



MAICS⁺

*Δράση Μembrάνης σε σύμμικτες κατασκευές
σε περίπτωση πυρκαγιάς*

Θεωρητικό υπόβαθρο

C.C. Baniotopoulos - C.T. Tsalikis

O. Vassart

B. Zhao



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το έργο χρηματοδοτήθηκε από την European Commission, Research Fund for Coal and Steel.

Η παρούσα έκδοση εκφράζει τις απόψεις μόνο των συγγραφέων, και η Επιτροπή δεν είναι υπεύθυνη για οποιαδήποτε χρήση που μπορεί να πηγάζει από τις πληροφορίες που περιέχονται.

Η έκδοση πραγματοποιήθηκε ως αποτέλεσμα διαφόρων ερευνητικών έργων:

- The RFCS Project FICEB+
- The RFCS Project COSSFIRE
- The project Leonardo Da Vinci 'Fire Resistance Assessment of Partially Protected Composite Floors' (FRACOF).
- Προγενέστερο έργο που χρηματοδοτήθηκε μαζί από την ArcelorMittal και CTICM και εκτελέστηκε από την CTICM και SCI.

Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού αρχικά αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα των μεγάλης κλίμακας πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε πολυώροφο μεταλλικό κτίριο στο Building Research Establishment's Cardington test facility στο Ηνωμένο Βασίλειο. Μεγάλο μέρος της θεωρητικής βάσης της μεθόδου σχεδιασμού υπήρχε από τα τέλη του 1950, ακολουθώντας μελέτες της δομικής συμπεριφοράς των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος σε θερμοκρασία δωματίου. Η πρώτη έκδοση την απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού ήταν διαθέσιμη από στο SCI Design Guide P288 'Fire Safe Design: A new approach to Multi-story Steel Framed Buildings', 2 Ed.

Παρόλο που η εφαρμογή της μεθόδου στο σχεδιασμό πυραντίστασης είναι σχετικά καινούρια, η βάση της μεθόδου είναι καθιερωμένη.

Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού εφαρμόστηκε σε λογισμικό από το SCI το 2000 και η βελτιωμένη έκδοση εκδόθηκε το 2006, ακολουθώντας βελτιώσεις στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού.

Σημαντικές συνεισφορές λήφθηκαν από:

- Mary Brettle The Steel Construction Institute
- Ian Sims The Steel Construction Institute
- Louis Guy Cajot ArcelorMittal
- Renata Obiala ArcelorMittal
- Mohsen Roosefid CTICM
- Gisèle Bihina CTICM.

Περιεχόμενα

Σελ.

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ CARDINGTON	3
	2.1 Το ερευνητικό πρόγραμμα	3
	2.2 Πείραμα 1: Δεσμευμένη δοκός	5
	2.3 Πείραμα 2: Επίπεδο πλαίσιο	7
	2.4 Πείραμα 3: Γωνιακό Πυροδιαμέρισμα	8
	2.5 Πείραμα 4: Γωνιακό Πυροδιαμέρισμα	10
	2.6 Πείραμα 5: Μεγάλο Πυροδιαμέρισμα	12
	2.7 Πείραμα 6: Δοκιμή γραφείου	13
	2.8 Πείραμα 7: Κεντρικό Πυροδιαμέρισμα	17
	2.9 Γενικά σχόλια στην παρατηρούμενη συμπεριφορά	21
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ, ΓΑΛΛΙΑ	22
4	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΥΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟ ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ	28
	4.1 Broadgate	28
	4.2 Churchill Plaza building, Basingstoke	30
	4.3 Πειράματα πυρκαγιάς στην Αυστραλία	31
	4.3.1 Πειράματα πυρκαγιάς στην οδό William και σχεδιαστική προσέγγιση	31
	4.3.2 Πειράματα πυρκαγιάς στην οδό Collins	34
	4.3.3 Συμπεράσματα της έρευνας στην Αυστραλία	35
	4.4 Πειράματα πυρκαγιάς στη Γερμανία	35
	4.5 Πειραματικές εργασίες σε θερμοκρασία δωματίου	36
	4.6 Πειραματικές εργασίες σε υψηλές θερμοκρασίες	37
5	Η ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	39
	5.1 Εισαγωγή στη θεωρία γραμμών διαρροής και στη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης	40
	5.1.1 Πλάκα με πλήρη δέσμευση ελευθεριών εντός επιπέδου	41
	5.1.2 Πλάκα χωρίς δέσμευση ελευθεριών εντός επιπέδου	42
	5.1.3 Επίδραση των τάσεων μεμβράνης στις γραμμές διαρροής	43
	5.2 Υπολογισμός της αντοχής σύμμικτης πλάκας σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού	45
	5.2.1 Υπολογισμός της αντοχής	45
	5.2.2 Εξαγωγή έκφρασης για την παράμετρο k	48
	5.2.3 Εξαγωγή έκφρασης για την παράμετρο b	50
	5.2.4 Δυνάμεις της μεμβράνης σταθεροποίησης	53
	5.3 Αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος	59
6	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	60
	6.1 Παραδοχές σχεδιασμού	60
	6.2 Κριτήριο αστοχίας	61
	6.2.1 Βύθιση της πλάκας	62
	6.2.1.1 Θερμικές επιδράσεις	62
	6.2.1.2 Μηχανικές παραμορφώσεις στον οπλισμό	63
	6.2.1.3 Υπολογισμός της βύθισης της πλάκας ώστε να επιτρέπεται ο υπολογισμός των δυνάμεων της μεμβράνης	64
	6.2.2 Βαθμονόμηση στα πειράματα πυρκαγιάς Cardington	65
	6.3 Μεθοδολογία σχεδίασης	67

6.3.1	Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας της πλάκας	68
6.3.2	Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας των μη μονωμένων δοκών	68
6.4	Σχεδίαση των πυράντοχων περιμετρικών δοκών	69
6.4.1	Μη μονωμένες δοκοί με ακραίες δοκούς στις δύο πλευρές	71
6.4.1.1	Γραμμή διαρροής παράλληλα στις μη μονωμένες δοκούς	71
6.4.1.2	Γραμμή διαρροής κάθετα στις μη μονωμένες δοκούς	73
6.4.2	Μη μονωμένες δοκοί με μία ακραία δοκό στη μία πλευρά	74
6.4.2.1	Γραμμή διαρροής παράλληλη στις μη μονωμένες δοκούς	74
6.4.2.2	Γραμμή διαρροής κάθετη στις μη μονωμένες δοκούς	76
6.4.3	Ζώνη σχεδιασμού πλάκας χωρίς ακραίες δοκούς	77
6.4.4	Σχεδιασμός των ακραίων δοκών	77
6.5	Θερμική ανάλυση	78
6.5.1	Συντελεστές σχήματος	79
6.5.2	Ιδιότητες υλικών	80
6.5.3	Εσωτερική μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	81
6.5.4	Θερμοκρασίες σχεδιασμού για μη μονωμένες μεταλλικές δοκούς	83
7	ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΥΡΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΑΚΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ	85
7.1	Πεδίο εφαρμογής	85
7.2	Πείραμα FRACOF	85
7.2.1	Πειραματικό δοκίμιο	85
7.2.2	Μεθοδολογία του πειράματος	89
7.2.3	Αποτελέσματα	92
7.2.3.1	Μεταβολή θερμοκρασίας στην κατασκευή	92
7.2.3.2	Μετακινήσεις των δομικών στοιχείων	95
7.2.3.3	Συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας κατά τη διάρκεια του πειράματος	98
7.2.4	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του πειράματος	100
7.3	Πρόγραμμα πειράματος πυρκαγιάς COSSFIRE	101
7.3.1	Δοκίμιο του πειράματος	101
7.3.2	Μετρήσεις των αποτελεσμάτων του πειράματος	103
7.3.3	Τα βασικά αποτελέσματα του πειράματος	105
7.3.4	Παρατηρήσεις των πειραμάτων	108
7.4	Πείραμα πραγματικής κλίμακας σε σύμμικτη πλάκα με κυψελωτές δοκούς μεγάλου ανοίγματος	112
7.4.1	Πειραματικό δοκίμιο	112
7.4.2	Φορτία σχεδιασμού	115
7.4.3	Σχεδιασμός της πυρκαγιάς	116
7.4.4	Εγκατάσταση οργάνων μέτρησης	116
7.4.5	Μετατόπιση δοκού / πλάκας	117
7.4.6	Δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης σε πλάκες	124
7.4.7	Συμπεράσματα	125
8	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	126
8.1	Πεδίο εφαρμογής	126
8.2	Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου ANSYS στο πείραμα FRACOF	126
8.2.1	Γενικά	126
8.2.2	Δομική ανάλυση	126
8.2.3	Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας	127
8.2.4	Μηχανική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων	129

8.3	Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου SAFIR σε πειράματα πυρκαγιάς	131
8.3.1	Γενικά	131
8.3.2	Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα FRACOF	131
8.3.2.1	Πυροθερμικό φορτίο	131
8.3.2.2	Θερμικές αναλύσεις: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα	132
8.3.2.3	Δομική ανάλυση	135
8.3.3	Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα COSSFIRE	136
8.3.3.1	Πυροθερμικό φορτίο	136
8.3.3.2	Θερμική ανάλυση: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα	137
8.3.3.3	Δομική ανάλυση	140
8.3.4	Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα FIBER	142
8.3.4.1	Πυροθερμικό φορτίο	142
8.3.4.2	Θερμική ανάλυση: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα	142
8.3.4.3	Δομική ανάλυση	145
8.4	Παραμετρική μελέτη με χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου	148
8.4.1	Εισαγωγή δεδομένων για την παραμετρική μελέτη	148
8.4.2	Εισαγωγή δεδομένων για την παραμετρική μελέτη	155
8.4.2.1	Μέγιστη βύθιση της πλάκας	155
8.4.2.2	Επιμήκυνση του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης	159
8.5	Συμπεράσματα	165
9	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	165

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πειράματα πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες και οι παρατηρήσεις πάνω σε πραγματικές πυρκαγιές κτιρίων έχουν δείξει ότι τα κτίρια με σύμμικτο μεταλλικό σκελετό παρουσιάζουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά στην πυρκαγιά σε σχέση με τις ενδείξεις των πειραμάτων πυραντοχής για μεμονωμένα στοιχεία. Είναι γεγονός ότι τα σύγχρονα κτίρια με μεταλλικό σκελετό παρουσιάζουν μεγάλα αποθέματα πυραντοχής, ενώ τα πρότυπα πειράματα πυραντοχής σε αυτόνομα, μη περιορισμένα μέλη δεν αποτελούν ικανοποιητικό δείκτη για τη συμπεριφορά αυτών των κατασκευών απέναντι σε πυρκαγιά.

Τα αποτελέσματα της παρατήρησης και της ανάλυσης του πειράματος πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας BRE Cardington, που πραγματοποιήθηκε μεταξύ 1995 και 1996, οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού, η οποία βασίζεται στη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης της σύμμικτης πλάκας χάλυβα-σκυροδέματος και η οποία επιτρέπει στους μελετητές να επωφελούνται από την εγγενή πυραντοχή της σύμμικτης πλάκας έδρασης, χωρίς να καταφεύγουν στη σύνθετη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της συνολικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου. Ωστόσο, οι περισσότεροι μηχανικοί και οι Ρυθμιστικές Αρχές δεν είναι ακόμα εξοικειωμένοι με αυτή την πρωτοποριακή ιδέα σχεδίασης, εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Ως εκ τούτου, το παρόν τεχνικό έγγραφο έχει συνταχθεί με σκοπό να παρέχει όλες τις απαραίτητες σχετικές πληροφορίες, ώστε να γίνει εύκολα κατανοητή στον αναγνώστη η βάση των προτάσεων της παραπάνω απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού.

