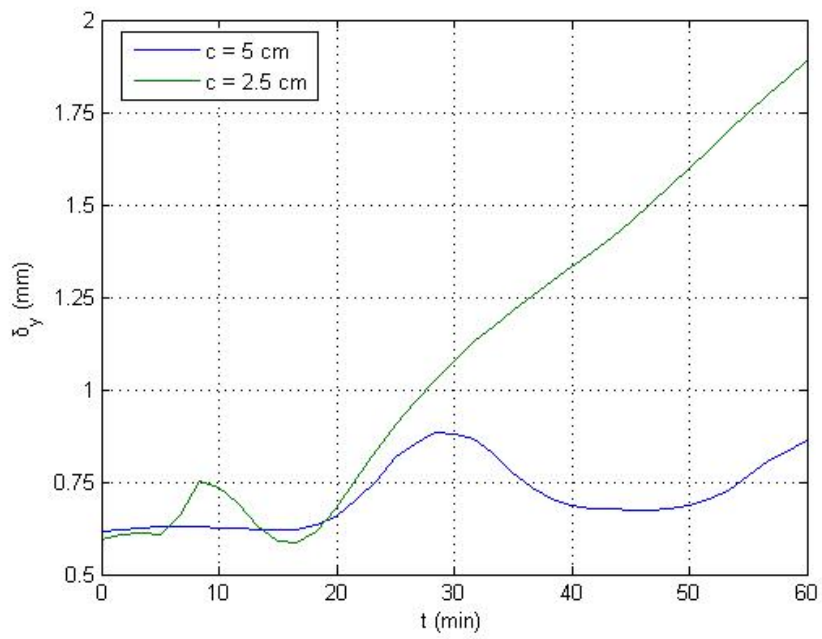
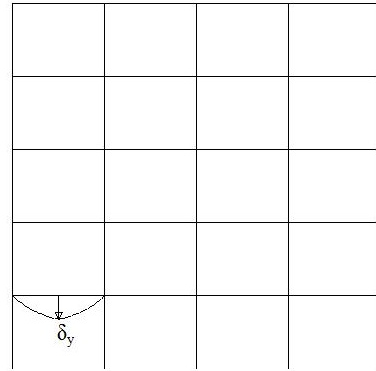
Στο πρώτο σενάριο πυρκαγιάς υποθέτουμε ότι η πυρκαγιά αναπτύσσεται στο πρώτο αριστερά φάτνωμα του πρώτου ορόφου. Η διάρκεια της πυρκαγιάς είναι 60 min και η σχέση θερμοκρασίας-χρόνου δίνεται από την σχέση της πρότυπης πυρκαγιάς. Δεν εξαπλώνεται σε κάποιο άλλο διαμέρισμα, επομένως οι υπόλοιπες παρειές εκτός του συγκεκριμένου φατνώματος έχουν σταθερή θερμοκρασία, ίση με 20 °C.



Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά για δύο τιμές της επικάλυψης του οπλισμού

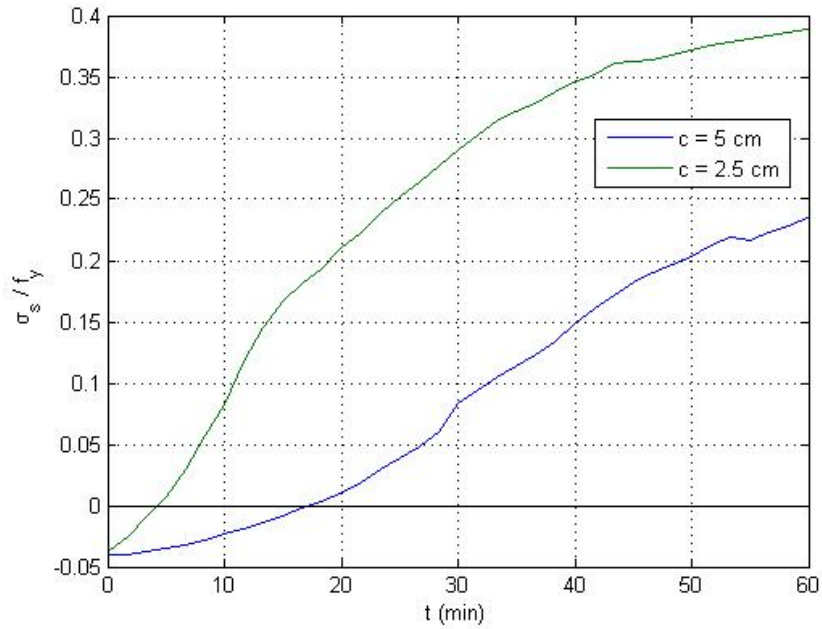


Κατακόρυφο βέλος του πρώτου από αριστερά
φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του
χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



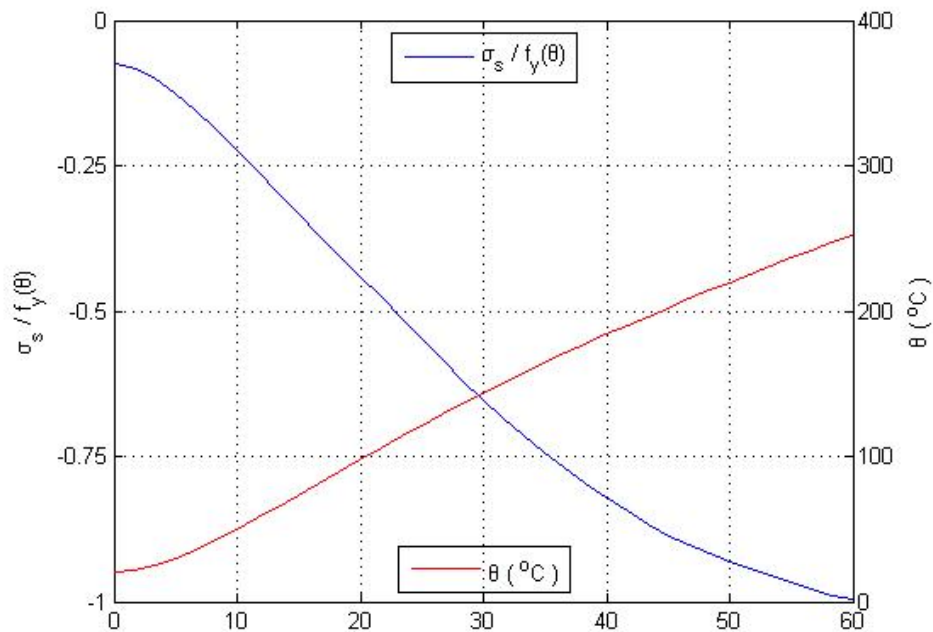
5.3.1 Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστρώματος

Αριστερή στρώση οπλισμού (3Φ16)

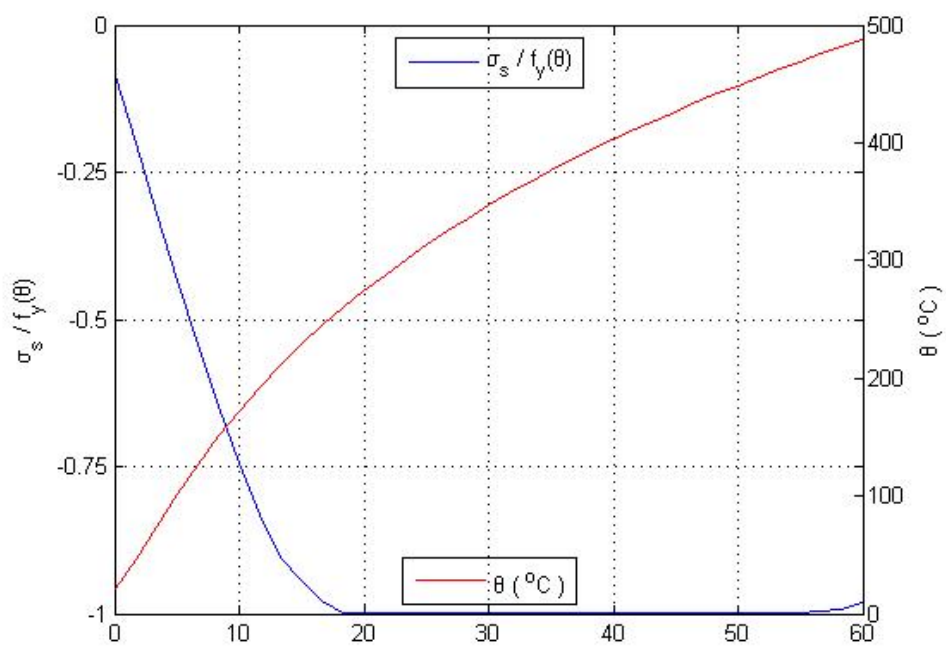


Δεξιά στρώση οπλισμού (3Φ16)

Για c = 5 cm:

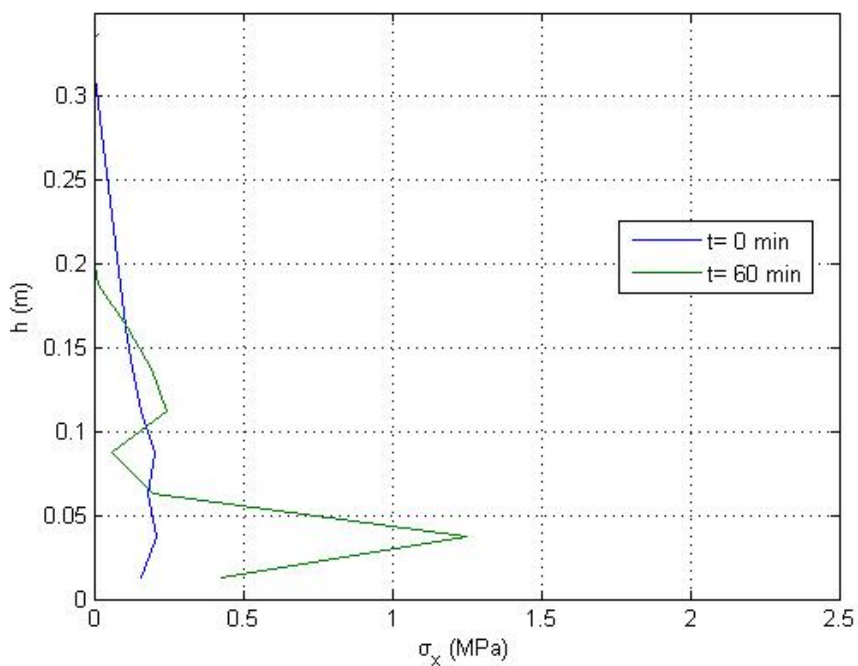


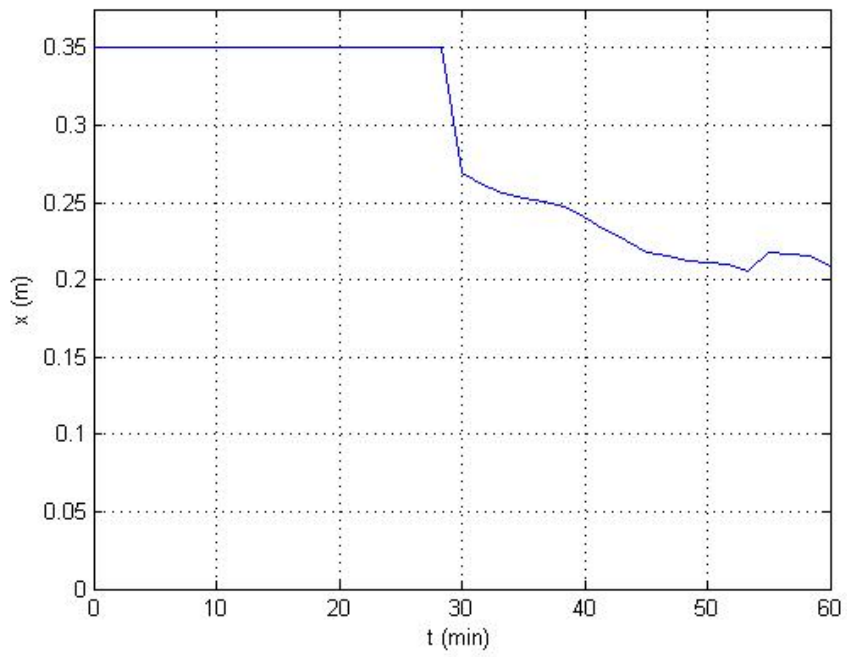
Για $c = 2.5$ cm:



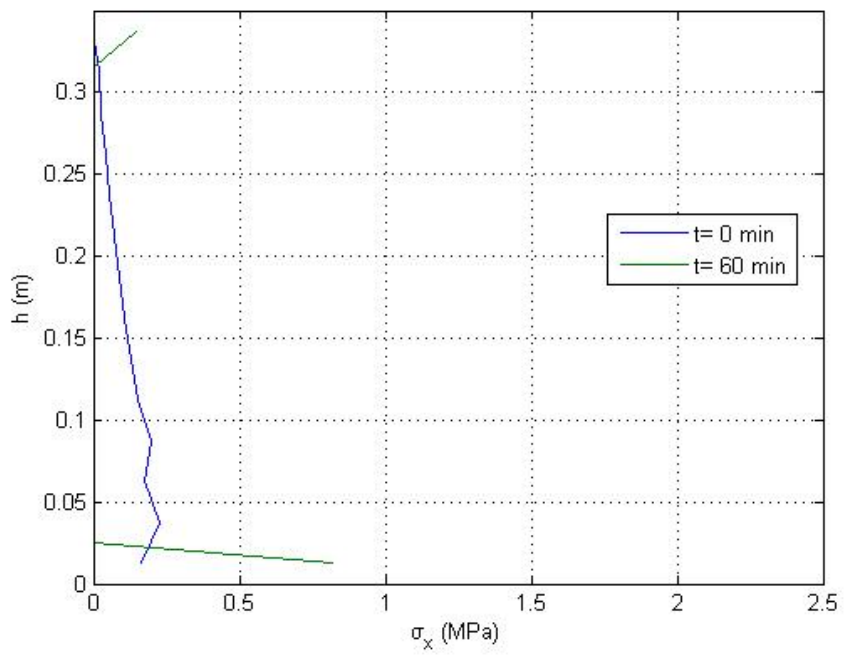
5.3.2 Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστυλώματος

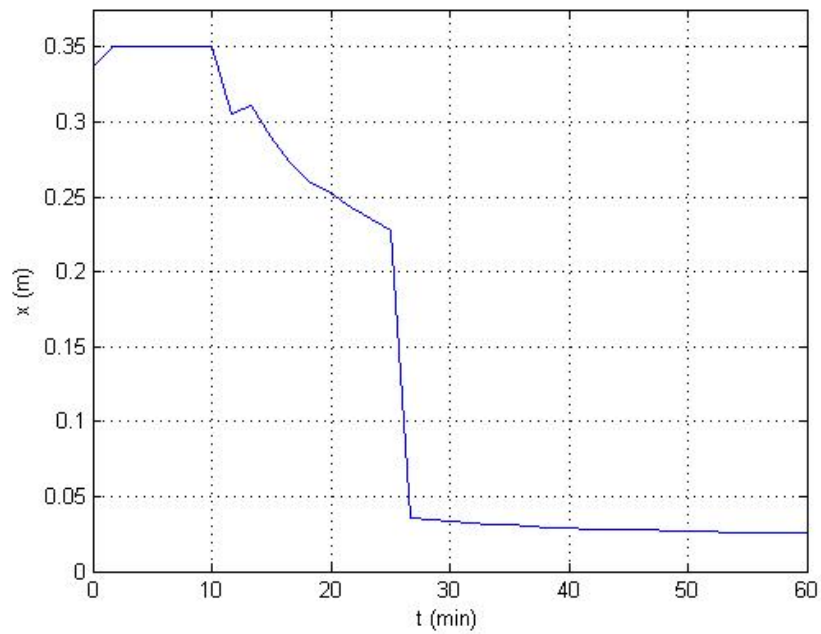
Για $c = 5$ cm





$\Gamma\alpha c = 2.5 \text{ cm}$

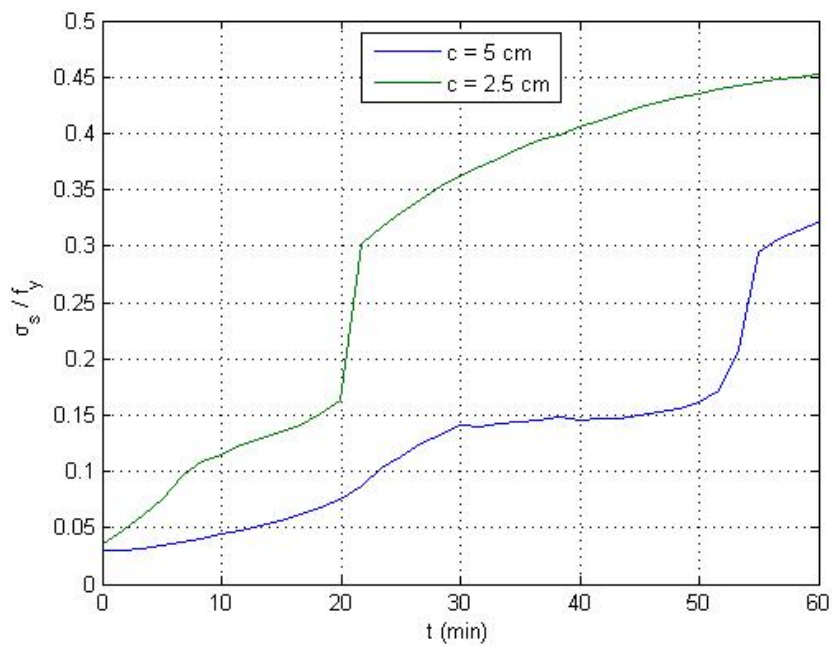




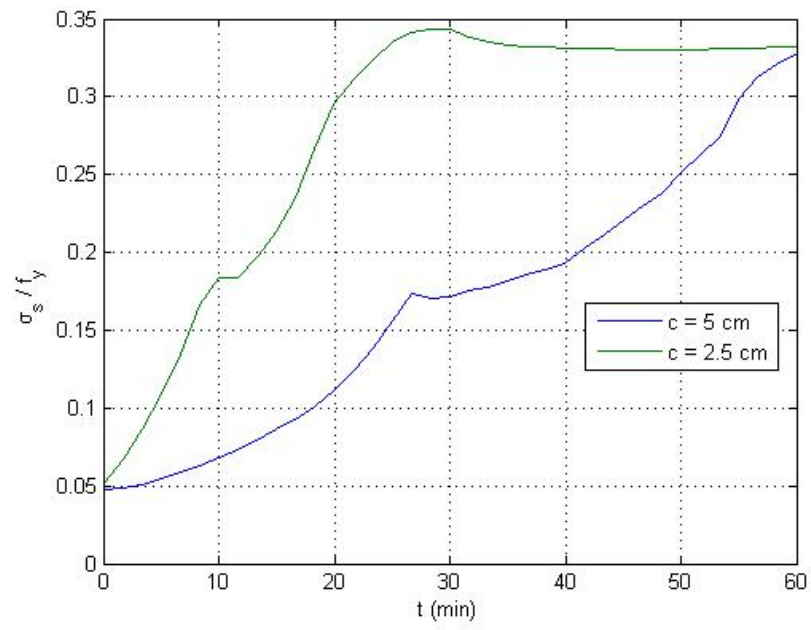
5.3.3 Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Η θερμοκρασία του άνω οπλισμού στο συγκεκριμένο σενάριο παραμένει ίση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (20 °C). Για τον λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη η πτώση της αντοχής του χάλυβα.

Αριστερή στήριξη:



Δεξιά στήριξη:

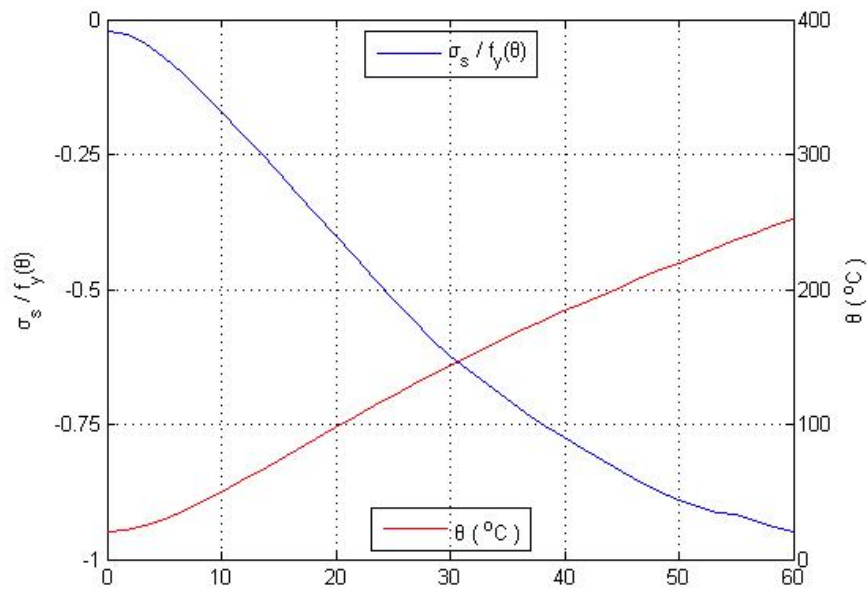


5.3.4 Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

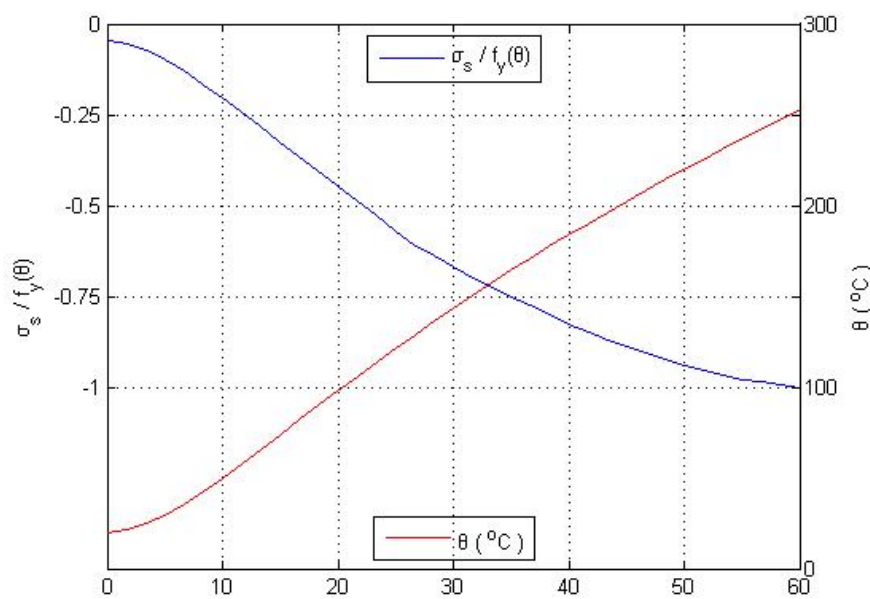
Στη στάθμη του κάτω οπλισμού υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας. Για τον λόγο αυτό λαμβάνεται η πτώση της τάσης διαρροής του χάλυβα, όπως δίνεται από τον Ευροκώδικα 2 για χάλυβα θερμής εξέλασης.

Για $c = 5 \text{ cm}$:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)

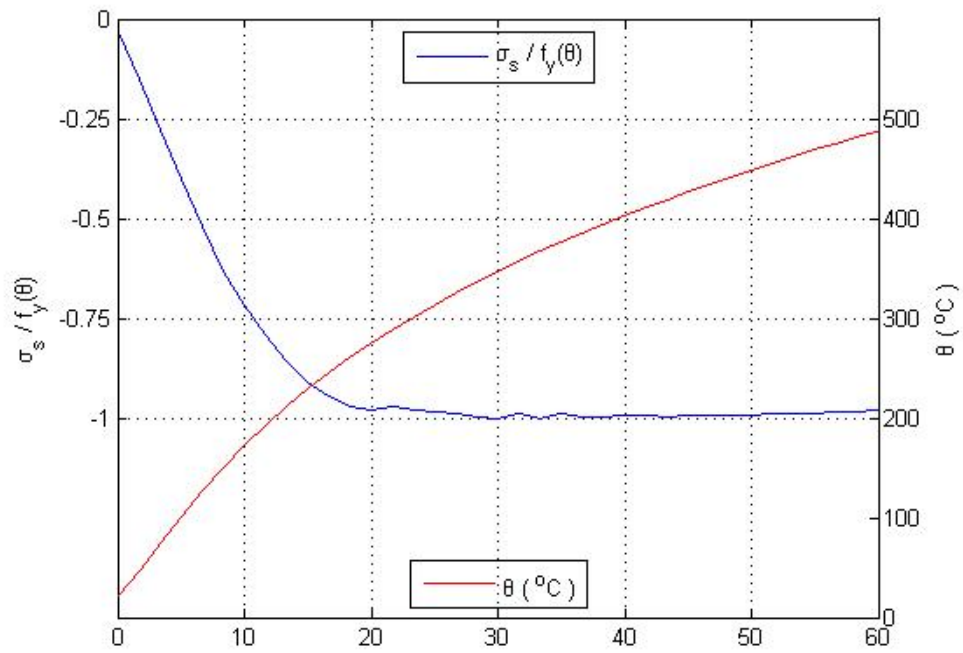


Δεξιά στήριξη: (2Φ14)

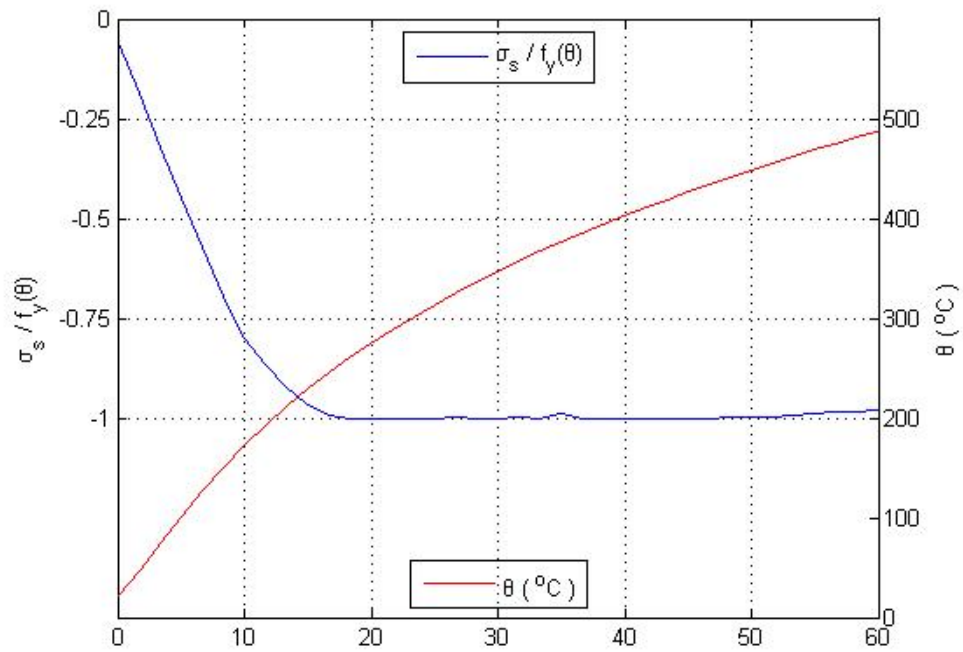


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)



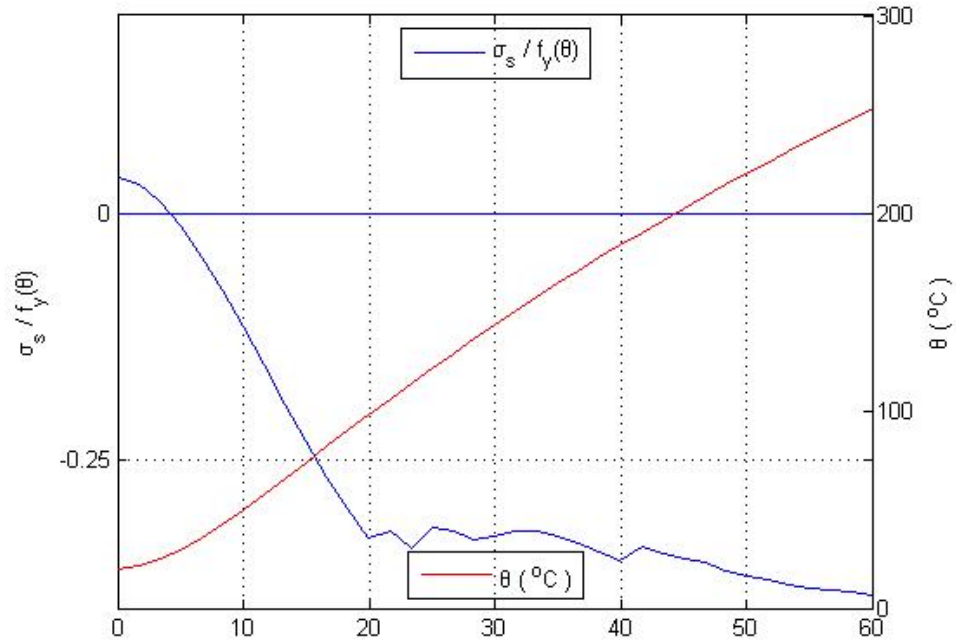
Δεξιά στήριξη: (2Φ14)



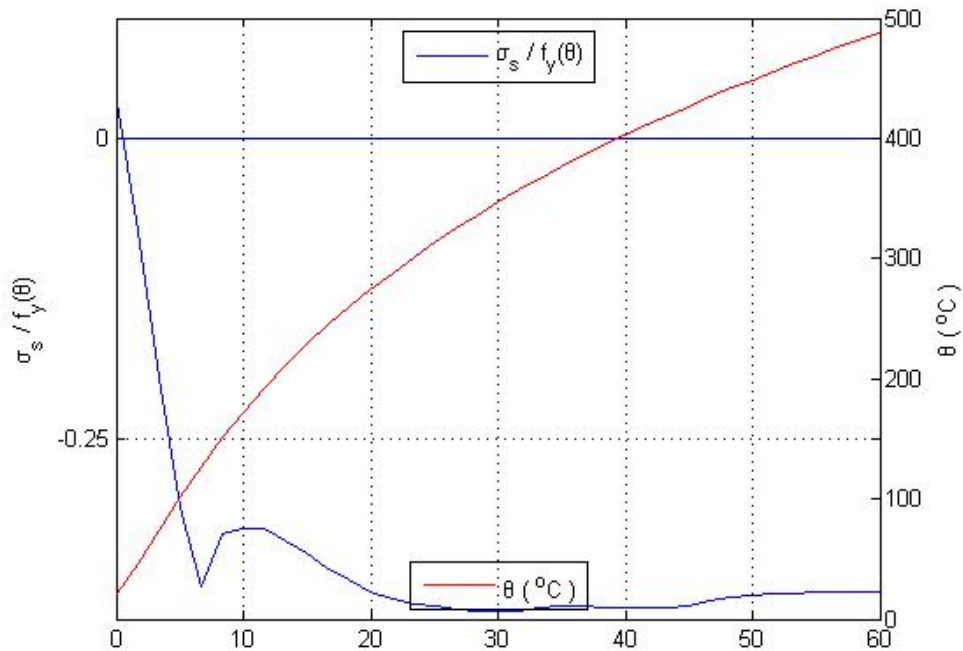
5.3.5 Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Κάτω οπλισμός:

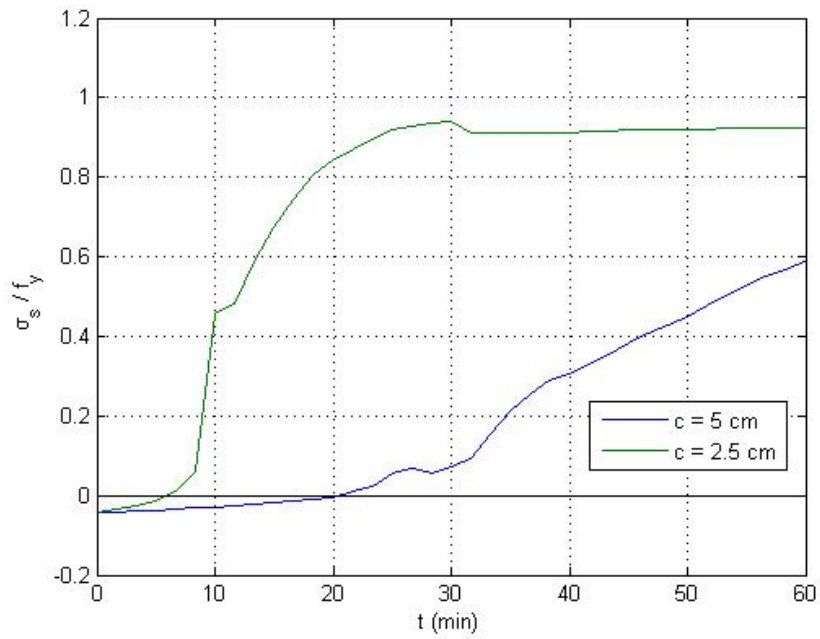
Για $c = 5$ cm: (4Φ14)



Για $c = 2.5$ cm: (4Φ14)



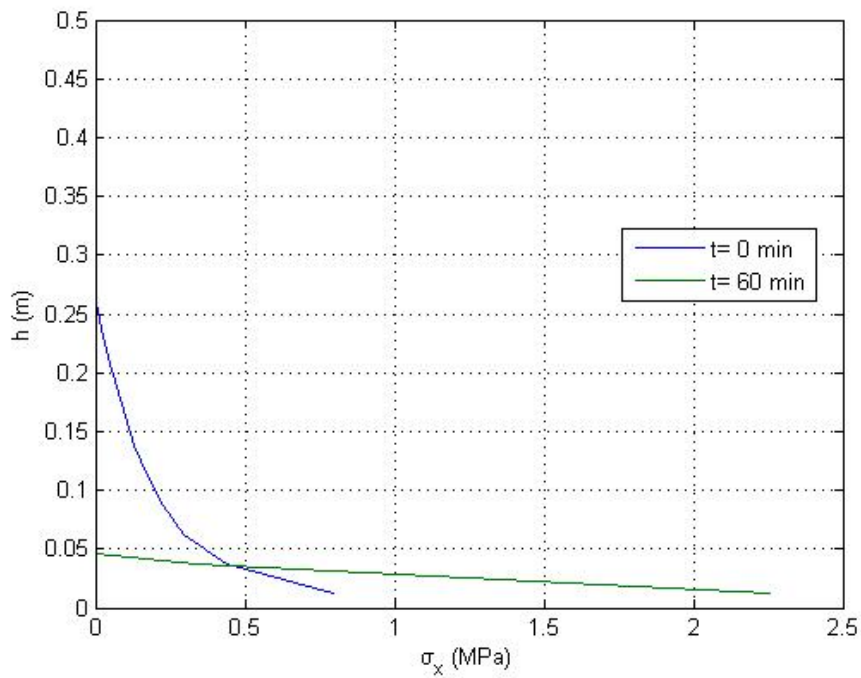
Άνω σπλισμός: (2Φ10)

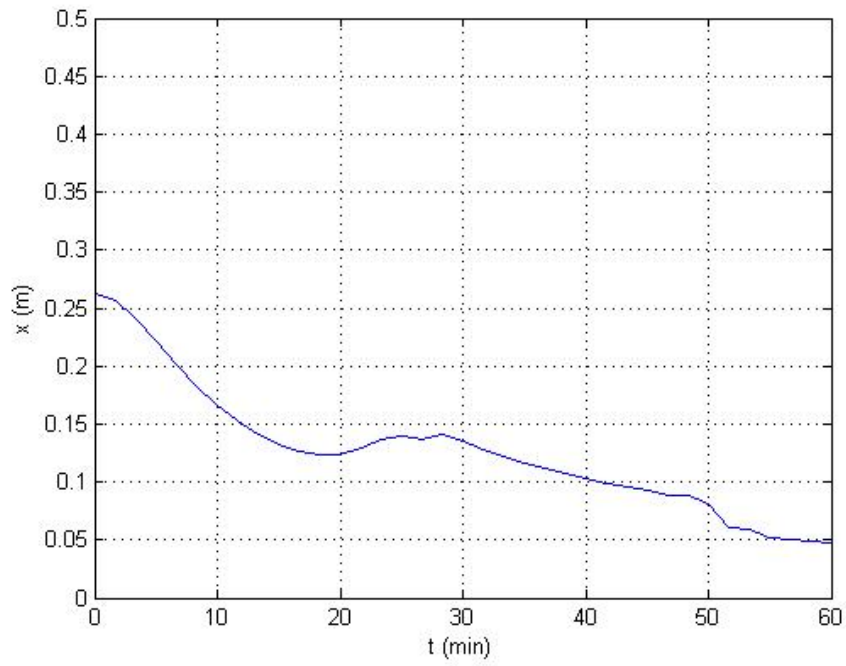


5.3.6 Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος

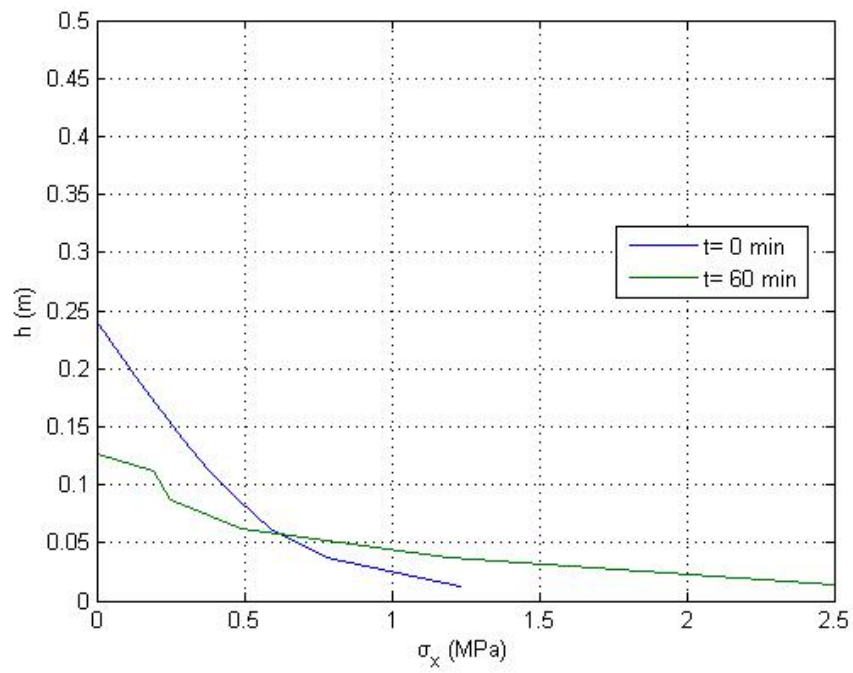
Για $c = 5$ cm:

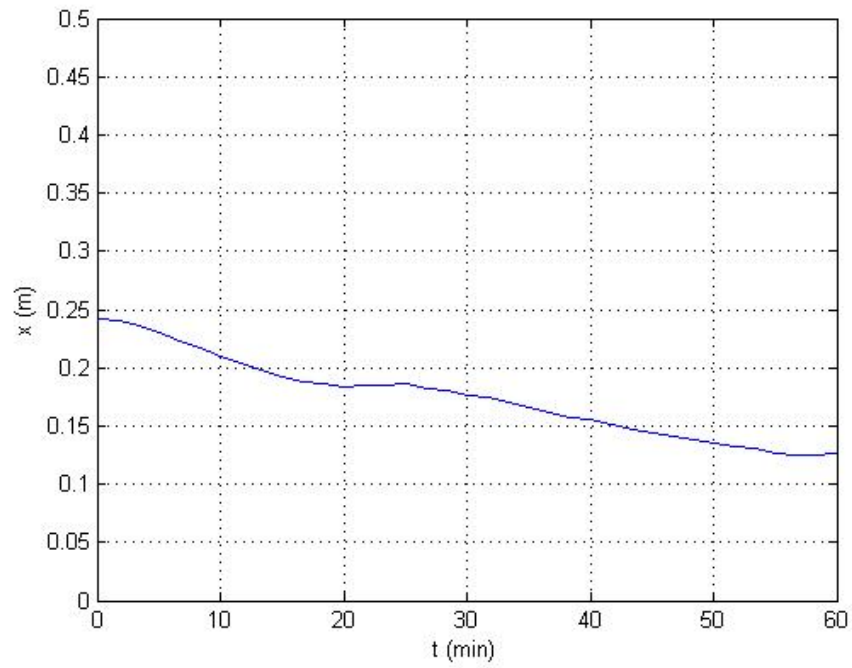
Αριστερή στήριξη:





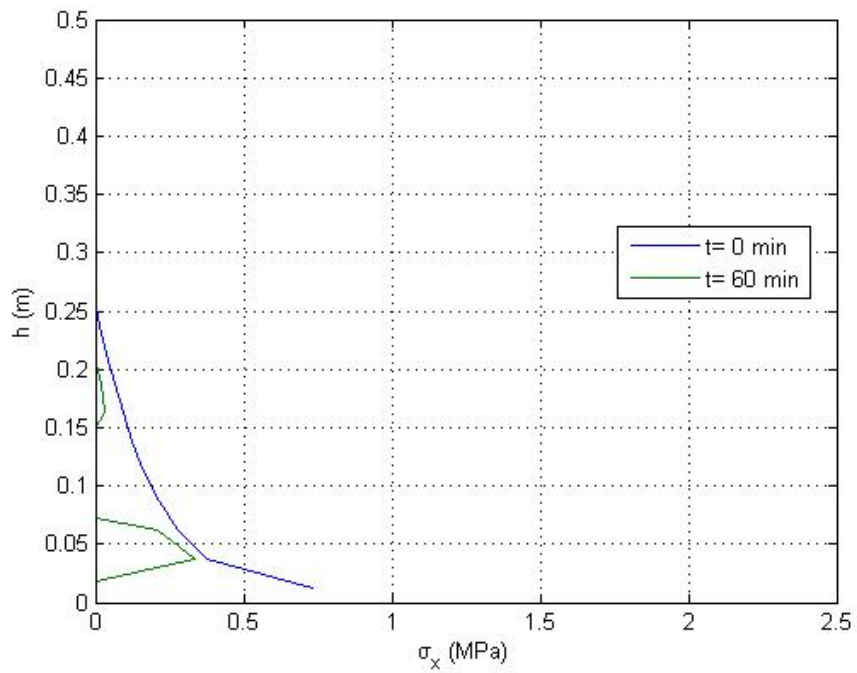
Δεξιά στήριξη:

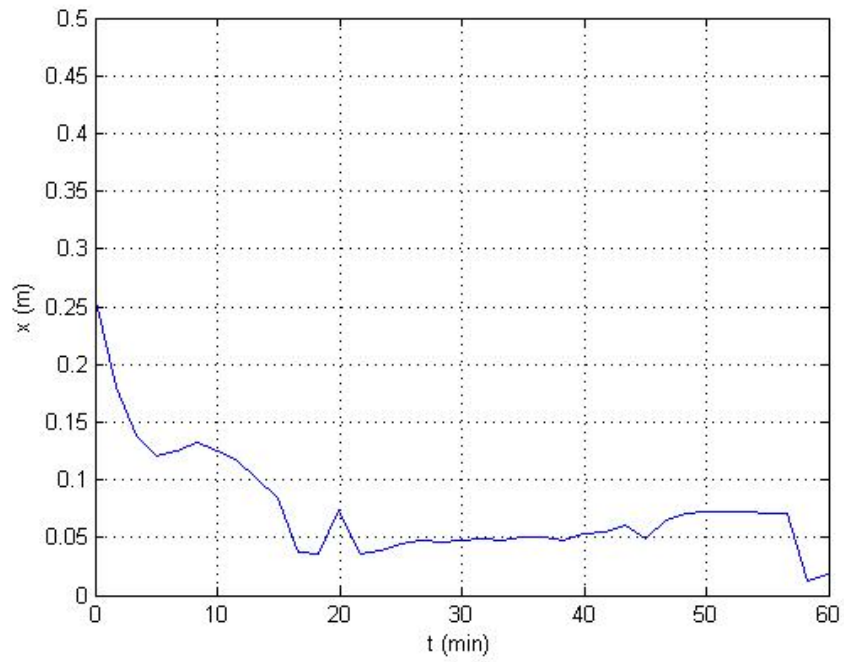




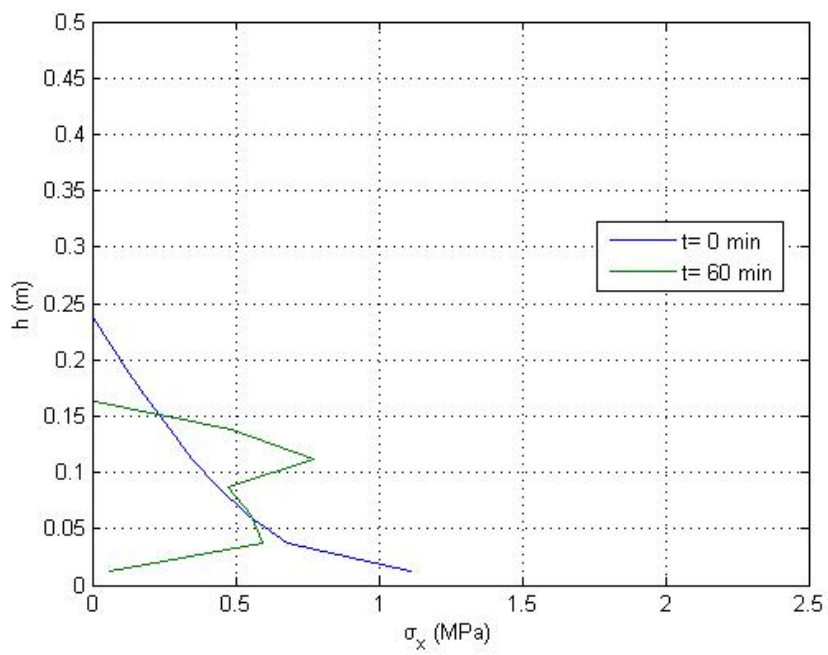
Για $c = 2.5$ cm:

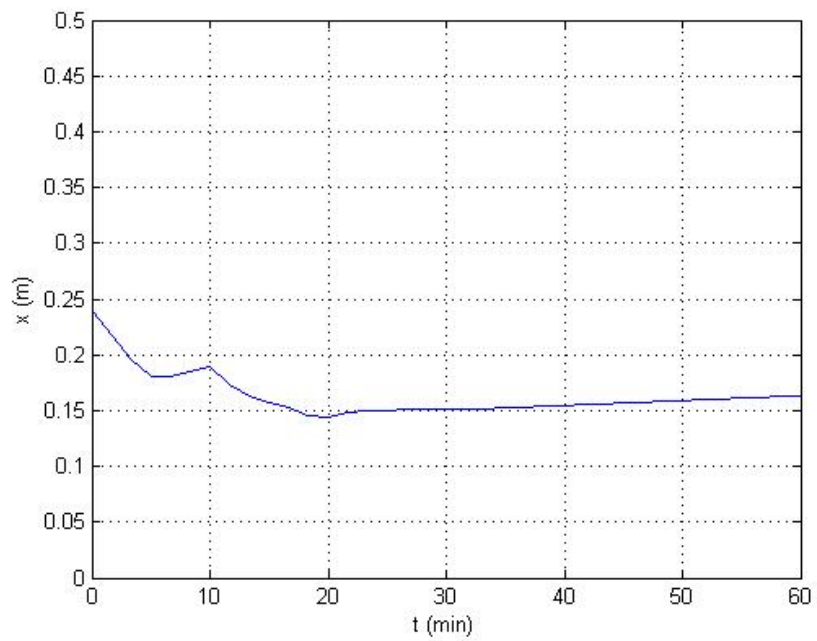
Αριστερή στήριξη:



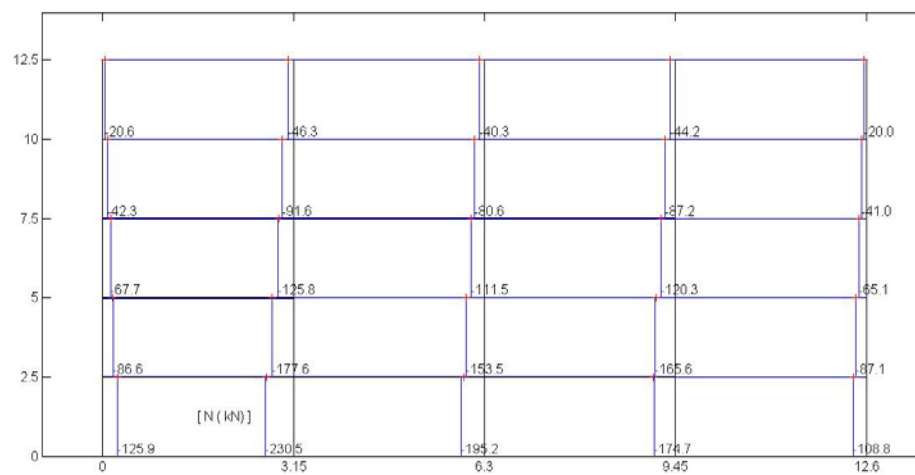
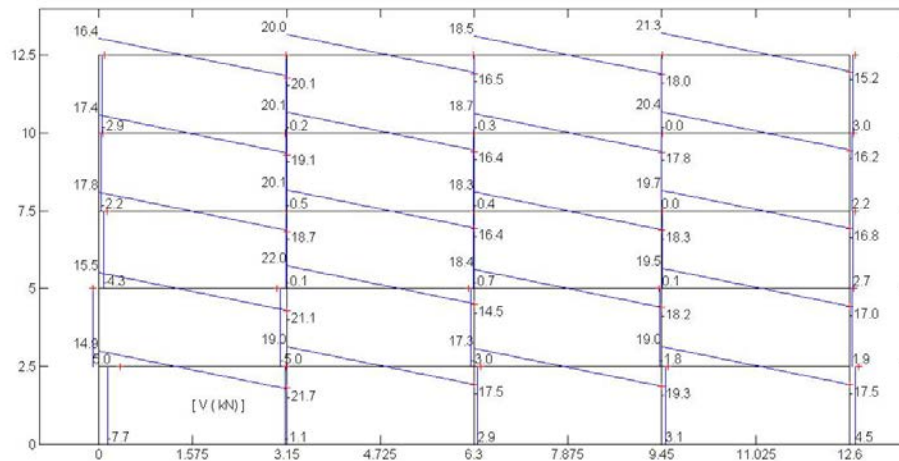
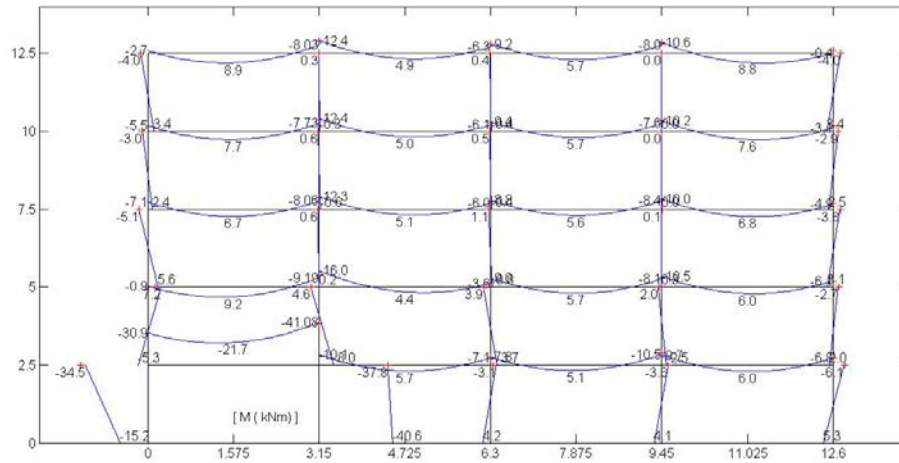


Δεξιά στήριξη:



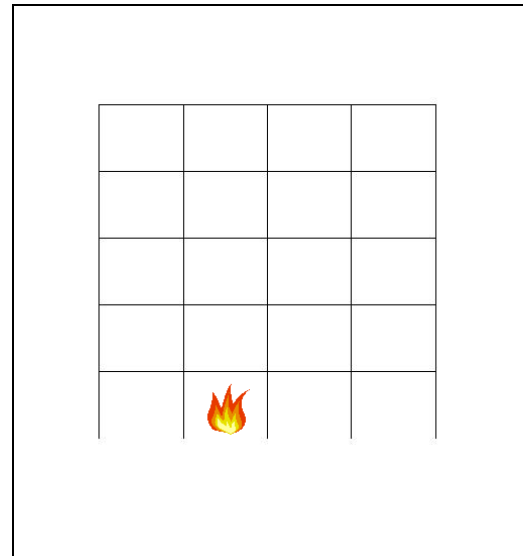


5.3.7 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$:

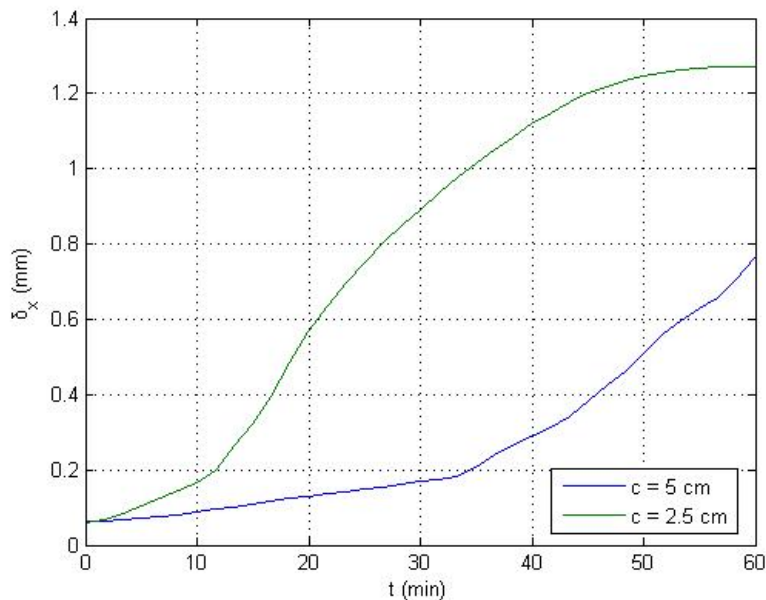
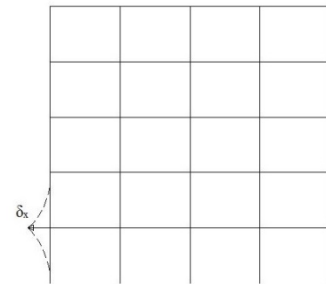


5.4 2^ο Σενάριο Πυρκαγιάς

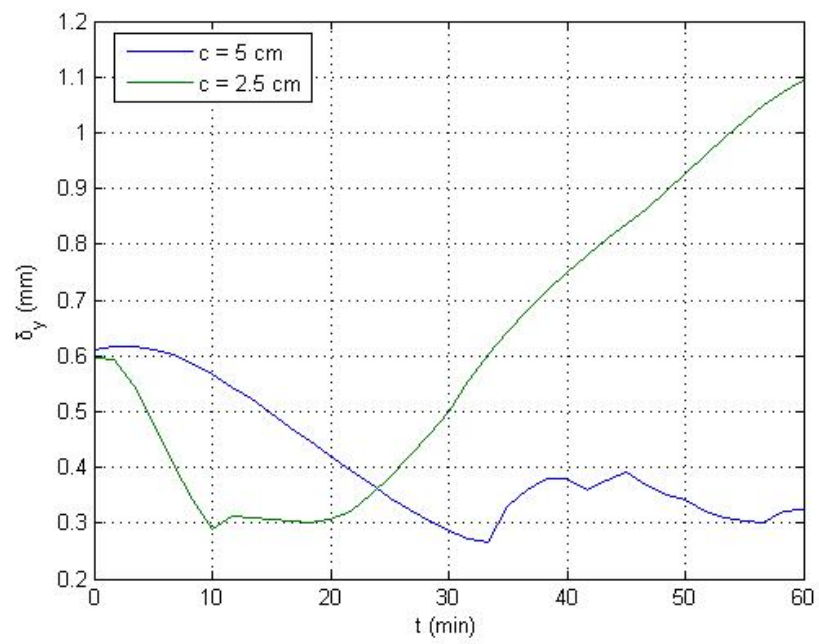
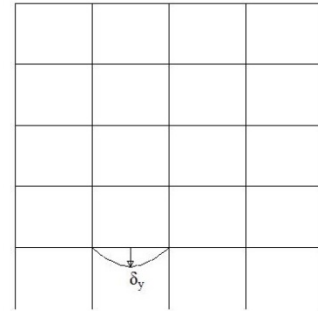
Στο δεύτερο σενάριο πυρκαγιάς υποθέτουμε ότι η πυρκαγιά αναπτύσσεται στο δεύτερο αριστερά φάνωμα του πρώτου ορόφου. Η διάρκεια της πυρκαγιάς είναι 60 min και η σχέση θερμοκρασίας-χρόνου δίνεται από την σχέση της πρότυπης πυρκαγιάς. Δεν εξαπλώνεται σε κάποιο άλλο διαμέρισμα, επομένως οι υπόλοιπες παρειές εκτός του συγκεκριμένου φανώματος έχουν σταθερή θερμοκρασία, ίση με 20 °C.



Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



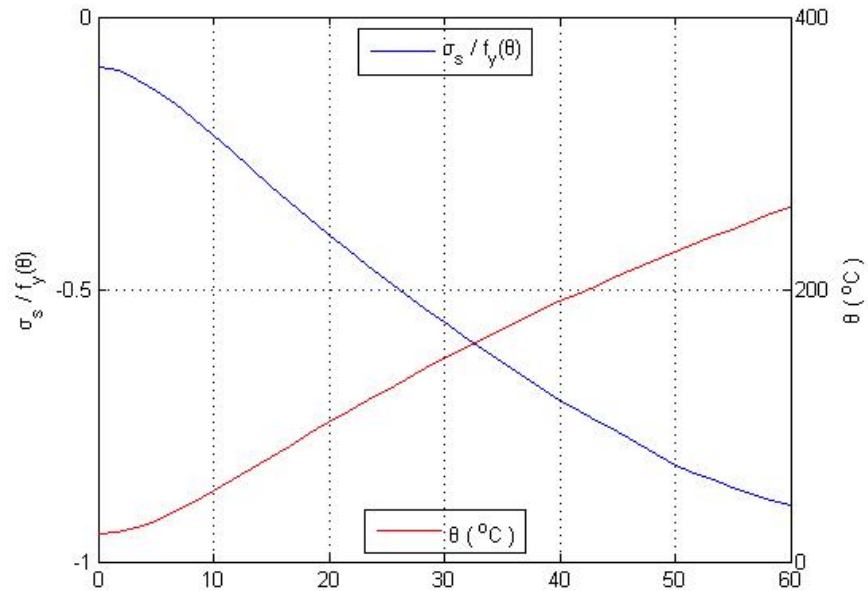
Κατακόρυφο βέλος του δεύτερου από αριστερά
φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου
έκθεσης στην πυρκαγιά



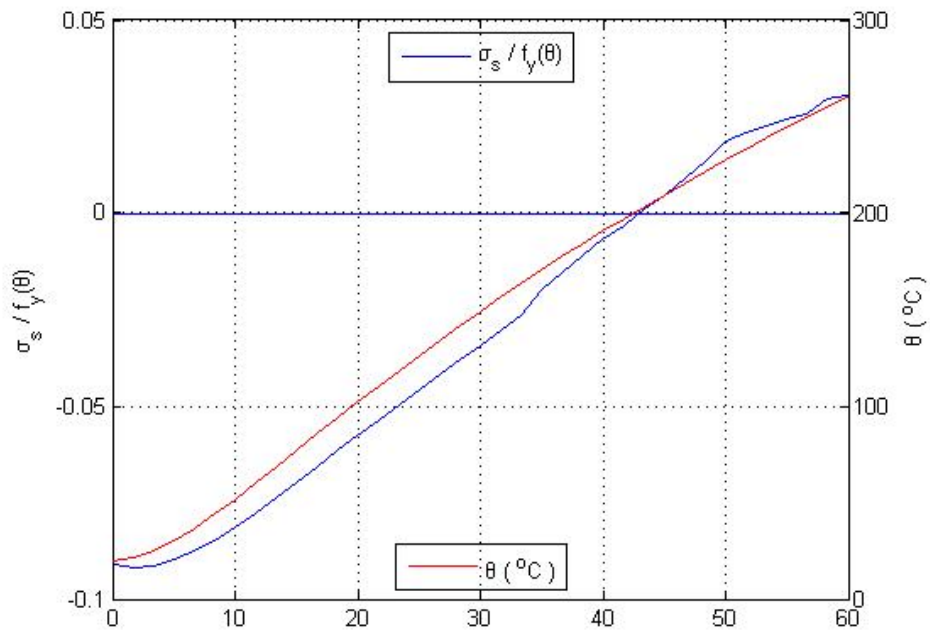
5.4.1 Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του τρίτου υποστρώματος

Αριστερή στρώση οπλισμού (3Φ16)

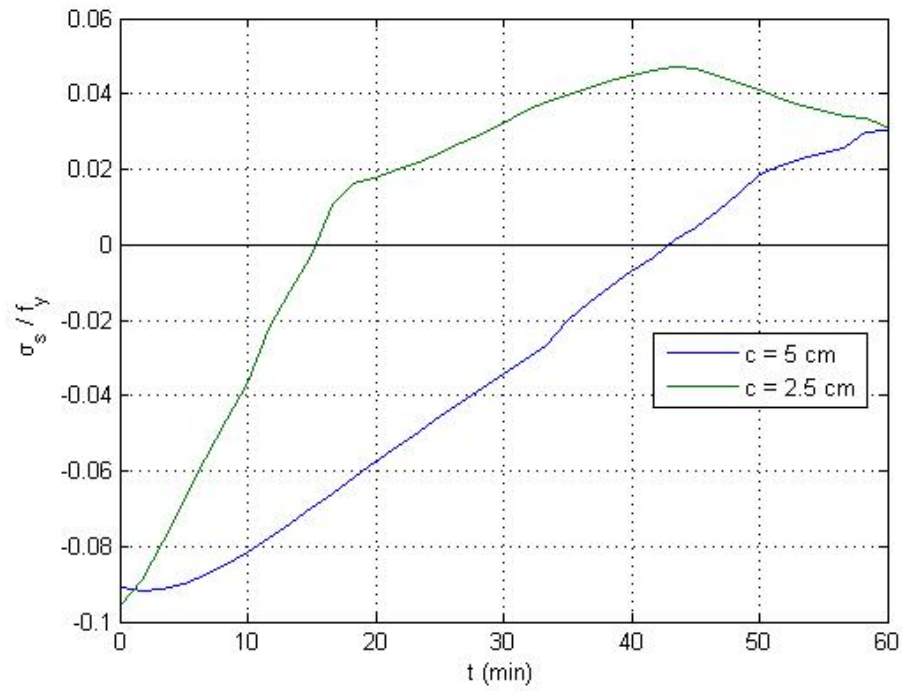
Για $c = 5$ cm:



Για $c = 2.5$ cm:

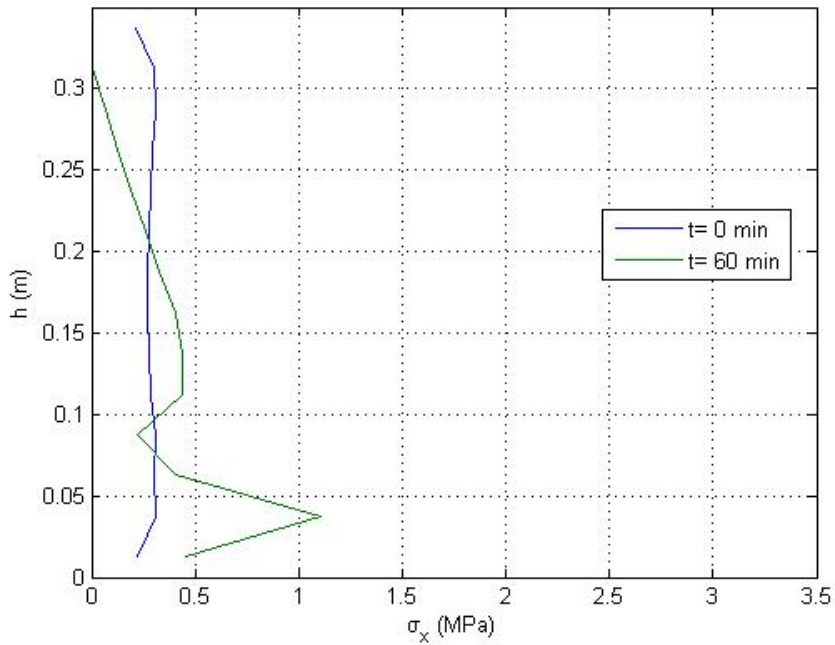


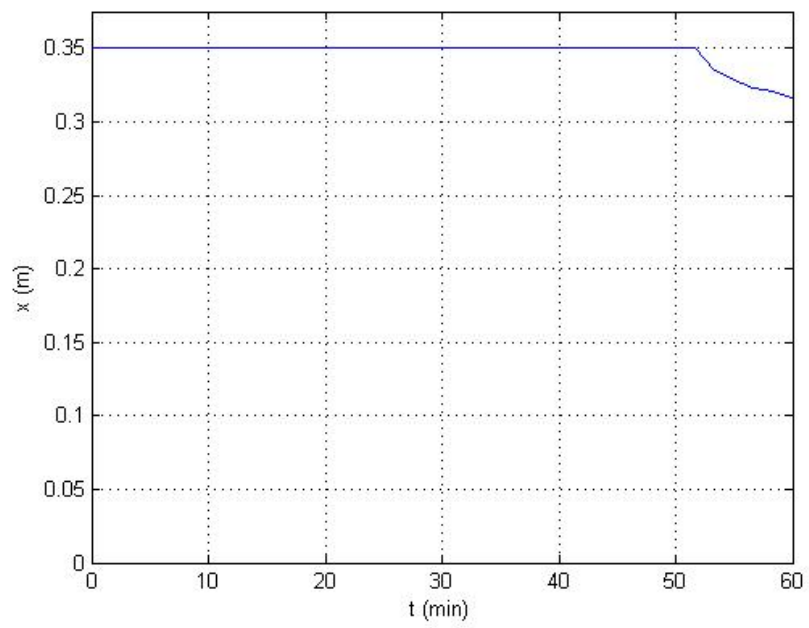
Δεξιά στρώση οπλισμού (3Φ16)



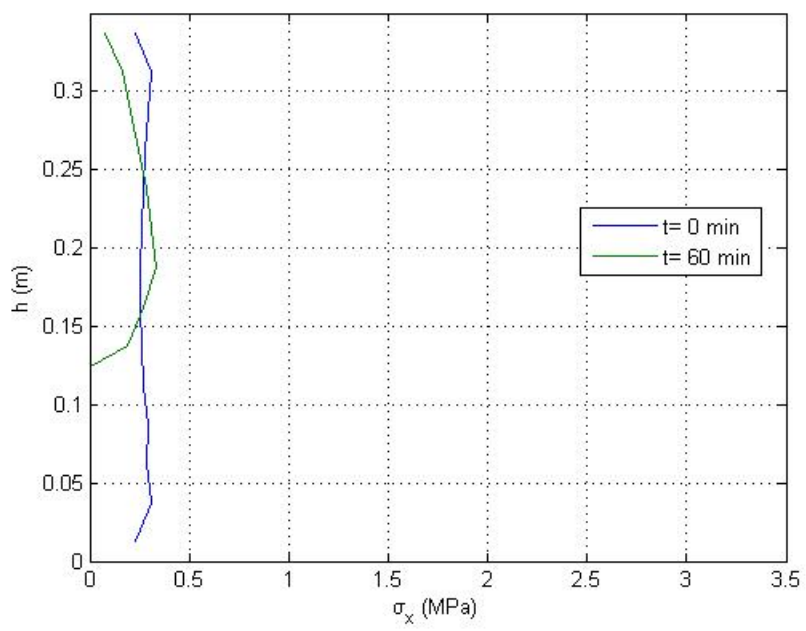
5.4.2 Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστυλώματος

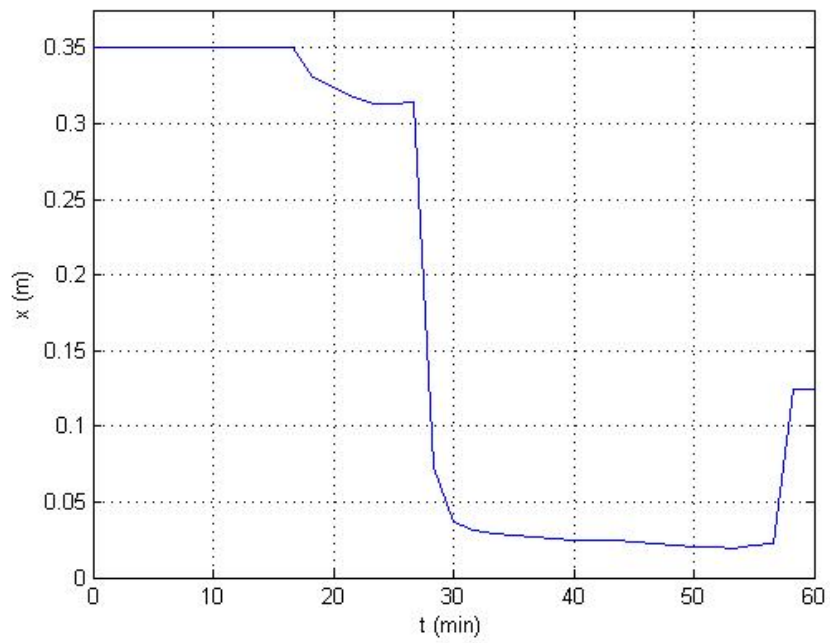
Για $c = 5$ cm





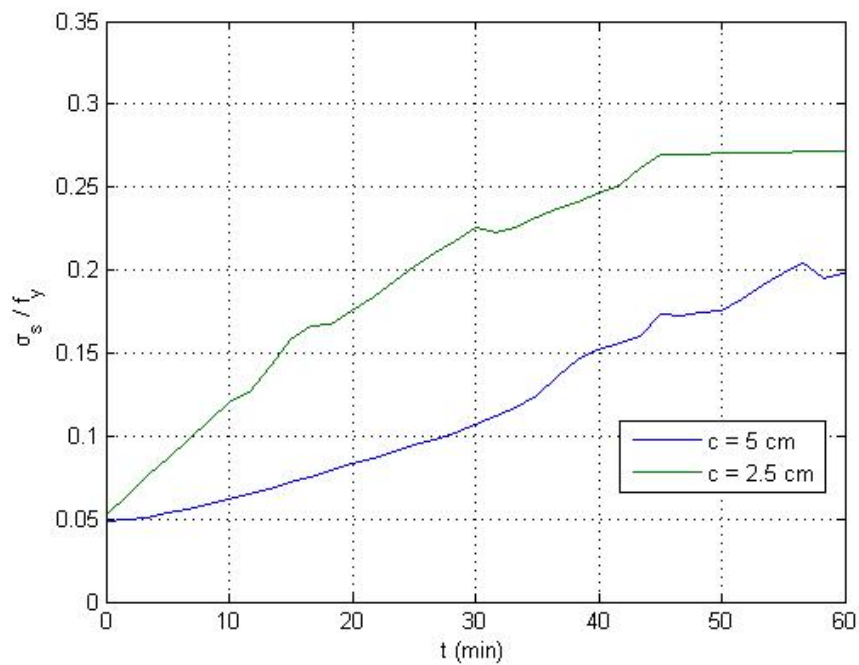
Για $c = 2.5$ cm



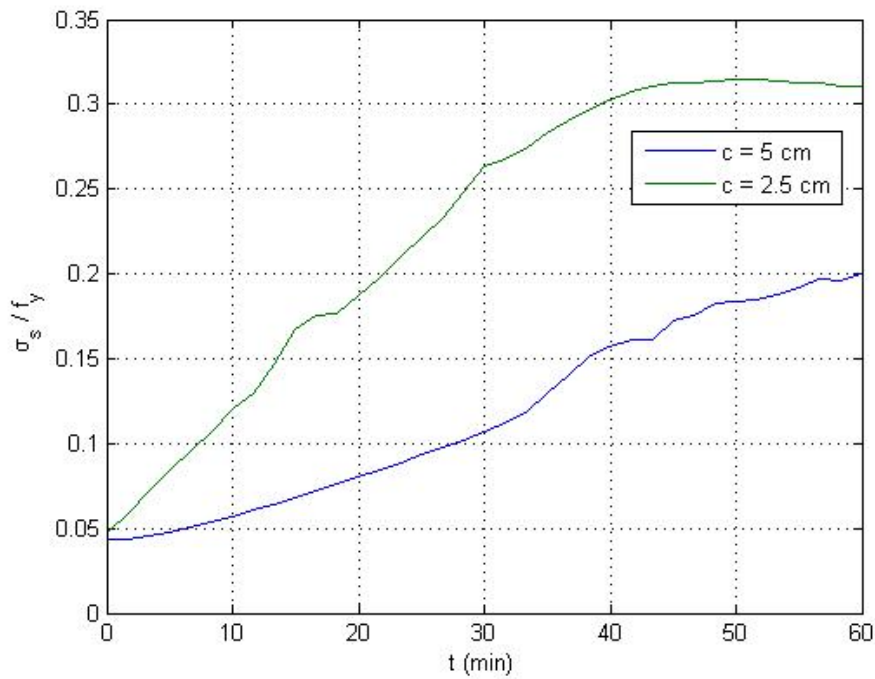


5.4.3 Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Αριστερή στήριξη:



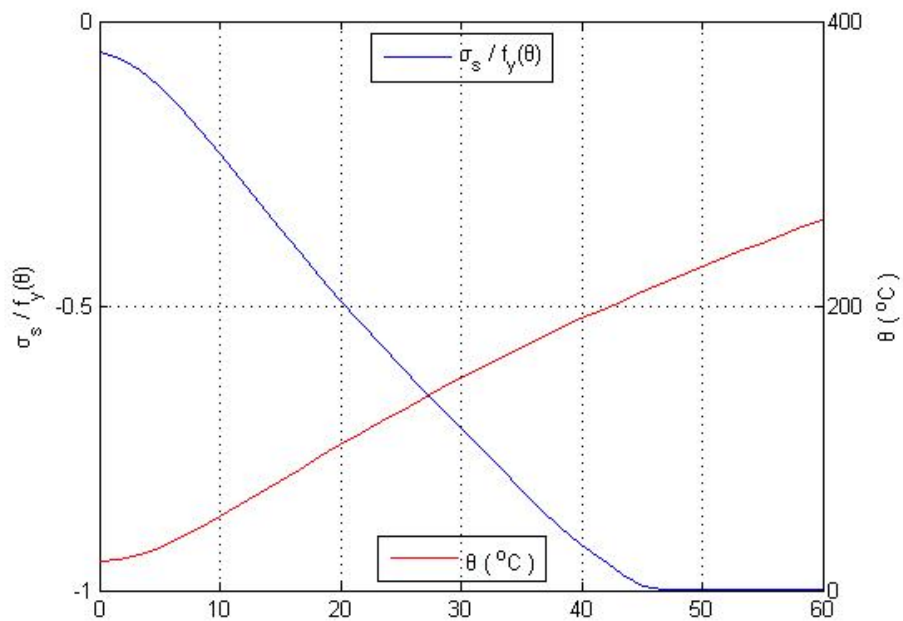
Δεξιά στήριξη:



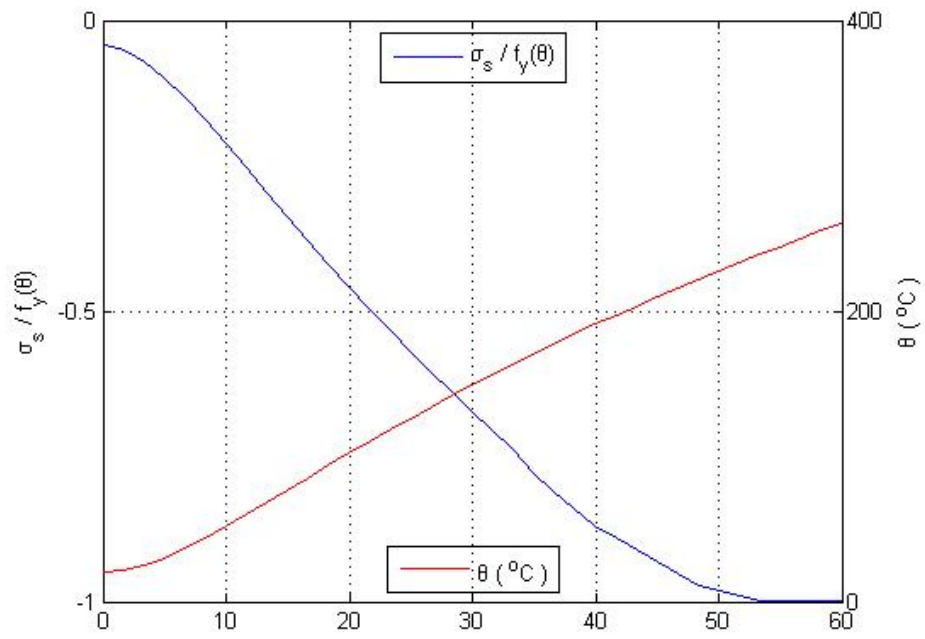
5.4.4 Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Για $c = 5$ cm:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10)

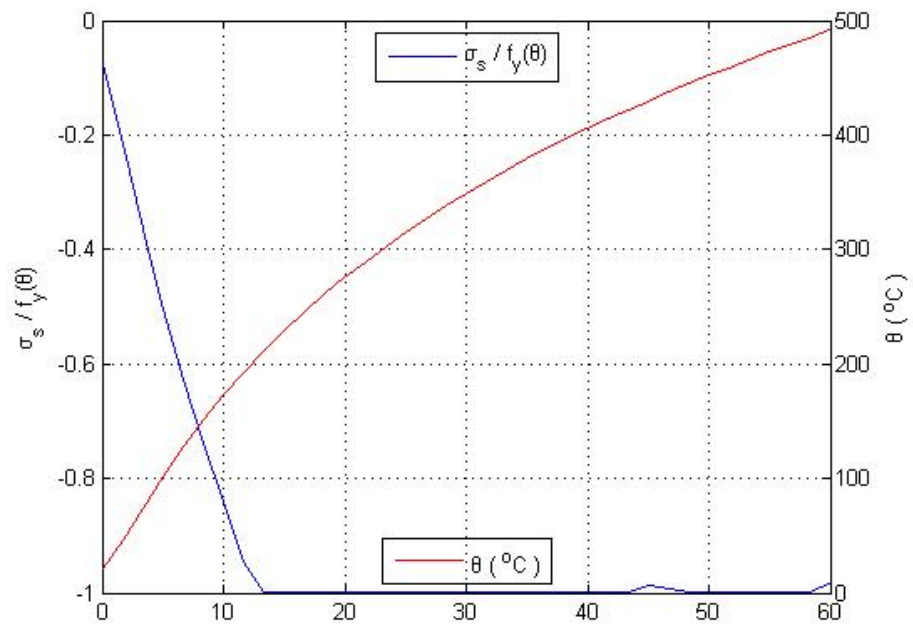


Δεξιά στήριξη: (2Φ10)

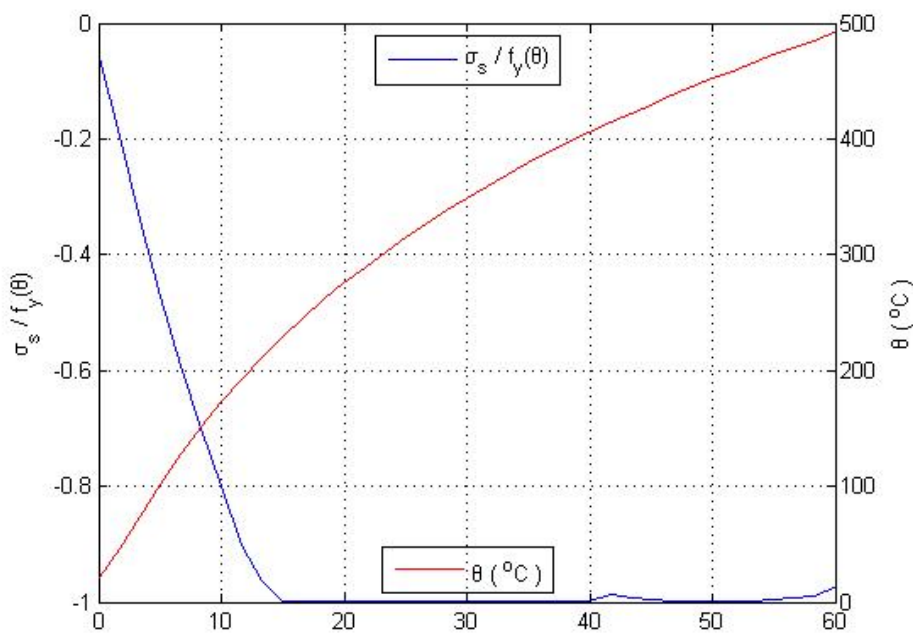


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Αριστερή στήριξη:



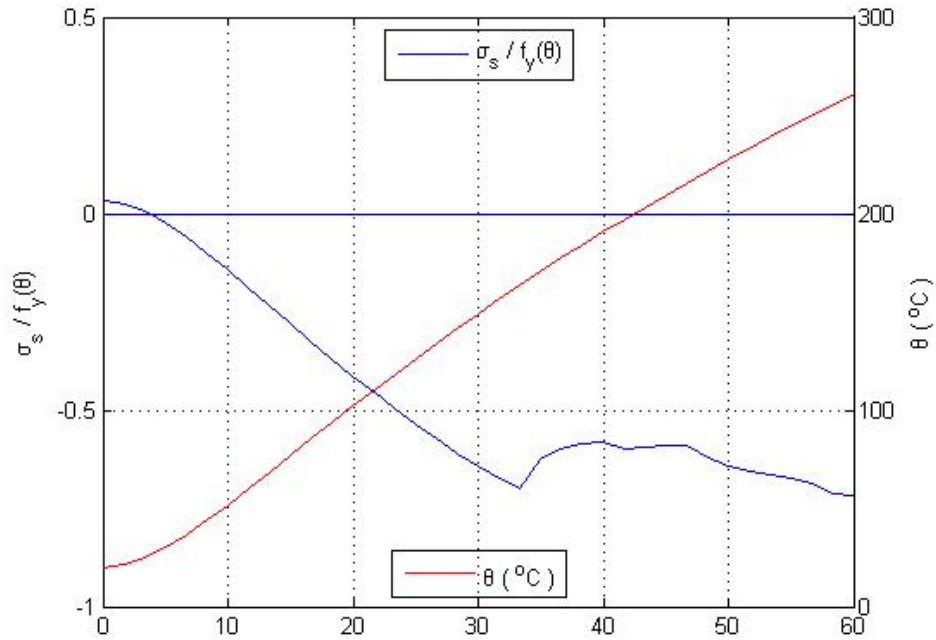
Δεξιά στήριξη:



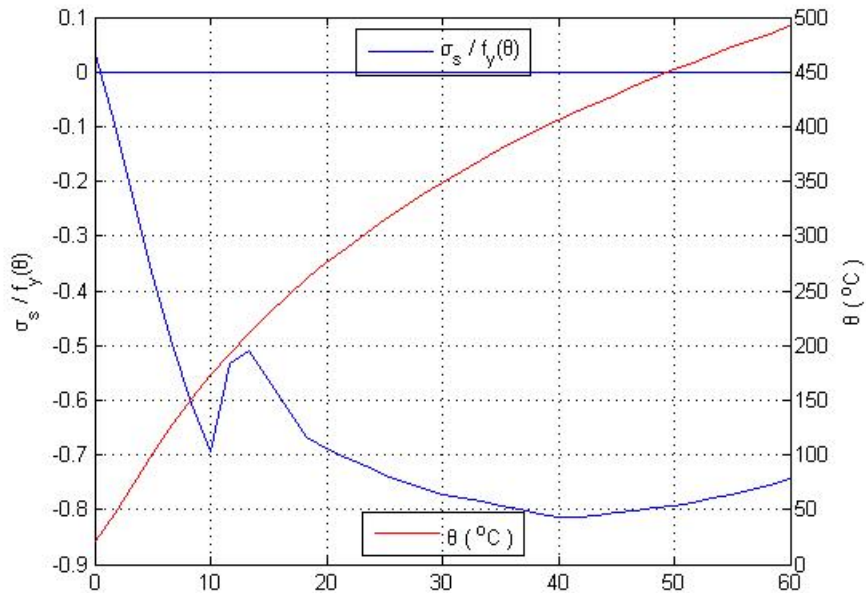
5.4.5 Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Κάτω οπλισμός: (4Φ10)

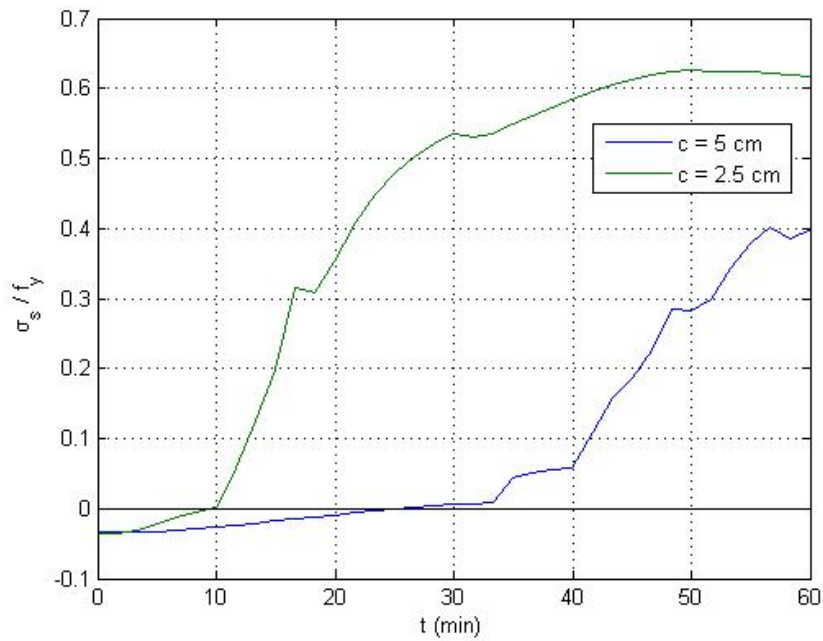
Για $c = 5 \text{ cm}$:



Για $c = 2.5 \text{ cm}$:



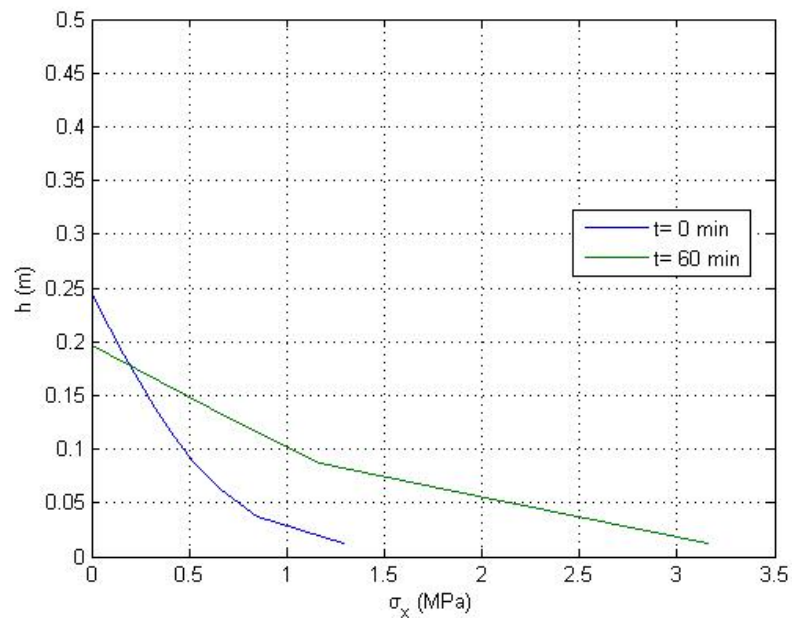
Άνω οπλισμός:

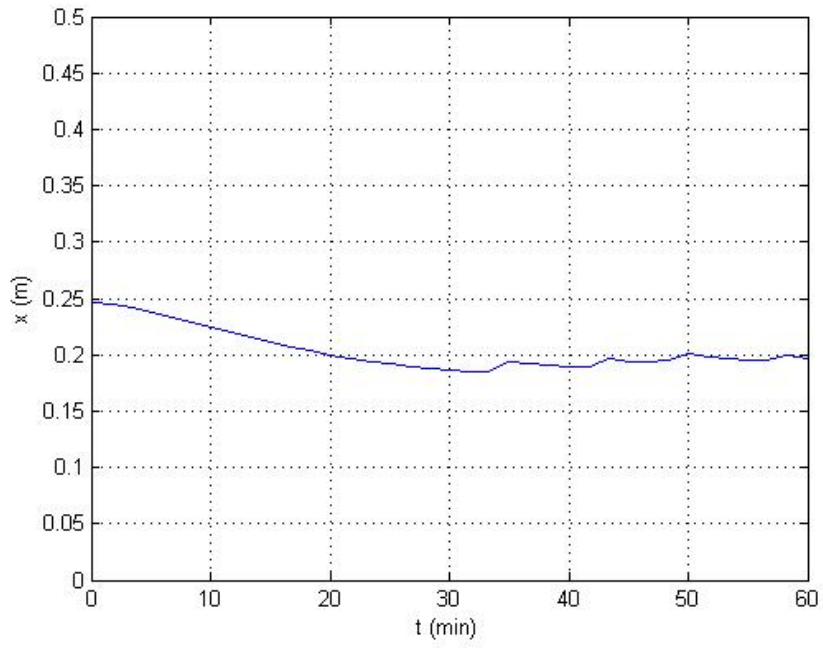


5.4.6 Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηριζέων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος

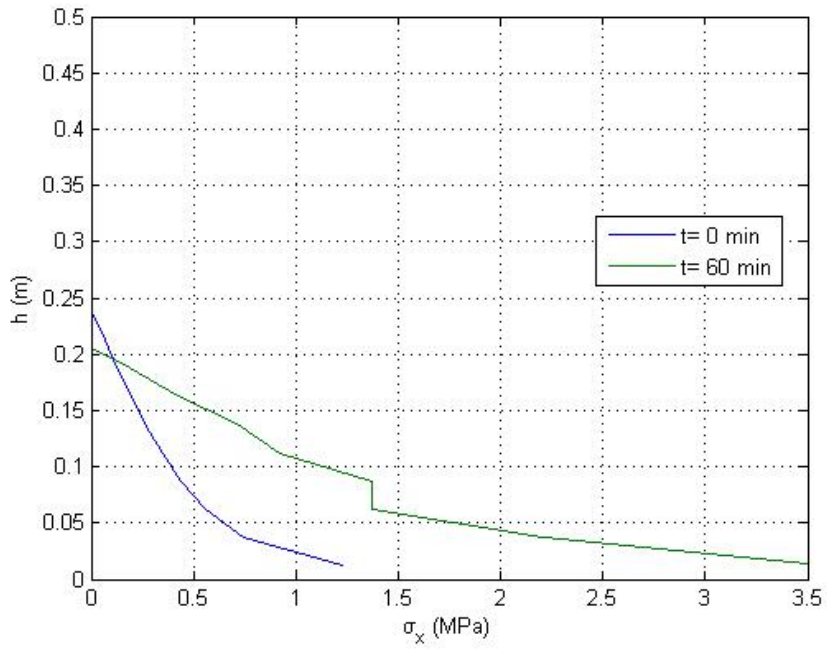
Για $c = 5$ cm:

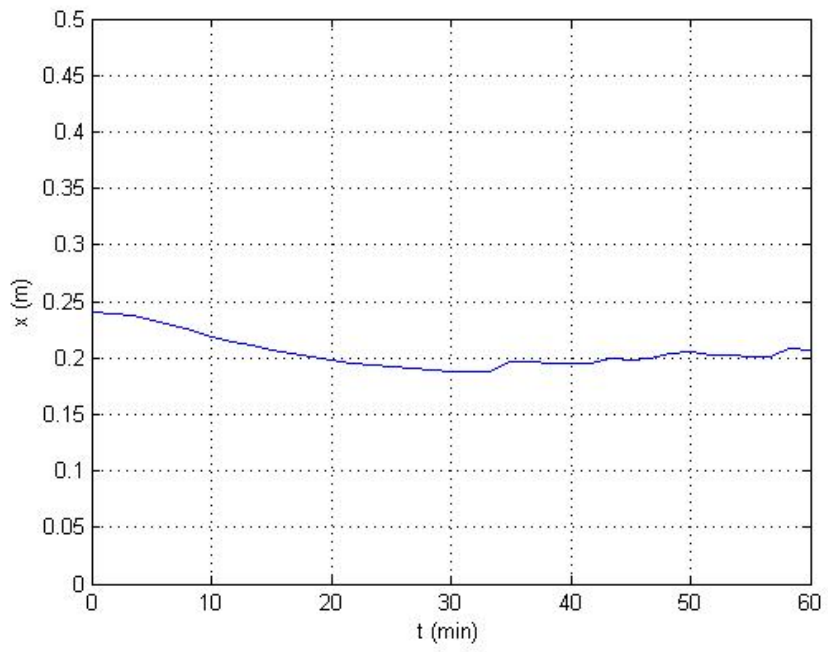
Αριστερή στήριξη:



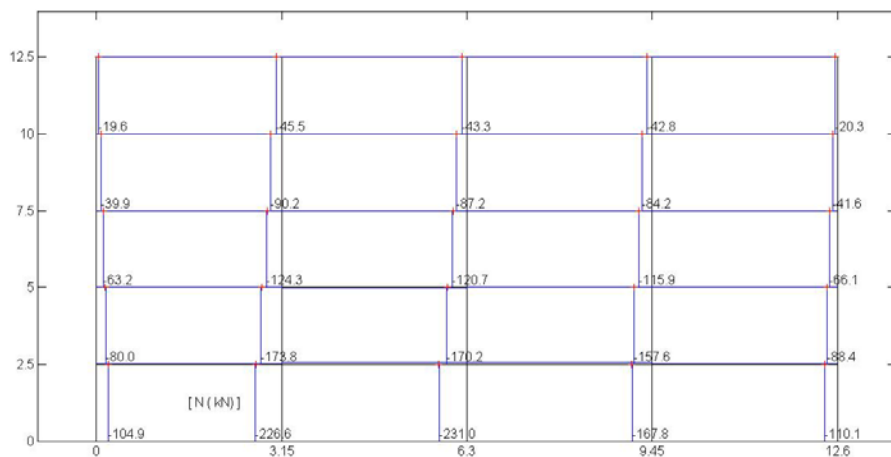
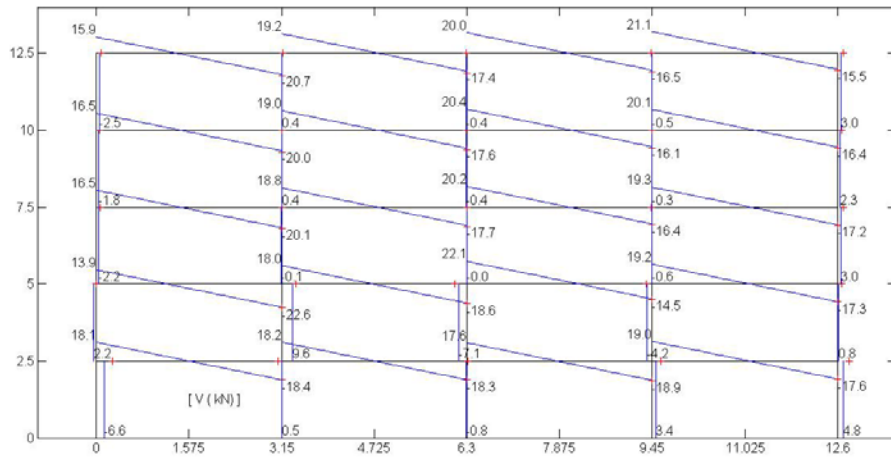
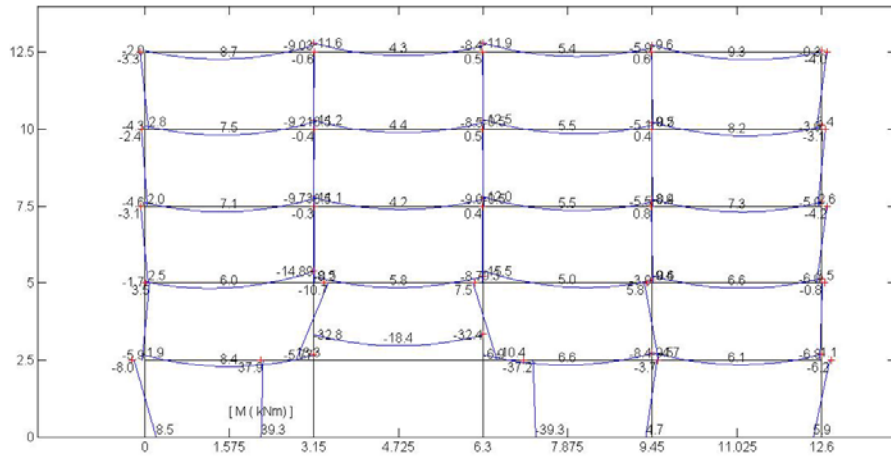


Δεξιά στήριξη:



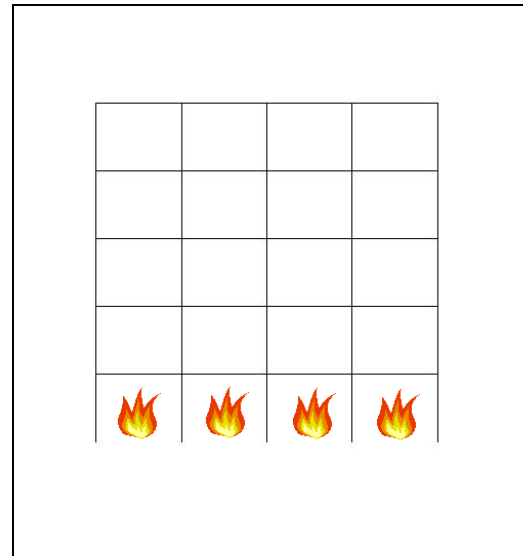


5.4.7 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$

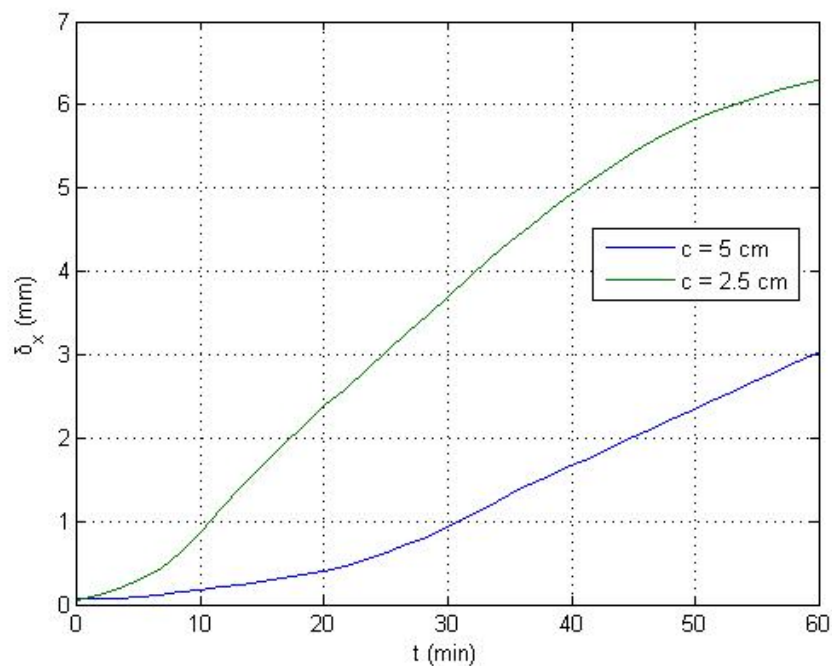
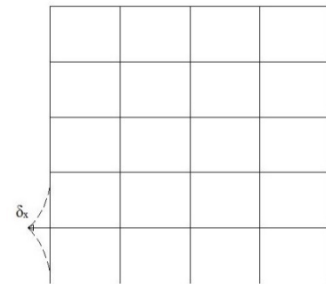


5.5 3^ο Σενάριο Πυρκαγιάς

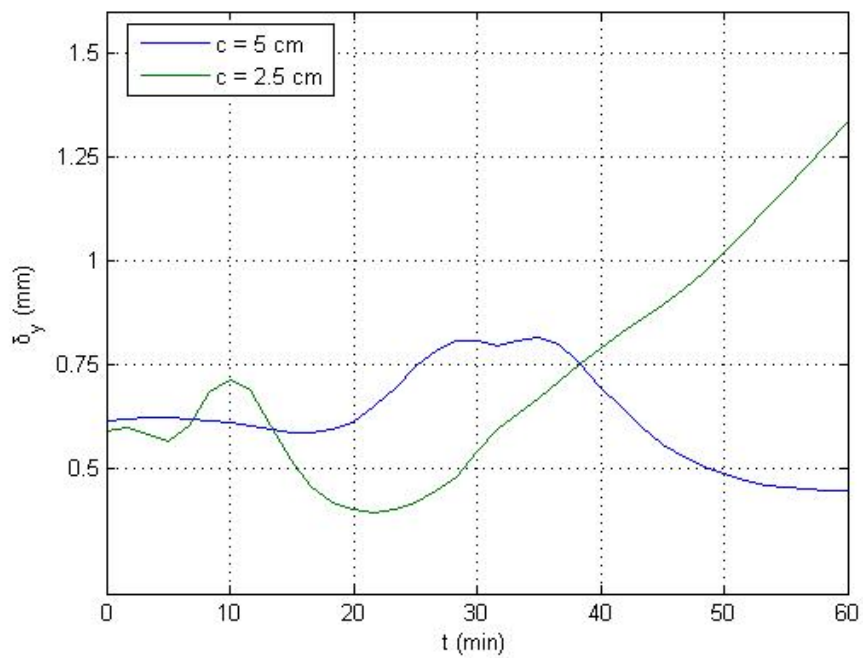
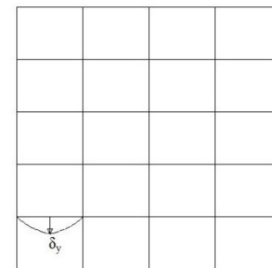
Στο τρίτο σενάριο πυρκαγιάς υποθέτουμε ότι η πυρκαγιά αναπτύσσεται ταυτόχρονα σε όλα τα φατνώματα του πρώτου ορόφου. Η διάρκεια της πυρκαγιάς είναι 60 min και η σχέση θερμοκρασίας-χρόνου δίνεται από την σχέση της πρότυπης πυρκαγιάς. Δεν εξαπλώνεται σε κάποιο άλλο διαμέρισμα, επομένως οι υπόλοιπες παρειές εκτός του πρώτου ορόφου έχουν σταθερή θερμοκρασία, ίση με 20 °C.



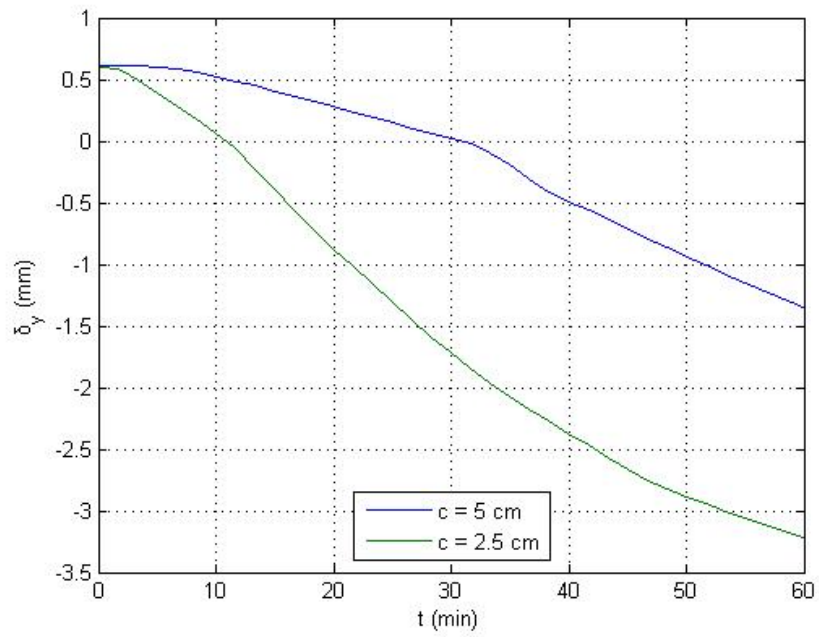
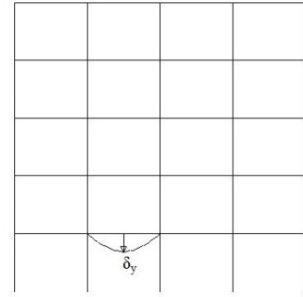
Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



Κατακόρυφο βέλος του πρώτου από αριστερά φατνώματος
του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην
πυρκαγιά

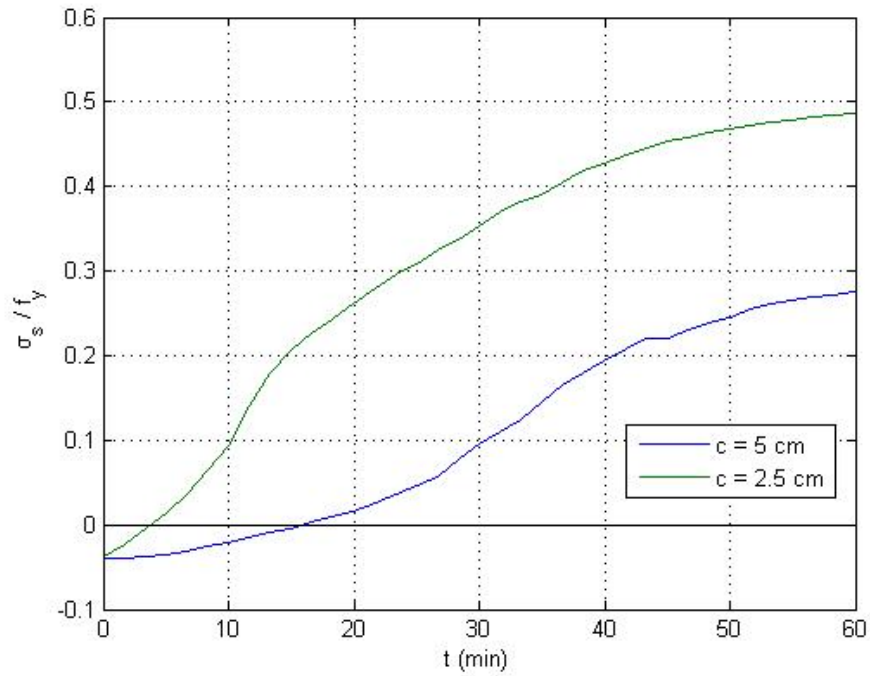


Κατακόρυφο βέλος του δεύτερου από αριστερά
φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου
έκθεσης στην πυρκαγιά



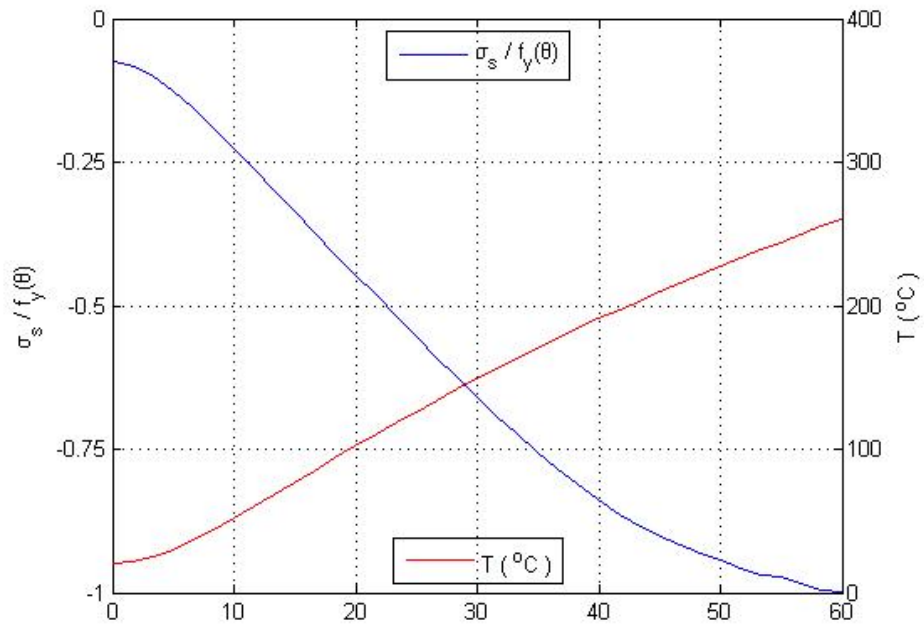
5.5.1 Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστρώματος

Αριστερή στρώση οπλισμού (3Φ16)

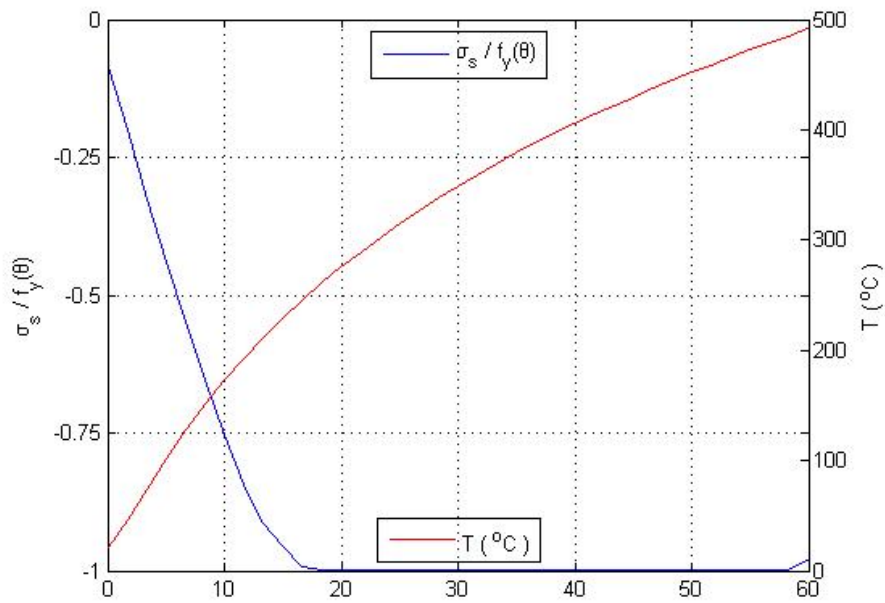


Δεξιά στρώση οπλισμού (3Φ16)

Για $c = 5 \text{ cm}$:

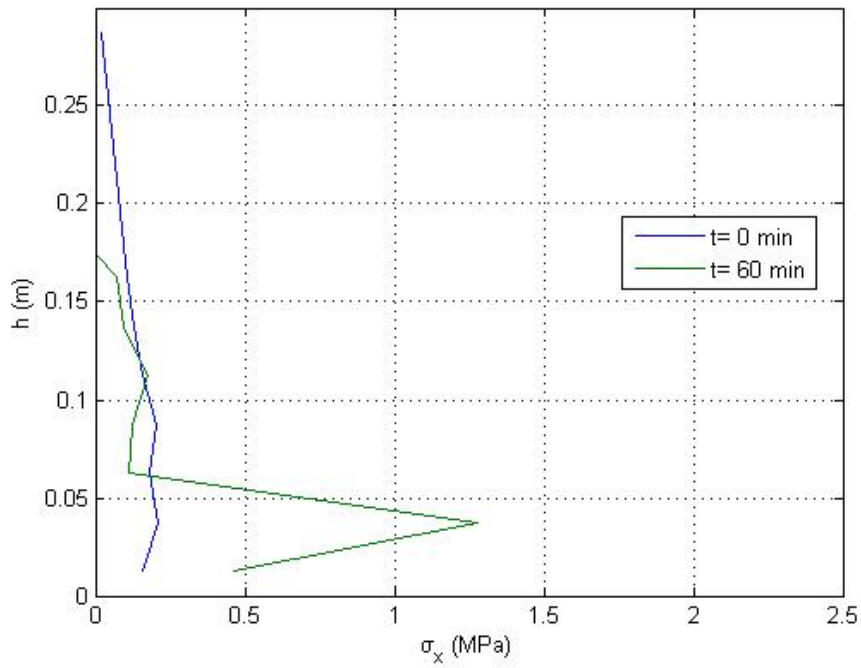
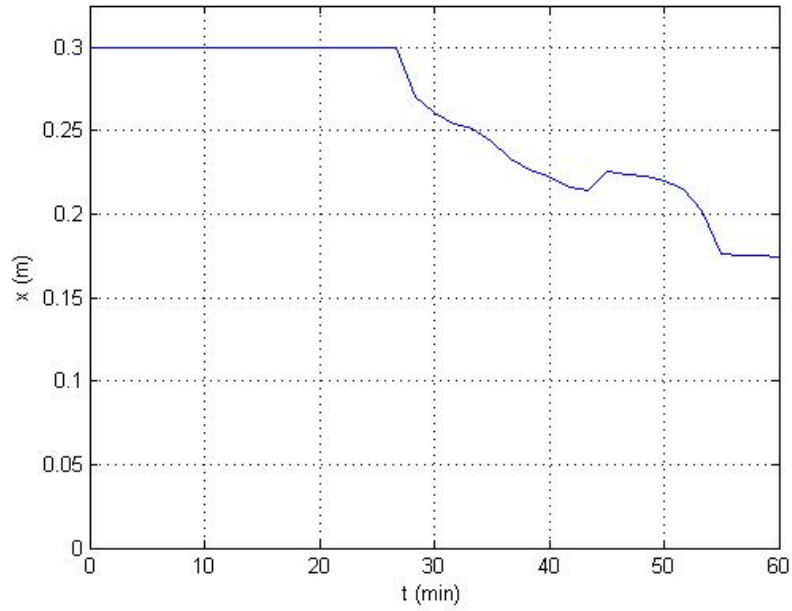


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

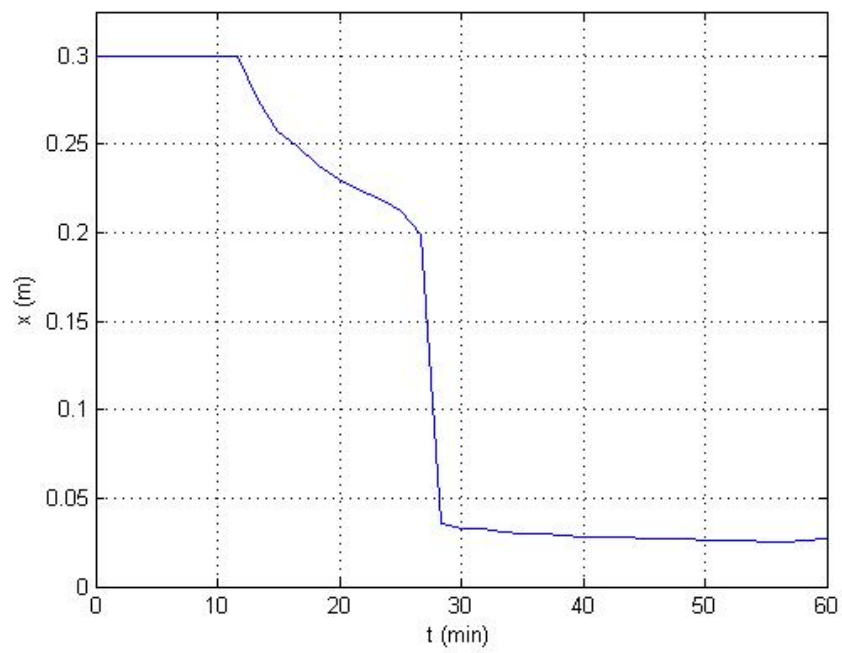
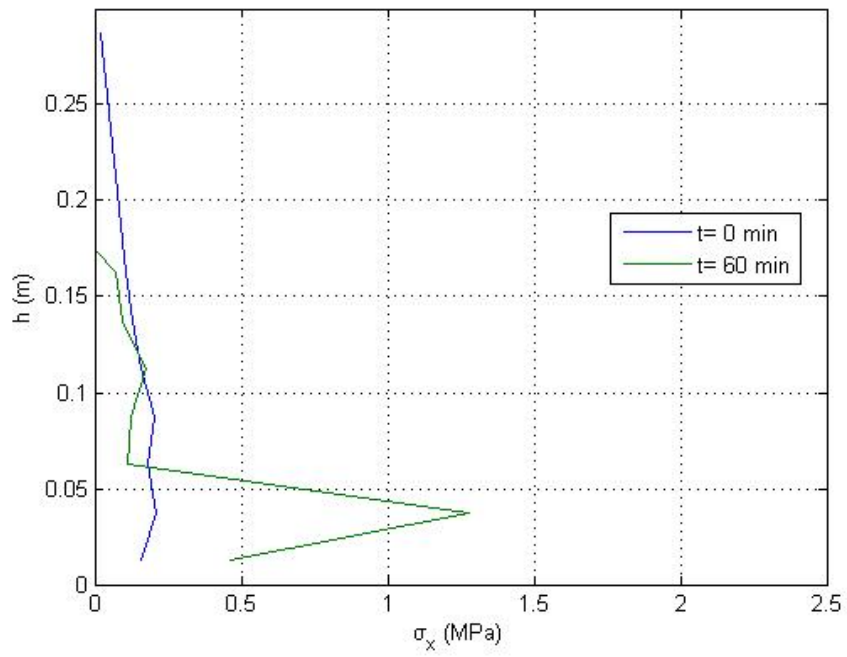


5.5.2 Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του υποστρώματος

Για $c = 5$ cm



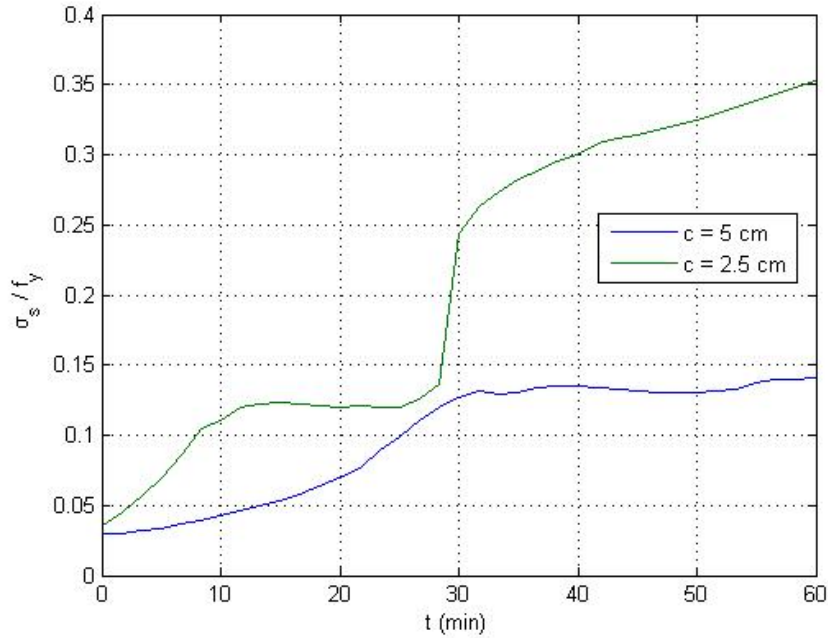
$\Gamma \alpha c = 2.5 \text{ cm}$



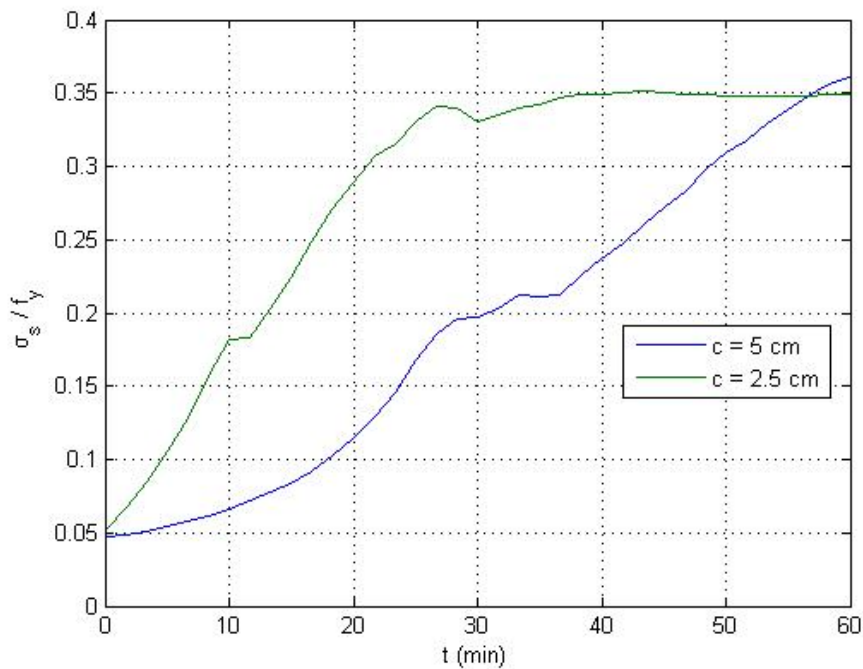
5.5.3 Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:

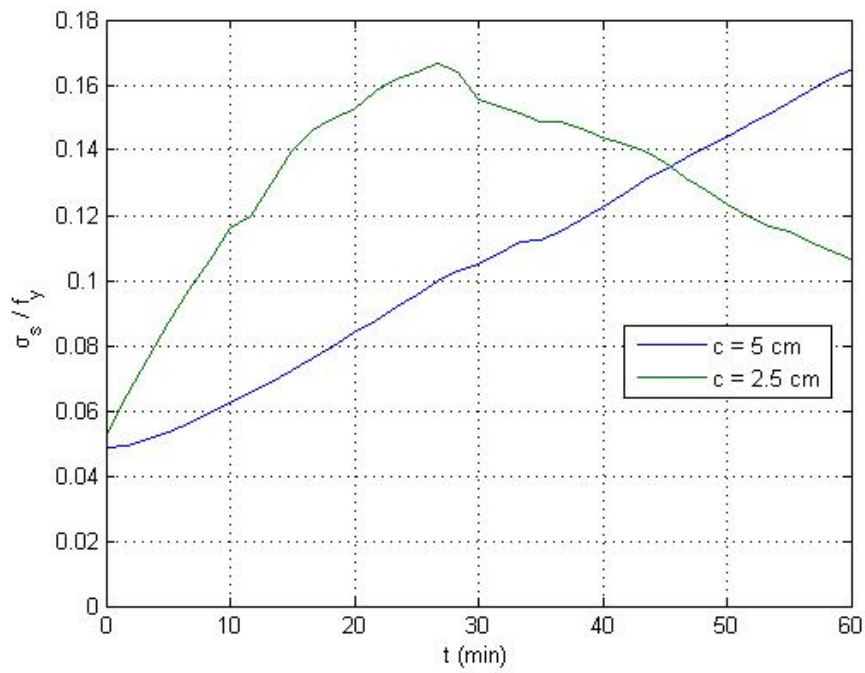


Δεξιά στήριξη:

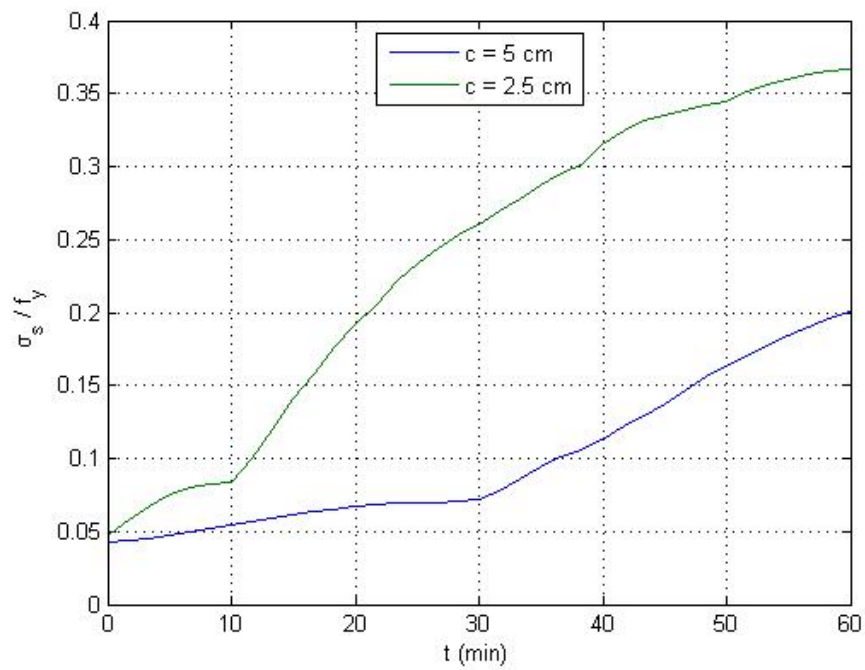


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:



Δεξιά στήριξη:

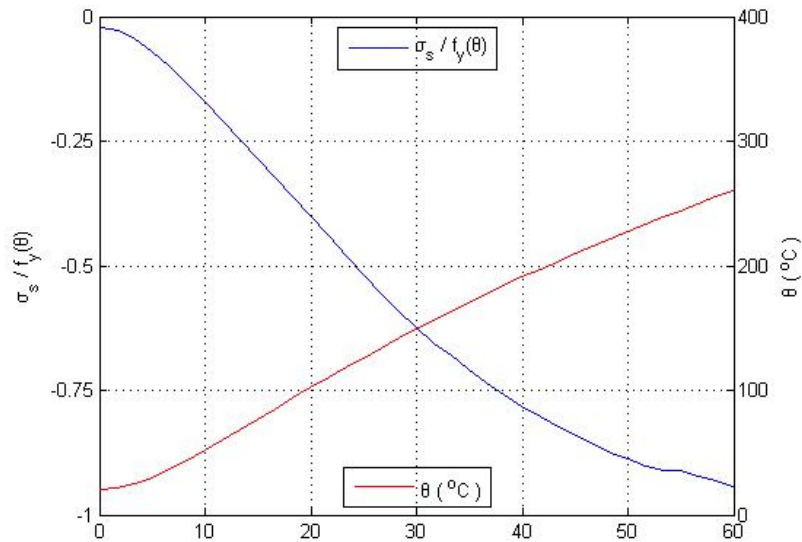


5.5.4 Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων των δοκών του πυροδιαμερίσματος

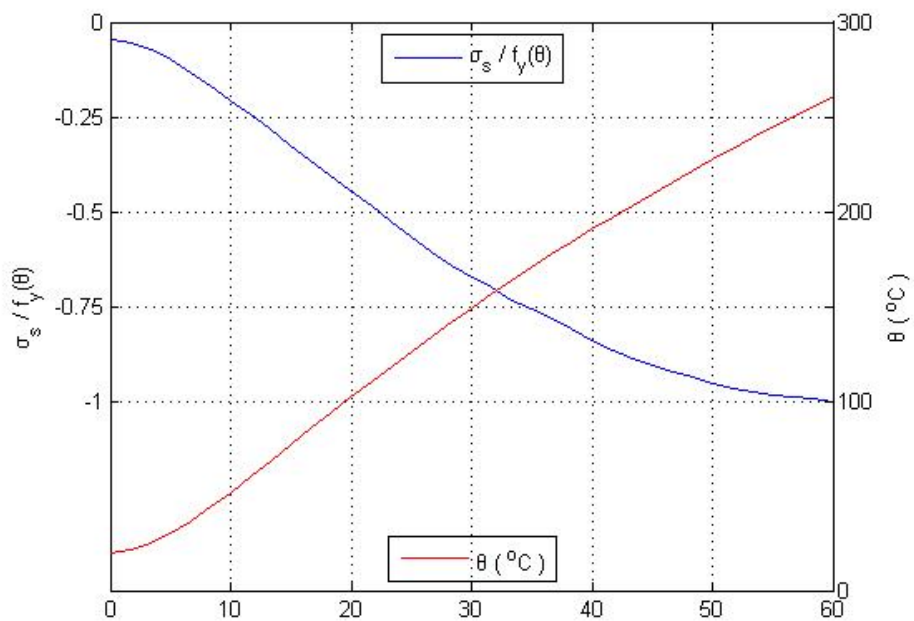
Για $c = 5$ cm:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)

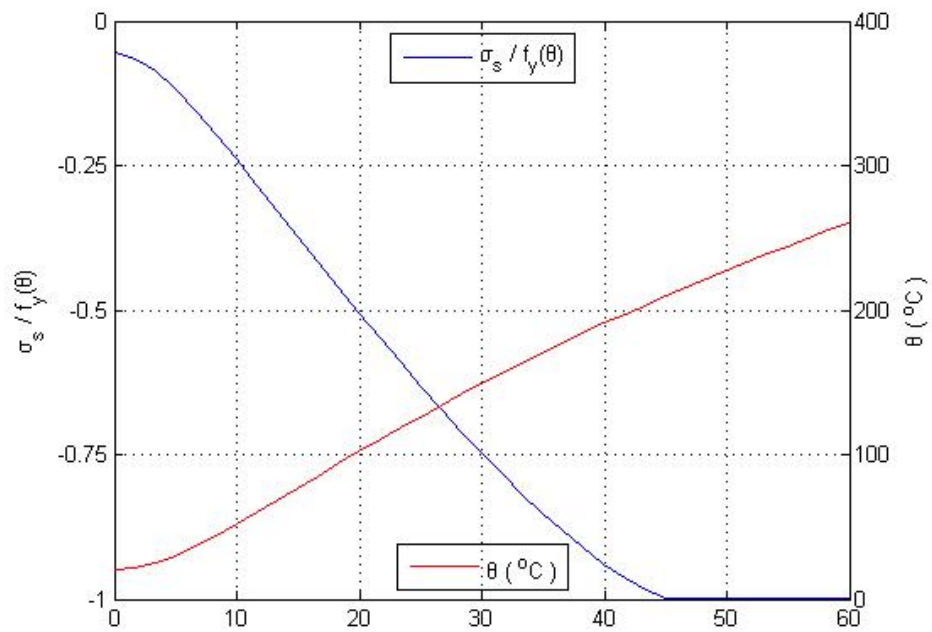


Δεξιά στήριξη: (2Φ14)

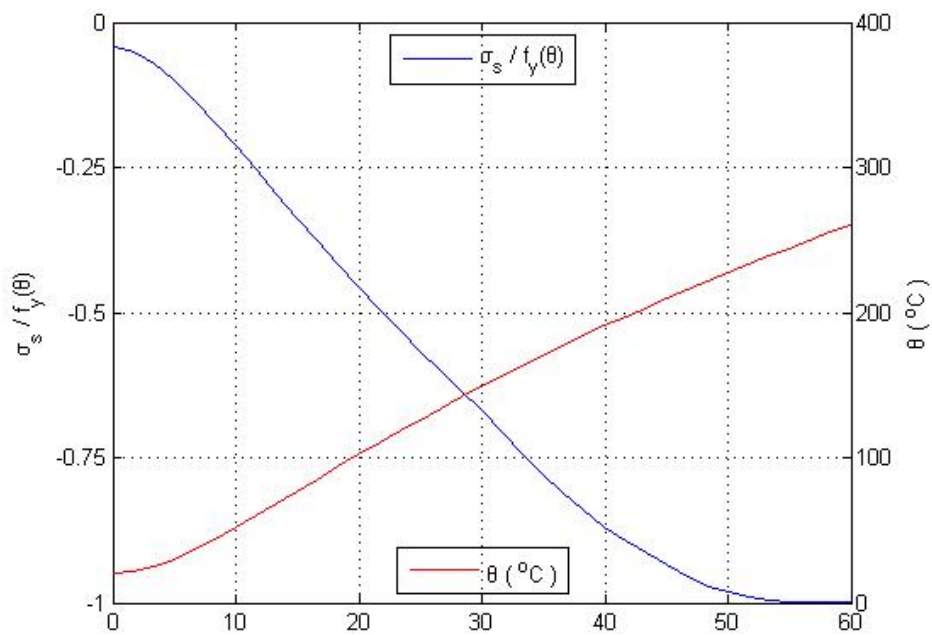


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10)



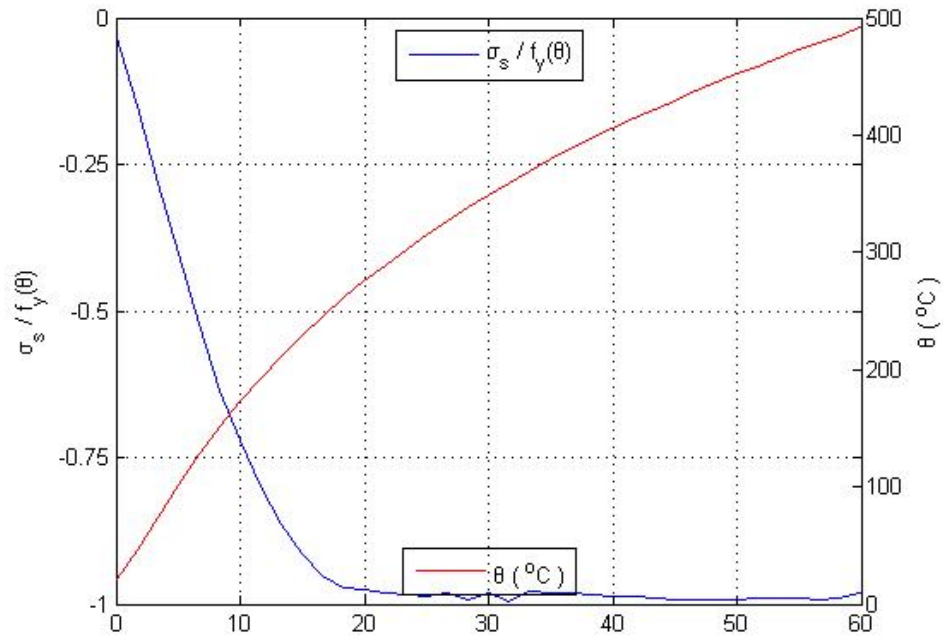
Δεξιά στήριξη: (2Φ10)



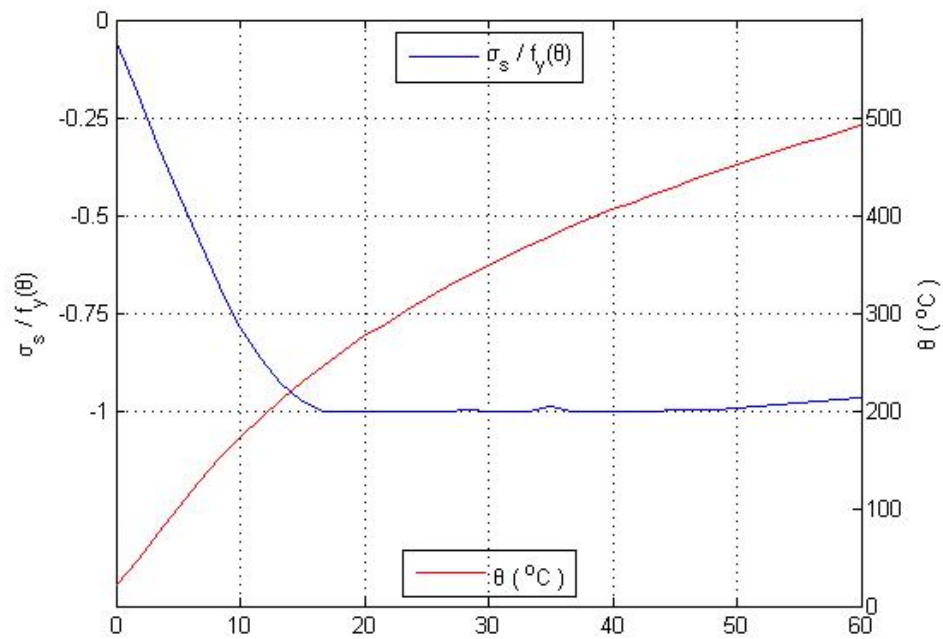
Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)

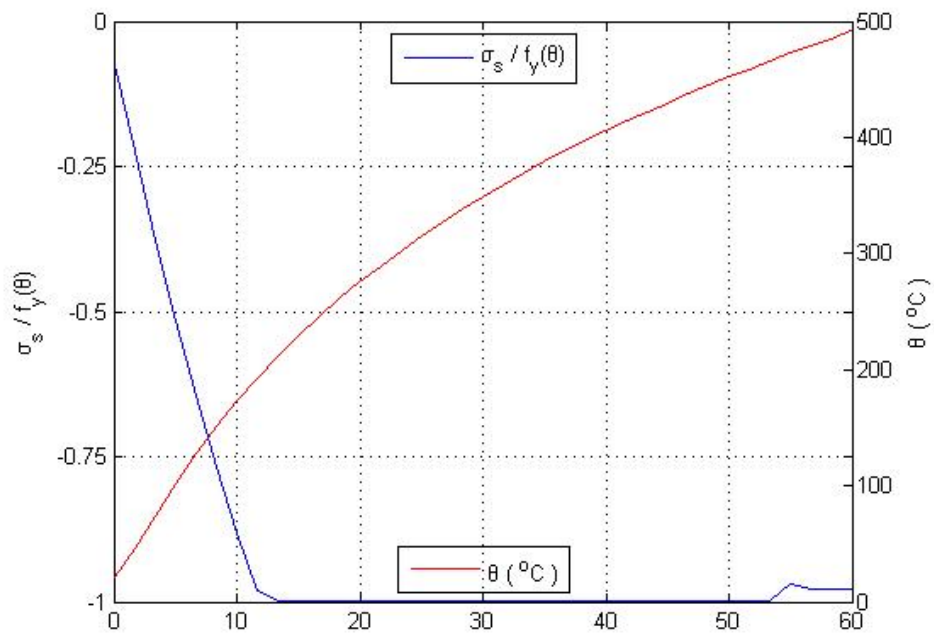


Δεξιά στήριξη: (2Φ14)

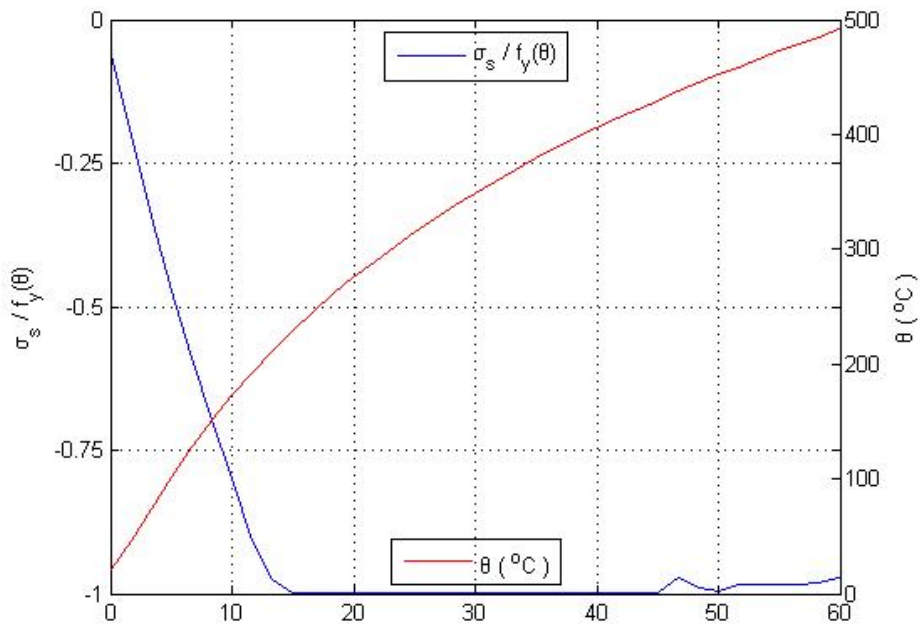


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10)



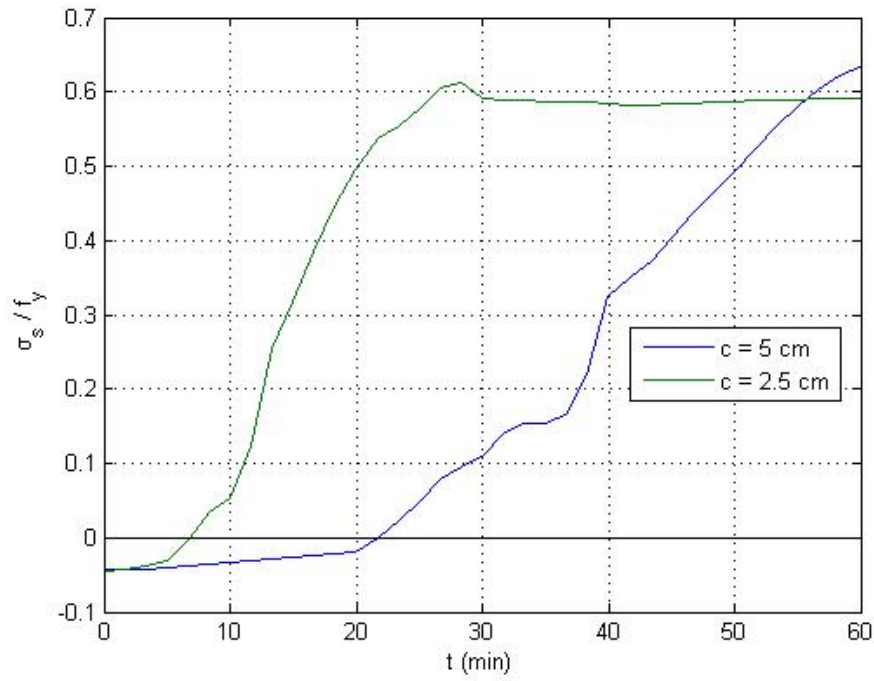
Δεξιά στήριξη: (2Φ10)



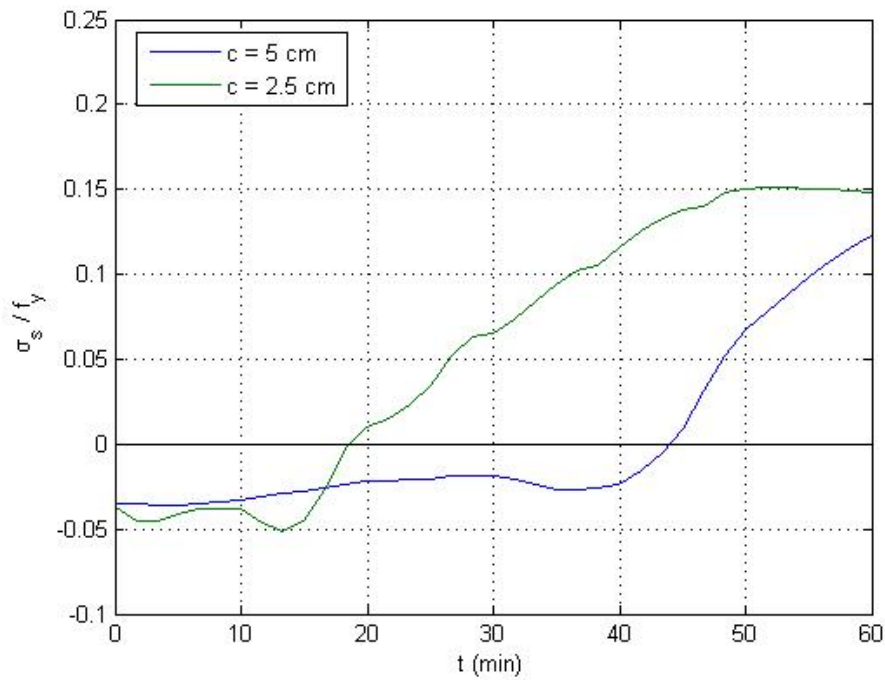
5.5.5 Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος

Άνω οπλισμός:

Πρώτο άνοιγμα:



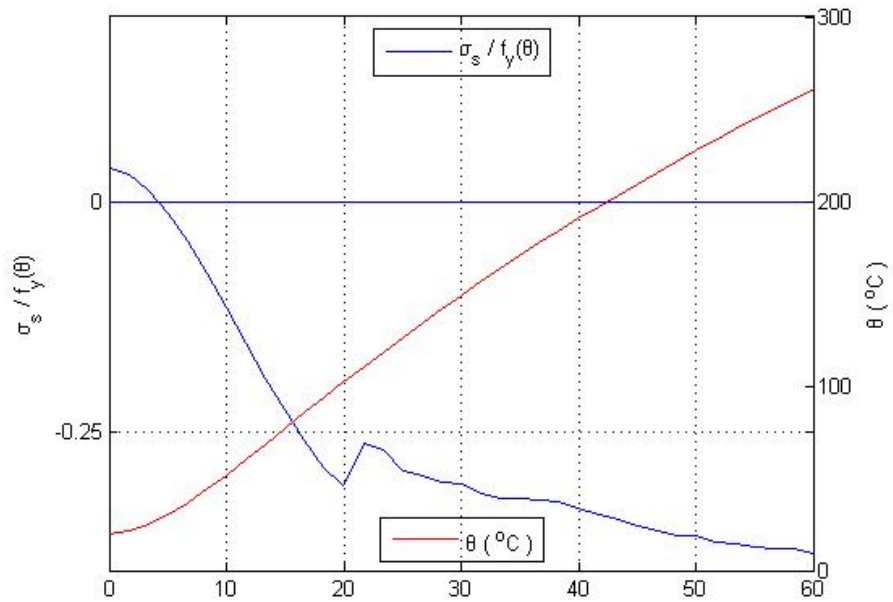
Δεύτερο άνοιγμα:



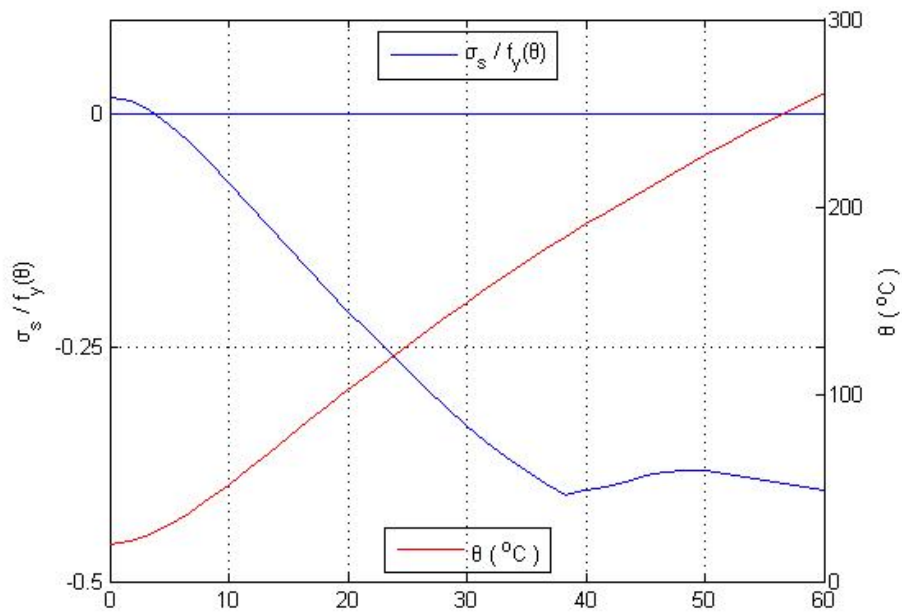
Κάτω σπλισμός:

Για $c = 5.0$ cm:

Πρώτο άνοιγμα: (4Φ14)

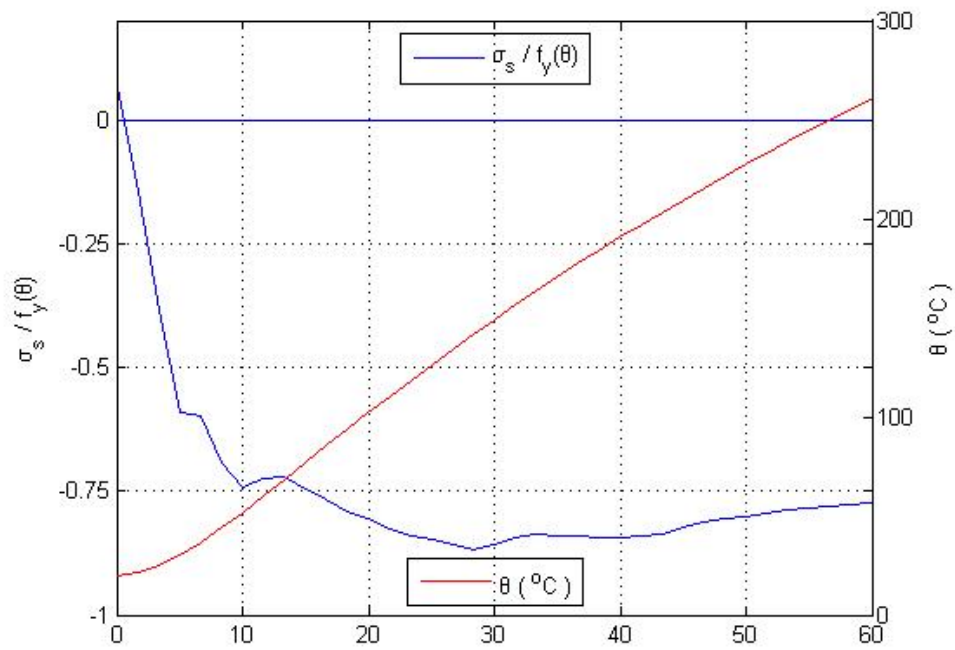


Δεύτερο άνοιγμα: (4Φ10)

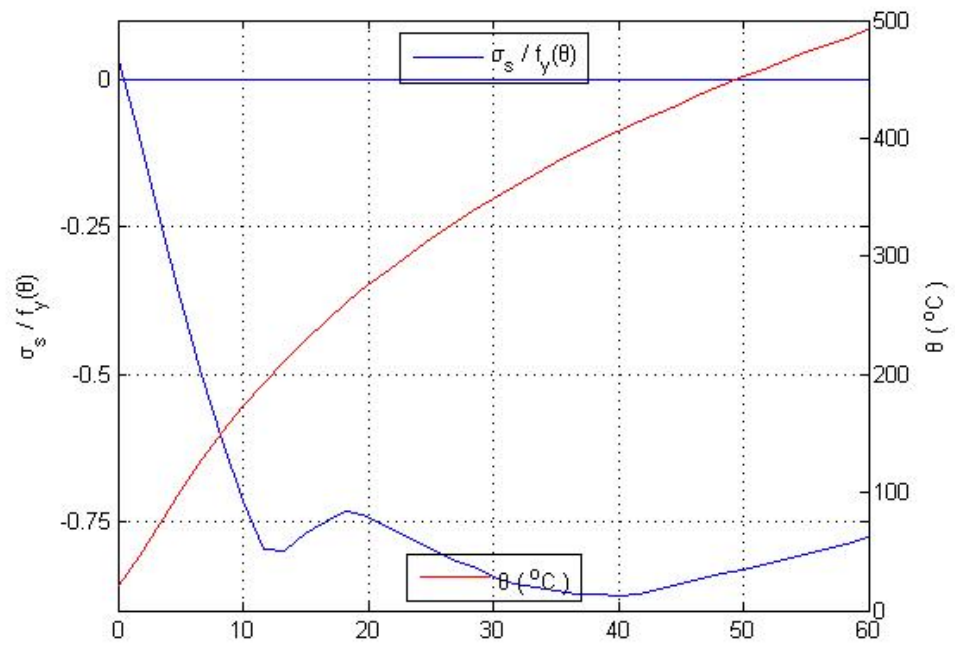


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα: (4Φ14)



Δεύτερο άνοιγμα: (4Φ10)

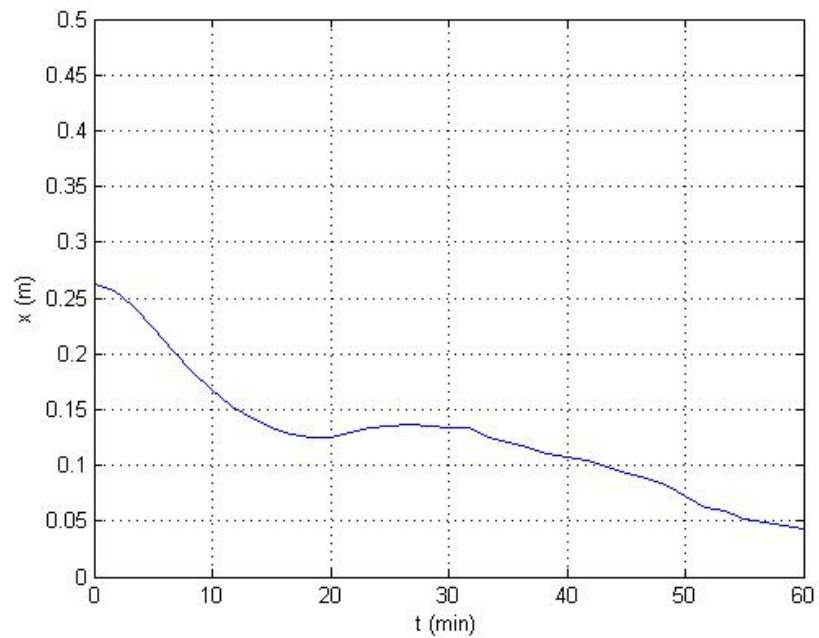
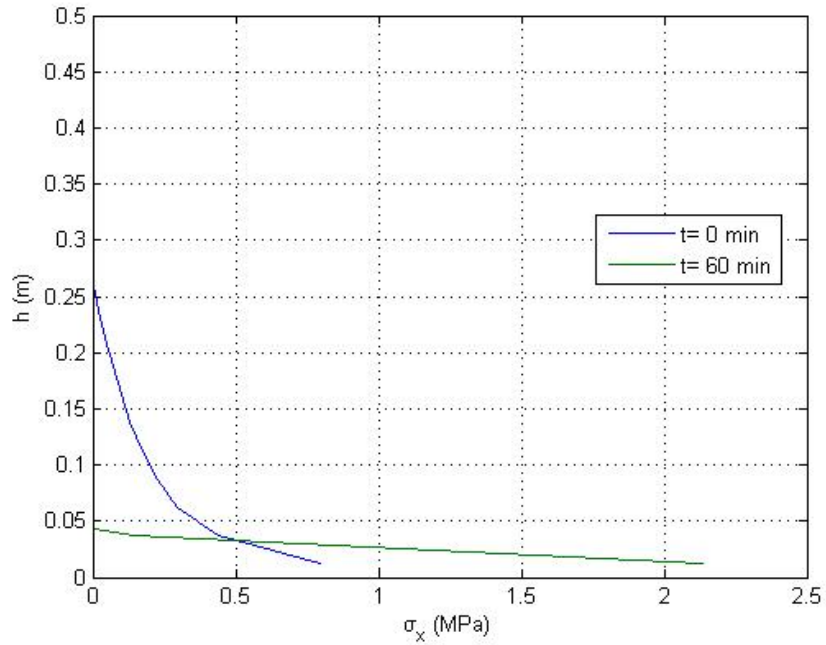


5.5.6 Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος

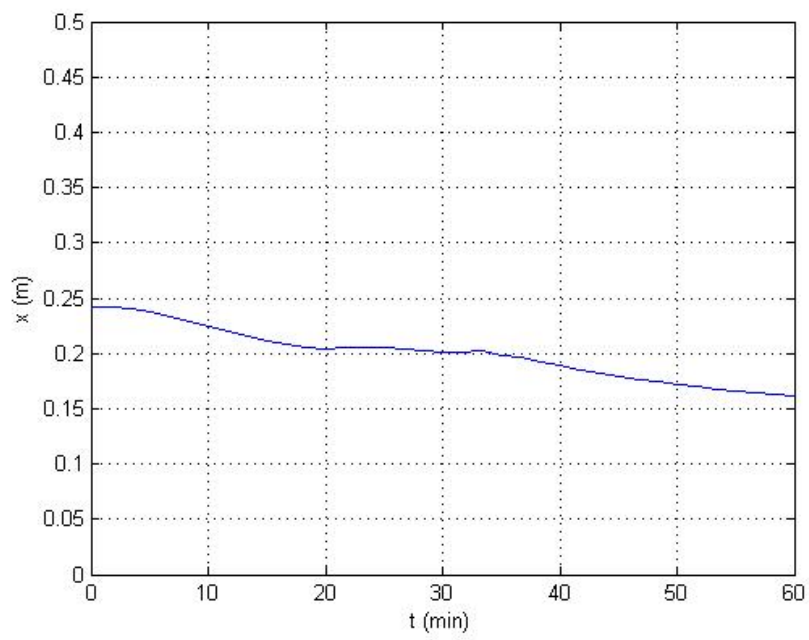
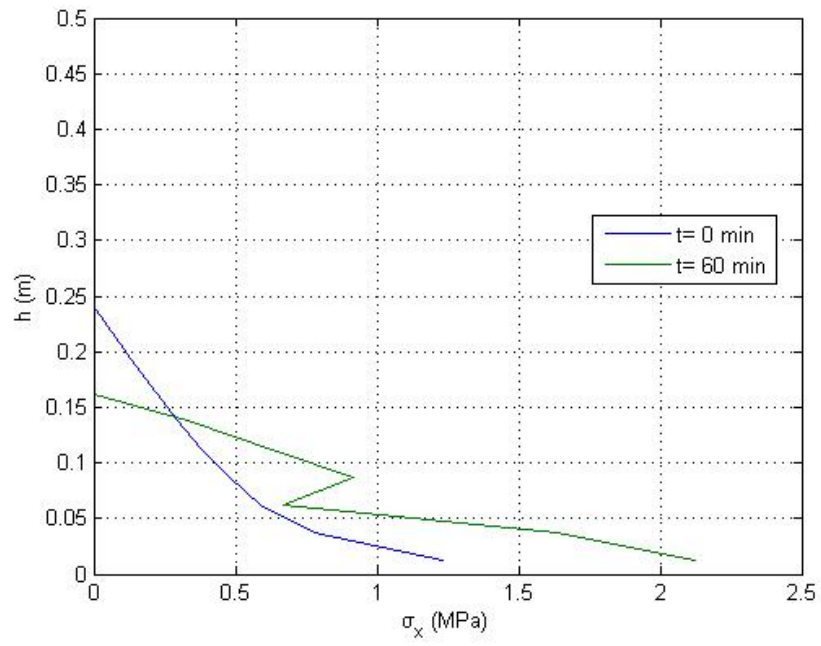
Για $c = 5$ cm:

Πρώτο άνοιγμα:

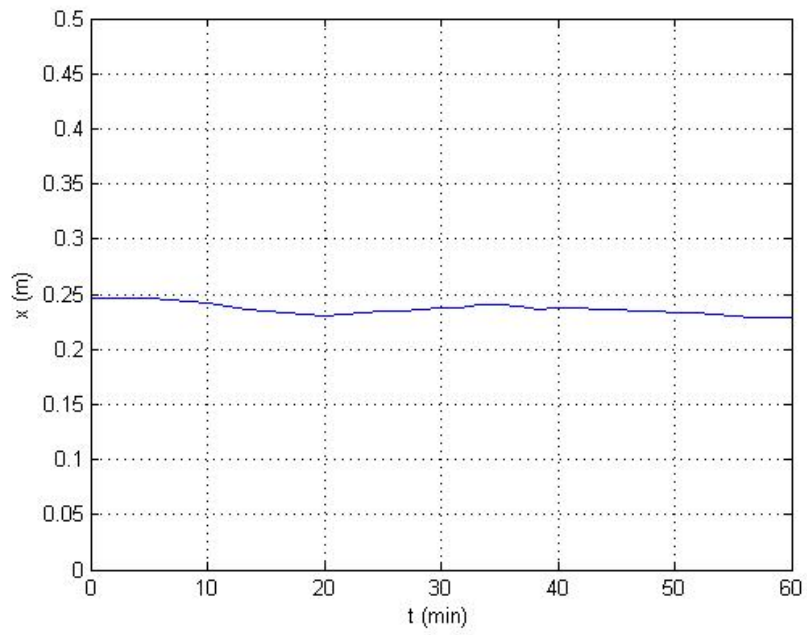
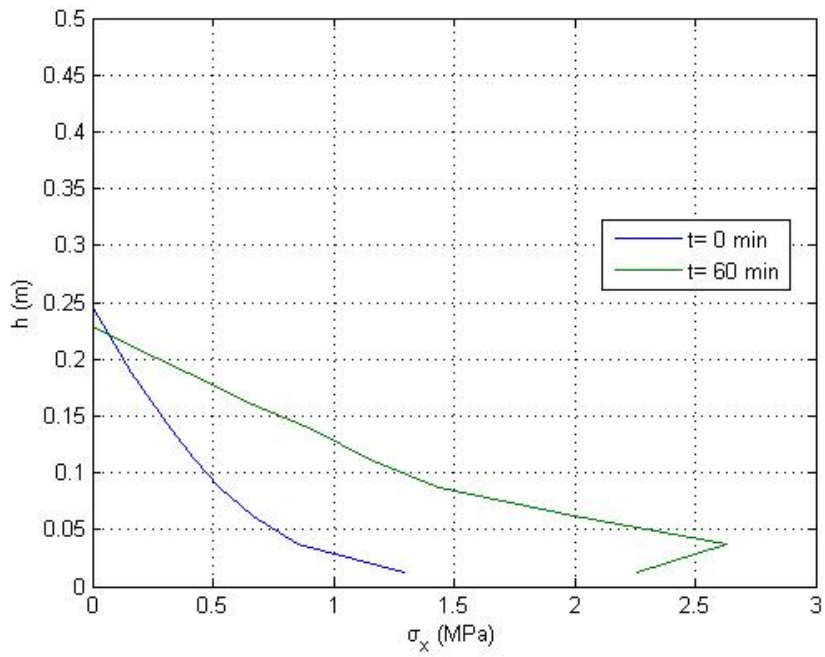
Αριστερή στήριξη:



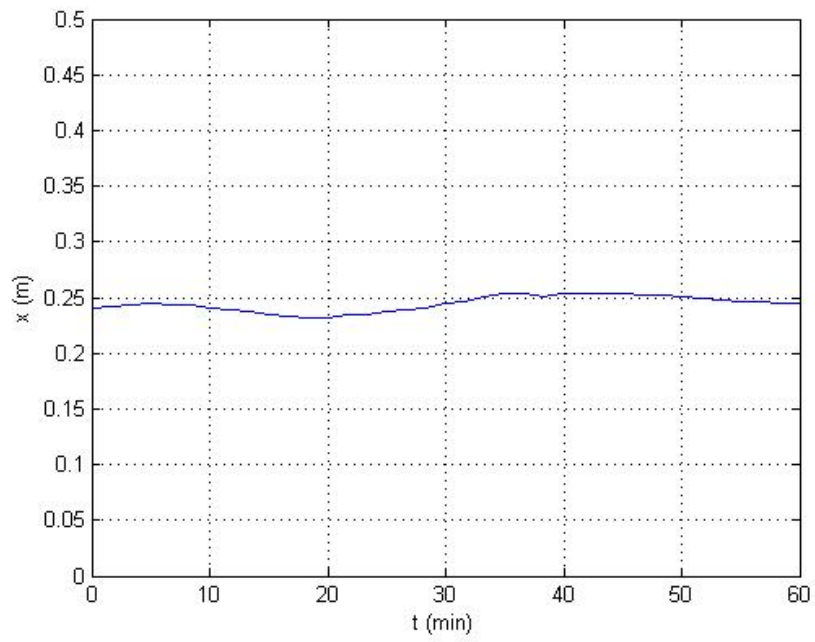
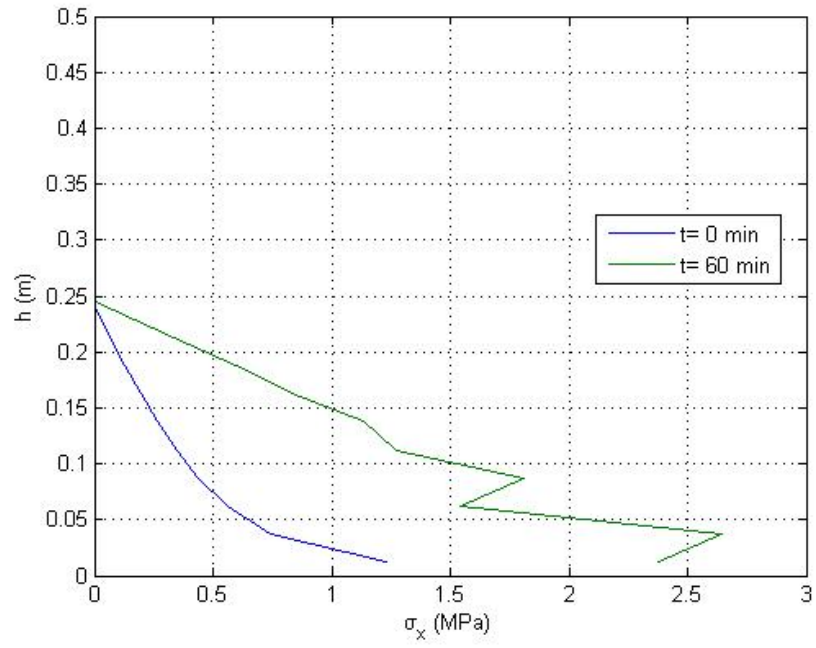
Δεξιά στήριξη:



Δεύτερο άνοιγμα:
Αριστερή στήριξη:



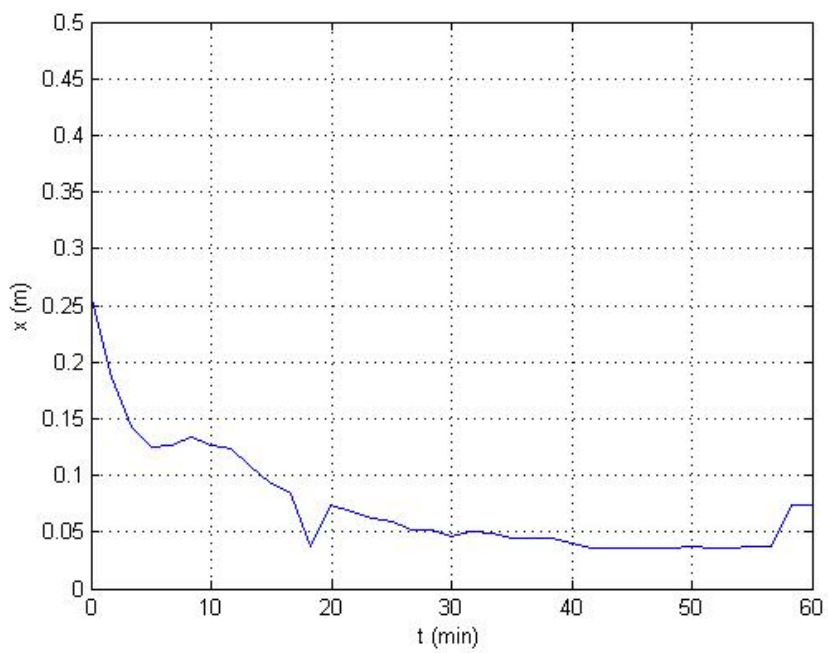
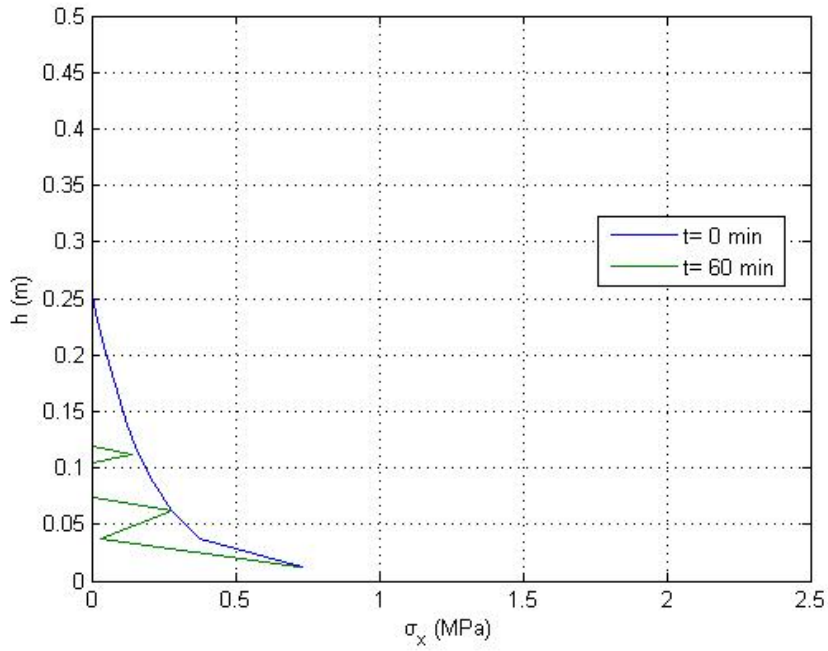
Δεξιά στήριξη:



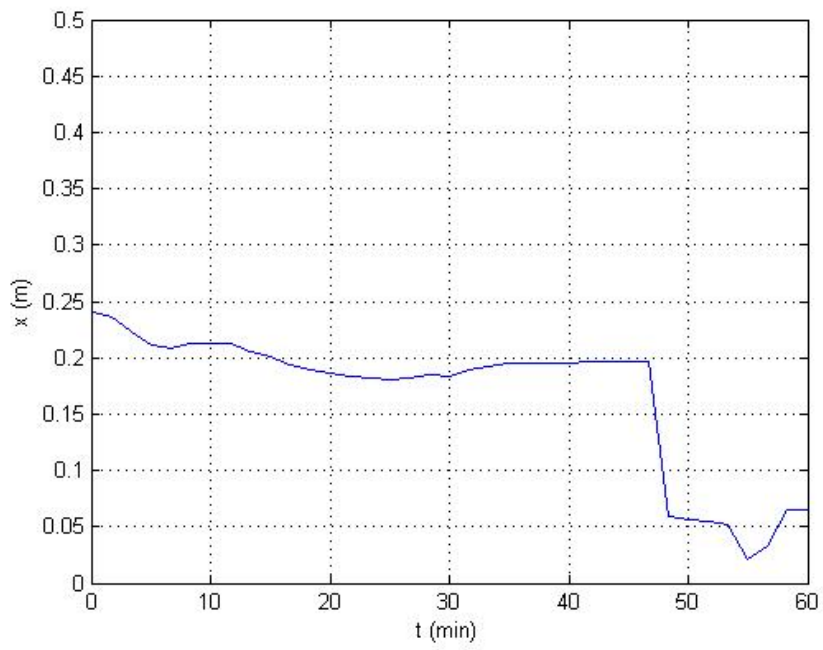
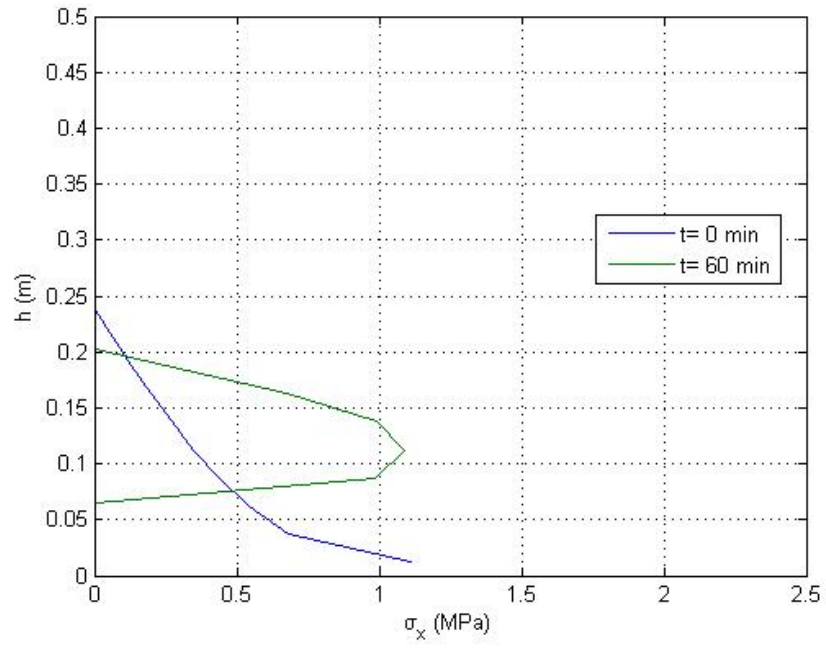
Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:

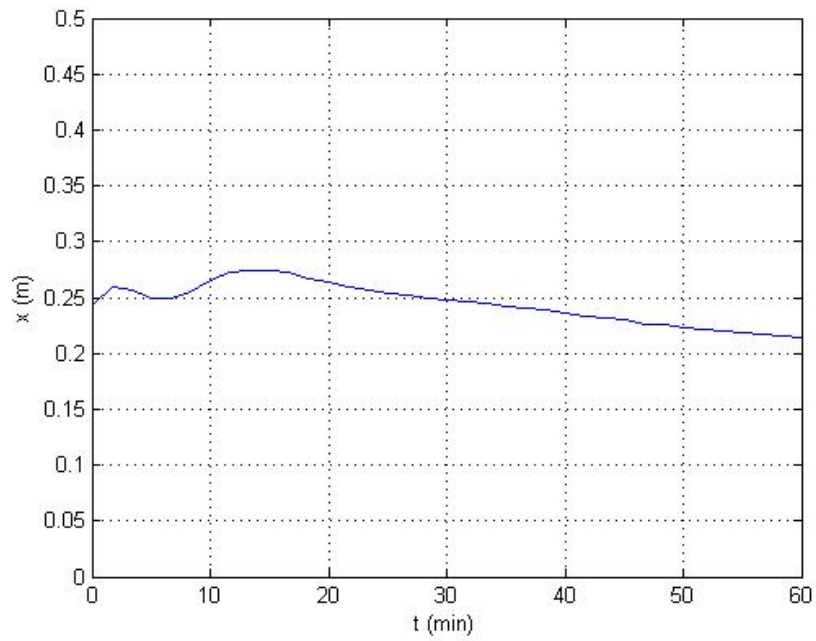
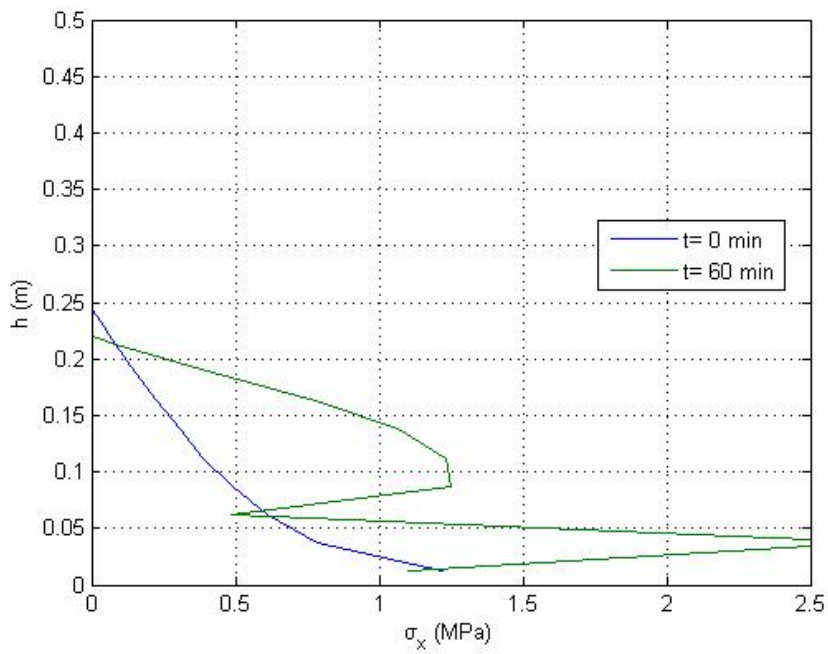


Δεξιά στήριξη:

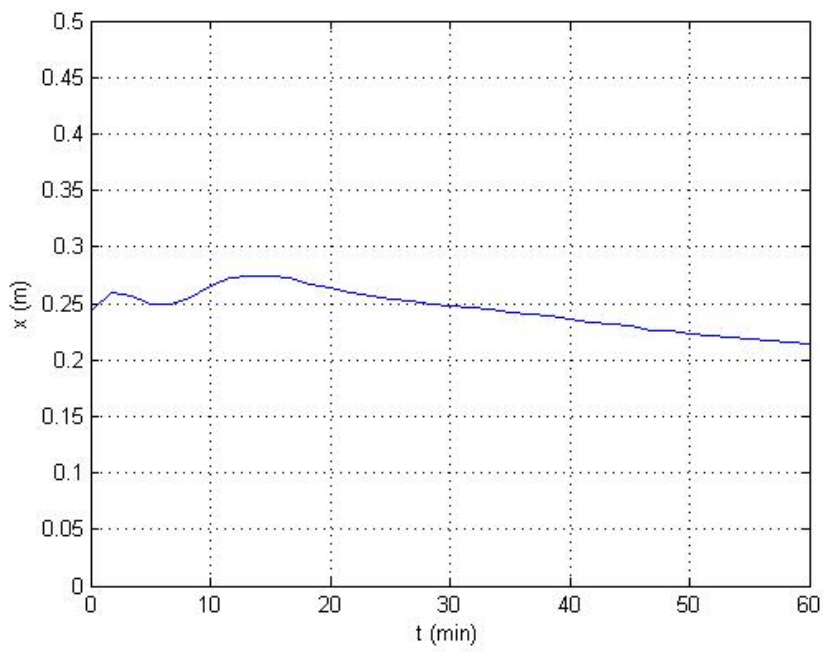
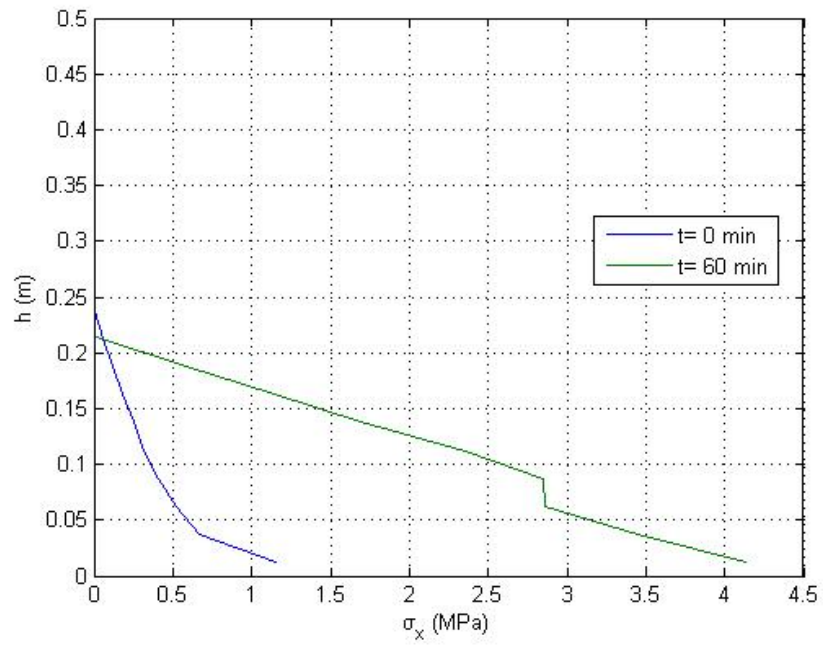


Δεύτερο άνοιγμα:

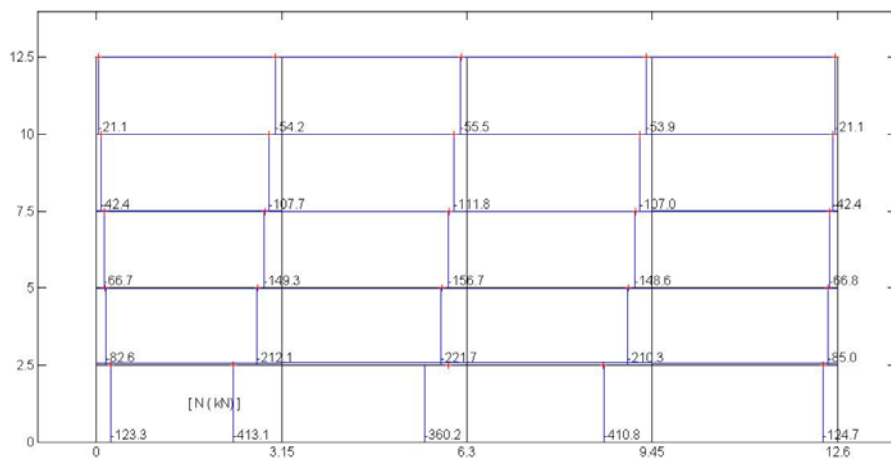
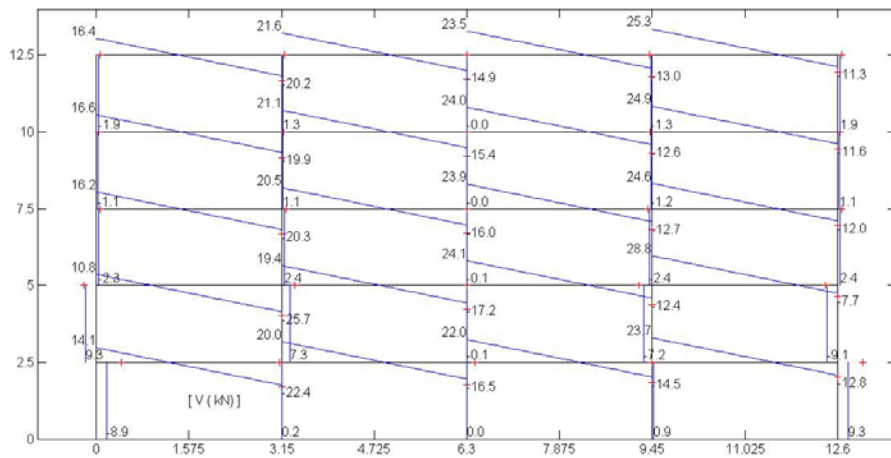
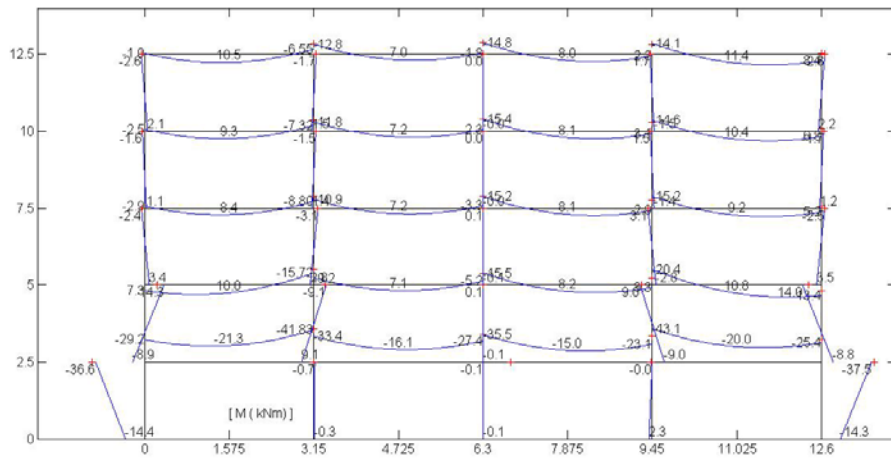
Αριστερή στήριξη:



Δεξιά στήριξη

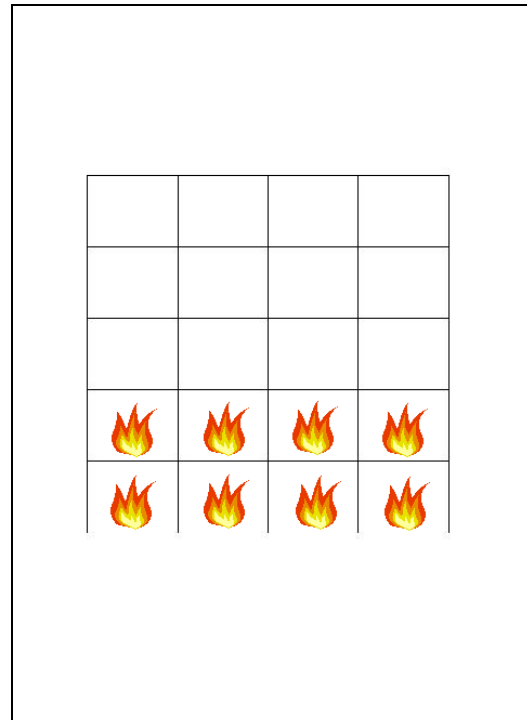


5.5.7 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$

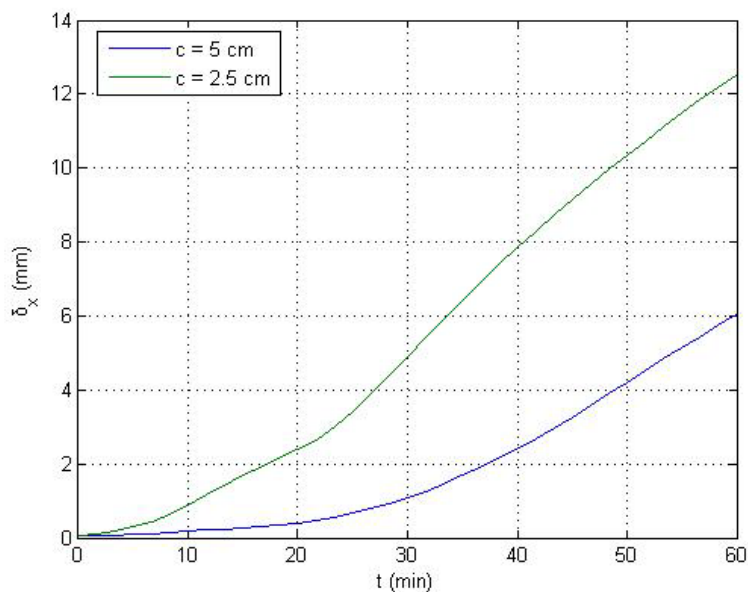
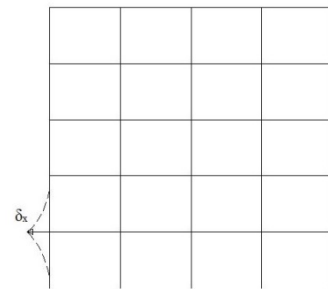


5.6 4^ο Σενάριο Πυρκαγιάς

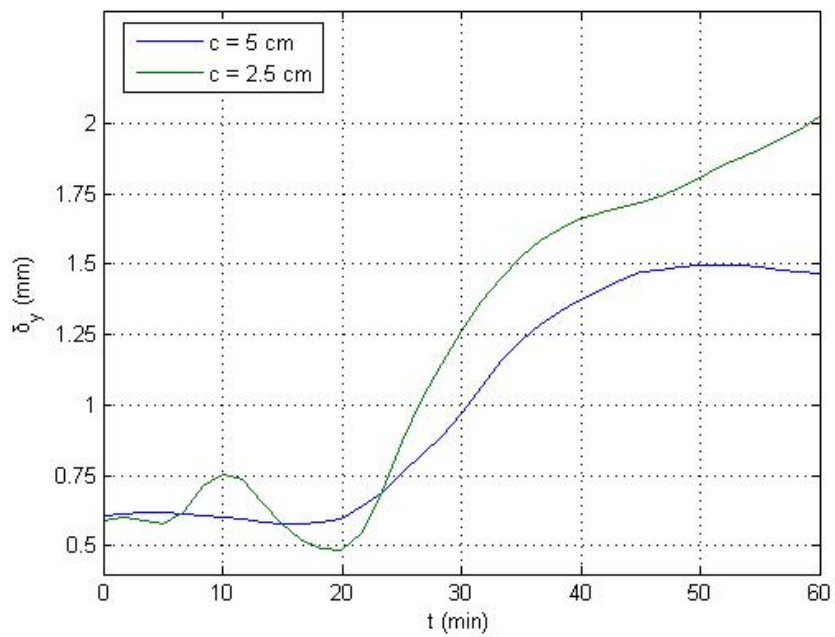
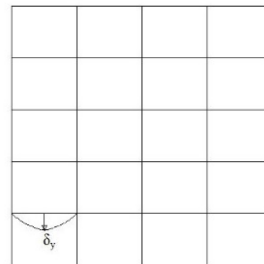
Στο τέταρτο σενάριο πυρκαγιάς υποθέτουμε ότι η πυρκαγιά αναπτύσσεται ταυτόχρονα σε όλα τα φατνώματα του πρώτου ορόφου και έπειτα από 20 min εξαπλώνεται και στα φατνώματα του δεύτερου ορόφου. Η διάρκεια της πυρκαγιάς στον πρώτο όροφο είναι 60 min (στον δεύτερο 40 min) και η σχέση θερμοκρασίας-χρόνου δίνεται από την σχέση της πρότυπης πυρκαγιάς. Δεν εξαπλώνεται σε κάποιο άλλο διαμέρισμα, επομένως οι υπόλοιπες παρειές εκτός των δύο πρώτων ορόφων, έχουν σταθερή θερμοκρασία, ίση με 20 °C.



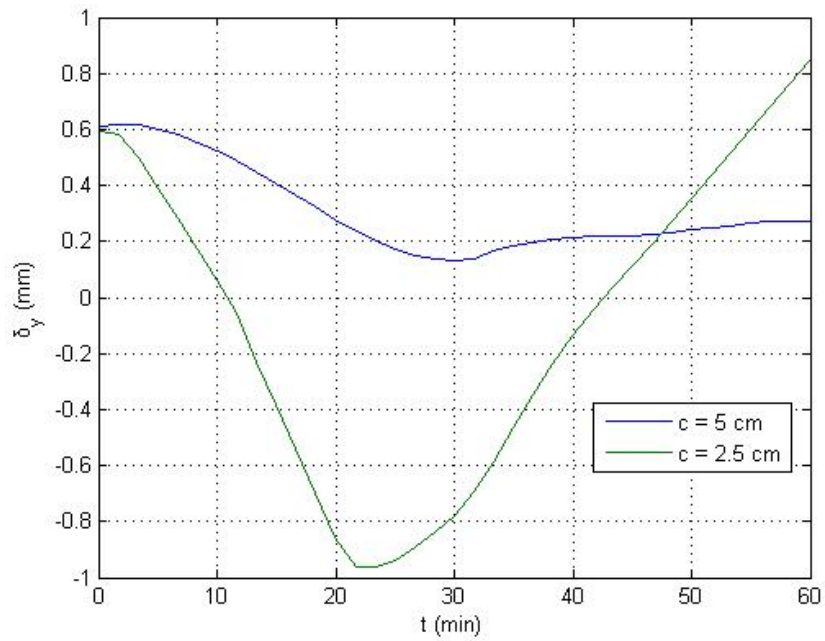
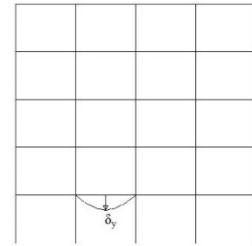
Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



Κατακόρυφο βέλος του πρώτου από αριστερά
φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του
χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



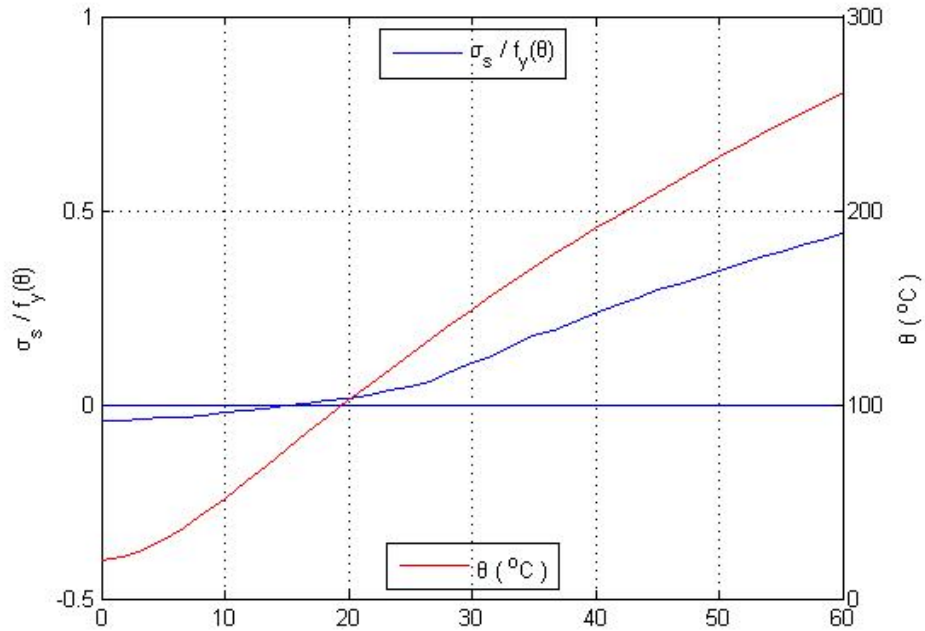
Κατακόρυφο βέλος του δεύτερου από αριστερά φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά



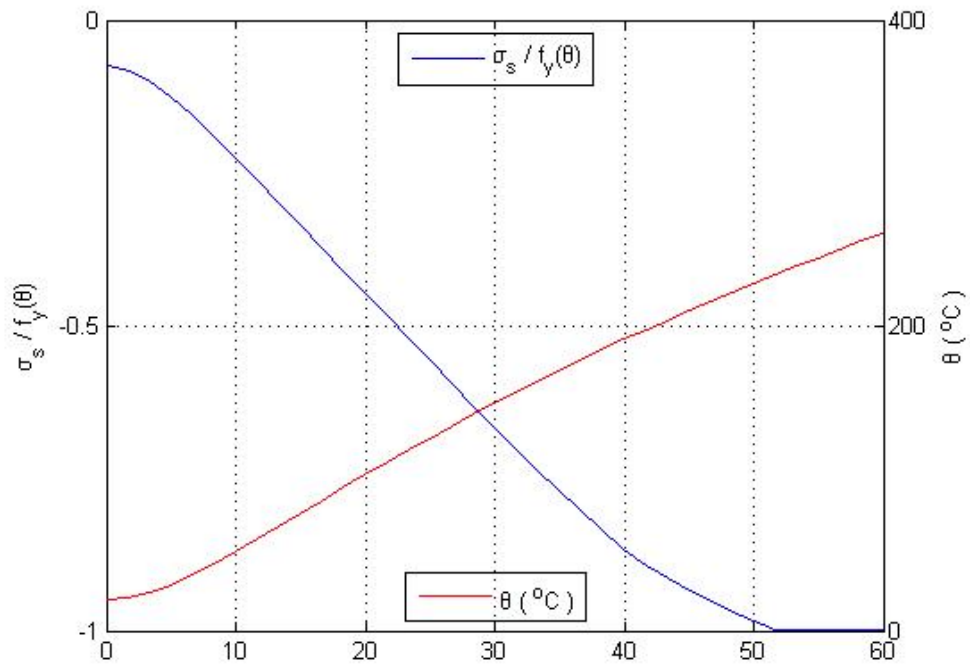
5.6.1 Διαγράμματα της τάσης του οπλισμού στην κορυφή του πρώτου υποστρώματος

Για $c = 5$ cm:

Αριστερή στρώση οπλισμού

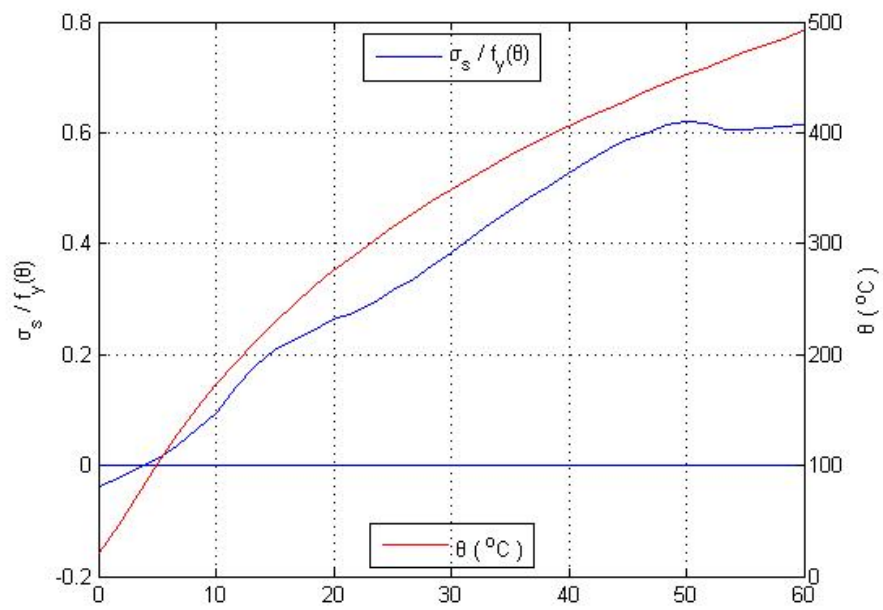


Δεξιά στρώση οπλισμού

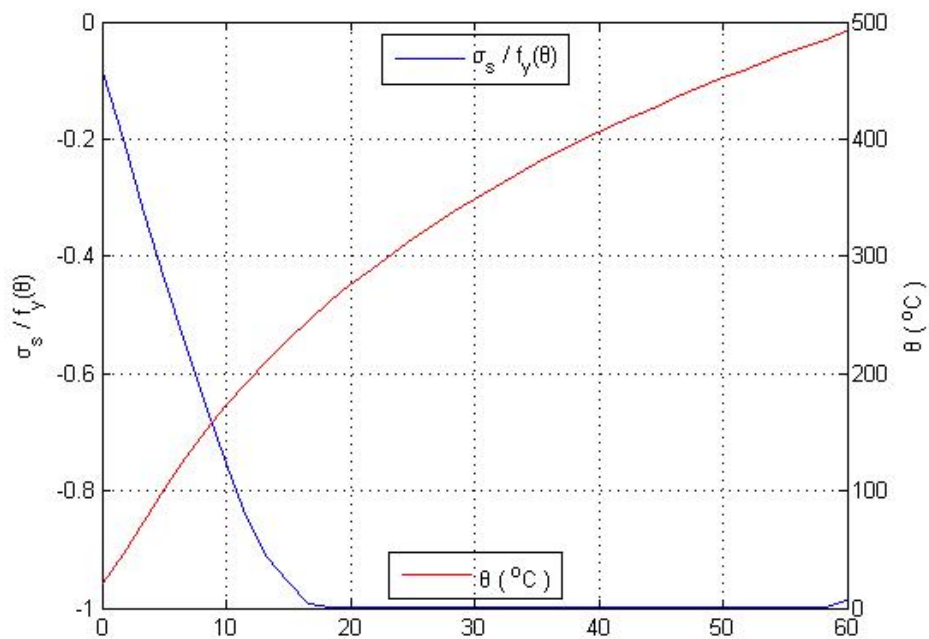


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Αριστερή στρώση οπλισμού

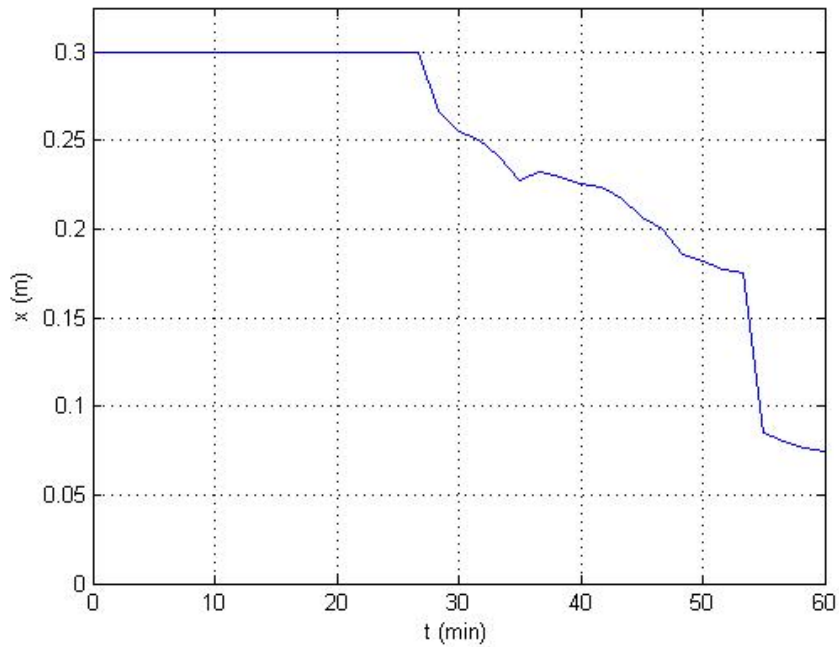
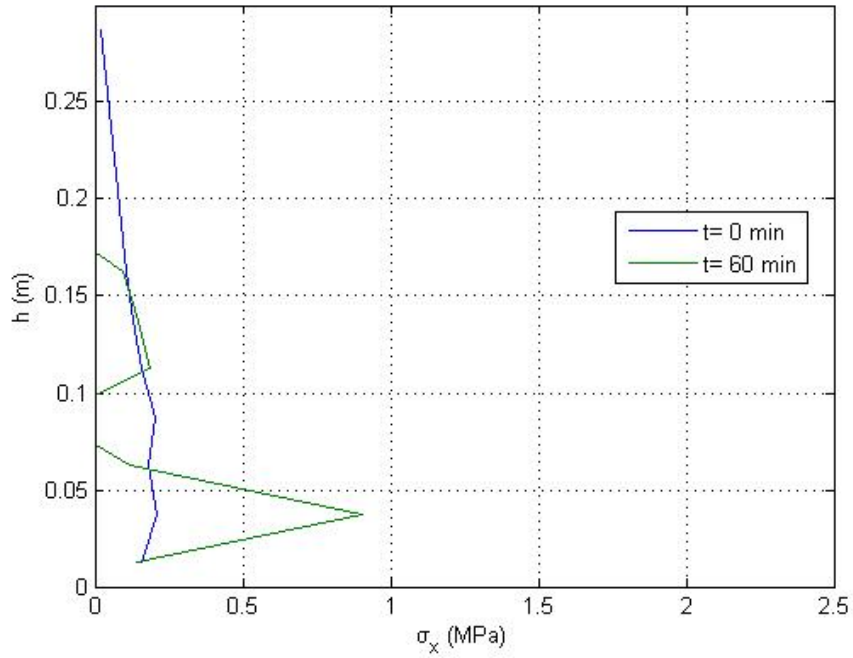