Το παρόν τεχνικό έγγραφο περιγράφει τη θεωρητική βάση της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού και την εξέλιξή της για εφαρμογή στη μηχανική πυρασφάλειας. Επίσης, στο παρόν έγγραφο πραγματοποιείται μια σημαντική επισκόπηση των σχετικών πειραμάτων πυρκαγιάς που έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως σε κτίρια πραγματικής κλίμακας και συνοψίζονται τα δεδομένα των πειραμάτων αυτών. Εξίσου, παρουσιάζονται οι πληροφορίες που έχουν προκύψει από την παρατήρηση της συμπεριφοράς πολυώροφων κτιρίων σε τυχηματικές πυρκαγιές. Παράλληλα, επεξηγούνται λεπτομερώς τα νέα πειράματα πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας σε σύμμικτα συστήματα πλακών, τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO μεγάλης διάρκειας, και τα οποία προσφέρουν περισσότερα στοιχεία για την εγκυρότητα της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού. Τέλος, η συντηρητικότητα του μοντέλου επιδεικνύεται σαφώς μέσα από τη σύγκριση με τη παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια προηγμένων υπολογιστικών μοντέλων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πειράματα πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες και οι παρατηρήσεις πάνω σε πραγματικές πυρκαγιές κτιρίων έχουν δείξει ότι τα κτίρια με μεταλλικό σκελετό με σύμμικτες πλάκες (πλάκες σκυροδέματος συνδεδεμένες με μεταλλικές δοκούς με ήλους διάτμησης) παρουσιάζουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά στην πυρκαγιά σε σχέση με τις ενδείξεις των πειραμάτων πυραντοχής σε σύμμικτες πλάκες ή σύμμικτες δοκούς ως μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Είναι γεγονός ότι τα σύγχρονα κτίρια με μεταλλικό σκελετό παρουσιάζουν μεγάλα αποθέματα πυραντοχής, ενώ τα πρότυπα πειράματα πυραντοχής σε αυτόνομα, μη περιορισμένα μέρη δεν αποτελούν ικανοποιητικό δείκτη για τη συμπεριφορά αυτών των κατασκευών απέναντι σε πυρκαγιά.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι η εξαιρετική συμπεριφορά στην πυρκαγιά οφείλεται στην ανάπτυξη της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης στην πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και στην αλυσιδωτή δράση των μεταλλικών δοκών.

Το αποτέλεσμα των παραπάνω παρατηρήσεων και της ανάλυσης ήταν η δημιουργία μιας νέας ιδέας σχεδίασης για την πυρκαγιά σε σύγχρονα πολυώροφα κτίρια με μεταλλικό σκελετό στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ο οδηγός σχεδίασης και τα εργαλεία σχεδίασης λογισμικού για τις σύμμικτες πλάκες έδρασης που βασίστηκαν σε αυτή τη μέθοδο παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 2000. Έκτοτε, πολλά κτίρια στο Ηνωμένο Βασίλειο έχουν επωφεληθεί από την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου σχεδίασμου, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους πυροπροστασίας⁽⁹⁾.

Αυτός ο τρόπος σχεδιασμού επιτρέπει στους μελετητές να επωφεληθούν από τη συνολική συμπεριφορά ενός κτιρίου σε πυρκαγιά, καθώς επιτρέπει να παραμένουν μη μονωμένα κάποια μέρη, ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται τα επίπεδα ασφαλείας που προβλέπονται για τις πλήρως πυροπροστατευμένες κατασκευές. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού επιτρέπει την εκτίμηση της πυραντοχής των μερικώς πυροπροστατευμένων σύμμικτων πλακών όταν εκτίθενται σε πυρκαγιές από φυσικά αίτια ή σε πρότυπες πυρκαγιές. Η τελευταία παρατήρηση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνάγεται ότι αυτός ο τρόπος σχεδιασμού μπορεί να εφαρμοστεί από τους μελετητές χωρίς να είναι απαραίτητες εξειδικευμένες γνώσεις στη μηχανική πυρασφάλειας.

Η ενίσχυση της πυραντοχής που οφείλεται στη μεμβράνη σταθεροποίησης και στην αλυσιδωτή δράση, παρόλο που χρησιμοποιείται ευρέως στο Ηνωμένο Βασίλειο, αποτελεί ακόμα νέα ιδέα για τους περισσότερους μηχανικούς και τις Ρυθμιστικές Αρχές στην Ευρώπη. Το παρόν έγγραφο έχει ως στόχο να αποτελέσει ένα αξιόπιστο πακέτο τεχνικής υποστήριξης αυτού του τρόπου σχεδιασμού, προς πληροφόρηση των δυνητικών ομάδων χρήσης. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει:

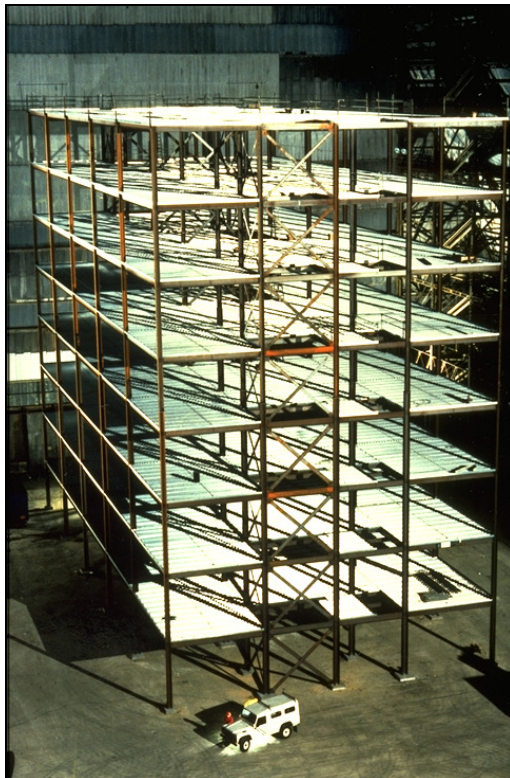
- επισκόπηση των διαθέσιμων στοιχείων για τη συμπεριφορά των σύμμικτων κατασκευών σε πειράματα πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας και τυχηματικές πυρκαγιές κτιρίων,
- λεπτομερή επεξήγηση της θεωρητικής βάσης της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού σε σύμμικτα συστήματα πλακών με στήριξη απλών προφίλ διατομών και κυψελωτών δοκών,

- περιγραφή των βασικών παραδοχών που υιοθετούνται από την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού για την εκτίμηση της πυραντοχής σύμμικτων συστημάτων πλακών χάλυβα-σκυροδέματος,
- λεπτομέρειες του πειράματος επίδειξης σε σύμμικτα συστήματα πλακών χάλυβα-σκυροδέματος πραγματικής κλίμακας με χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου κατά EN 1365-2, για διάρκεια μεγαλύτερη των 120 λεπτών και
- λεπτομερή παραμετρική εξέταση για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού.

2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ CARDINGTON

2.1 Το ερευνητικό πρόγραμμα

Τον Σεπτέμβριο του 1996 στο Ηνωμένο Βασίλειο ολοκληρώθηκε ένα πρόγραμμα πειραμάτων πυρκαγιάς του Ερευνητικού Κέντρου του Εργαστηρίου Cardington. Μια σειρά από πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κτίριο οκτώ ορόφων με σύμμικτο μεταλλικό σκελετό, το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με βάση τις προδιαγραφές ενός τυπικού πολυώροφου κτιρίου γραφείων. Σκοπός αυτών των πειραμάτων ήταν η εξέταση της συμπεριφοράς μιας πραγματικής κατασκευής σε συνθήκες πραγματικής πυρκαγιάς και η συλλογή δεδομένων τα οποία θα επέτρεπαν την επαλήθευση υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των κατασκευών.

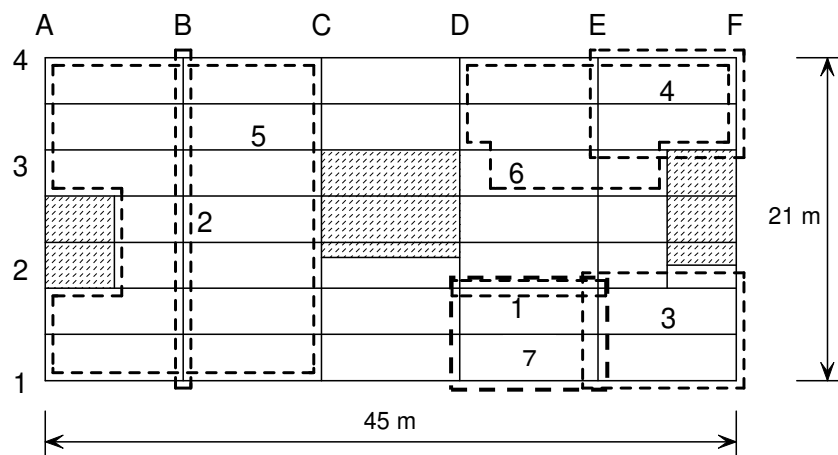


Σχήμα 2.1 Το κτίριο του πειράματος Cardington πριν από τη σκυροδέτηση της πλάκας

Το κτίριο του πειράματος (βλ. Σχήμα 2.1.) σχεδιάστηκε με βάση τις τυπικές προδιαγραφές μιας πλευρικός αντιστηριζόμενης κατασκευής και τα αντίστοιχα τυπικά επίπεδα φορτίου για τα κτίρια αυτού του είδους στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το κτίριο καταλάμβανε εμβαδό 21,00 m x 45,00 m και είχε συνολικό ύψος 33,00 m. Οι δοκοί σχεδιάστηκαν να είναι απλά εδραζόμενες και να δρουν σύμμικτα με την πλάκα πάχους 130 mm. Υπό κανονικές συνθήκες, η πυραντοχή κτιρίου αυτού του είδους απαιτείται να είναι 90 λεπτά. Για τις συνδέσεις δοκού σε δοκό χρησιμοποιήθηκαν αρθρωτές συνδέσεις ελάσματος περυγίου (ελάσματα παράλληλα στον κορμό), ενώ για τις συνδέσεις δοκού σε στύλο χρησιμοποιήθηκαν ημιάκαμπτες συνδέσεις ακραίου ελάσματος (ελάσματα κάθετα στον κορμό). Η

κατασκευή έφερε φορτίο με τη μορφή σάκων άμμου που κατανεμήθηκαν σε κάθε όροφο, ως προσομοίωση του τυπικού φορτίου γραφείου.

Το ερευνητικό πρόγραμμα αποτελούταν από δύο έργα. Το πρώτο χρηματοδοτήθηκε από την Corus (πρώην British Steel) και την ECSC (European Coal and Steel Community). Το δεύτερο χρηματοδοτήθηκε από την Κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου μέσω της BRE (Building Research Establishment). Άλλοι οργανισμοί που συμμετείχαν στο ερευνητικό πρόγραμμα ήταν το Πανεπιστήμιο του Σέφιλντ (Sheffield University), η TNO (Ολλανδία), η CTICM (Γαλλία) και το Βρετανικό Ινστιτούτο Κατασκευής Χάλυβα (The Steel Construction Institute). Τα πειράματα πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκαν μεταξύ Ιανουαρίου 1995 και Ιουλίου 1996. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους ορόφους. Η τοποθεσία κάθε πειράματος απεικονίζεται στην κάτωψη στο Σχήμα 2.2.



- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Restrained beam (ECSC) | 4. Corner (BRE) |
| 2. Plane frame (ECSC) | 5. Large compartment (BRE) |
| 3. Corner (ECSC) | 6. Office demonstration (ECSC) |
| 7. Central compartment (CTU) | |

Σχήμα 2.2 Τοποθεσίες πειράματος

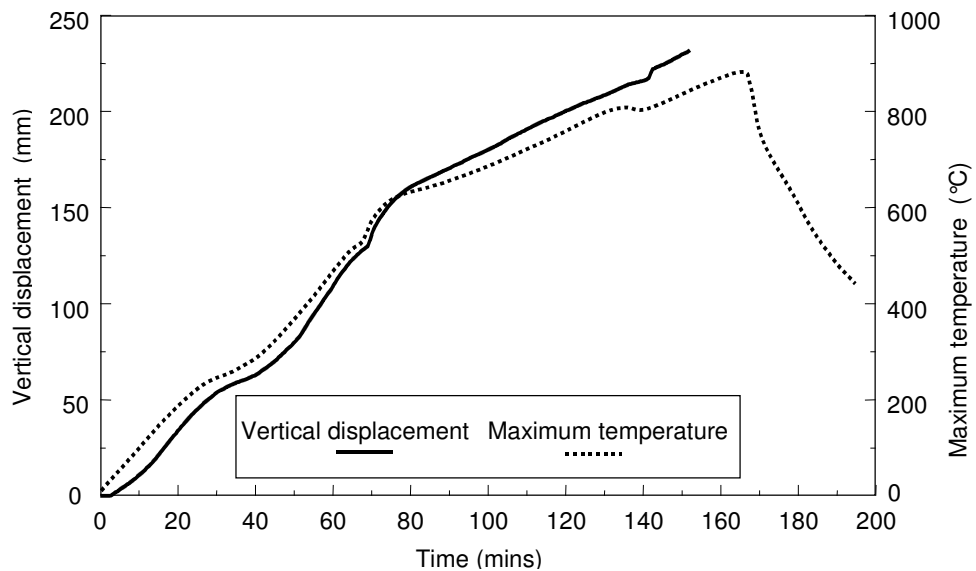
Το Πείραμα 1 αφορούσε μια μεμονωμένη δευτερεύουσα δοκό και την περιβάλλουσα πλάκα, η οποία θερμάνθηκε με κλίβανο καύσης αερίου που κατασκευάστηκε για το πείραμα. Στο Πείραμα 2, το οποίο πραγματοποιήθηκε σε ένα επίπεδο πλαίσιο κατά μήκος του κτιρίου σε έναν όροφο, η θερμότητα επίσης προκλήθηκε με χρήση αερίου. Το Πείραμα 2 αφορούσε τις κύριες δοκούς και τους αντίστοιχους στύλους. Στα Πειράματα 3, 4 και 5, διαμερίσματα διαφόρων μεγεθών εκτέθηκαν το κάθε ένα σε πυρκαγιά από φυσικά αίτια, η οποία πυροδοτήθηκε από ξύλινα σανίδια. Οι στύλοι σε αυτά τα πειράματα ήταν μονωμένοι ως την κάτω πλευρά της πλάκας, ενώ οι δοκοί και η πλάκα παρέμειναν μη μονωμένες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Το Πείραμα 6 ήταν μια επίδειξη στην οποία ως πυροθερμικό φορτίο χρησιμοποιήθηκαν μεταχειρισμένα έπιπλα και άλλα αντικείμενα τυπικά των σύγχρονων γραφείων, προκαλώντας την πιο σοβαρή πυρκαγιά.

Η λεπτομερής περιγραφή των πειραμάτων αυτών έχει δημοσιευτεί⁽⁹⁾. Όλα τα δεδομένα των πειραμάτων σε ηλεκτρονική μορφή με συμπληρωματικούς χάρτες θέσης των οργάνων μέτρησης είναι διαθέσιμα από την Corus RD&T (Swinden Technology Centre) για τα Πειράματα 1, 2, 3 και 6 και την BRE^(3,4) για τα Πειράματα 4 και 5.

2.2 Πείραμα 1: Δεσμευμένη δοκός

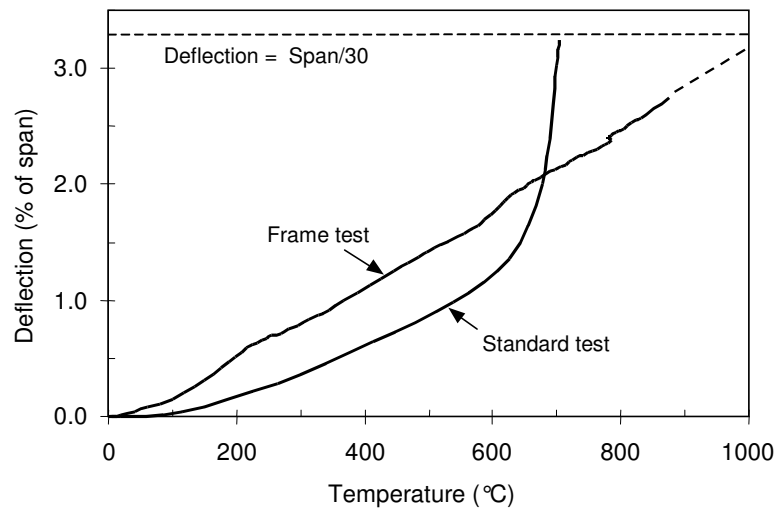
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον έβδομο όροφο του κτιρίου. Για το πείραμα κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε κλίβανος καύσης αερίου, με διαστάσεις 8 m μήκος και 3 m πλάτος, ώστε να θερμάνει τη δευτερεύουσα δοκό (D2/E2) που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στύλους και τμήμα της περιβάλλουσας κατασκευής. Η δοκός, συνολικού μήκους 9 m, θερμάνθηκε στα μέσα των 8 m, ώστε οι συνδέσεις να παραμείνουν σχετικά ψυχρές. Σκοπός του πειράματος ήταν η εξέταση της συμπεριφοράς της θερμαινόμενης δοκού, η οποία περιβάλλεται από μη θερμαινόμενη πλάκα και η μελέτη των συνεπειών της δέσμευσης των μη θερμαινόμενων τμημάτων της κατασκευής.

Η δοκός θερμάνθηκε με θερμοκρασία μεταξύ 3 και 10°C ανά λεπτό ώσπου η καταγεγραμμένη θερμοκρασία να προσεγγίζει τους 900°C. Στη μέγιστη θερμοκρασία, 875°C στο κάτω πέλαμα, η βύθιση στο μέσο του ανοίγματος ήταν 232 mm (άνοιγμα / 39) (βλ. Σχήμα 2.3). Κατά την ψύξη, η βύθιση στο μέσο του ανοίγματος ανέκαμψε στα 113 mm.



Σχήμα 2.3 Μετατόπιση στο μέσο και μέγιστη θερμοκρασία στο πείραμα δεσμευμένης δοκού

Η αντίθεση στη συμπεριφορά αυτής της δοκού και μιας παρόμοιας μη μονωμένης δοκού σε πειράματα πρότυπης πυρκαγιάς με το ίδιο φορτίο⁽⁵⁾ απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Η απότομη μετατόπιση που παρουσιάζουν τυπικά οι απλά εδραζόμενες δοκοί σε πρότυπα πειράματα, δεν παρουσιάστηκε στη δοκό στο σκελετό του κτιρίου παρόλο που, σε θερμοκρασία που προσεγγίζει τους 900°C, ο δομικός χάλυβας διατηρεί μόνο περίπου 6% του ορίου διαρροής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.4 Μετατόπιση στο μέσο και μέγιστη θερμοκρασία στο πείραμα πρότυπης πυρκαγιάς και στο πείραμα δεσμευμένης δοκού

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός στα δύο άκρα της δοκού, εντός των τοιχωμάτων του κλιβάνου (βλ. Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Λυγισμός του πέλματος στη δεσμευμένη δοκό

Η οπτική εξέταση της δοκού μετά από το πείραμα έδειξε ότι οι ημιάκαμπτες συνδέσεις ακραίου ελάσματος (έλασμα κάθετο στον κορμό) στα δύο άκρα της δοκού παρουσίασαν θραύσεις κοντά, αλλά στο εξωτερικό της τμήμα, στη ζώνη που επηρεάστηκε από τη θερμότητα στη συγκόλληση στη μία πλευρά της δοκού. Η θραύση αυτή προκλήθηκε από τη θερμική συστολή της δοκού κατά τη διάρκεια της ψύξης, όταν εμφανίστηκαν πολύ ισχυρές δυνάμεις εφελκυσμού. Παρόλο που η πλάκα αστόχησε από διάτμηση στη μια πλευρά, ο μηχανισμός αυτός ανακούφισε

τις εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις, ενώ η πλάκα στην άλλη πλευρά της δοκού διατήρησε την ακεραιότητά της, προσφέροντας διατμητική ικανότητα στη δοκό. Η θραύση της δοκού προσδιορίστηκε από τις μετρήσεις του μετρητή ανηγμένης παραμόρφωσης, ο οποίος έδειξε ότι κατά τη διάρκεια της ψύξης η ρωγμή δημιουργήθηκε σταδιακά με την πάροδο του χρόνου και όχι εξαιτίας μιας απότομης θραύσης.

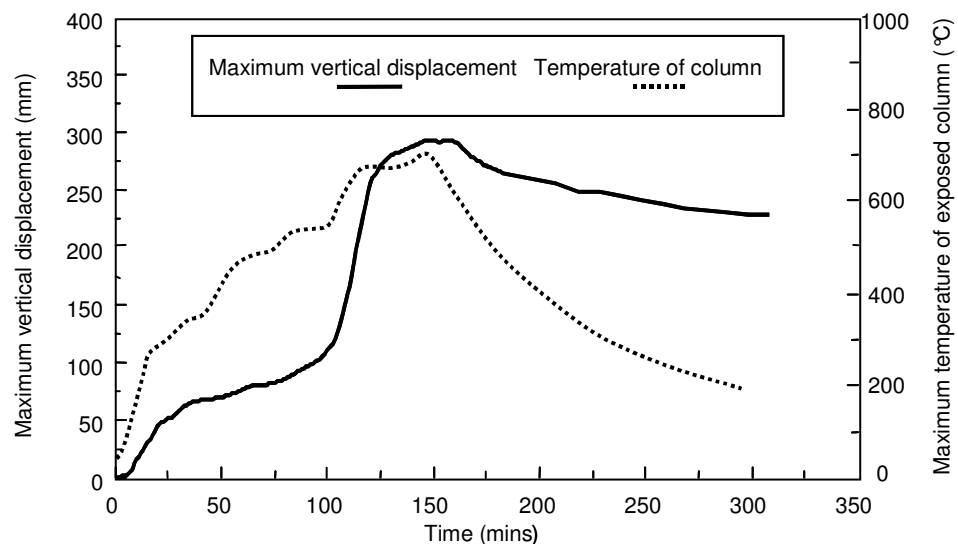
2.3 Πείραμα 2: Επίπεδο πλαίσιο

Αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο πλαίσιο που αποτελούταν από τέσσερις στύλους και τρεις κύριες δοκούς με άνοιγμα σε όλο το πλάτος του κτιρίου στη γραμμή πλέγματος Β, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Ένας κλίβανος καύσης αερίου με διαστάσεις 21 m μήκος x 2,5 m πλάτος x 4 m ύψος κατασκευάστηκε με τσιμεντόλιθους σε όλο το πλάτος του κτιρίου.

Οι κύριες και δευτερεύουσες δοκοί, όπως και η κάτω πλευρά της σύμμικτης πλάκας, δεν μονώθηκαν. Οι στύλοι ήταν μονωμένοι ως το ύψος στο οποίο θα μπορούσε να τοποθετηθεί ψευδοροφή (παρόλο που δεν υπήρχε ψευδοροφή στο πείραμα). Κατά συνέπεια, το άνω τμήμα 800 mm των στύλων, που περιλάμβανε τις συνδέσεις, παρέμεινε απροστάτευτο.

Ο ρυθμός της κατακόρυφης βύθισης στο μέσο του ανοίγματος της μεταλλικής δοκού με άνοιγμα 9,00 m αυξήθηκε ταχέως μεταξύ περίπου των 110 και 125 λεπτών (βλ. Σχήμα 2.6). Αυτό οφείλεται στην κατακόρυφη μετατόπιση των στύλων υποστήριξης. Οι εκτεθειμένες περιοχές των εσωτερικών στύλων συνθλίφθηκαν κατά περίπου 180 mm (βλ. Σχήμα 2.7). Η θερμοκρασία στο εκτεθειμένο τμήμα του στύλου ήταν περίπου 670°C όταν εμφανίστηκε τοπικός λυγισμός.



Σχήμα 2.6 Μέγιστη κατακόρυφη βύθιση της κεντρικής δοκού μήκους 9,00 m και θερμοκρασία του εκτεθειμένου άνω τμήματος στον εσωτερικό στύλο

Η μείωση του ύψους του στύλου εξαιτίας του τοπικού λυγισμού προκάλεσε μόνιμη παραμόρφωση κατά 180 mm σε όλους τους ορόφους πάνω από το πυροδιαμέρισμα του πειράματος. Προς αποφυγή αυτής της συμπεριφοράς, στα επόμενα πειράματα οι στύλοι ήταν προστατευμένοι σε όλο το ύψος τους.



Σχήμα 2.7 Συνθλιμμένη κεφαλή σύλου μετά από το πείραμα

Και στις δύο πλευρές των κύριων δοκών, οι δευτερεύουσες δοκοί θερμάνθηκαν η κάθε μία σε μήκος περίπου 1 m. Μετά από το πείραμα, η εξέταση έδειξε ότι πολλοί από τους κοχλίες των συνδέσεων πτερυγωτών ελασμάτων (ελάσματα παράλληλα στον κορμό) αστόχησαν από διάτμηση (βλ. Σχήμα 2.8). Οι κοχλίες αστόχησαν από διάτμηση μόνο στη μία πλευρά της κύριας δοκού. Με τρόπο παρόμοιο όπως στη θραύση της πλάκας στο Πείραμα 1, οι κοχλίες αστόχησαν από διάτμηση εξαιτίας της θερμικής συστολής της δοκού κατά τη διάρκεια της ψύξης. Η θερμική συστολή προκάλεσε πολύ ισχυρές δυνάμεις εφελκυσμού, οι οποίες εκτονώθηκαν όταν οι κοχλίες αστόχησαν από διάτμηση στις συνδέσεις πτερυγωτών ελασμάτων (ελάσματα παράλληλα στον κορμό) στη μία πλευρά της κύριας δοκού.



Σχήμα 2.8 Σύνδεση πτερυγωτών ελασμάτων (ελάσματα παράλληλα στον κορμό) μετά από το πείραμα

2.4 Πείραμα 3: Γωνιακό Πυροδιαμέρισμα

Σκοπός αυτού του πειράματος ήταν η εξέταση της συμπεριφοράς ενός ολοκληρωμένου συστήματος πλάκας και συγκεκριμένα του ρόλου της γεφύρωσης

ή της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης της πλάκας στο να προσφέρει εναλλακτικές διαδρομές φορτίου καθώς οι υποστηρίζουσες δοκοί εξασθενούν. Με τη χρήση τσιμεντότουβλων κατασκευάστηκε ένα διαμέρισμα διαστάσεων 10 m πλάτος x 7,6 m βάθος σε μία γωνία του πρώτου ορόφου του κτιρίου (E2/F1).

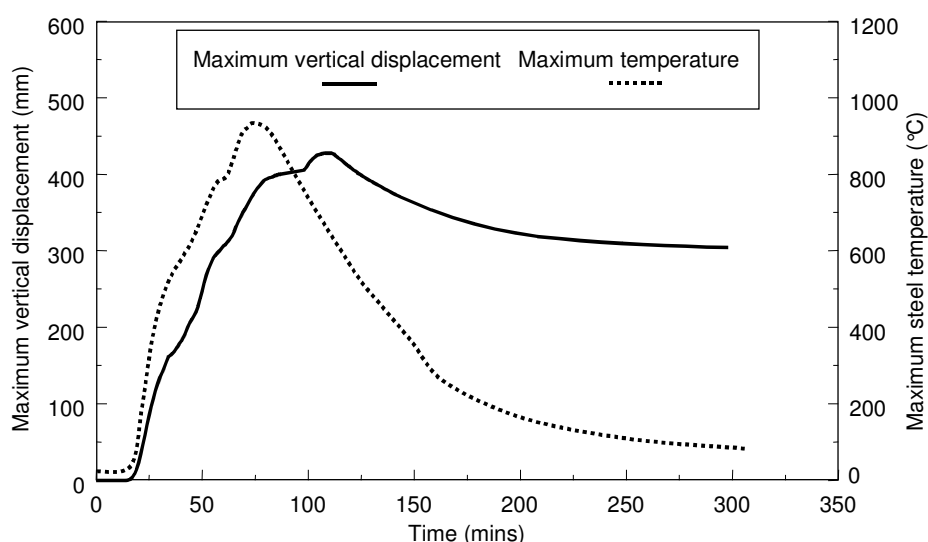
Για να διασφαλιστεί ότι οι τοίχοι του διαμερίσματος δεν συνεισέφεραν στην υποστήριξη του φορτίου του πειράματος, αφαιρέθηκαν όλες οι δεσμεύσεις και οι αγκυρώσεις στο μετωπικό τοίχο και στο άνω στρώμα των τσιμεντότουβλων. Η ινώδης τεχνητή πλάκα στους αρμούς διαστολής αντικαταστάθηκε από κεραμικό μανδύα.

Ομοίως, οι ορθοστάτες αντιστήριξης στον εξωτερικό τοίχο αποκολλήθηκαν από την ακραία δοκό πάνω από το άνοιγμα του διαμερίσματος, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι η ακραία δοκός δεν είχε πρόσθετη υποστήριξη.

Όλοι οι στύλοι, οι συνδέσεις δοκού σε στύλο και οι ακραίες δοκοί ήταν μονωμένες.

Το πυροθερμικό φορτίο ήταν 45 kg/m^2 , με τη μορφή ξύλινων σανιδιών. Αυτό το πυροθερμικό φορτίο είναι πολύ υψηλό και ισοδυναμεί με το 95% του πιθανοτικού φορτίου σε κτίρια γραφείων. Οι υπολογισμοί της μηχανικής πυρασφάλειας συνήθως βασίζονται στο 80% του πιθανοτικού φορτίου. Ο αερισμός στο πείραμα προερχόταν από ένα μοναδικό άνοιγμα με διαστάσεις 6,6 m πλάτος x 1,8 m ύψος. Η ανώτατη θερμοκρασία περιβάλλοντος που καταγράφηκε στο διαμέρισμα ήταν 1071°C .

Η μέγιστη θερμοκρασία του μετάλλου ήταν 1014°C , η οποία καταγράφηκε στην εσωτερική δοκό της γραμμής πλέγματος 2 (E2/F2). Η μέγιστη κατακόρυφη βύθιση των 428 mm (λίγο μικρότερη από άνοιγμα / 20) παρατηρήθηκε στο κέντρο της δευτερεύουσας δοκού, που παρουσίασε ανώτατη θερμοκρασία 954°C . Κατά τη διάρκεια της ψύξης, αυτή η δοκός ανέκαμψε σε μόνιμη μετατόπιση 296 mm. Οι μεταβολές της μετατόπισης και της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Μέγιστη κατακόρυφη βύθιση και θερμοκρασία της δευτερεύουσας δοκού

Η πυρκαγιά κατανάλωσε όλο το καύσιμο υλικό μέσα στο διαμέρισμα. Η συμπεριφορά της κατασκευής στην πυρκαγιά ήταν εξαιρετικά θετική, χωρίς να παρουσιαστούν ενδείξεις κατάρρευσης. (βλ. Σχήμα 2.10).

Παρατηρήθηκε λυγισμός κοντά σε ορισμένες συνδέσεις δοκού σε στύλο, αλλά σε αντίθεση με το Πείραμα 2, οι κοιλίες των συνδέσεων δεν αστόχησαν από διάτμηση. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι είτε δεν αναπτύχθηκαν ισχυρές δυνάμεις εφελκυσμού είτε η σύνδεση είχε επαρκή ολκιμότητα ώστε να αντισταθεί στις μετατοπίσεις εξαιτίας του εφελκυσμού.



Σχήμα 2.10 Όψη της κατασκευής μετά από το πείραμα

2.5 Πείραμα 4: Γωνιακό Πυροδιαμέρισμα

Αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον δεύτερο όροφο του κτιρίου, σε γωνιακό άνοιγμα (E4/F3) επιφάνειας 54 m^2 . Τα εσωτερικά όρια του διαμερίσματος στις γραμμές πλέγματος E και 3 κατασκευάστηκαν από μεταλλικούς στύλους ελαφριάς κατασκευής με πυράντοχη θερμομόνωση. Οι μεταλλικοί στύλοι προβλέφτηκε να έχουν πυράντοχη 120 λεπτών, με μετατόπιση κεφαλής 15 mm. Ο ήδη υπάρχων τοίχος από τσιμεντότουβλα λειτούργησε ως μετωπικός τοίχος στη γραμμή πλέγματος F. Ο εξωτερικός τοίχος, στη γραμμή πλέγματος 4, συμπληρώθηκε με υαλοπίνακα πάνω από τα τσιμεντότουβλα που έφταναν σε ύψος 1 m. Το διαμέρισμα ήταν ολοκληρωτικά κλειστό, με κλειστούς όλους τους υαλοπίνακες και τις θύρες. Οι στύλοι ήταν μονωμένοι ως την κάτω πλευρά της πλάκας, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων, αλλά σε αντίθεση με το Πείραμα 3 η δοκός πρέκι (E4/F4) ήταν μονωμένη και οι ορθοστάτες αντιστήριξης τοίχου πάνω από τη δοκό διατηρήθηκαν στη θέση τους. Δώδεκα ξύλινα σανίδια χρησιμοποιήθηκαν ως πυροθερμικό φορτίο 40 kg/m^2 .

Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από την έλλειψη οξυγόνου μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Μετά από την αρχική άνοδο της θερμοκρασίας, η πυρκαγιά εξασθένησε και συνέχισε να καίει με χαμηλή ένταση ώσπου, μετά από 55 λεπτά, παρενέβη το πυροσβεστικό σώμα, ανοίγοντας κανάλι αερισμού στο διαμέρισμα με την αφαίρεση ενός μοναδικού υαλοπίνακα. Ακολούθησε μικρή άνοδος της θερμοκρασίας και στη συνέχεια πτώση. Ένας δεύτερος υαλοπίνακας πάνω από τον πρώτο έσπασε στα 64 λεπτά και η

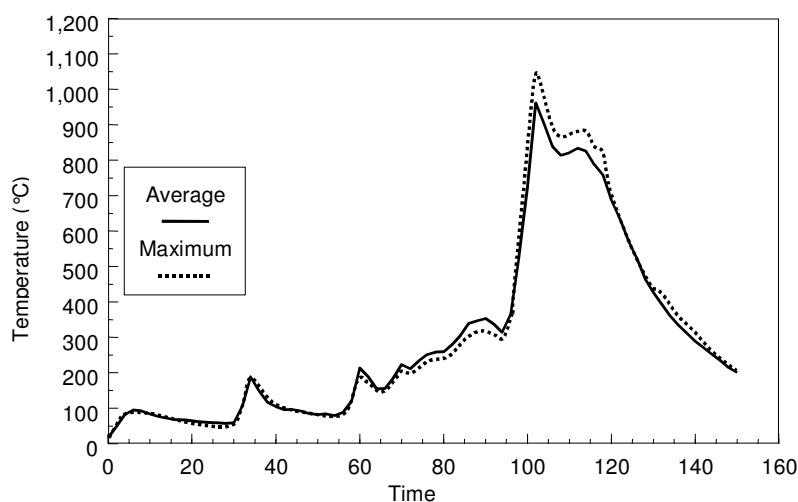
θερμοκρασία άρχισε να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Μεταξύ 94 και 100 λεπτών έσπασαν και οι υπόλοιποι υαλοπίνακες. Αυτό προκάλεσε απότομη άνοδο της θερμοκρασίας η οποία συνεχίστηκε με την ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Η μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο μέσο του διαμερίσματος ήταν 1051°C μετά από 102 λεπτά (βλ. Σχήμα 2.11). Η μέγιστη θερμοκρασία του μετάλλου ήταν 903°C και καταγράφηκε μετά από 114 λεπτά στο κάτω πέλαμα της κεντρικής δευτερεύουσας δοκού.

Η μέγιστη βύθιση της πλάκας ήταν 269 mm και παρατηρήθηκε στο μέσο του διαμερίσματος μετά από 130 λεπτά. Η μετατόπιση αυτή ανέκαμψε σε 160 mm μετά από την πυρκαγιά.

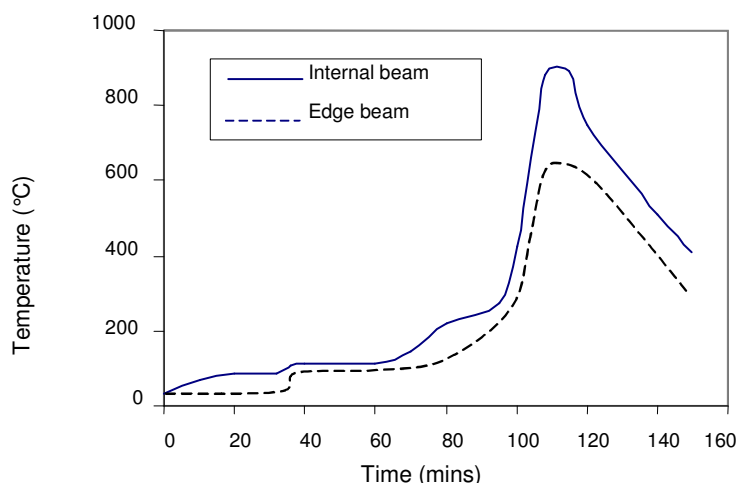
Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρατηρήθηκε ότι η μη μονωμένη ακραία δοκός στη γραμμή πλέγματος 4 περικλείστηκε ολοσχερώς από την πυρκαγιά. Εντούτοις, η μέγιστη θερμοκρασία της δοκού ήταν 680°C, δηλαδή σχετικά χαμηλή σε σχέση με τις εσωτερικές δοκούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Η αντίστοιχη μέγιστη βύθιση της ακραίας δοκού ήταν 52 mm και καταγράφηκε μετά από 114 λεπτά. Αυτή η μικρή μετατόπιση οφείλεται στην πρόσθετη υποστήριξη χάρη στους ορθοστάτες αντιστήριξης τοίχου πάνω από το διαμέρισμα, οι οποίοι έδρασαν εφελκυστικά κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Οι εσωτερικοί τοίχοι του διαμερίσματος κατασκευάστηκαν με μη μονωμένες δοκούς και επέδειξαν καλή συμπεριφορά στην πυρκαγιά. Η ακεραιότητά τους διατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Κατά την αφαίρεση του τοίχου, παρατηρήθηκε ότι μία από τις δοκούς υπέστη τοπικό λυγισμό σχεδόν σε όλο το μήκος της. Αυτό προκλήθηκε από τη μεγάλη θερμική ανομοιομορφία στη διατομή της δοκού (εξαιτίας της θέσης του τοίχου του διαμερίσματος) σε συνδυασμό με τις πολλές δεσμεύσεις της θερμικής διαστολής.

Δεν παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός σε καμία από τις δοκούς, ενώ οι συνδέσεις δεν επέδειξαν καμία χαρακτηριστική ένδειξη ανάπτυξης ισχυρών δυνάμεων εφελκυσμού, οι οποίες παρατηρήθηκαν κατά την ψύξη στα άλλα πειράματα.



Σχήμα 2.11 Θερμοκρασίες του κλίβανου καύσης αερίου που καταγράφηκαν στο Πείραμα 4



Σχήμα 2.12 Μέγιστη θερμοκρασία πέλματος της εσωτερικής δοκού και της ακραίας δοκού

2.6 Πείραμα 5: Μεγάλο Πυροδιαμέρισμα

Αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου ορόφου του κτιρίου με το πυροδιαμέρισμα να εκτείνεται σε όλο το πλάτος του κτιρίου, καλύπτοντας επιφάνεια 340 m².

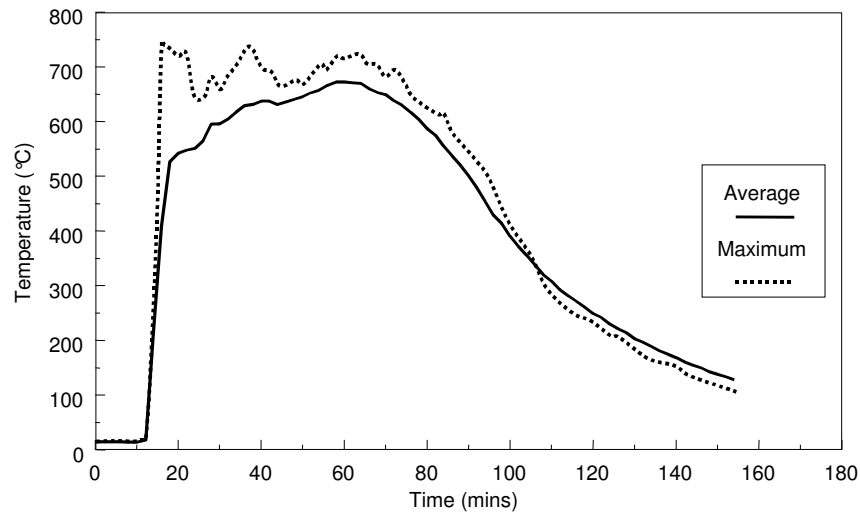
Το πυροθερμικό φορτίο 40 kg/m² παρείχαν ξύλινα σανίδια ομοιόμορφα κατανομημένα στην επιφάνεια της πλάκας. Το διαμέρισμα δημιουργήθηκε με την κατασκευή μονωμένων ορθοστατών και διαχωριστικού τοίχου γυψοσανίδας σε όλο το πλάτος του κτιρίου, ενώ κατασκευάστηκε πρόσθετη προστασία για τον χώρο του ανελκυστήρα. Στις δύο πλευρές του κτιρίου τοποθετήθηκε διπλός υαλοπίνακας, ενώ το μεσαίο τρίτο κάθε πλευράς υαλοπίνακα παρέμεινε ανοιχτό. Οι εσωτερικοί και οι εξωτερικοί στύλοι ήταν μονωμένοι σε όλο το ύψος τους, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων.

Η σοβαρότητα της πυρκαγιάς εξαρτήθηκε από τις συνθήκες αερισμού. Σημειώθηκε αρχική απότομη άνοδος της θερμοκρασίας όταν ο υαλοπίνακας καταστράφηκε από την πυρκαγιά, δημιουργώντας μεγάλα ανοίγματα και στις δύο πλευρές του κτιρίου. Η εκτενής περιοχή αερισμού στις δύο απέναντι πλευρές του διαμερίσματος προκάλεσε πυρκαγιά μεγάλης διάρκειας, αλλά σε χαμηλότερες από τις αναμενόμενες θερμοκρασίες. Η μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 691°C και καταγράφηκε στο κέντρο του διαμερίσματος. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος που καταγράφηκαν στο διαμέρισμα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13. Η κατασκευή πριν από την εξάντληση της πυρκαγιάς εικονίζεται στο Σχήμα 2.14.

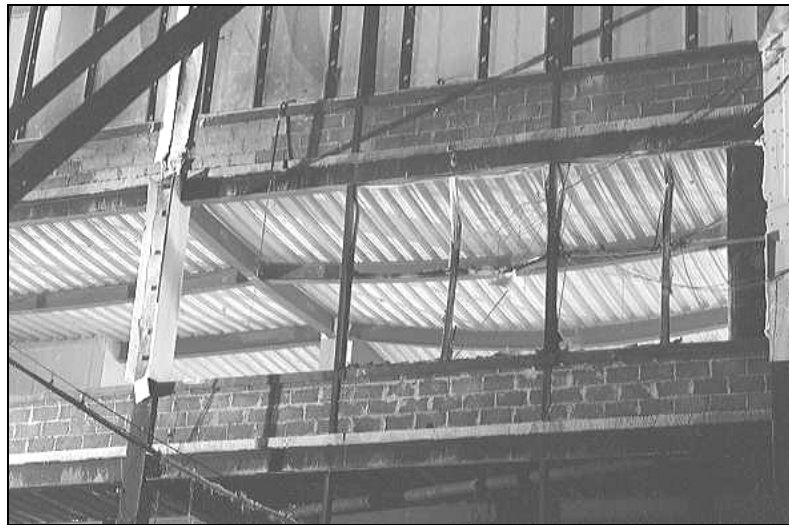
Η μέγιστη βύθιση της πλάκας άγγιξε την τιμή των 557 mm. Η βύθιση αυτή ανέκαμψε στα 481 mm μετά από την ψύξη της κατασκευής.