Δεξιά στρώση οπλισμού

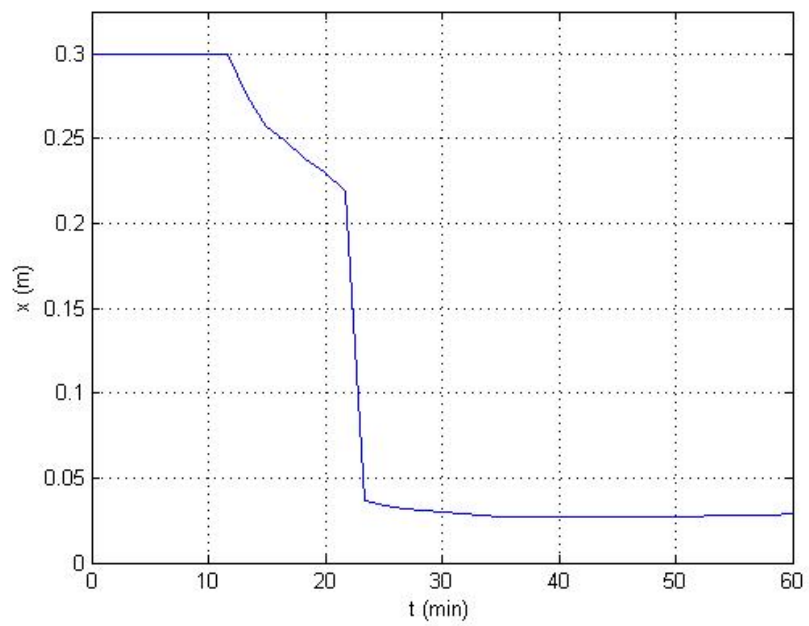
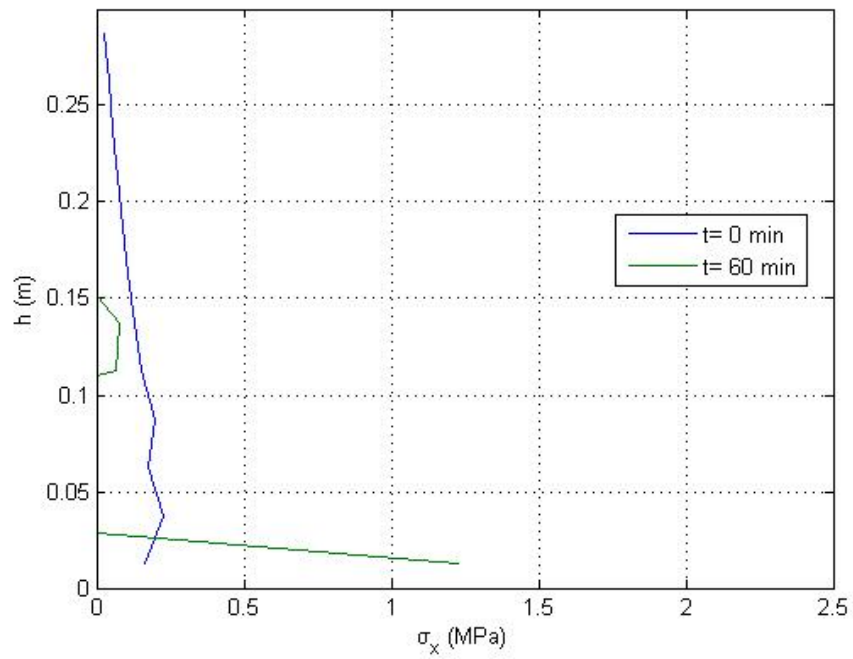


5.6.2 Κατανομή θλιπτικών τάσεων στην διατομή της κορυφής του πρώτου υποστρώματος

Για $c = 5$ cm



$\Gamma\alpha c = 2.5 \text{ cm}$

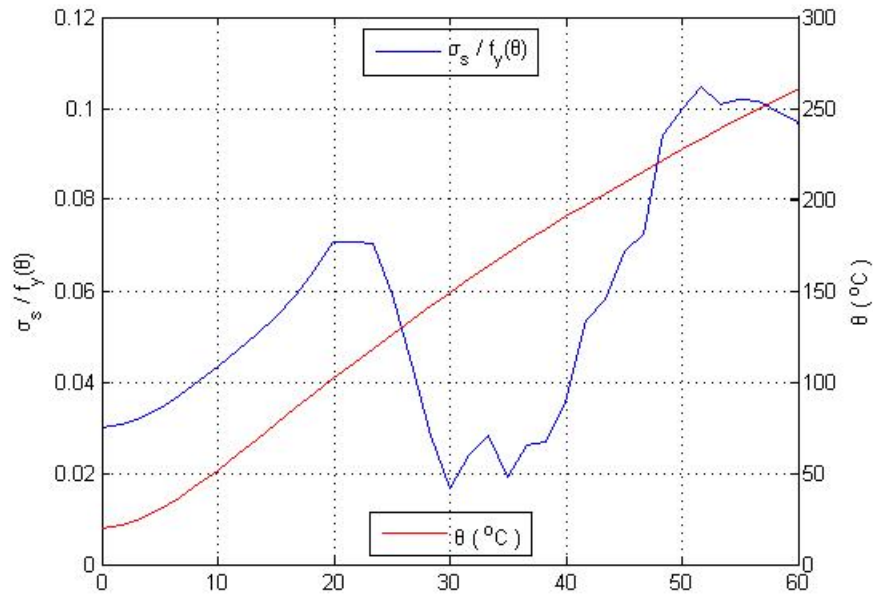


5.6.3 Διαγράμματα της τάσης του άνω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

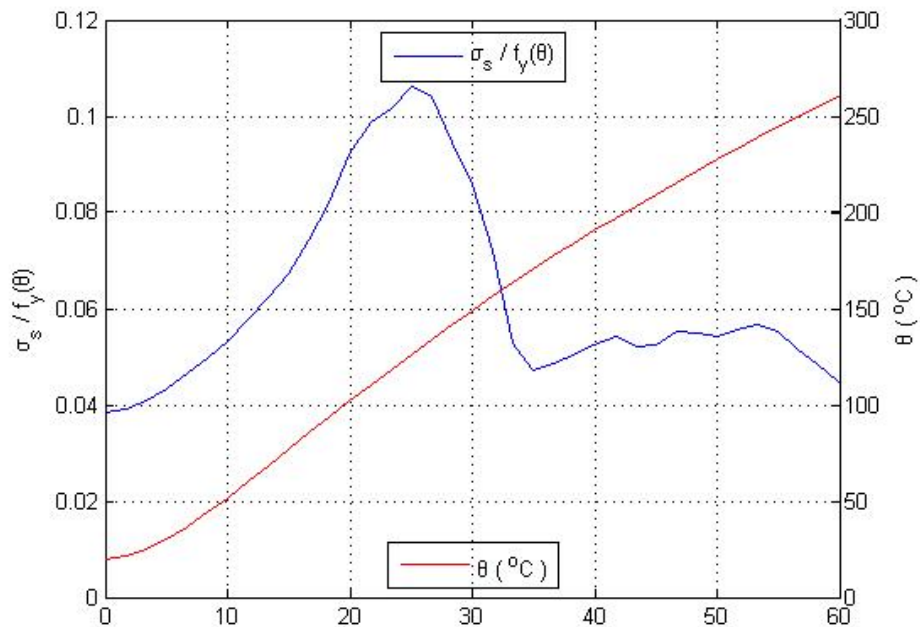
Για $c = 5$ cm:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14+2Φ10)

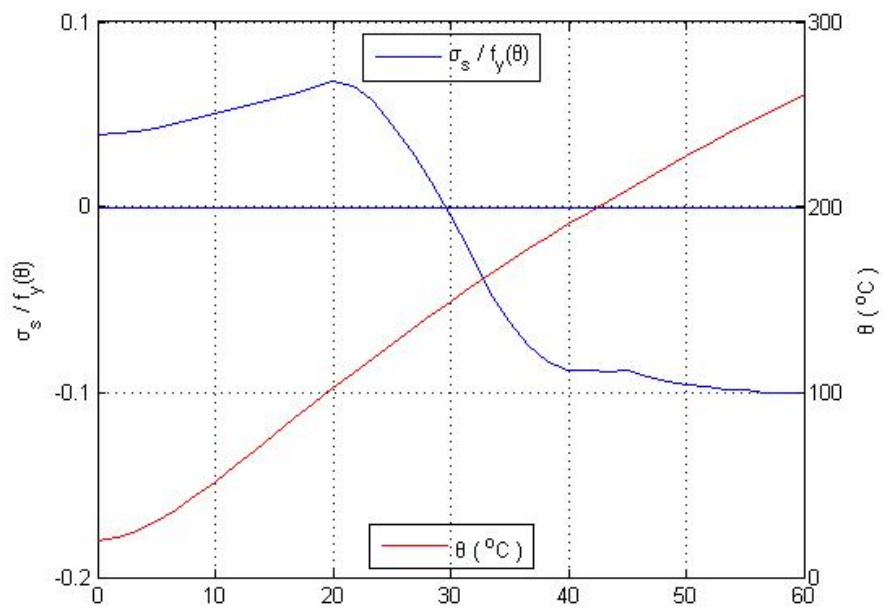


Δεξιά στήριξη: (4Φ10 + 2Φ14)

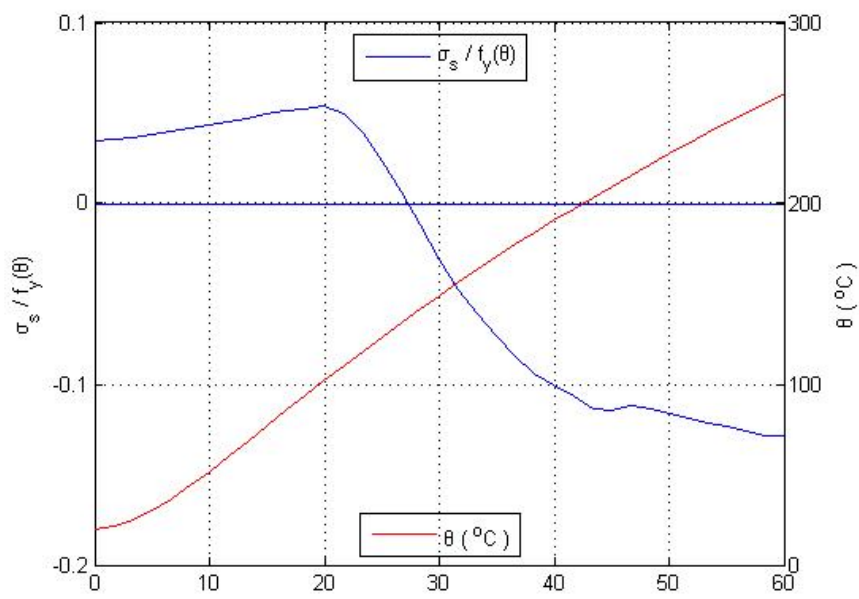


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (4Φ10 + 2Φ14)



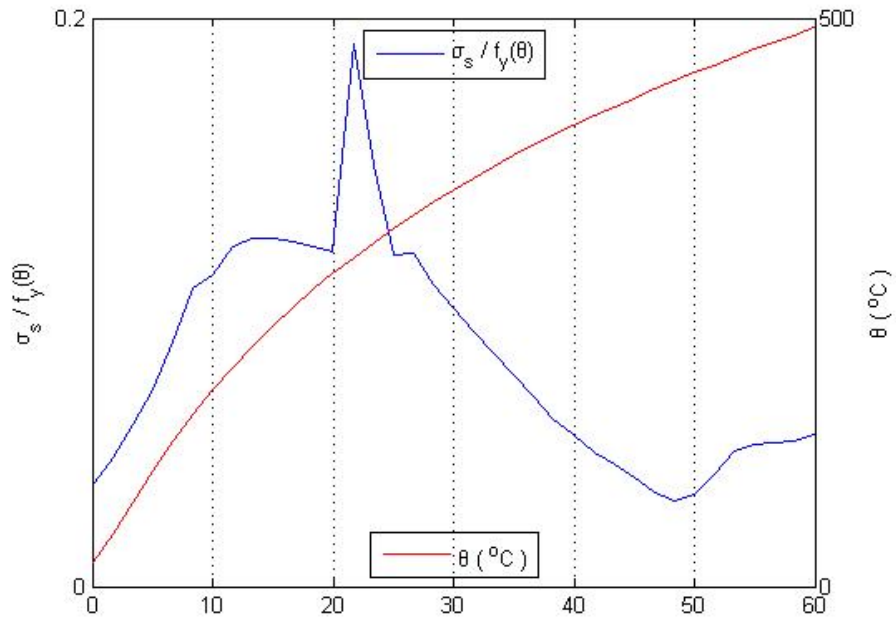
Δεξιά στήριξη: (6Φ10)



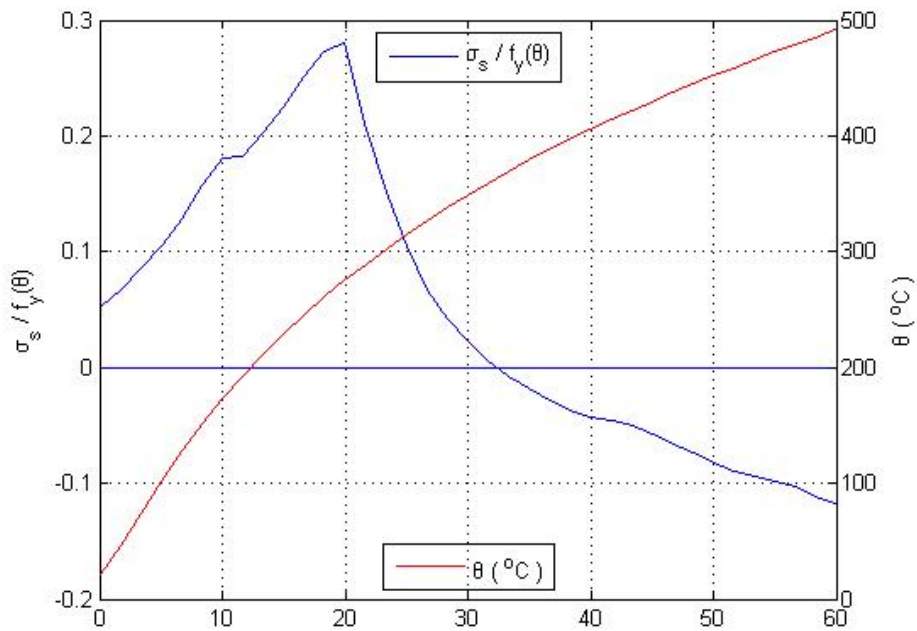
Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10 + 2Φ14)

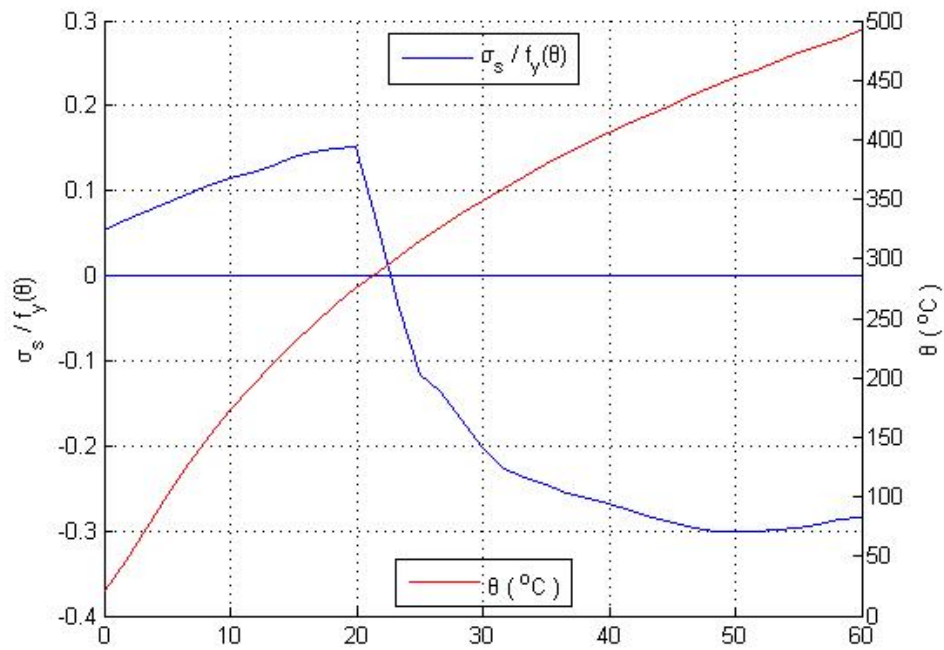


Δεξιά στήριξη: (4Φ10 + 2Φ14)

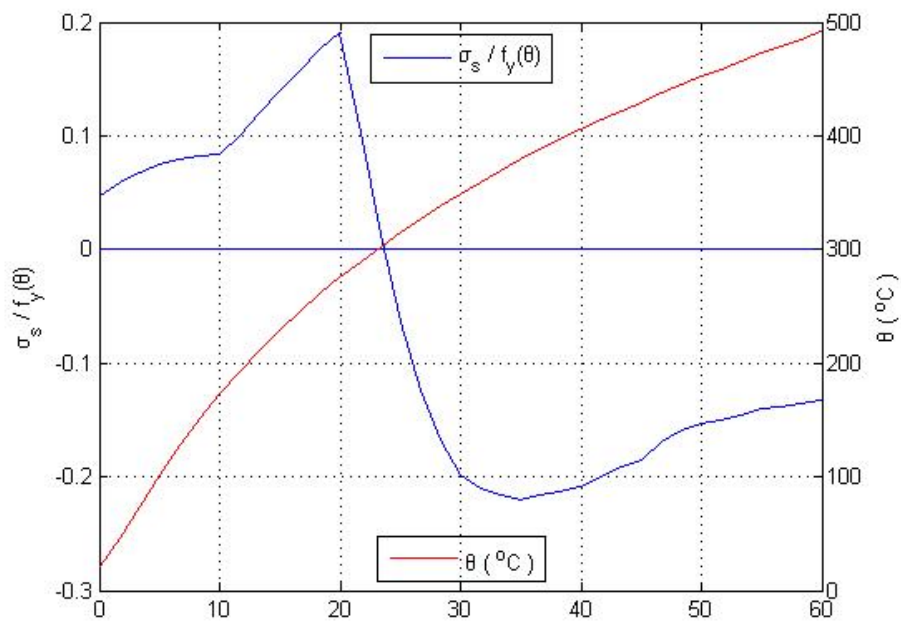


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (4Φ10 + 2Φ14)



Δεξιά στήριξη: (6Φ10)

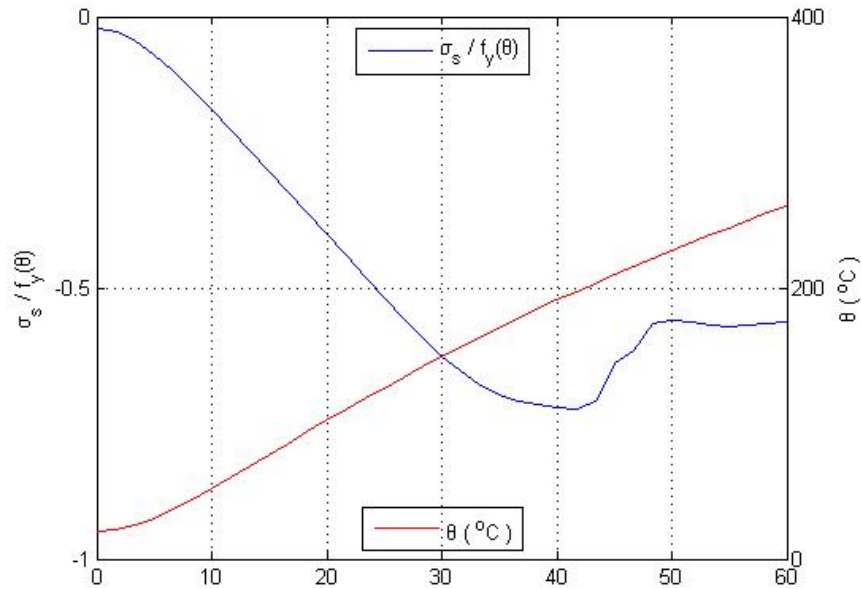


5.6.4 Διαγράμματα της τάσης του κάτω χάλυβα των διατομών των στηρίξεων της δοκού του πυροδιαμερίσματος

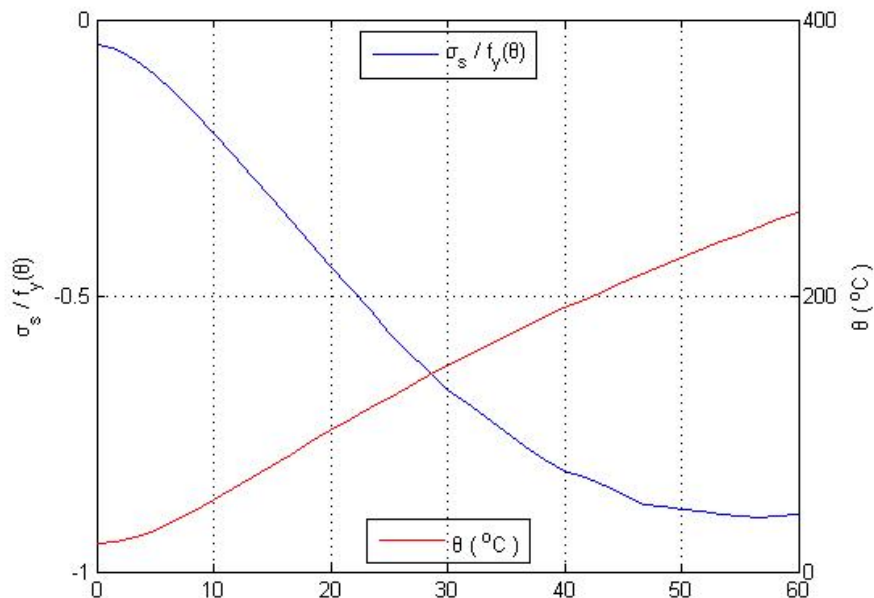
Για $c = 5$ cm:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)

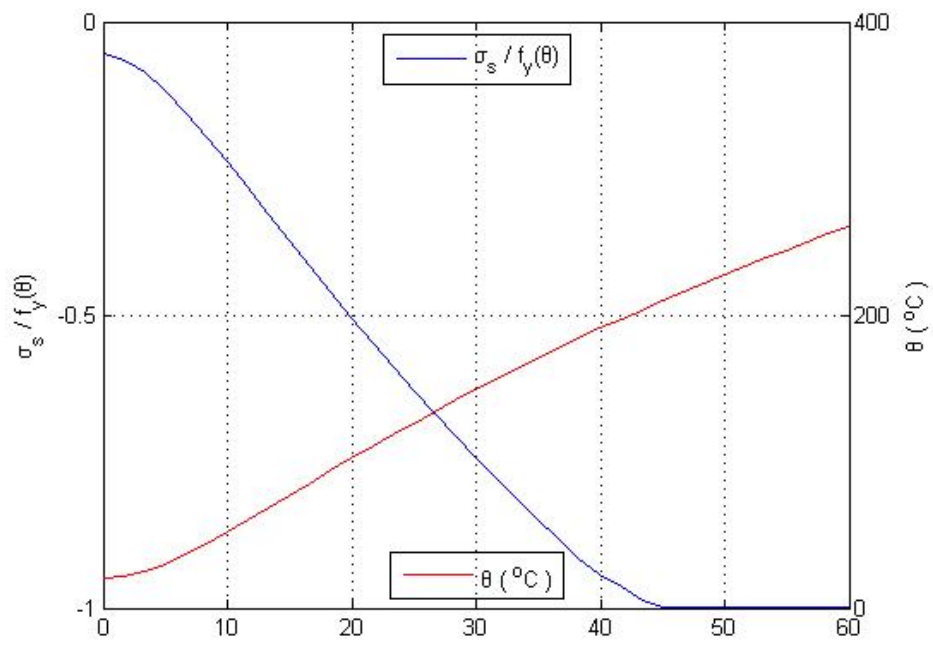


Δεξιά στήριξη: (2Φ14)

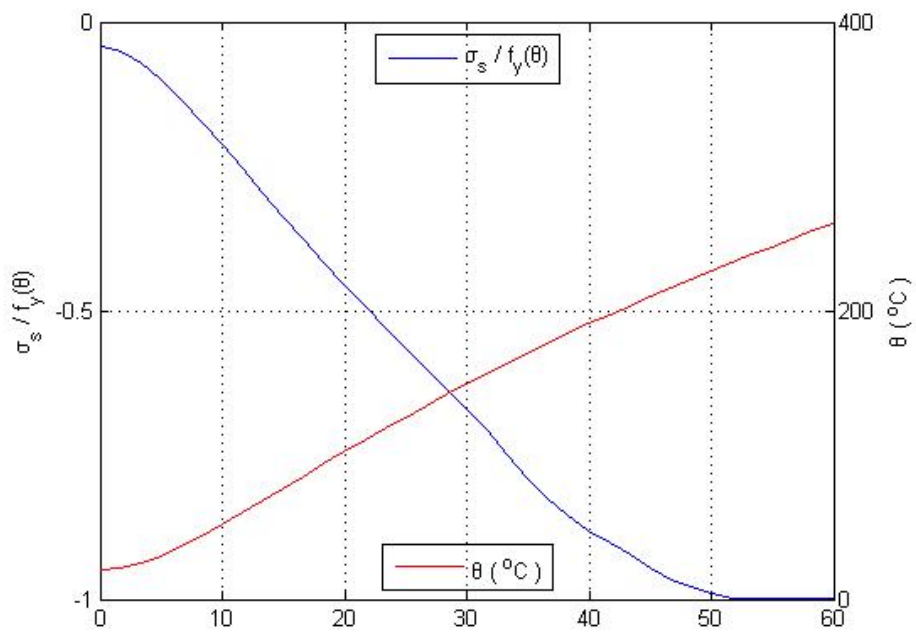


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10)



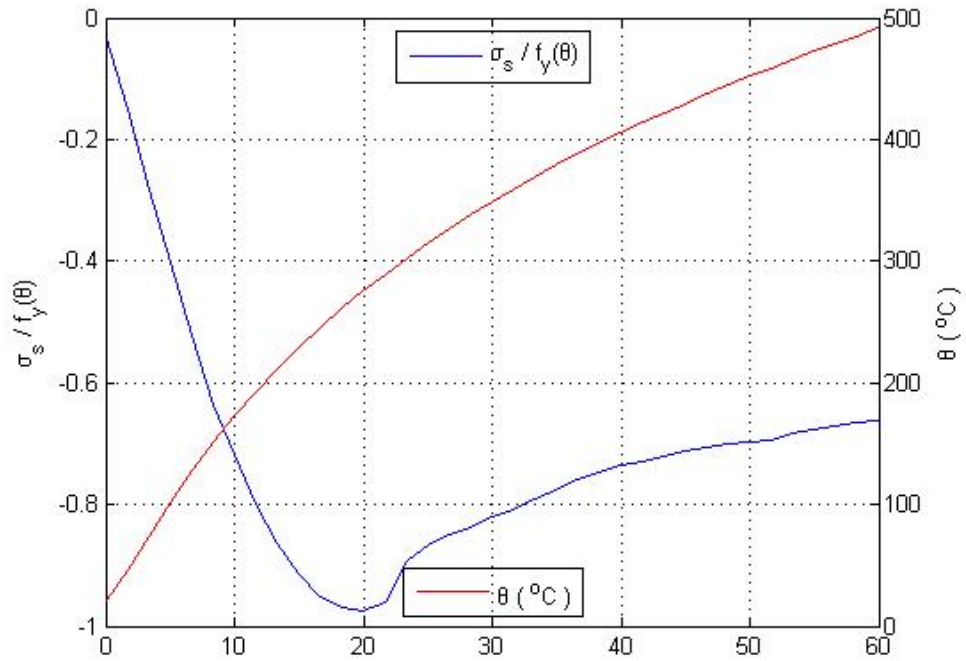
Δεξιά στήριξη: (2Φ10)



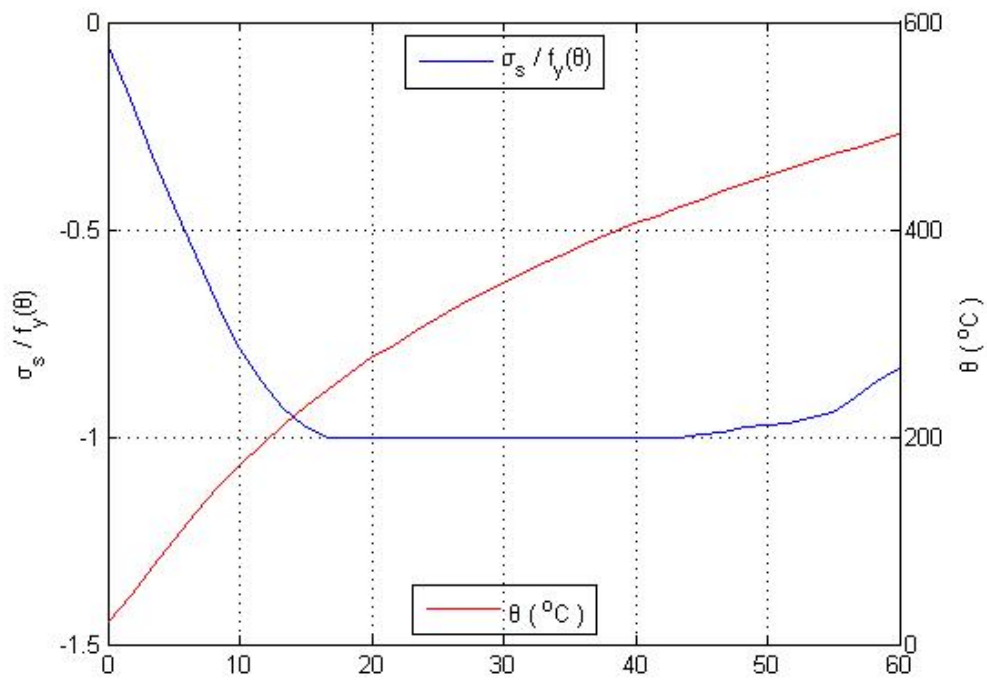
Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ14)

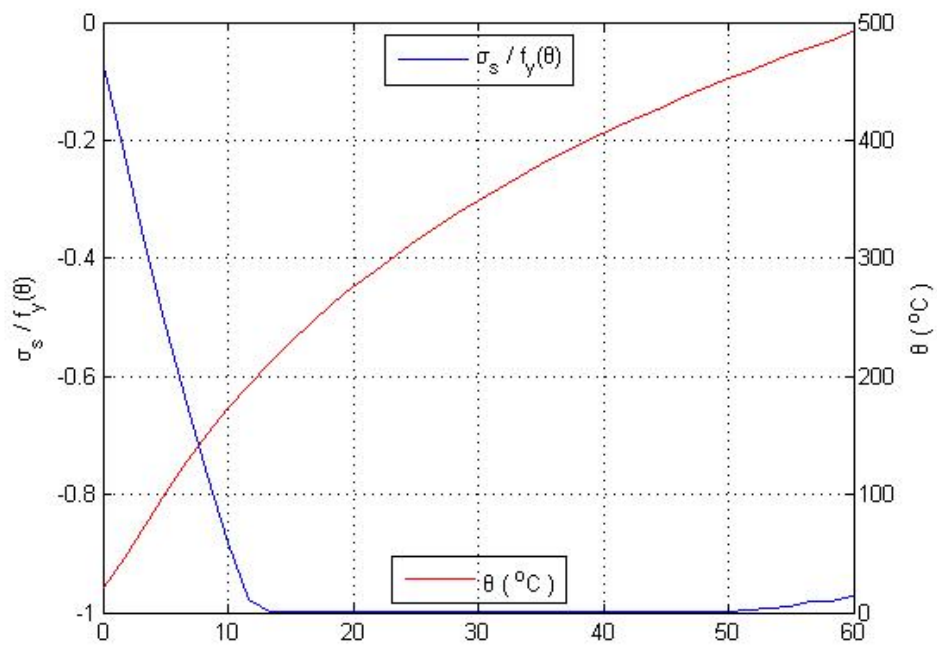


Δεξιά στήριξη: (2Φ14)

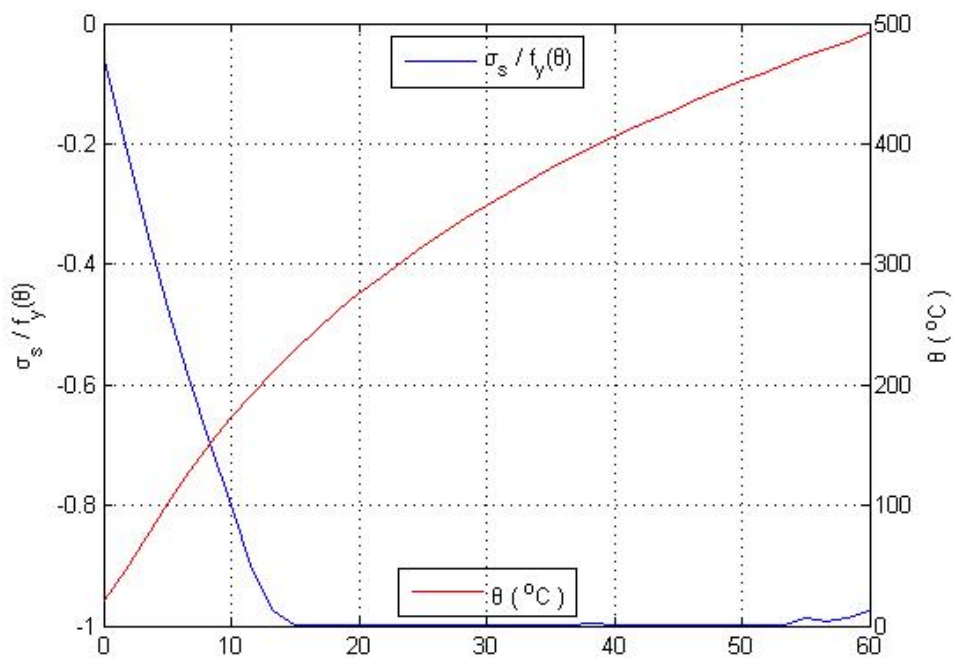


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη: (2Φ10)



Δεξιά στήριξη: (2Φ10)

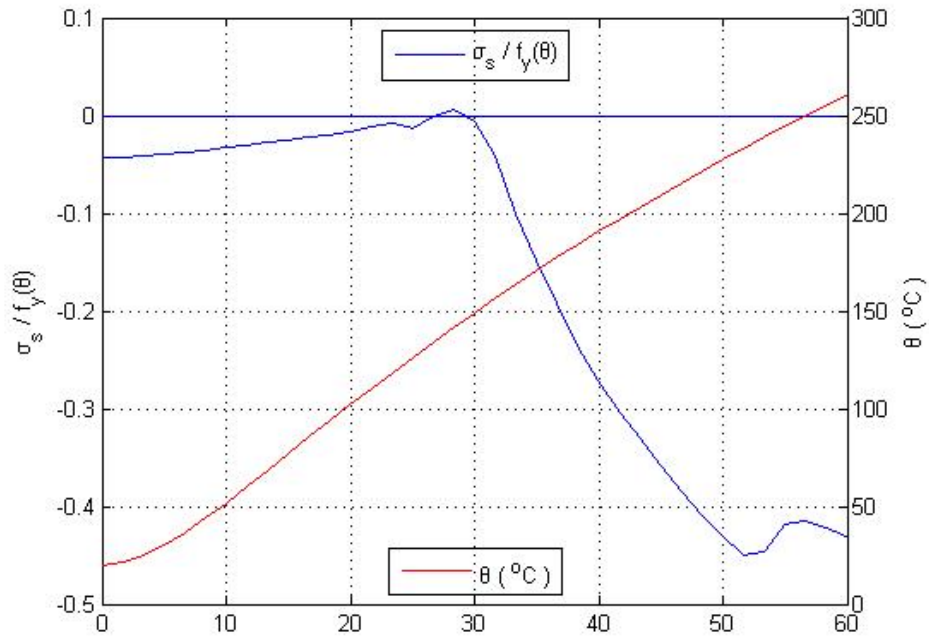


5.6.5 Διαγράμματα της τάσης του χάλυβα της διατομής στο μέσο της δοκού του πυροδιαμερίσματος

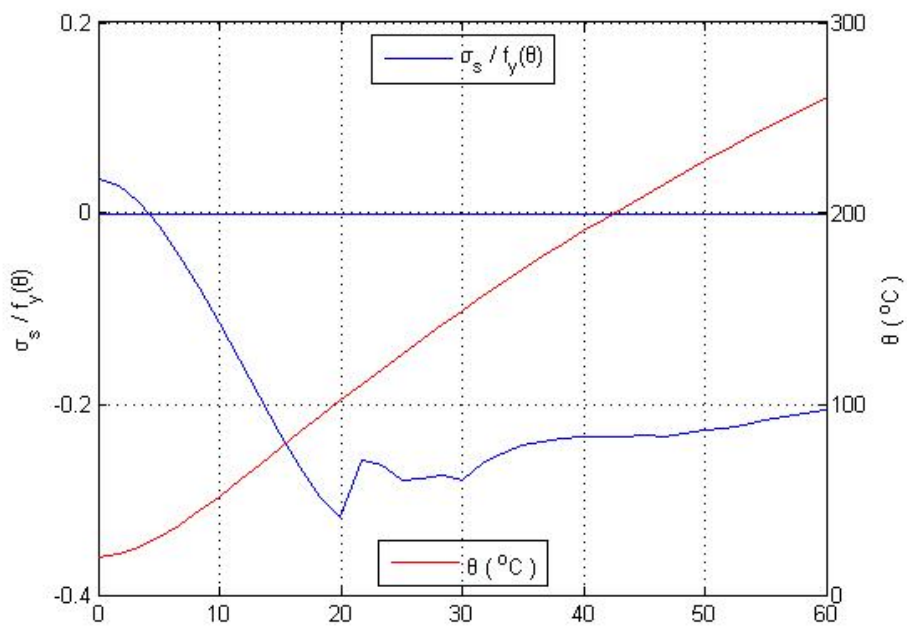
Για $c = 5.0$ cm:

Πρώτο άνοιγμα:

Άνω οπλισμός: (2Φ10)

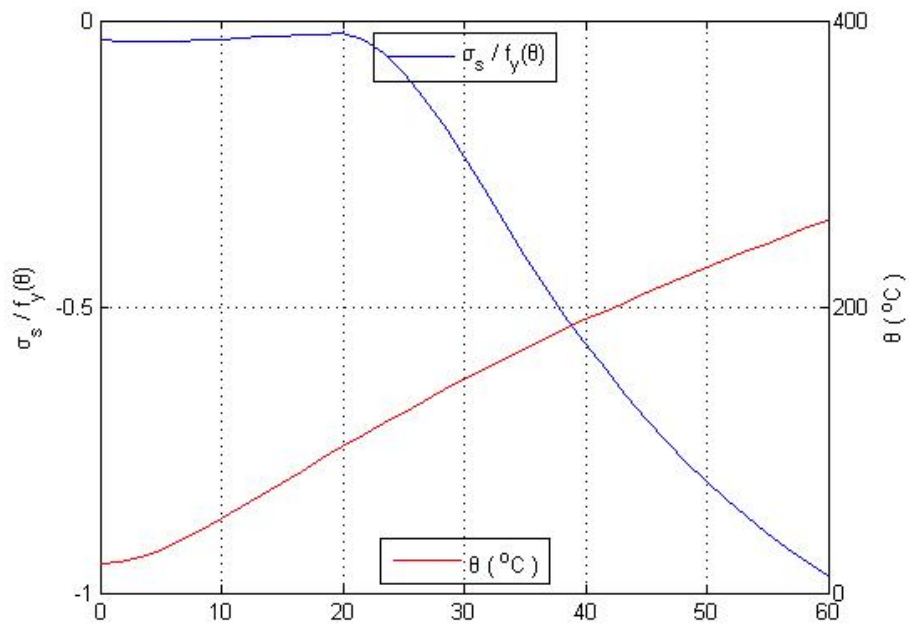


Κάτω οπλισμός: (4Φ14)

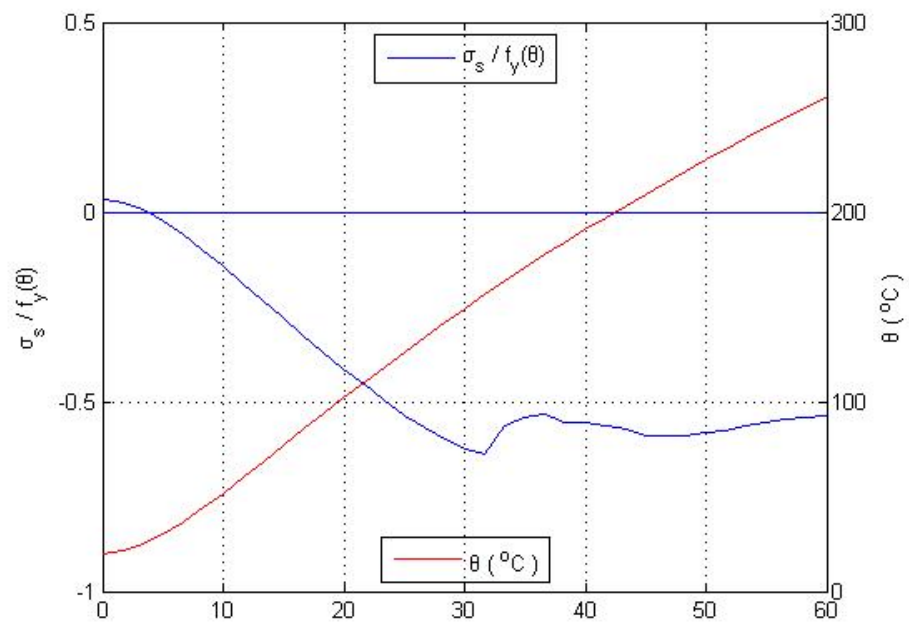


Δεύτερο άνοιγμα:

Άνω σπλισμός: (2Φ10)

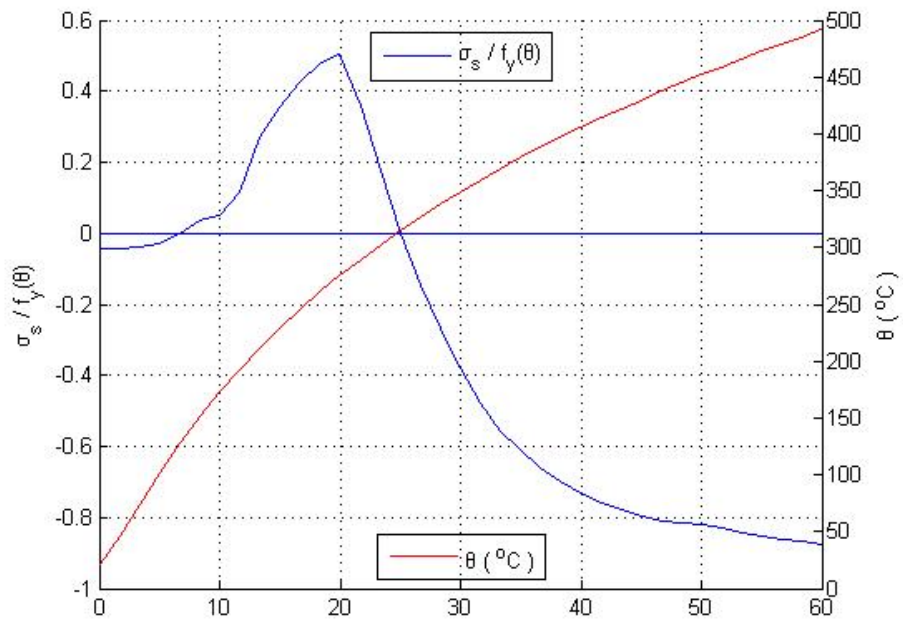


Κάτω σπλισμός: (4Φ10)

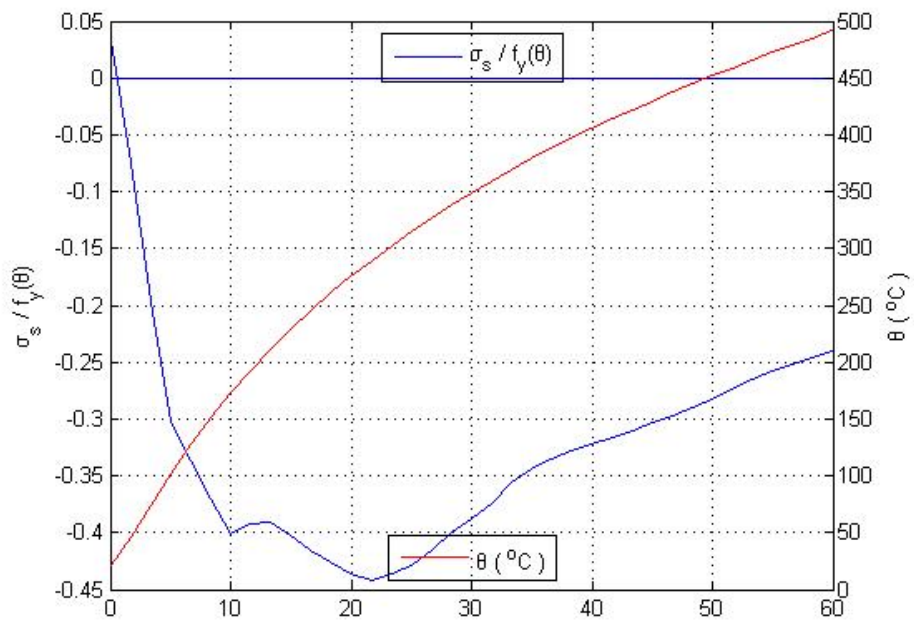


Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Άνω οπλισμός: (2Φ10)

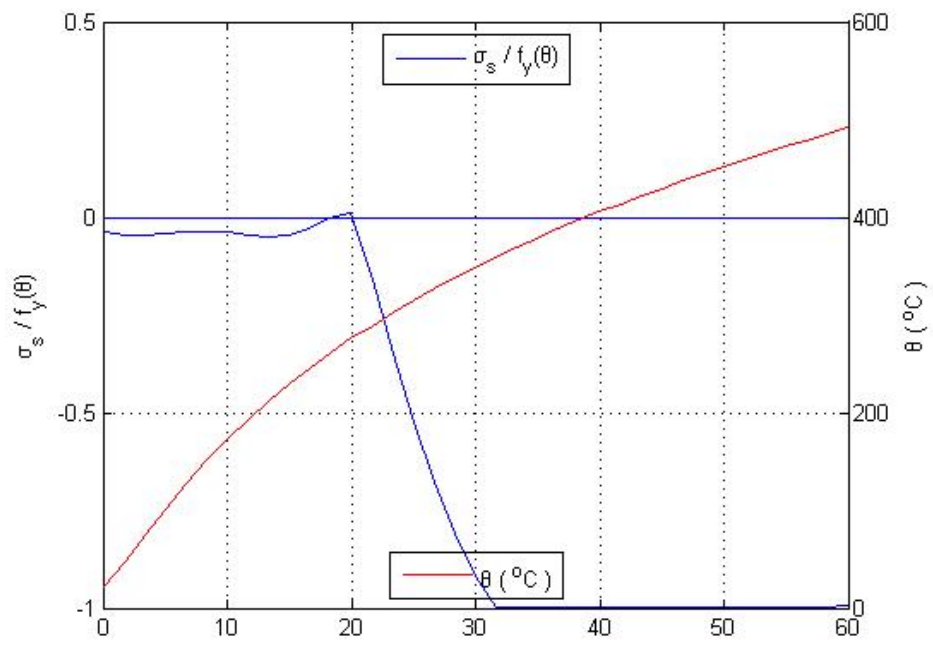


Κάτω οπλισμός: (4Φ14)

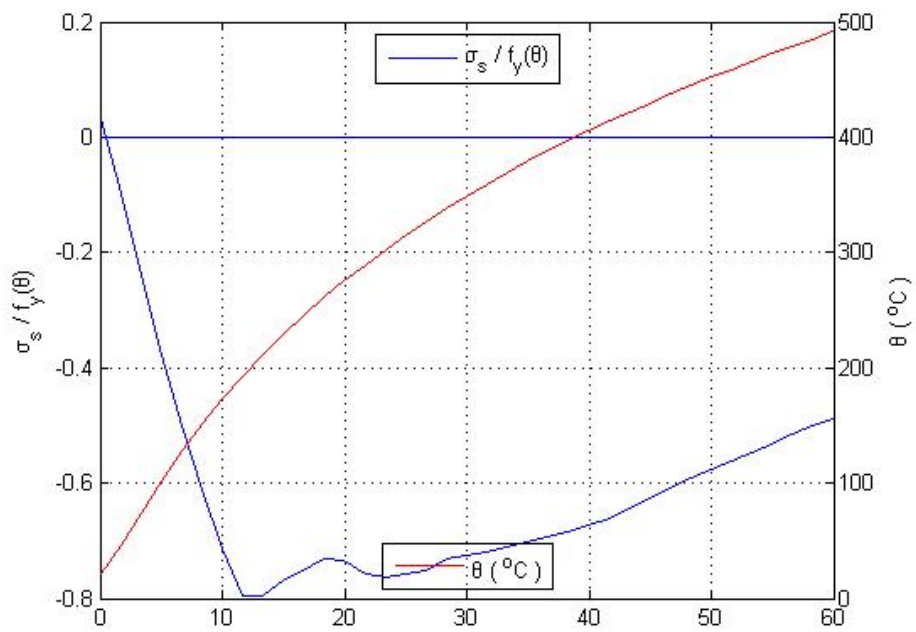


Δεύτερο άνοιγμα:

Άνω σπλισμός: (2Φ10)



Κάτω σπλισμός: (4Φ10)

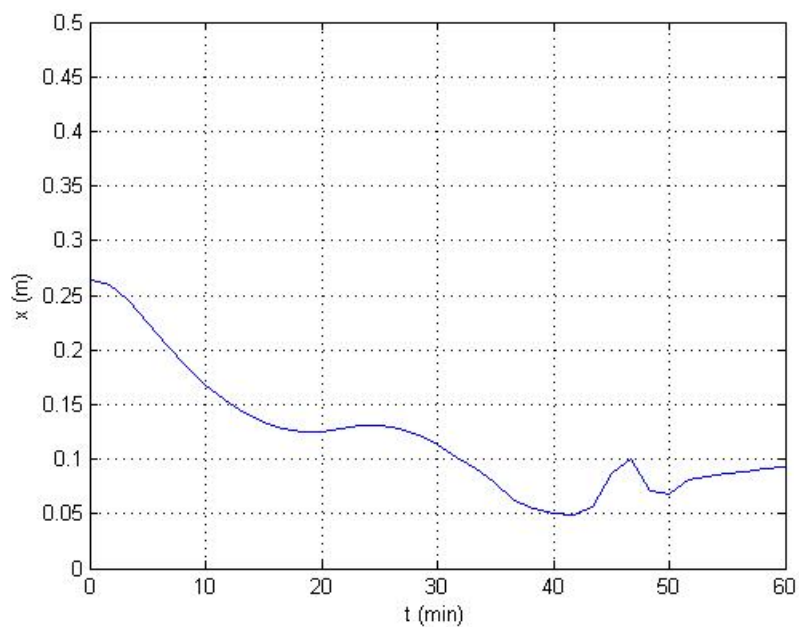
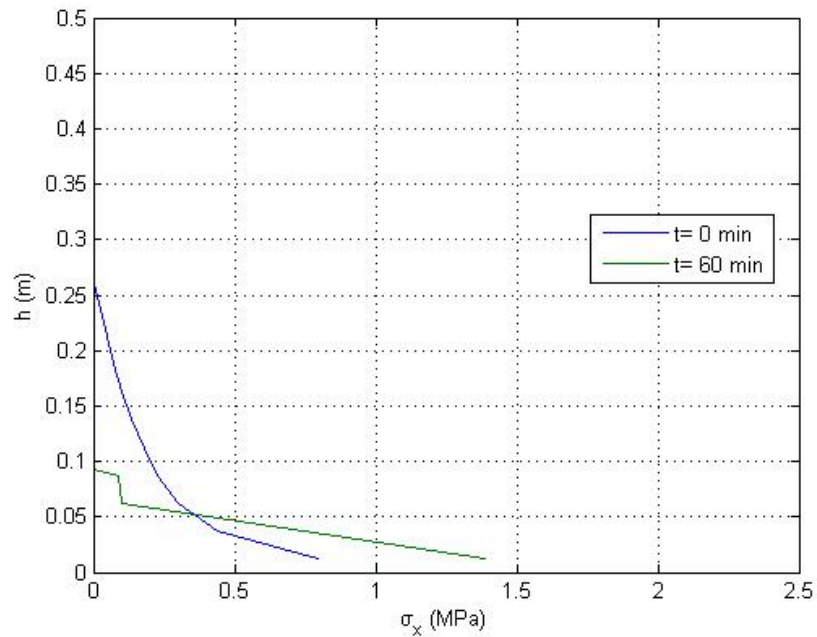


5.6.6 Μεταβολή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στις διατομές των στηρίξεων και κατανομή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος

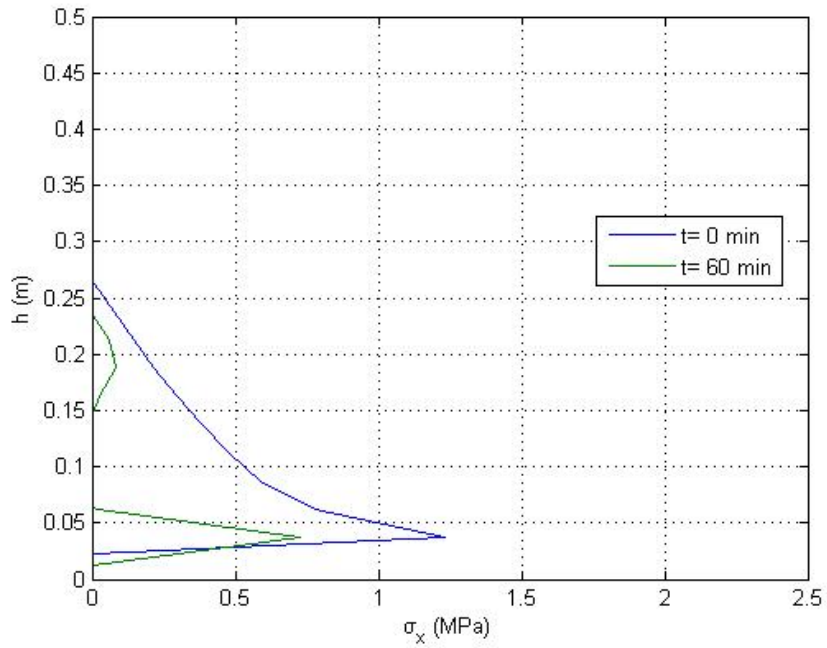
Για $c = 5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:

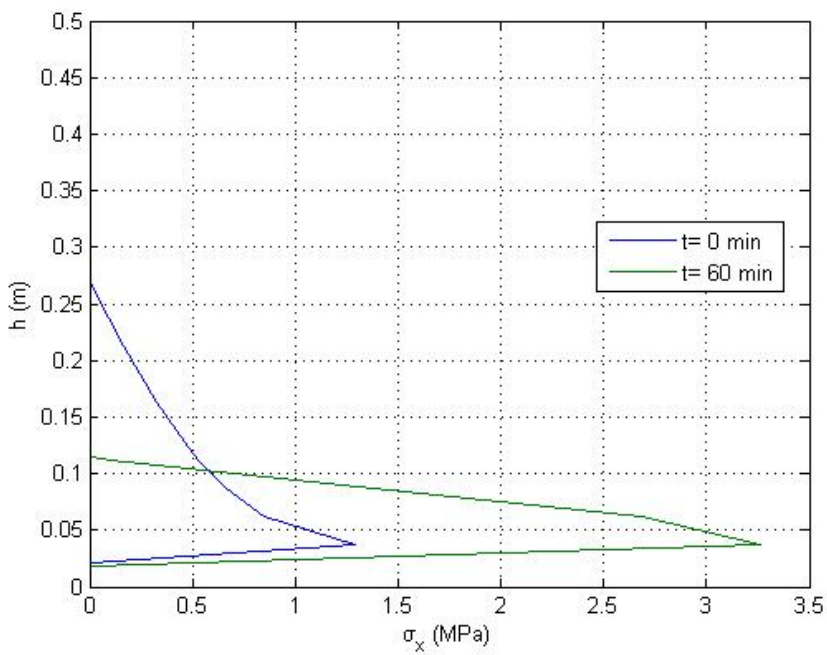


Δεξιά στήριξη:

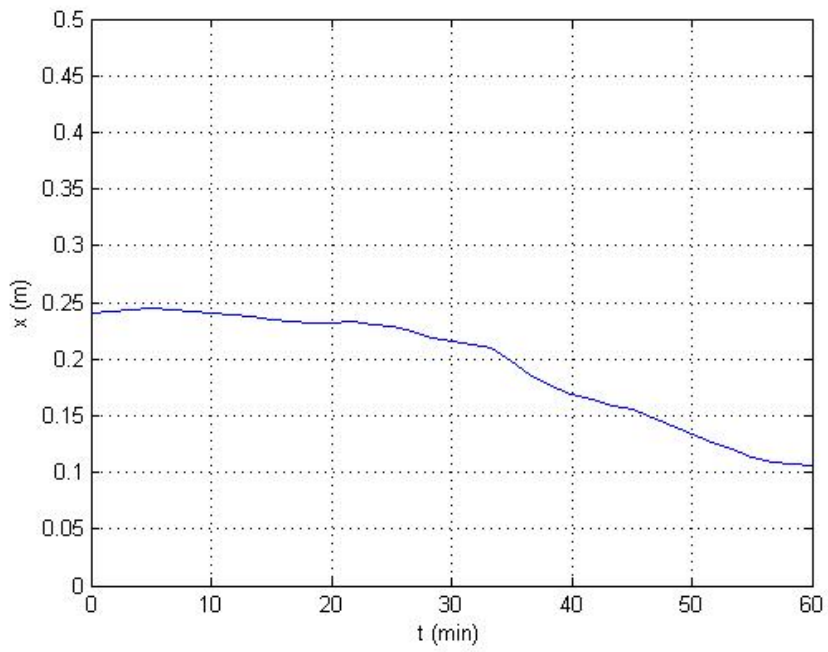
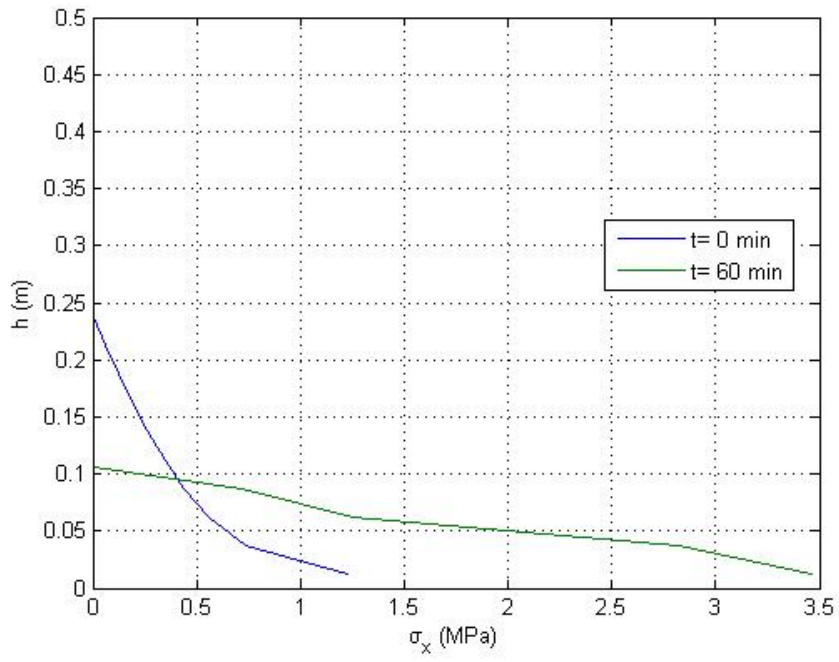


Δεύτερο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:



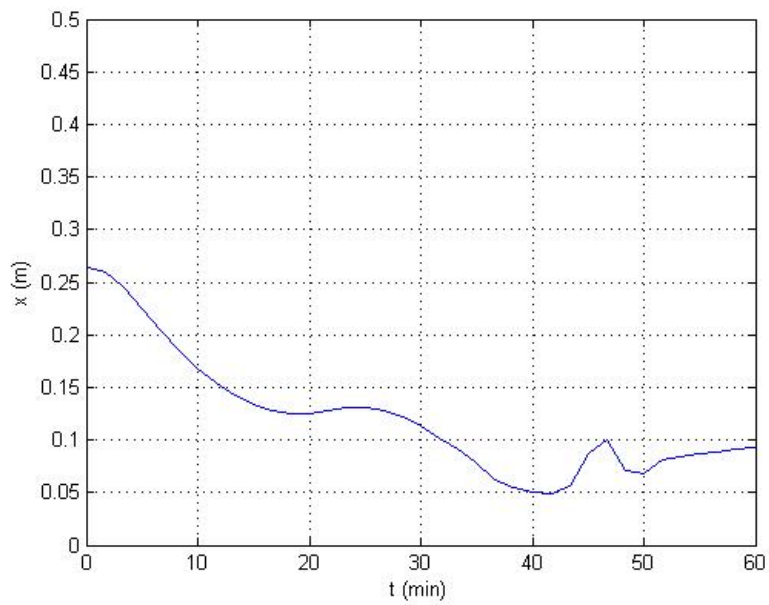
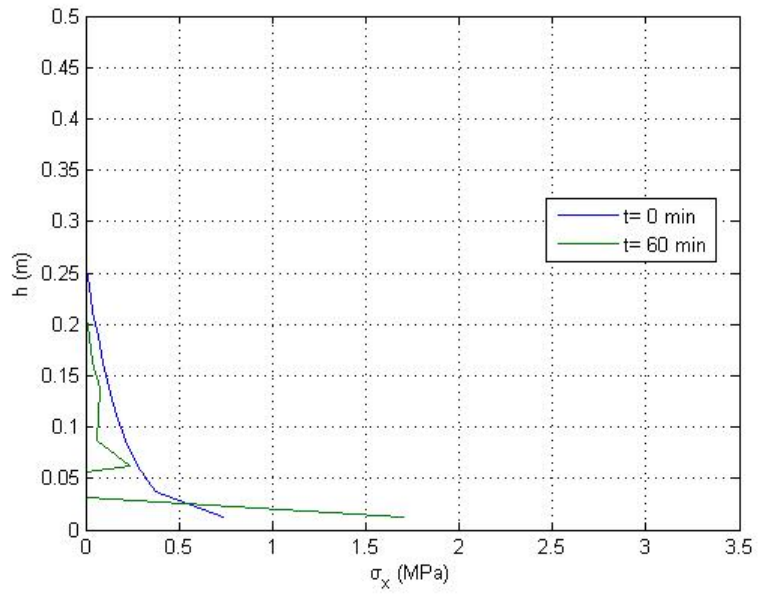
Δεξιά στήριξη:



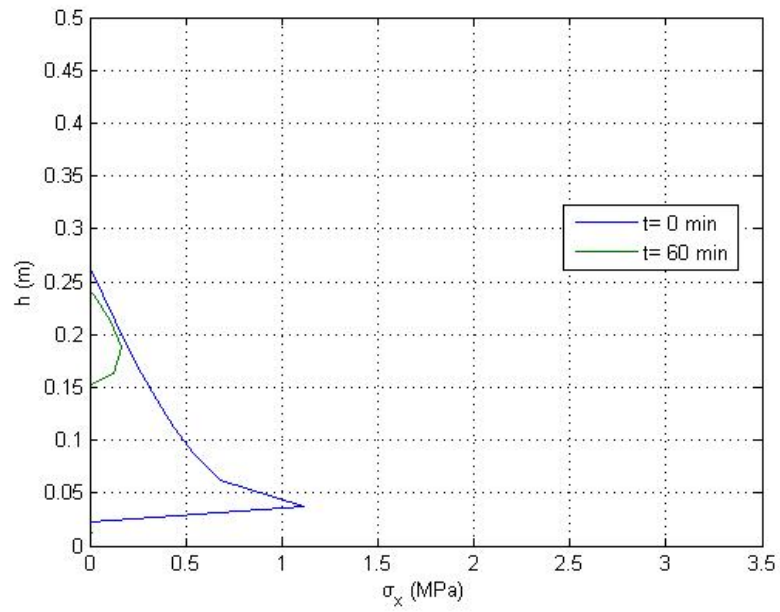
Για $c = 2.5 \text{ cm}$:

Πρώτο άνοιγμα:

Αριστερή στήριξη:

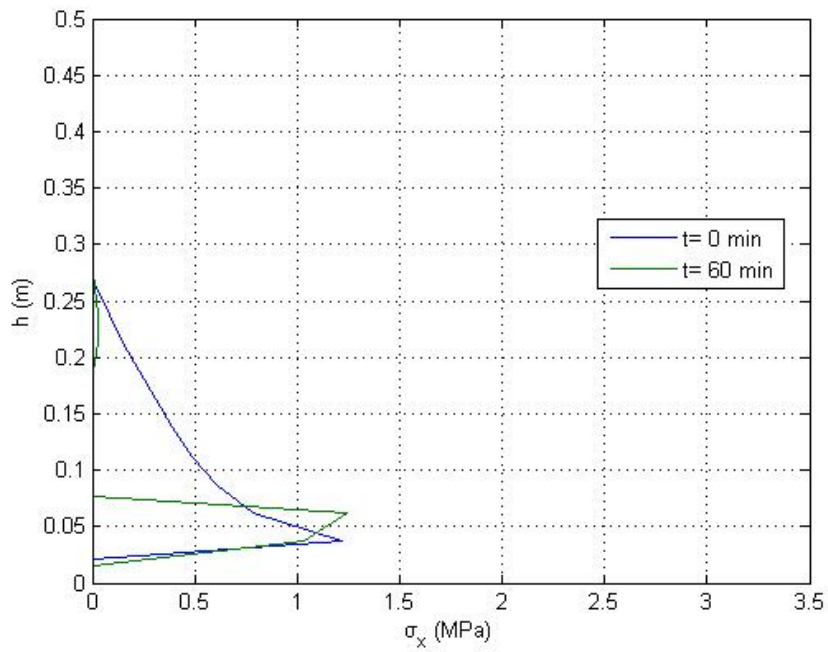


Δεξιά στήριξη:

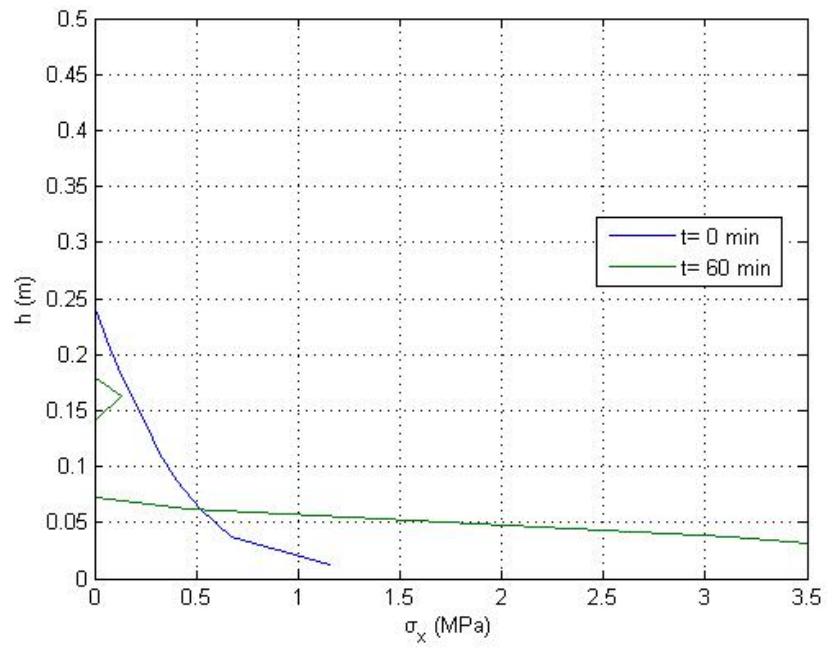


Δεύτερο άνοιγμα:

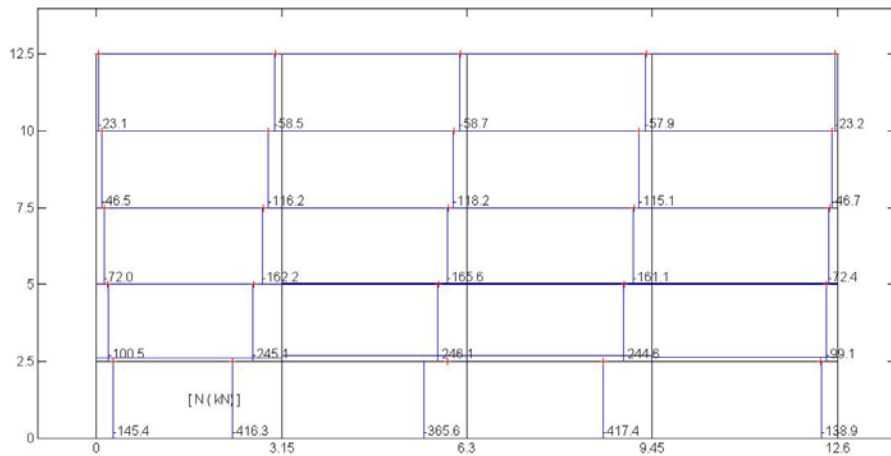
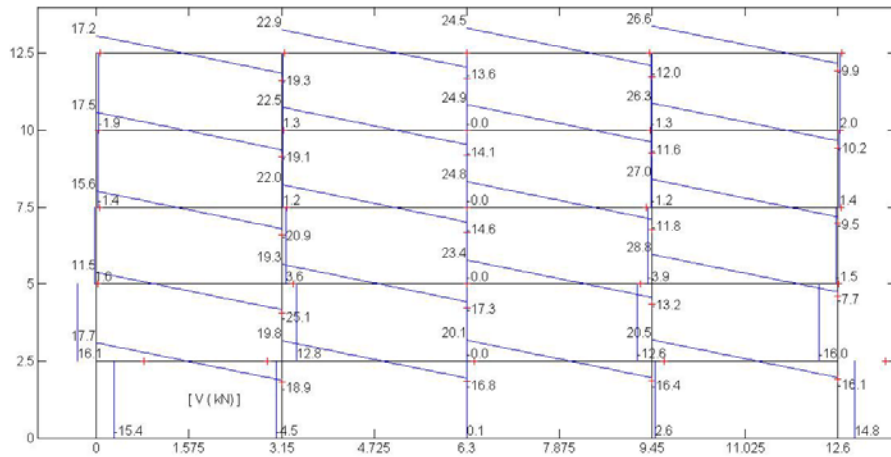
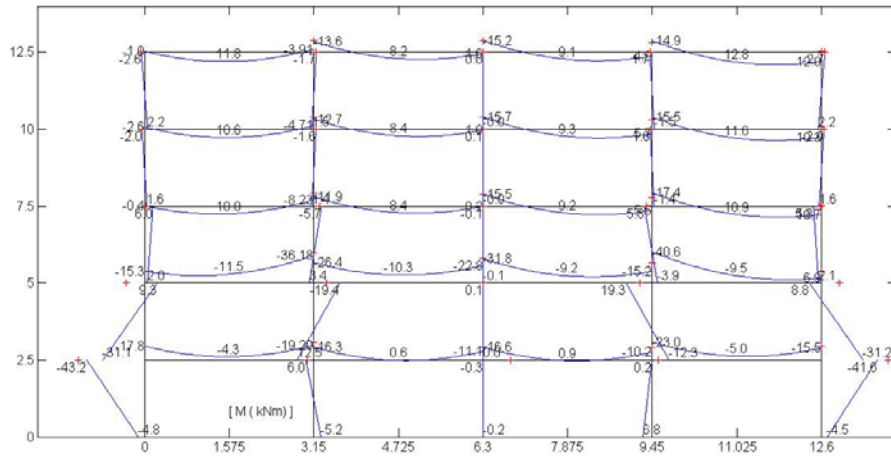
Αριστερή στήριξη:



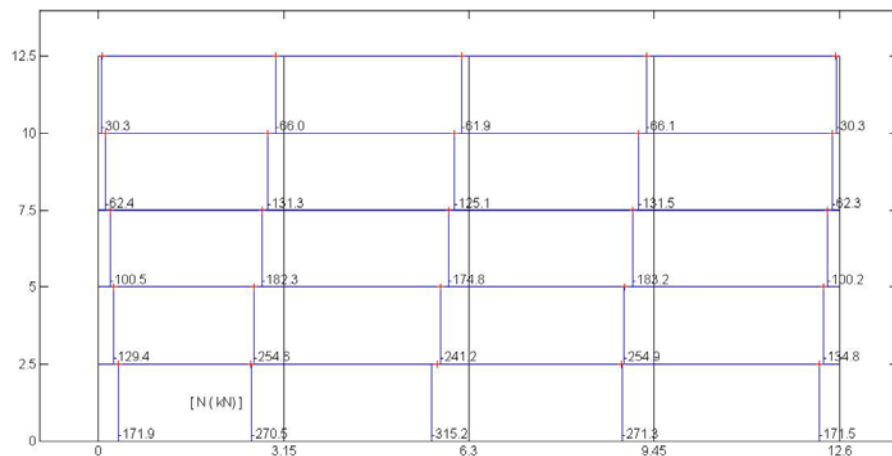
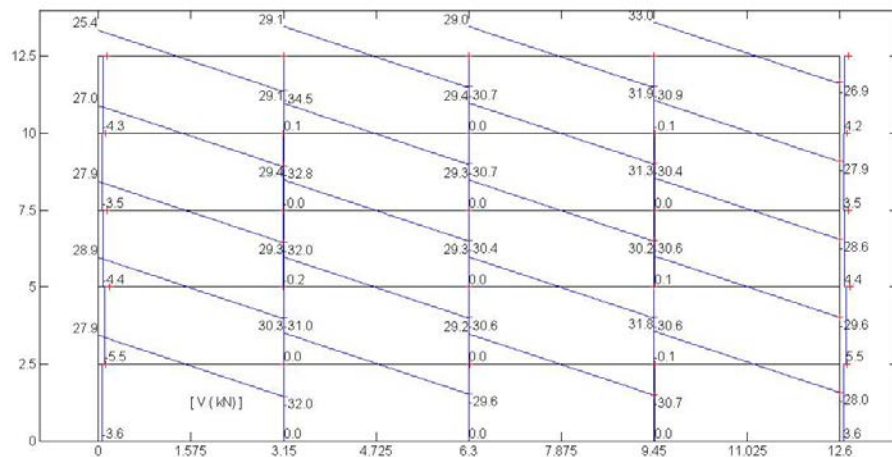
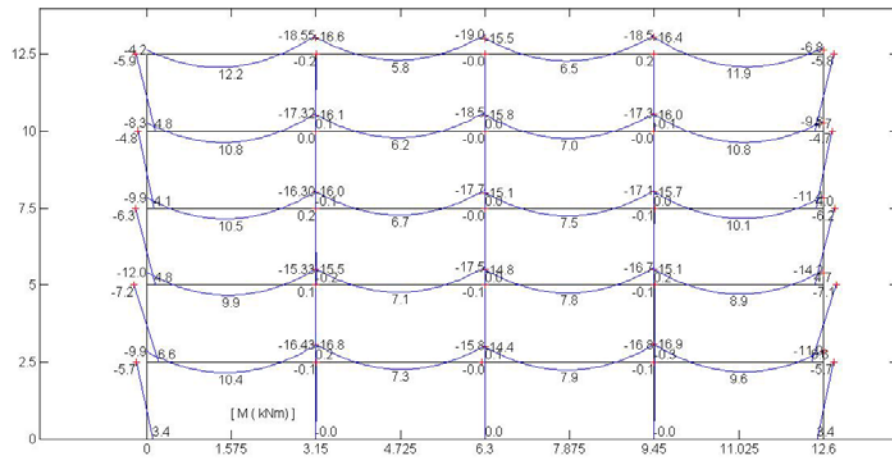
Δεξιά στήριξη



5.6.7 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών για $t = 60 \text{ min}$



5.7 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών στην οριακή κατάσταση αστοχίας



5.8 Σύγκριση – Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

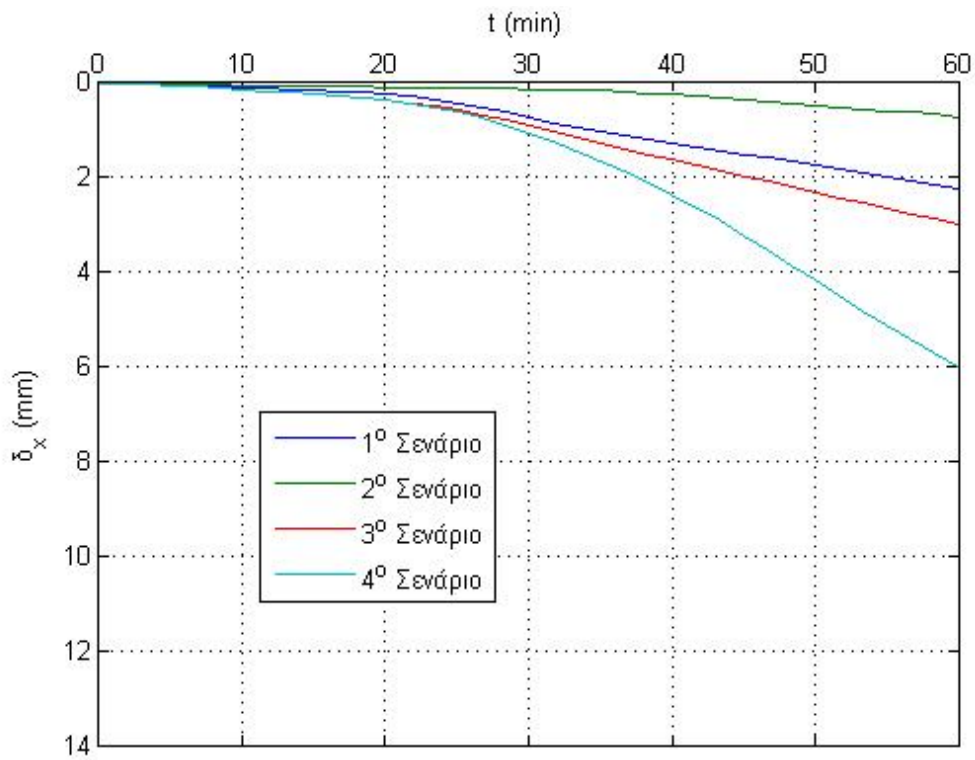
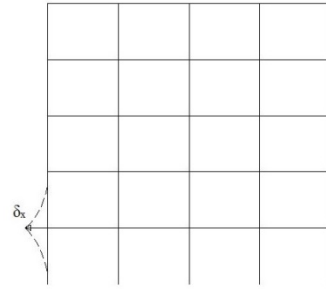
Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων διαπιστώνεται ότι η πυρκαγιά είναι απαραίτητο να λαμβάνεται ως μία πρόσθετη δράση στις κατασκευές. Ο λόγος για αυτό είναι το γεγονός ότι οι έμμεσες δράσεις που προκύπτουν από τις θερμικές διαστολές δεν είναι ασήμαντες, αλλά σε συνδυασμό με την ελάττωση της αντοχής των υλικών μπορεί να προκληθεί διαρροή στα εκτιθέμενα δομικά μέλη.

Από τα διαγράμματα ροπής-χρόνου έκθεσης των τεσσάρων σεναρίων, προκύπτει ότι η αναπτυσσόμενη ροπή μπορεί να ξεπεράσει την τιμή που δίνει ο συνδυασμός 1.35g + 1.50q.