Εκτεταμένος τοπικός λυγισμός παρατηρήθηκε κοντά στις συνδέσεις δοκού με δοκό. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, κάποιες από τις ημιάκαμπτες συνδέσεις ακραίου ελάσματος (έλασμα κάθετο στον κορμό) υπέστησαν θραύση στη μία πλευρά τους. Σε μία περίπτωση ο κορμός αποκολλήθηκε από τη σύνδεση, με αποτέλεσμα να εκλείψει η διατηρητική ικανότητα της σύνδεσης δοκού με δοκό. Αυτό οδήγησε στην εμφάνιση μεγάλων ρωγμών στη σύμμικτη πλάκα πάνω από τη

σύνδεση, ενώ η διατμητική ικανότητα της δοκού συγκρατήθηκε από τη σύμμικτη πλάκα.



Σχήμα 2.13 Μέγιστη και μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος που καταγράφηκε



Σχήμα 2.14 Η παραμορφωμένη κατασκευή κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς

2.7 Πείραμα 6: Δοκιμή γραφείου

Σκοπός αυτού του πειράματος είναι η μελέτη της πραγματικής συμπεριφοράς της κατασκευής σε πραγματική υπόθεση πυρκαγιάς.

Κατασκευάστηκε διαμέρισμα με διαστάσεις 18 m πλάτος και βάθος ως 10 m με επιφάνεια 135 m² με τη χρήση τσιμεντόλιθων. Το διαμέρισμα αναπαριστούσε έναν ενιαίο γραφειακό χώρο και περιλάμβανε σειρά σταθμών εργασίας με σύγχρονα έπιπλα, υπολογιστές και συστήματα αρχειοθέτησης (βλ. Σχήμα 2.15). Οι συνθήκες του πειράματος ορίστηκαν έτσι ώστε να προκληθεί πολύ σοβαρή πυρκαγιά, με τη συμπληρωματική χρήση ξύλινων και πλαστικών σανιδιών, ώστε το συνολικό πυροθερμικό φορτίο να ανέρχεται σε 46 kg/m² (ποσοστό μικρότερο του 5% των γραφειακών χώρων είναι πιθανό να υπερβαίνουν αυτή την τιμή φορτίου), και με

ταυτόχρονο περιορισμό της επιφάνειας των υαλοπινάκων στην ελάχιστη επιτρεπτή σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς για τα κτίρια γραφείων. Η σύσταση του πυροθερμικού φορτίου αποτελούνταν από 69% ξύλο, 20% πλαστικό και 11% χαρτί. Η συνολική επιφάνεια των υαλοπινάκων ήταν 25,6 m² (ποσοστό 19% της επιφάνειας της πλάκας) και το κεντρικό τμήμα κάθε υαλοπίνακα, με συνολική επιφάνεια 11,3 m², διατηρήθηκε χωρίς υαλόφραξη, έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι περισσότερο δυσχερείς συνθήκες αερισμού στην αρχή του πειράματος.



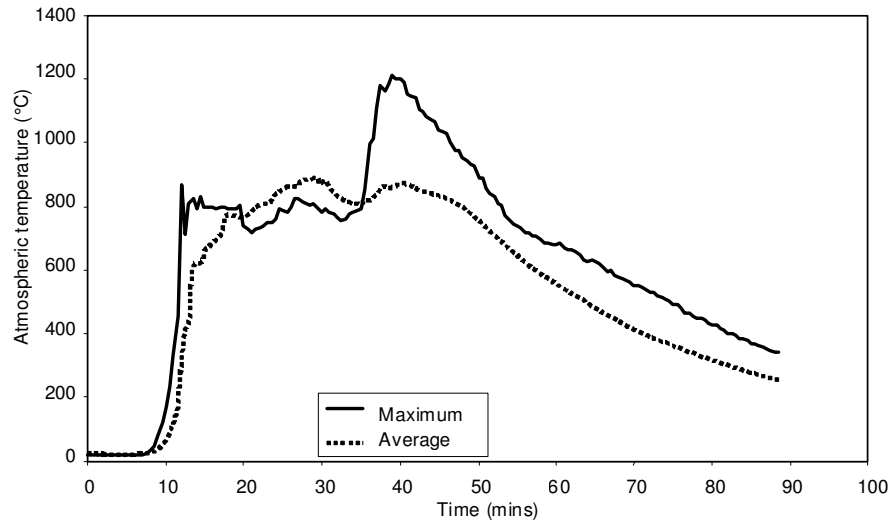
Σχήμα 2.15 Το γραφείο πριν από το πείραμα

Μέσα στο διαμέρισμα οι στύλοι και οι συνδέσεις δοκού σε στύλο ήταν μονωμένες. Τόσο οι κύριες όσο και οι δευτερεύουσες δοκοί, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων δοκού σε δοκό, παρέμειναν πλήρως εκτεθειμένες.

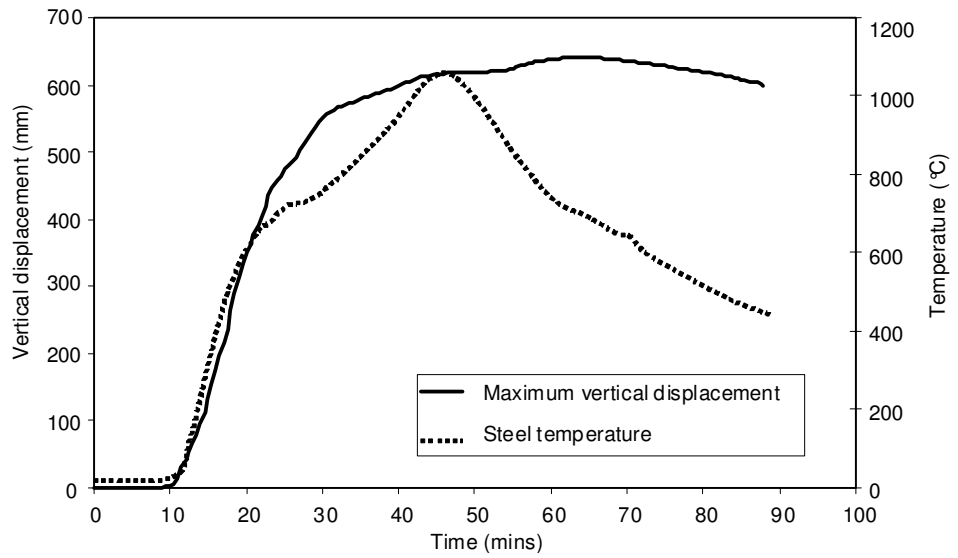
Οι ορθοστάτες αντιστήριξης τοίχου παρέμειναν συνδεδεμένοι στις ακραίες δοκούς και συνεπώς παρείχαν κάποια υποστήριξη κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 1213°C και η μέγιστη μέση θερμοκρασία ήταν περίπου 900°C, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Η μέγιστη θερμοκρασία του μη μονωμένου μετάλλου ήταν 1150°C. Η μέγιστη κατακόρυφη βύθιση ήταν 640 mm, η οποία ανέκαμψε σε μόνιμη παραμόρφωση 540 mm κατά τη διάρκεια της ψύξης (βλ. Σχήμα 2.17). Η ανώτατη θερμοκρασία στις δοκούς πρέκια, πάνω από τους υαλοπίνακες, ήταν 813°C. Όλο το καύσιμο υλικό εντός του διαμερίσματος κάηκε ολοσχερώς, συμπεριλαμβανομένου του περιεχομένου των ερμαρίων αρχειοθέτησης. Προς την πίσω όψη του διαμερίσματος, η πλάκα παραμορφώθηκε και εδράστηκε στον τοίχο των τσιμεντόλιθων. Η κατασκευή δεν παρουσίασε ενδείξεις αστοχίας.

Η εξωτερική όψη της πυρκαγιάς κατά τη μέγιστη ανάπτυξη της απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18. Η κατασκευή μετά από την πυρκαγιά απεικονίζεται στο Σχήμα 2.19 και στο Σχήμα 2.20. Το Σχήμα 2.19 δείχνει μία γενική όψη του καμμένου διαμερίσματος και το Σχήμα 2.20 απεικονίζει την κεφαλή ενός στύλου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η πλάκα υπέστη θραύσεις γύρω από την κεφαλή ενός στύλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Αυτές οι θραύσεις σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια της ψύξης, πιθανόν εξαιτίας μερικής αστοχίας της σύνδεσης μεταλλικής δοκού σε στύλο στη συγκεκριμένη περιοχή. Η εξέταση της πλάκας μετά από το πείραμα επέδειξε ότι η ενίσχυση δεν είχε αγκυρωθεί καταλλήλως και ότι στη συγκεκριμένη περιοχή τα προσκείμενα φύλλα πλέγματος ενίσχυσης δεν αλληλοκαλύπτονταν. Από τα παραπάνω διαφαίνεται η ανάγκη να χρησιμοποιούνται επαρκείς αγκυρώσεις οπλισμού μεταξύ των προσκείμενων φύλλων του πλέγματος ενίσχυσης.



Σχήμα 2.16 Μετρηθείσα θερμοκρασία περιβάλλοντος



Σχήμα 2.17 Μέγιστη θερμοκρασία μετάλλου και μέγιστη κατακόρυφη βύθιση



Σχήμα 2.18 Εξωτερική όψη της πυρκαγιάς



Σχήμα 2.19 Μετρηθείσα θερμοκρασία περιβάλλοντος στο πυροδιαμέρισμα



Σχήμα 2.20 Κεφαλή στύλου που εμφανίζει λυγισμένες δοκούς



Σχήμα 2.21 Πλάκα που έχει υποστεί θραύση σε περιοχή μη επαρκούς αγκυρωμένου πλέγματος

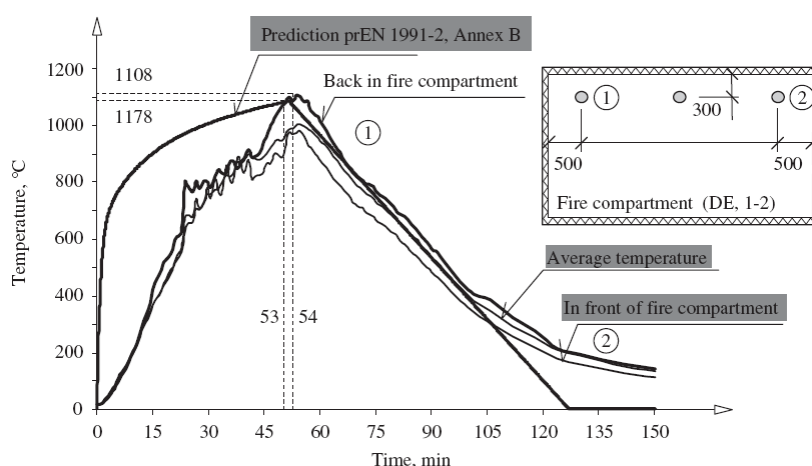
2.8 Πείραμα 7: Κεντρικό Πυροδιαμέρισμα

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε πυροδιαμέρισμα κεντρικά τοποθετημένο στον τέταρτο όροφο του κτιρίου, με διαστάσεις 11 m πλάτος και βάθος 7 m. Η μεταλλική κατασκευή που εκτέθηκε στην πυρκαγιά αποτελείται από δύο κύριες δοκούς 356x171x51 UB, δύο στύλους 305x305x198 UC και 305x305x137 UC και τρεις δευτερεύουσες δοκούς 305x165x40 UB, αντίστοιχα.

Το πυροθερμικό φορτίο 40 kg/m² παρείχαν ξύλινα σανίδια που κάλυπταν όλη την επιφάνεια της πλάκας. Ένα άνοιγμα στην όψη με διαστάσεις 1,27 m ύψος και 9 m μήκος παρείχε τον αερισμό.