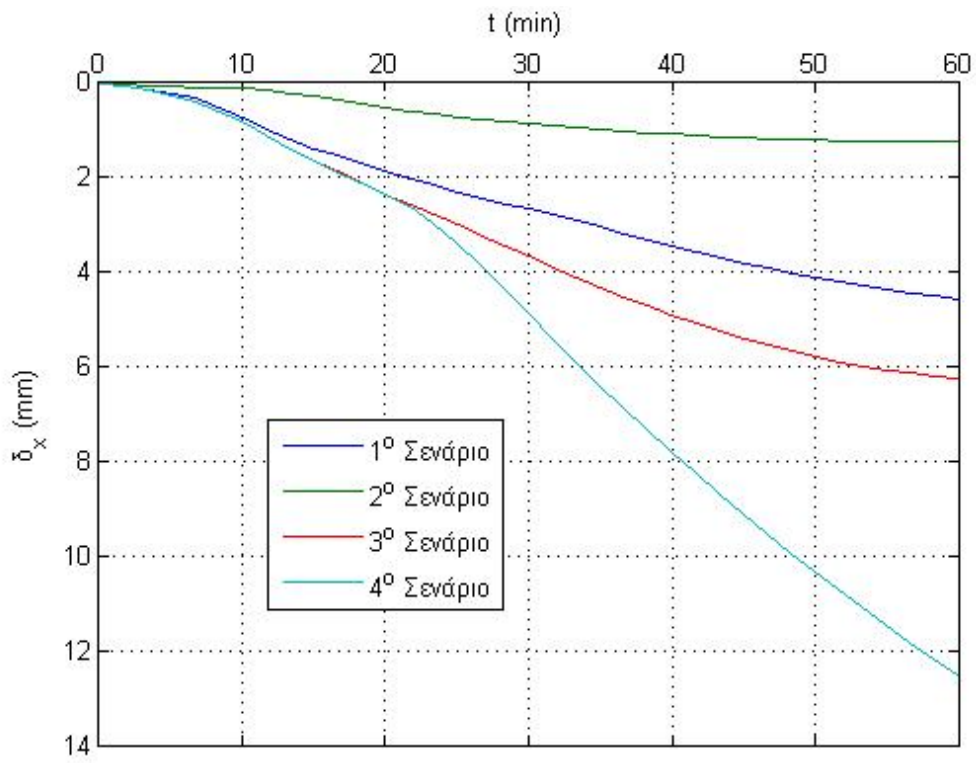
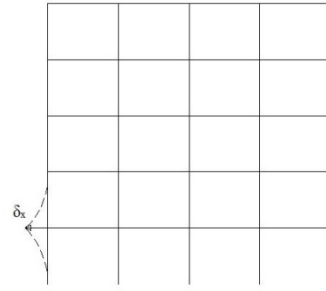
Έχοντας εξασφαλίσει την κατάλληλη όπλιση ώστε τα πρόσθετα φορτία κάμψης και αξονικών δυνάμεων να μπορούν να παραληφθούν από τον φορέα, είναι απαραίτητο στη συνέχεια να έχει εξασφαλισθεί η ικανότητα του φορέα να παρακολουθήσει τις πρόσθετες παραμορφώσεις. Δηλαδή για να εξασφαλισθεί η ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά πρέπει να ικανοποιηθεί η απαίτηση σε πλαστιμότητα του φορέα.

Ένα σημείο που θα ήταν ενδιαφέρον για μελέτη θα ήταν η επίδραση του βαθμού περίσφιξης στην συμπεριφορά των υποστυλωμάτων ενός κτηρίου υπό πυρκαγιά. Στην συγκεκριμένη εργασία δεν έχει ληφθεί η επίδραση της περίσφιξης στην αντοχή και παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος.

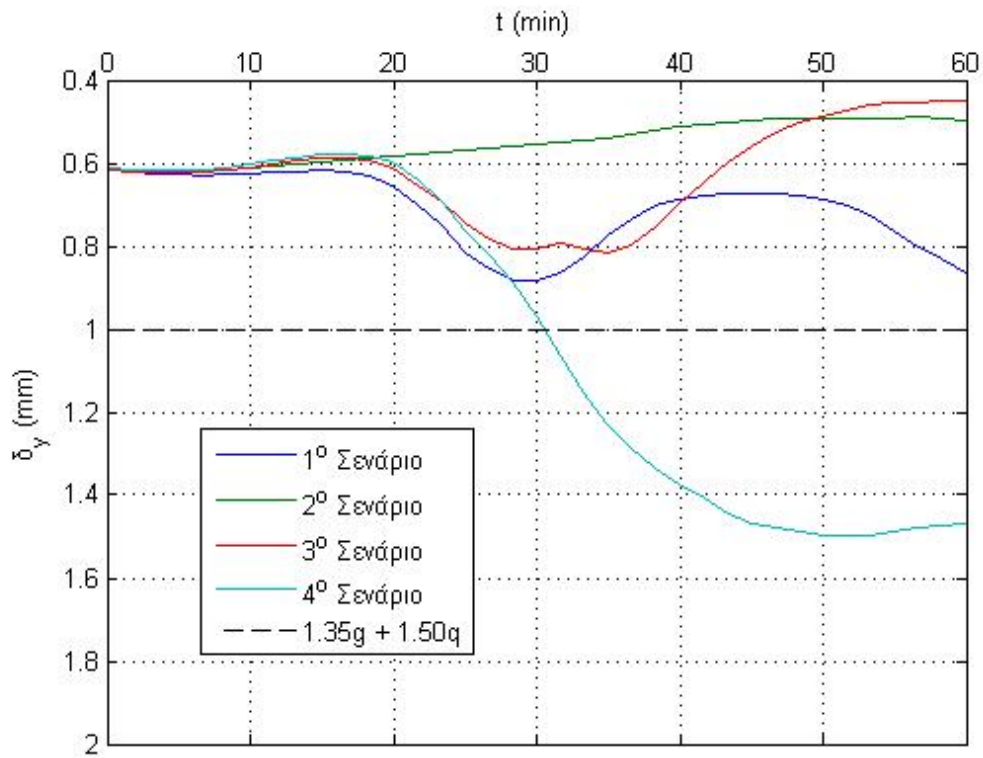
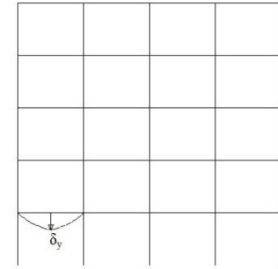
Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει
του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 5 \text{ cm}$)



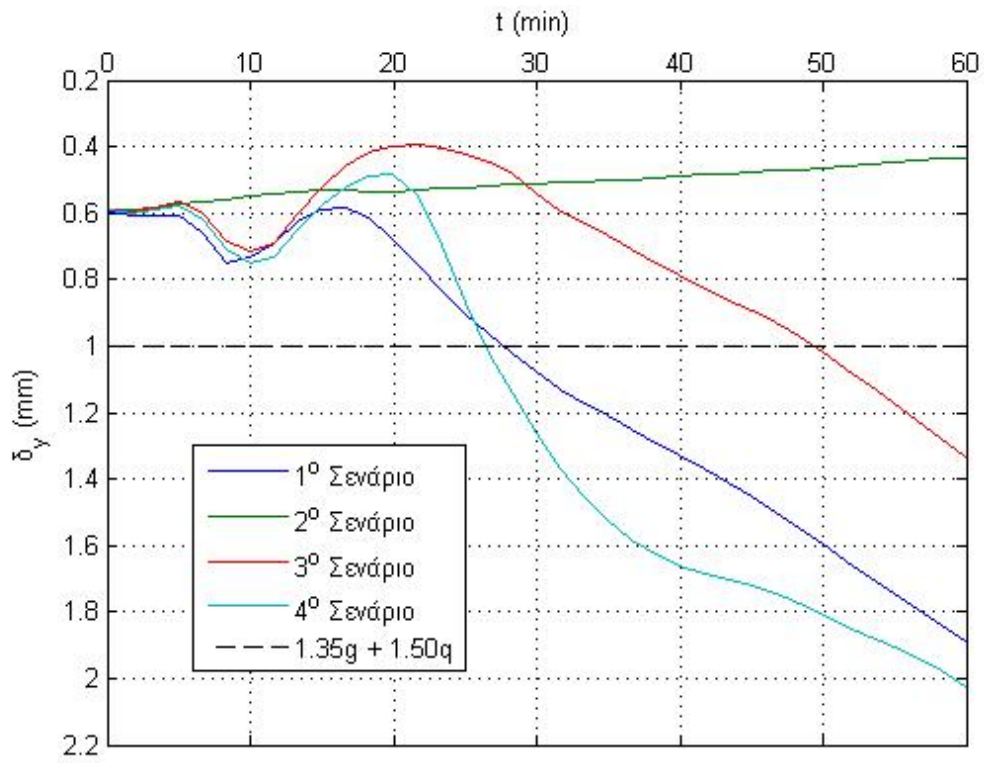
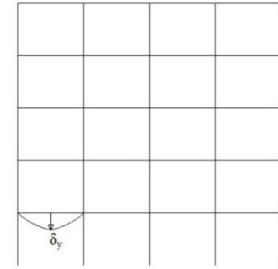
Οριζόντια μετατόπιση του πρώτου ορόφου συναρτήσει
του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 2.5 \text{ cm}$)



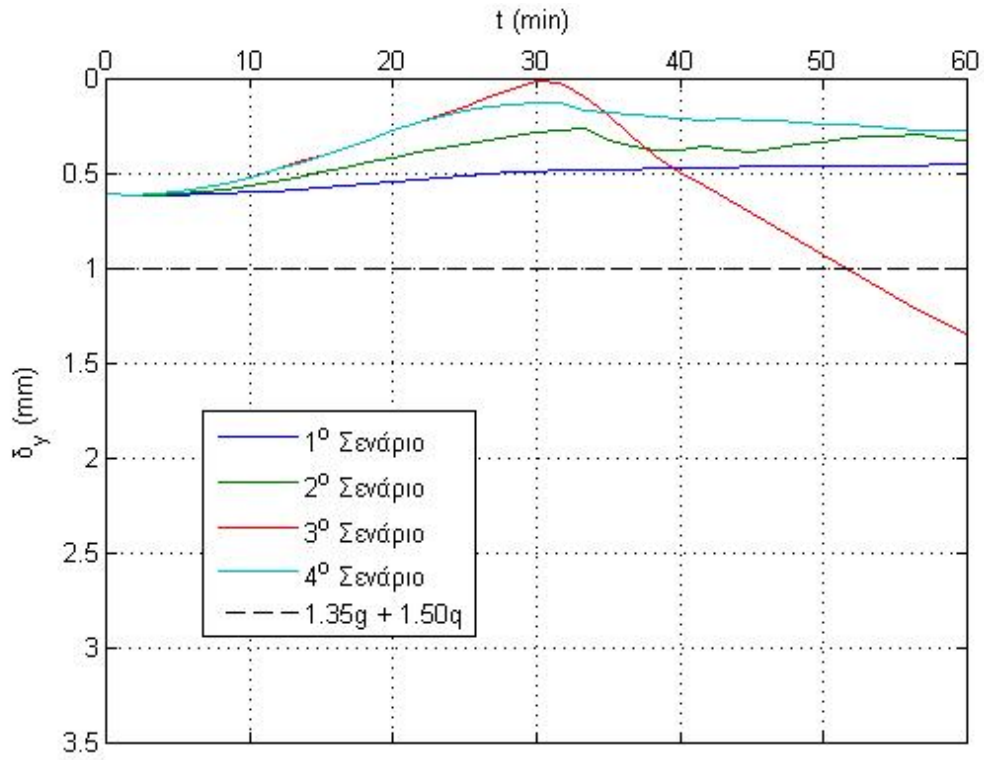
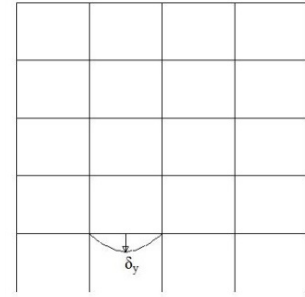
Κατακόρυφο βέλος του πρώτου από αριστερά φατνώματος
 του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην
 πυρκαγιά
 ($c = 5 \text{ cm}$)



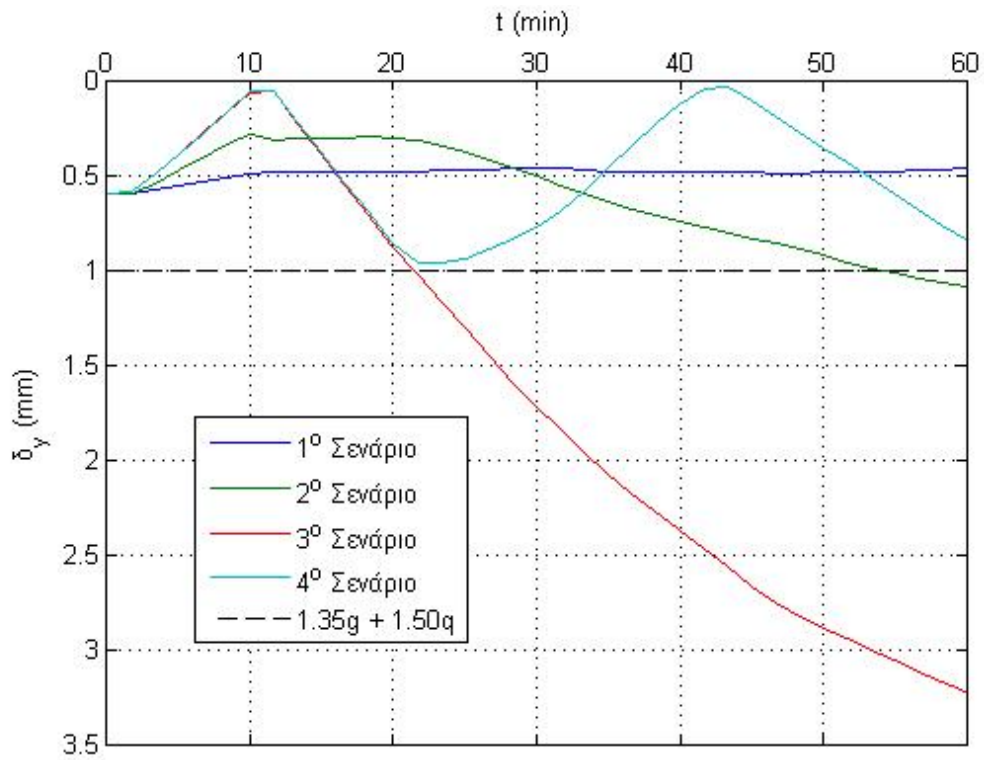
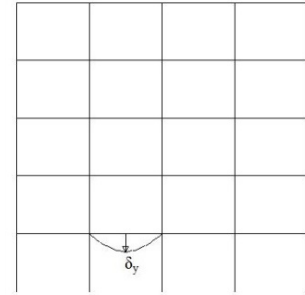
Κατακόρυφο βέλος του πρώτου από αριστερά φατνώματος
του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην
πυρκαγιά
($c = 2.5 \text{ cm}$)



Κατακόρυφο βέλος του δεύτερου από αριστερά
 φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου
 έκθεσης στην πυρκαγιά
 ($c = 5 \text{ cm}$)

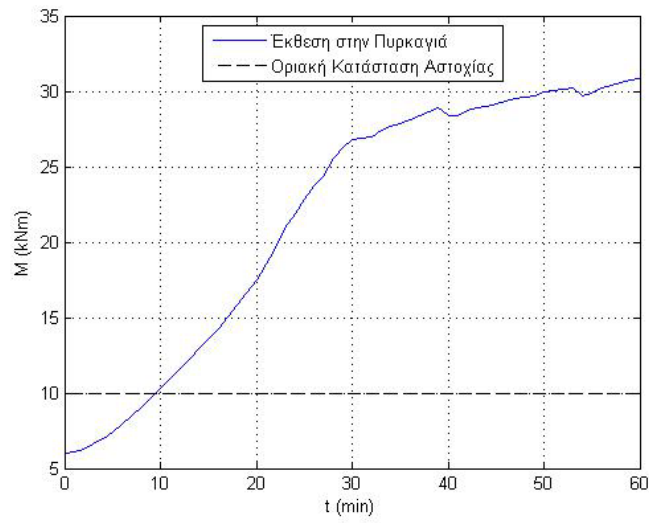


Κατακόρυφο βέλος του δεύτερου από αριστερά
 φατνώματος του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου
 έκθεσης στην πυρκαγιά
 ($c = 2.5 \text{ cm}$)

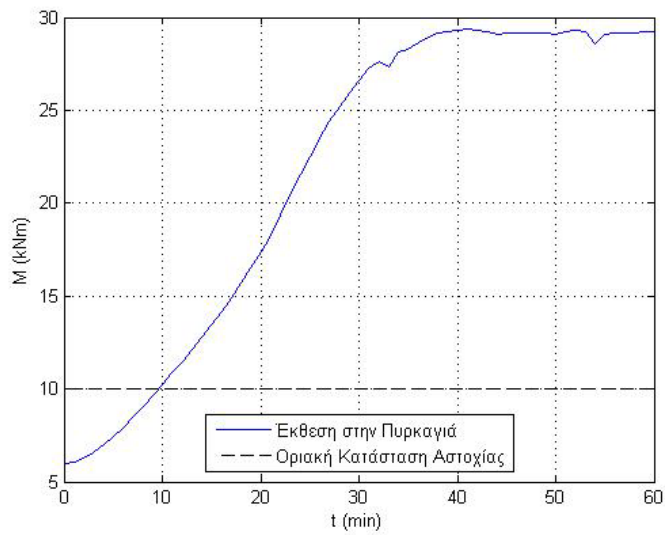


Μεταβολή της αριστερής ροπής στήριξης της πρώτης δοκού του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 5 \text{ cm}$)

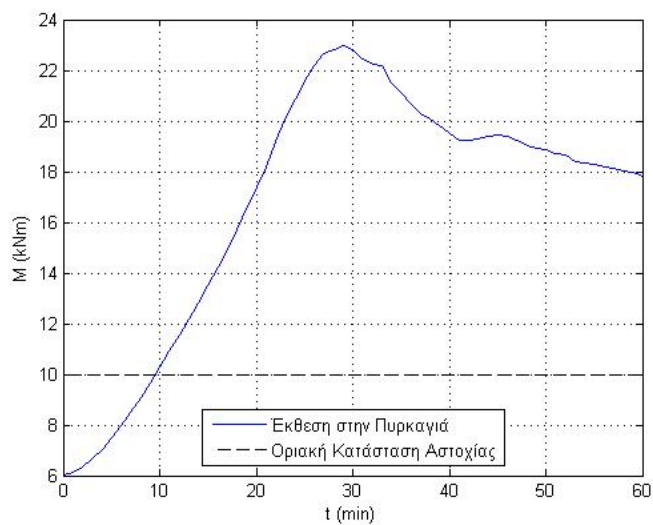
1^ο Σενάριο



3^ο Σενάριο

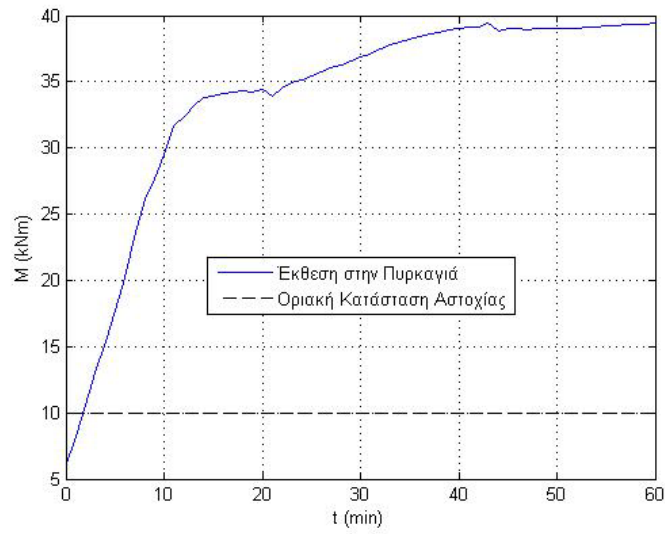


4^ο Σενάριο

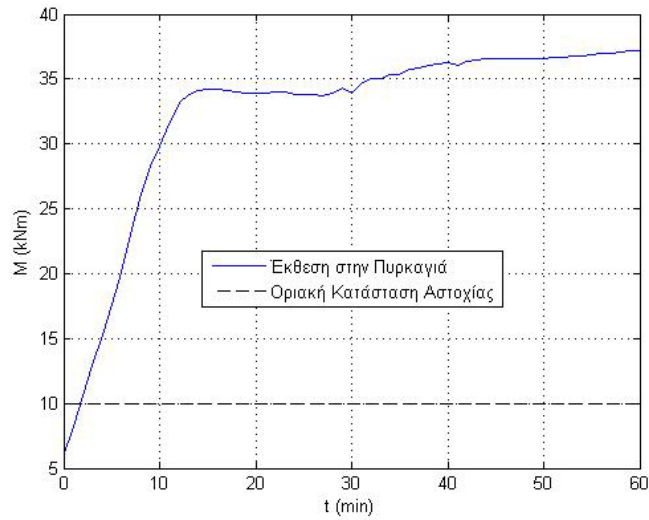


Μεταβολή της αριστερής ροπής στήριξης της πρώτης δοκού του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 2.5 \text{ cm}$)

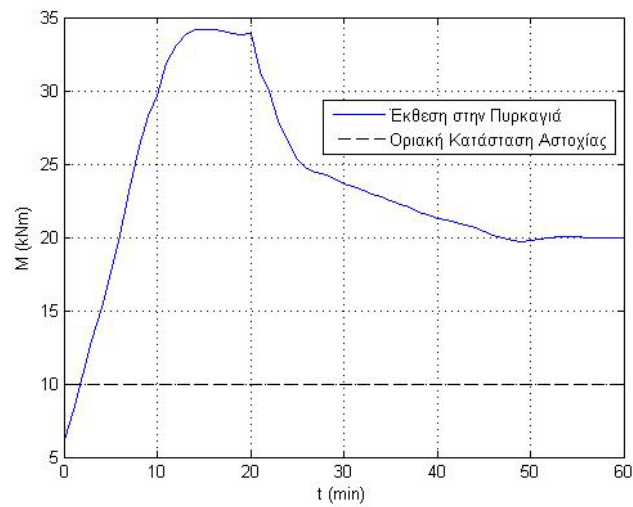
1° Σενάριο



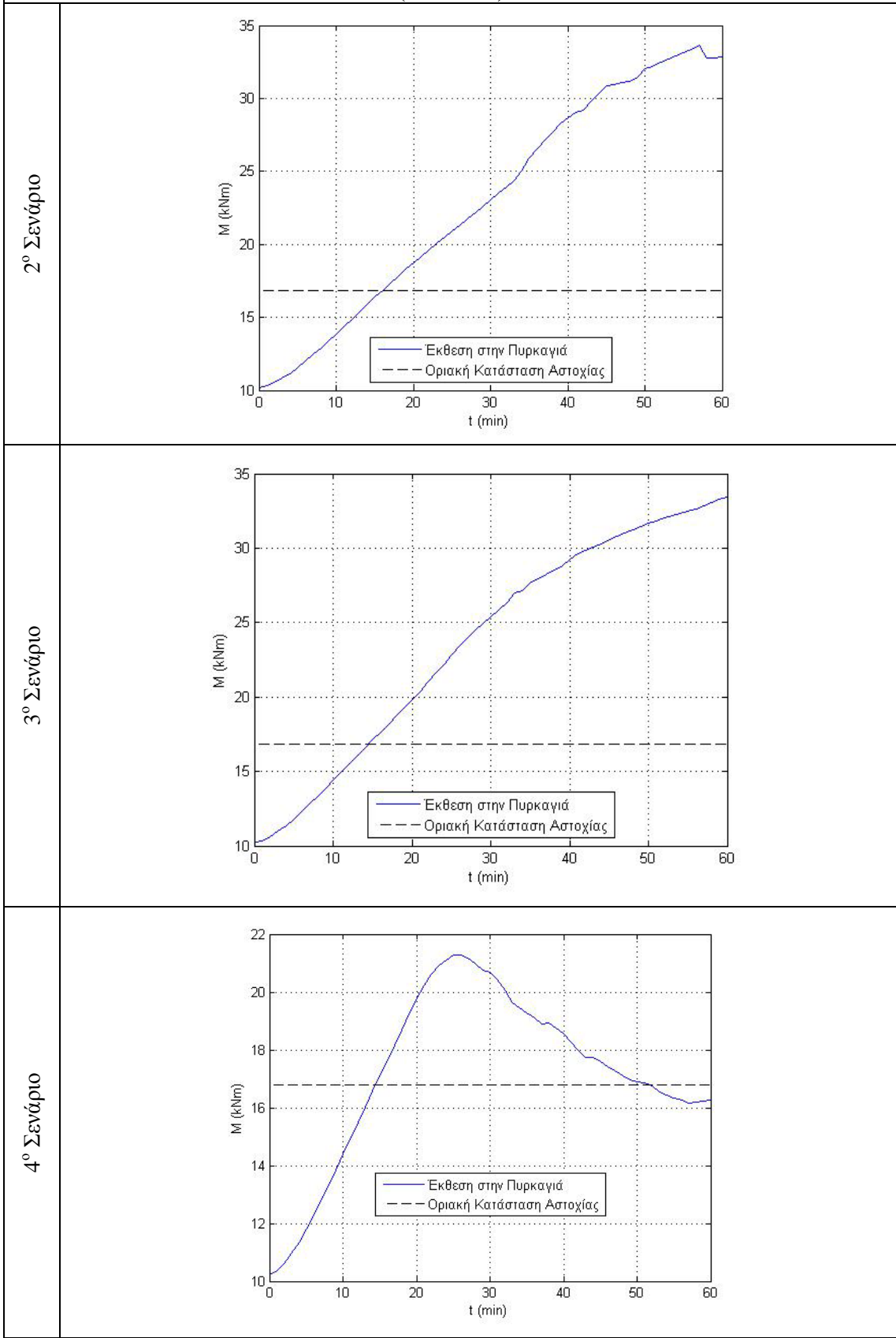
3° Σενάριο



4° Σενάριο

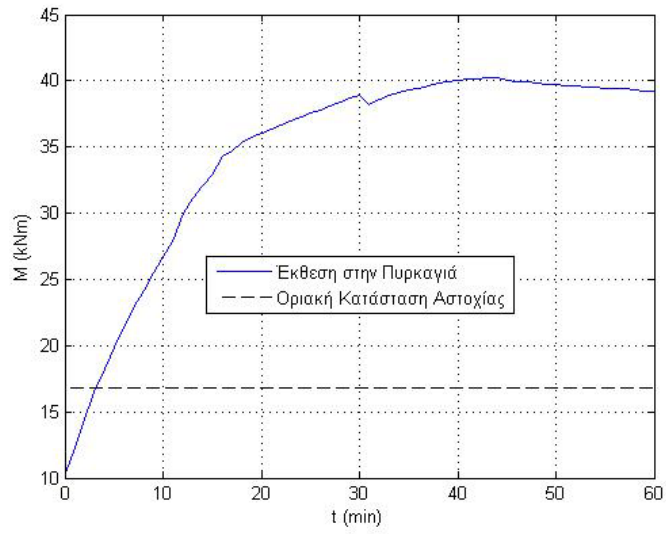


Μεταβολή της αριστερής ροπής στήριξης της δεύτερης δοκού του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 5 \text{ cm}$)

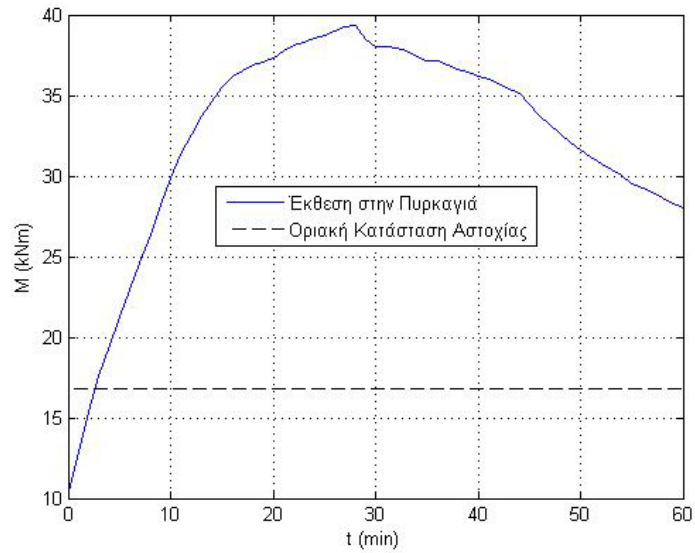


Μεταβολή της αριστερής ροπής στήριξης της δεύτερης δοκού του πρώτου ορόφου συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά
($c = 2.5 \text{ cm}$)

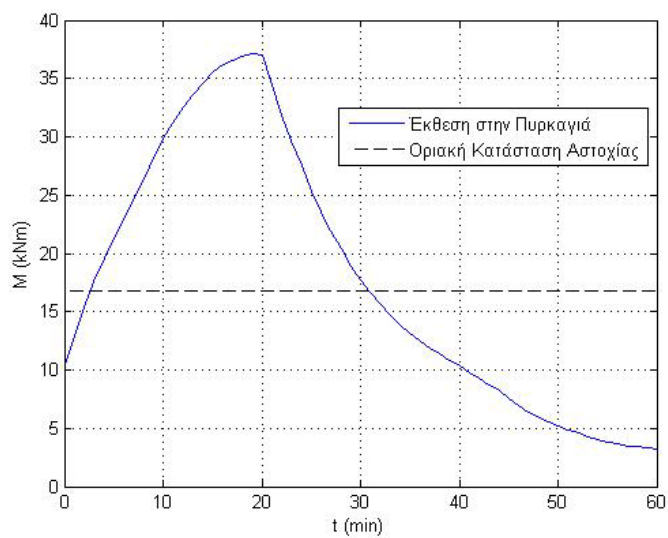
2° Σενάριο



3° Σενάριο



4° Σενάριο



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1996
2. *Ευροκώδικας 1 : Δράσεις, Μέρος 1-2: Γενικές Δράσεις – Δράσεις σε φορείς που εκτίθενται σε πυρκαγιά*
3. *Ευροκώδικας 2 : “Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα”, Μέρος 1-2: Γενικοί Κανόνες: Δομοστατικός σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς*
4. Gilat Amos, Department of Mechanical Engineering The Ohio State University, *MATLAB An Introduction with Applications*, John Witley & Sons, INC
5. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), *LS-DYNA Theory Manual*, May 2007
6. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), *LS-DYNA Keyword User’s Manual Version 971*, May 2006
7. Μπακόπουλος Α. και Χρυσοβέργης Ι., *Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση, Εκδόσεις Συμεών*, Αθήνα 2009
8. Παπαδρακάκης Μ., *Ανάλυση φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001
9. Τάσιος Θ. Π. και Δεοδάτης Γ., *Πρακτικός Σχεδιασμός κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα Έναντι Πυρκαγιάς*, Εργαστήριο Ω.Σ. / Ε.Μ.Π., Αθήνα 1984

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας του MATLAB για την κατασκευή των διαγραμμάτων των εντατικών μεγεθών της δοκού, για τρεις χρονικές στιγμές. Η πρώτη είναι πριν ξεκινήσει η πυρκαγιά, δηλαδή στους 20 °C, και τις άλλες δύο τις επιλέγει ο χρήστης. Εάν εισάγει από απροσεξία μεγαλύτερη τιμή του χρόνου έκθεσης από αυτόν που έχει ορισθεί αρχικά, τα αντίστοιχα διαγράμματα θα υπολογισθούν με βάση την μέγιστη τιμή αυτού.

```
clear
clc
numsec=3;
birthtime=input('Type the time (sec) that the fire begins
');
endtime=input('Type the time (sec) that the fire ends ');
dur=(endtime-birthtime)/60.0;
outime=zeros(1,2);
for i=1:1:2
outime(i)=input('Type the time (min) of the fire to plot
');
if outime(i)>dur
disp('Wrong output time! The max time will be
plotted!')
outime(i)=dur;
end
end
dumps=60.0;
n=(endtime-birthtime)/dumps+1;
ra=zeros(1,n);rb=zeros(1,n);time=zeros(1,n);MQN=zeros(3,3
);
Nd=zeros(n,numsec);Md=zeros(n,numsec);Vd=zeros(n,numsec);
ind=zeros(1,2);
for i=1:1:numsec
ra(1)=5.0+numsec+7.0+4.0*numsec+4.0*(i-1.0);
rb(1)=ra(1)+1.0;
for j=1:1:n-1
ra(j+1)=ra(j)+4.0*numsec;
rb(j+1)=ra(j+1)+1.0;
end
if i==1
for k=1:1:n
time(k)=round((dlmread('secforc','',[ra(k) 1 ra(k)
```



```

1]))-birthtime)/60.0);
    end
    end
    for j=1:1:n
        MQN=(dlmread('secforc','',[ra(j) 2 rb(j)
4]))/1000.0;
        Nd(j,i)=MQN(1,1);
        Vd(j,i)=MQN(1,2);
        Md(j,i)=MQN(2,3);
    end
end
L=4.0; m=100; dl=L/m; q=55.0;
x=zeros(1,m+1);M=zeros(n,m+1);V=zeros(n,m+1);N=zeros(n,m+
1);
for i=1:1:n
    for j=1:1:m+1
        x(j)=j*dl-dl;
        M(i,j)=-Md(i,1)+Vd(i,1)*x(j)-q*x(j)^2/2;
        V(i,j)=Vd(i,1)-q*x(j);
        N(i,j)=-Nd(i,1);
    end
end
for i=1:1:2
ind(i)=max(find(time,outime(i)));
end
plot(x,M(1,:), 'b',x,M(ind(1),:),'--r',x,M(ind(2),:),'--
m',[0,L/2.0,L],[-Md(1,1),Md(1,2),Md(1,3)],'+r')
set(gca,'YDir','reverse')
xlabel('x (m)')
ylabel('M (kN/m)')
legend('t=0 min',[ 't= ' num2str(outime(1)) ' sec'],[ 't= '
num2str(outime(2)) ' sec'],'Ls-Dyna output',0)
grid on
figure
plot(x,V(1,:),x,V(ind(1),:),x,V(ind(2),:))
xlabel('x (m)')
ylabel('V (kN)')
legend('t=0 min',[ 't= ' num2str(outime(1)) ' sec'],[ 't= '
num2str(outime(2)) ' sec'],0)
grid on
figure
plot(x,N(1,:),x,N(ind(1),:),x,N(ind(2),:))
xlabel('x (m)')
ylabel('N (kN)')

```

```
legend('t=0 min', ['t= ' num2str(outime(1)) ' sec'], ['t= '
num2str(outime(2)) ' sec'], 0)
grid on
```

Κώδικας στην FORTRAN για την κατασκευή των καμπυλών την ονοματικής πυρκαγιάς και της καμπύλης υδρογονανθράκων. Ο χρήστης εισάγει την χρονική στιγμή που στο LS-DYNA ξεκινά η πυρκαγιά και την χρονική της διάρκεια σε λεπτά και προκύπτουν δύο αρχεία .txt με ονομασία TEMPNOM.TXT και TEMPYDR.TXT τα οποία περιέχουν τους αριθμούς για την ονομαστική και την καμπύλη υδρογονανθράκων αντίστοιχα.

```
FUNCTION NOM(X)
NOM=20.0+345.0*ALOG10(8.0*X/60.0+1.0)
RETURN
END
FUNCTION YDR(X)
YDR=20.0+1080.0*(1.0-0.325*EXP(-0.167*X)-0.625*EXP(-2.5*X))
RETURN
END
PROGRAM TEMPERATURE
OPEN(11,FILE='TEMPNOM.TXT')
OPEN(12,FILE='TEMPYDR.TXT')
WRITE(*,*) 'TYPE BIRTH TIME'
READ(*,*) T0
WRITE(*,*) 'TYPE FIRE DURATION (MIN)'
READ(*,*) DUR
T=-50.0
T0=T0-50.0
DO
T=T+50.0
T0=T0+50.0
TEMPN=NOM(T)
TEMPY=YDR(T)
WRITE(11,10) T0,',',TEMPN
10 FORMAT(F8.1,A,F8.2)
WRITE(12,10) T0,',',TEMPY
IF(T.GE.(DUR*60.0)) EXIT
END DO
CLOSE(11)
CLOSE(12)
STOP
END
```

Κώδικας στο MATLAB για την κατασκευή του διαγράμματος της βύθισης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης

```
clear
clc
ca=2; cb=4;
birthtime=2100.0; endtime=5700.0; dumps=50.0;
n1=endtime/dumps+1;
n=(endtime-birthtime)/dumps+2;
ind=birthtime/dumps;
ra=8.0+ind;
rb=8.0+n1;
t=(dlmread('y_nom','',[ra 0 rb 0])-birthtime)/60.0;
ynom=dlmread('y_nom','',[ra 1 rb 1])*1000.0;
yydr=dlmread('y_ydr','',[ra 1 rb 1])*1000.0;
plot(t,ynom,t,yydr)
%set(gca,'YDir','reverse')
xlabel('t (min)')
xlim([0,60])
ylabel('y (mm)')
set(gca,'XTick',[0 10 20 30 40 50 60])
legend('Ονομαστική Πυρκαγιά','Πυρκαγιά
Υδρογονανθράκων',0)
grid on
```

Κώδικας του MATLAB για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής της διατομής, χωρίς αξονική δύναμη:

```
clear
clc
h=0.45;b=0.20;
c=30; dbw=8; dbl=14; d1=(c+dbw+dbl/2)/1000.0;
d=h-d1;
disp('Σκυρόδεμα C25/30, Χάλυβας B500C ')
fcd=25000.0; fyd=500.0; E=200.0e+003;
esy=fyd/E;
n1=input('Αριθμός εφελκυσόμενων ράβδων : ');
n2=input('Αριθμός θλιβόμενων ράβδων : ');
As1=n1*pi*(dbl/10)^2/4;
As2=n2*pi*(dbl/10)^2/4;
x=0.0;
```

```

for j=1:1:1.0e+006
x=x+1.0e-007;
es1=(d-x)/x*3.5/1000; es2=abs((x-d1)/x*3.5/1000);
if x<=d1
es2=-es2;
end
if es1>=esy
F1=As1*fyd/10;
else
F1=As1*es1*E/10;
end
if es2>=esy
F2=As2*fyd/10;
else
F2=As2*es2*E/10;
end
Fc=0.85*fc*d*0.81*x*b;
N=Fc+F2-F1;
if abs(N)<=0.001
M=Fc*(d-0.416*x)+(d-d1)*F2;
fprintf('Η ροπή αντοχής της διατομής είναι : %5.2f kNm
',M)
break
else
M=-1.0;
end
end
if M== -1.0
disp('Δεν υπάρχει λύση! ')
end

```

Κώδικας στο MATLAB για την κατασκευή των διαγραμμάτων ροπής – χρόνου έκθεσης της ανάλυσης με Π.Σ για τον έλεγχο της ακρίβειας της συζευγμένης ανάλυσης.

```
clear
clc
ca=2; cb=4;
rtime(1)=27; ctime=1; numsec=2;
birthtime=2100.0; endtime=16500.0; dumps=100.0;
n=(endtime-birthtime)/dumps+1;
ra(1)=5.0+numsec+7.0+4.0*numsec;
rb(1)=ra(1)+1.0;
    for j=1:1:n-1
        ra(j+1)=ra(j)+4.0*numsec;
        rb(j+1)=ra(j+1)+1.0;
    end
for i=1:1:n-1
t(i)=(dmlread('secforc2','',[ra(i) 1 ra(i) 1])-
birthtime)/60.0;
M(i)=(dmlread('secforc2','',[rb(i) 4 rb(i) 4]))/1000.0;
end
tex=[0,15.0,30.0,40,80,120,160,200,240];
Mex=[8.0,12,14,14.5,15.5,16,16.5,16.6,16.5];
ta=[0,30,40,50,65,80,120,160,200,240];
Ma=[6,12,14,16.1,18,18.5,18.5,18.2,17.8,17.5];
plot(t,M,tex,Mex,'--r',ta,Ma,'--k')
xlabel('t (min)')
xlim([0 240])
set(gca,'XTick',[0 40 80 120 160 200 240])
ylabel('M (kN/m)')
legend('Επίλυση με Π.Σ. - 2η ανάλυση','Πειραματική
Καμπύλη','Μέθοδος Βήμα προς Βήμα (βιβλ. Τάσιος και
Δεοδάτης)',0)
grid on
```

Κώδικας στο Matlab για την κατασκευή των διαγραμμάτων των μετακινήσεων συγκεκριμένων διατομών του πλαισίου, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά

```
clear
clc
ca=2; cb=4;
birthtime=5100.0; endtime=8700.0; dumps=50.0;
n1=endtime/dumps+1;
n=(endtime-birthtime)/dumps+2;
ind=birthtime/dumps;
y=6;
%y=input('Type dy');
X=[0 60]; Y=[y y];y2=[20 20];
```

```

ra=8.0+ind;
rb=8.0+n1;
t=(dlmread('yy1','',[ra 0 rb 0])-birthtime)/60.0;
dy1=abs((dlmread('yy1','',[ra 1 rb 1])))*1000.0;
%dy2=abs((dlmread('yy1','',[ra 1 rb 1])))*1000.0;
plot(t,dy1,X,Y,'--k',X,y2,'--r')
set(gca,'YDir','reverse')
xlabel('t (min)')
xlim([0,60])
ylim([0 22])
ylabel('δ_y (mm)')
%set(gca,'YTick',[0.5:0.25:2.0])
legend('Συζευγμένη Ανάλυση','Μέθοδος των 500 ^οC (χωρίς
θερμική διαστολή)', 'Μέθοδος των 500 ^οC (με θερμική
διαστολή)',0)
grid on

```