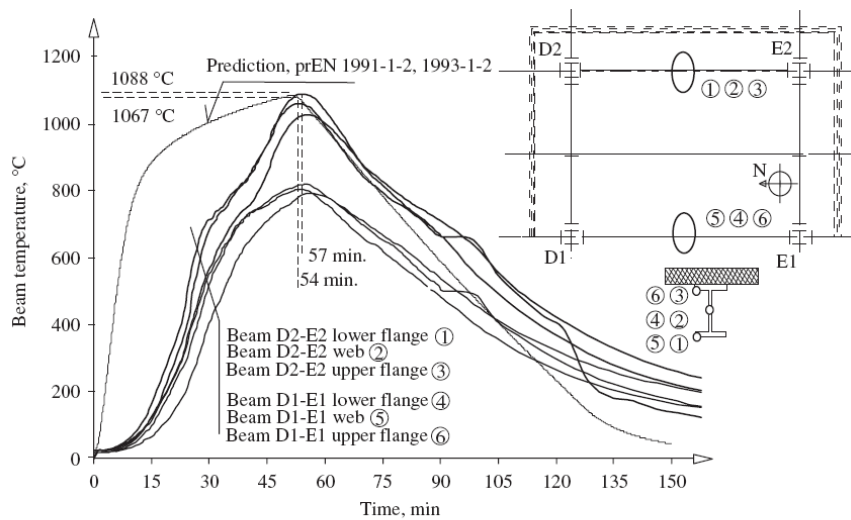
Περίπου 130 θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν στο διαμέρισμα, σε διάφορες τοποθεσίες κατά μήκος των δοκών, τόσο στο μεταλλικό προφίλ όσο και στις σύμμικτες πλάκες, όπως επίσης στις μεταλλικές συνδέσεις (αρθρωτές συνδέσεις ελάσματος περυγίου και ημιάκαμπτες συνδέσεις ακραίου ελάσματος). 14 πρόσθετα θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν στους μονωμένους στύλους. Δύο διαφορετικοί τύποι μηκυσιόμετρων χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των εσωτερικών δυνάμεων: μηκυσιόμετρα υψηλών θερμοκρασιών στη σύνδεση και μηκυσιόμετρα θερμοκρασιών περιβάλλοντος στον μονωμένο στύλο και στα μη εκτεθειμένα στοιχεία. Όσον αφορά τα όργανα μέτρησης της παραμόρφωσης της πλάκας και των βασικών δομικών στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 37 μετρητές μετατόπισης για τη μέτρηση της παραμόρφωσης της σύμμικτης πλάκας και της οριζόντιας μετατόπισης των στύλων. Επιπλέον, η ανάπτυξη της πυρκαγιάς και του καπνού, οι παραμορφώσεις στην κατασκευή και η κατανομή της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου καταγράφηκαν από 10 βιντεοκάμερες και δύο θερμοκάμερες.

Οι καταγεγραμμένες θερμοκρασίες σε διαφορετικά σημεία του διαμερίσματος παρουσιάζονται συγκριτικά με την παραμετρική καμπύλη του prEN 1991-2, Παράρτημα Β⁽³⁷⁾ (βλ. Σχήμα 2.22). Η μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία του διαμερίσματος ήταν 1107,8°C μετά από 54 λεπτά πυρκαγιάς.



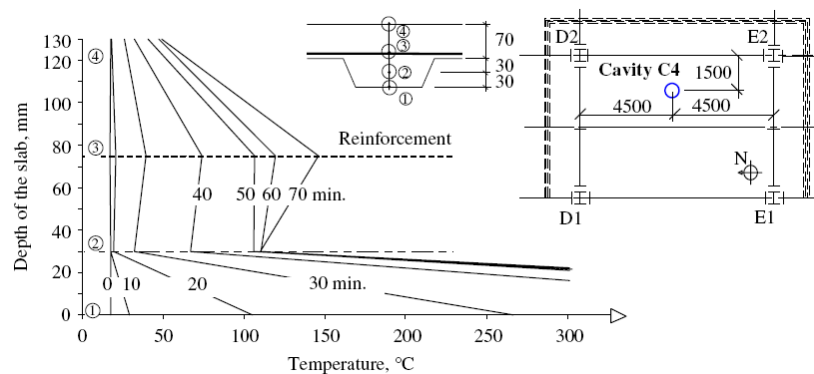
Σχήμα 2.22 Μεταβολές της θερμοκρασίας στο πυροδιαμέρισμα

Όσον αφορά τη θέρμανση των μεταλλικών δοκών, οι μη μονωμένες δοκοί θερμάνθηκαν περίπου ως τους 1087,5°C, θερμοκρασία η οποία παρουσιάστηκε μετά από 57 λεπτά πυρκαγιάς στο κάτω πέλμα της μεταλλικής δοκού D2-E2 στο μέσο του αντίστοιχου τμήματος (βλ. Σχήμα 2.23). Η μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία στις συνδέσεις ήταν περίπου 200°C.



Σχήμα 2.23 Μεταβολές της θερμοκρασίας στις μεταλλικές δοκούς

Στο Σχήμα 2.24 απεικονίζεται μια σύνοψη των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν στη σύμμικτη πλάκα, στην ενίσχυση πάνω από την εσοχή. Διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη μετρηθείσα θερμοκρασία στη μη εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας ήταν κατώτερη των 100°C, δηλαδή σύμφωνα με τα κριτήρια μόνωσης.



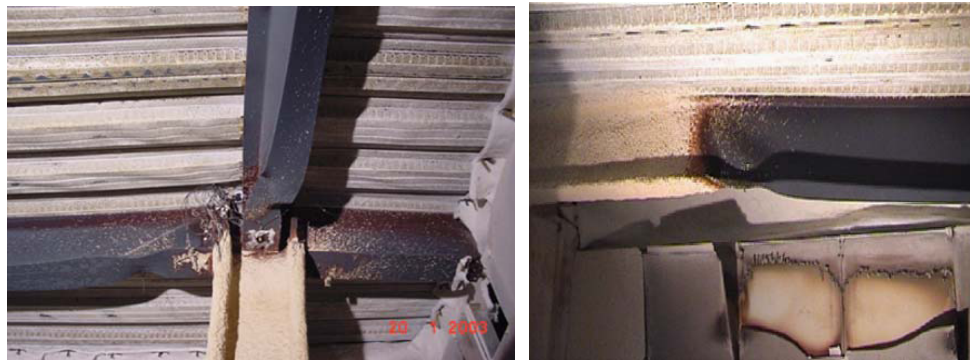
Σχήμα 2.24 Μεταβολή της θερμοκρασίας στη σύμμικτη πλάκα

Σε ότι αφορά τη συνολική παραμόρφωση της πλάκας, οι μέγιστες βυθίσεις που σημειώθηκαν ήταν της τάξης των 1200 mm. Παρά την εμφάνιση αυτής της σημαντικής βύθισης, δεν επήλθε η αναμενόμενη κατάρρευση της πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, η ανάκαμψη της βύθισης μετρήθηκε περίπου στα 925 mm.



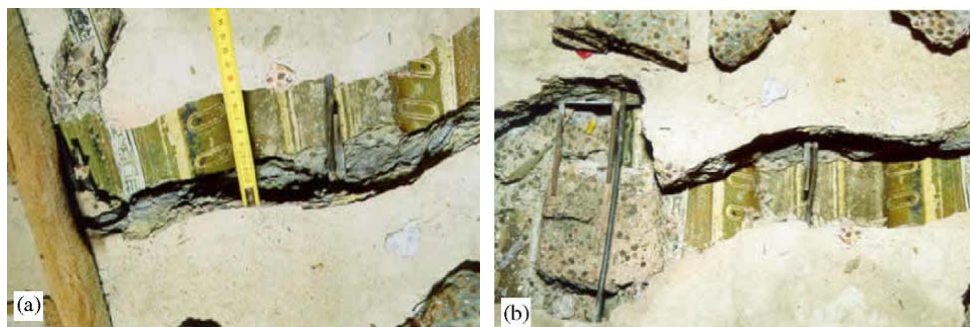
Σχήμα 2.25 Όψη της πλάκας μετά από το πείραμα

Παρατηρήθηκε λυγισμός στο κάτω πέλαμα της δοκού και στον κορμό που πρόσκειται στις συνδέσεις, κατά τη θέρμανση και μετά από 23 λεπτά πυρκαγιάς (βλ. Σχήμα 2.26). Αυτός ο τοπικός λυγισμός προκαλείται από τη δέσμευση της θερμικής διαστολής που παρέχει η περιβάλλουσα κατασκευή. Επιπλέον, η εμφάνιση μιας εύκαμπτης πλαστικής άρθρωσης στη διατομή της δοκού που πρόσκειται στην μονωμένη ζώνη οφείλεται στη δέσμευση της θερμικής επιμήκυνσης που παρέχει το προσκείμενο μονωμένο τμήμα του διαμερίσματος.



Σχήμα 2.26 Διάφορες παραμορφωμένες μεταλλικές δοκοί

Στο Σχήμα 2.27 απεικονίζονται τα ανοίγματα των ρωγμών στην πλάκα σκυροδέματος γύρω από τις κεφαλές ενός στύλου. Οι ρωγμές αυτές δημιουργήθηκαν κατά μήκος της ακύρωσης του πλέγματος ενίσχυσης, χωρίς να παρέχεται κατάλληλη στερέωση.



Σχήμα 2.27 Ρωγμές στην πλάκα γύρω από τις κεφαλές ενός στύλου

2.9 Γενικά σχόλια στην παρατηρούμενη συμπεριφορά

Σε όλα τα πειράματα, η κατασκευή παρουσίασε πολύ θετική συμπεριφορά στην πυρκαγιά και διατηρήθηκε η συνολική ευστάθεια της κατασκευής.

Η συμπεριφορά όλου του κτιρίου στην πυρκαγιά είναι προφανώς πολύ διαφορετική από τη συμπεριφορά των μεμονωμένων μη δεσμευμένων στοιχείων σε πειράματα πρότυπης πυρκαγιάς. Γίνεται εμφανές ότι οι αλληλεπιδράσεις και οι μεταβολές των φερόντων μηχανισμών στις πραγματικές κατασκευές καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευές συμπεριφέρονται στην πυρκαγιά. Τα απλά πειράματα πρότυπης πυρκαγιάς δεν δύνανται να αναπαραγάγουν ή να εκτιμήσουν αυτά τα αποτελέσματα.

Τα πειράματα Cardington επέδειξαν ότι οι σύγχρονοι μεταλλικοί σκελετοί που δρουν σύμμικτα με την πλάκα μετάλλου-οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζουν μια συνοχή η οποία παρέχει πυραντίσταση πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που συνήθως υποθέτουν οι μελέτες. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και σε άλλες πηγές.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ, ΓΑΛΛΙΑ

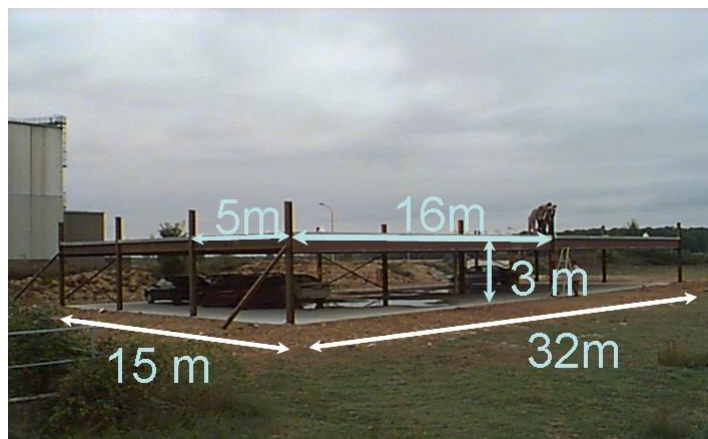
Μεταξύ 1998 και 2000, πραγματοποιήθηκαν, ως μέρος του έργου με τη χρηματοδότηση του ECSC, πειράματα πυρκαγιάς σε ανοιχτό χώρο στάθμευσης οχημάτων με σύμμικτη κατασκευή χάλυβα-σκυροδέματος.

Για τα πειράματα πυρκαγιάς πραγματικής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν κατασκευάστηκε ειδικά ένας μονώροφος χώρος στάθμευσης οχημάτων με σύμμικτο μεταλλικό σκελετό. Η πλάκα του χώρου στάθμευσης καταλάμβανε εμβαδό 32 x 16 m², που αντιστοιχεί σε 48 θέσεις στάθμευσης οχημάτων, ενώ το ύψος της κατασκευής ήταν 3 m (βλ. Σχήμα 3.1).

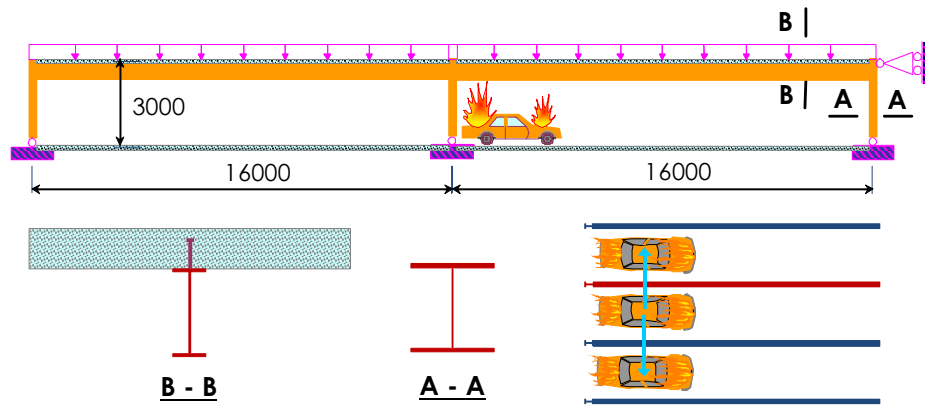
Η κατασκευή αποτελούταν από:

- μη μονωμένους μεταλλικούς στύλους: HEA180 (ακραιοί στύλοι) και HEB200 (μεσαίοι στύλοι),
- σύμμικτες δοκούς: μη μονωμένες μεταλλικές δοκοί (IPE 550, IPE 400 και IPE 500) συνδεδεμένες σε σύμμικτη πλάκα, και
- σύμμικτη πλάκα με συνολικό πάχος 120 mm (μεταλλικό υπόστρωμα: COFRASTRA40).

Ο δομικός σχεδιασμός του ανοιχτού χώρου στάθμευσης βασίστηκε σε μια μέθοδο της μηχανικής πυρασφάλειας, η οποία αναπτύχθηκε ειδικά για ανοιχτούς χώρους στάθμευσης κατά τη διάρκεια ενός ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου που προηγήθηκε χρονικά. Για τη μέθοδο αυτή καθορίστηκε μία υπόθεση πυρκαγιάς με βάση στατιστικά στοιχεία πραγματικής πυρκαγιάς σε χώρους στάθμευσης οχημάτων. Η κατασκευαστική αντοχή του ανοιχτού χώρου στάθμευσης ελέγχθηκε με ένα προηγμένο μοντέλο με βάση τη δισδιάστατη ανάλυση πλαισίου, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης στη σύμμικτη πλάκα (βλ. Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.1 Ανοιχτοί χώροι στάθμευσης οχημάτων πριν από την πυρκαγιά



Σχήμα 3.2 Δισδιάστατο μοντέλο του ανοιχτού χώρου στάθμευσης οχημάτων με επίπεδο σύμμικτο πλαίσιο

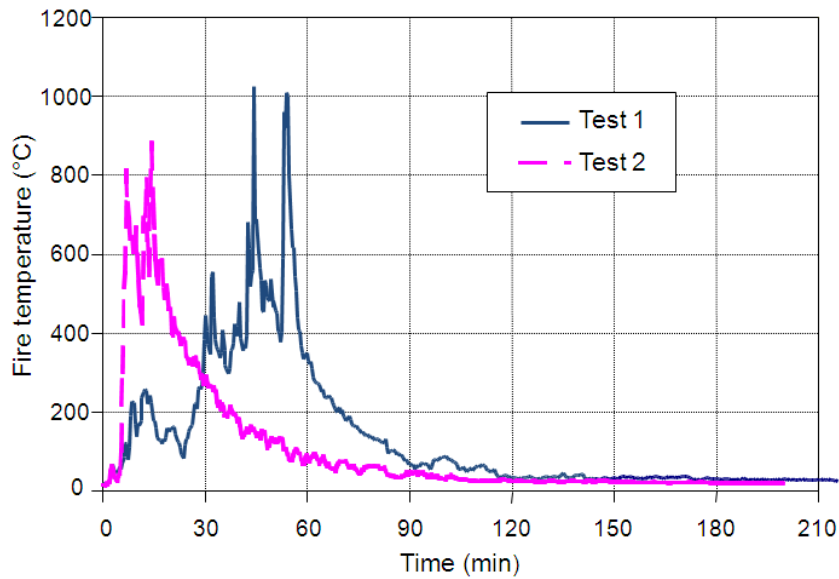
Στον ανοιχτό χώρο στάθμευσης οχημάτων πραγματοποιήθηκαν συνολικά τρία πειράματα. Τα πρώτα δύο συμπεριλάμβαναν τρία οχήματα, ενώ το τρίτο πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εκτίμηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς ανάμεσα σε δύο οχήματα τοποθετημένα απέναντι το ένα από το άλλο. Κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος τα οχήματα αφέθηκαν να καταληφθούν πλήρως από την πυρκαγιά.

Η πιο σοβαρή πυρκαγιά προέκυψε στο δεύτερο πείραμα, στο οποίο υπό την επίδραση δυνατού ανέμου τρία οχήματα αφέθηκαν στην πυρκαγιά για 10 λεπτά μετά από την ανάφλεξη του πρώτου οχήματος (βλ. Σχήμα 3.3), με συνέπεια σημαντική επιφάνεια της πλάκας να εκτεθεί στις φλόγες, με τη θερμοκρασία να ανέρχεται στους 800 °C (βλ. Σχήμα 3.4). Οι μεταλλικές δοκοί πάνω από τα φλεγόμενα οχήματα ανέπτυξαν θερμοκρασία τουλάχιστον 700 °C (βλ. Σχήμα 3.5).

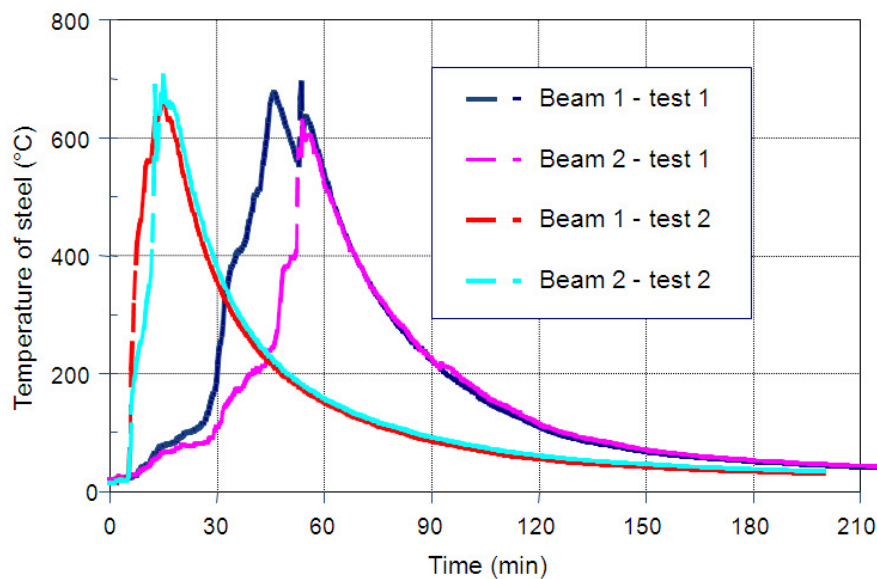


Σχήμα 3.3 Πλήρης ανάπτυξη της πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια πειράματος

Παρόλο που η θέρμανση των μεταλλικών δοκών θα προκαλούσε μείωση της αντοχής του χάλυβα, κατά τη διάρκεια των παραπάνω πειραμάτων πυρκαγιάς η μη μονωμένη μεταλλική κατασκευή δεν υπέστη κατάρρευση. Επιπλέον, όσον αφορά τη συμπεριφορά της κατασκευής, η μετρηθείσα μέγιστη παραμόρφωση της σύμμικτης πλάκας ήταν σχετικά χαμηλή, δηλαδή δεν υπερέβη τα 150 mm.



Σχήμα 3.4 Μετρηθείσα θερμοκρασία των θερμών αερίων (της πυρκαγιάς) πάνω από τα φλεγόμενα οχήματα

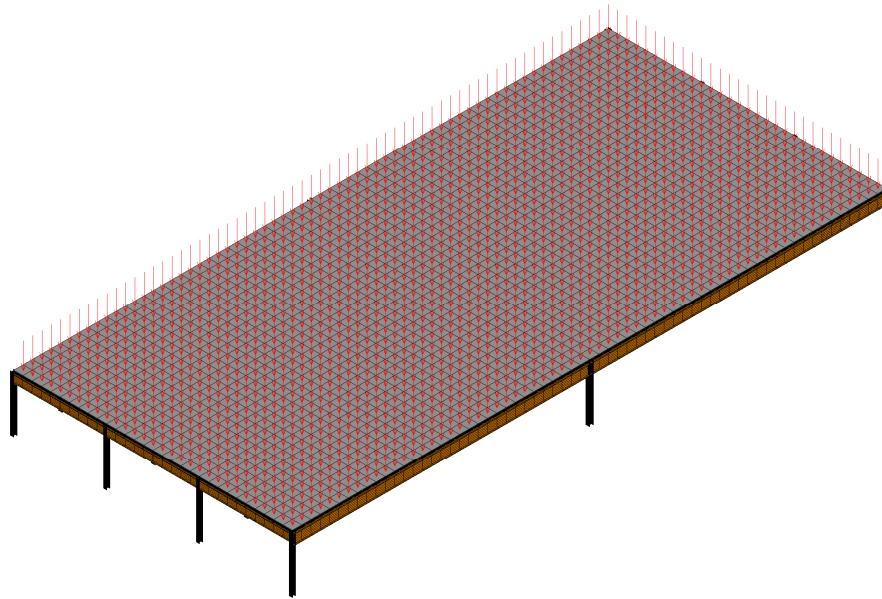


Σχήμα 3.5 Μετρηθείσα θερμοκρασία των μεταλλικών δοκών πάνω από τα φλεγόμενα οχήματα

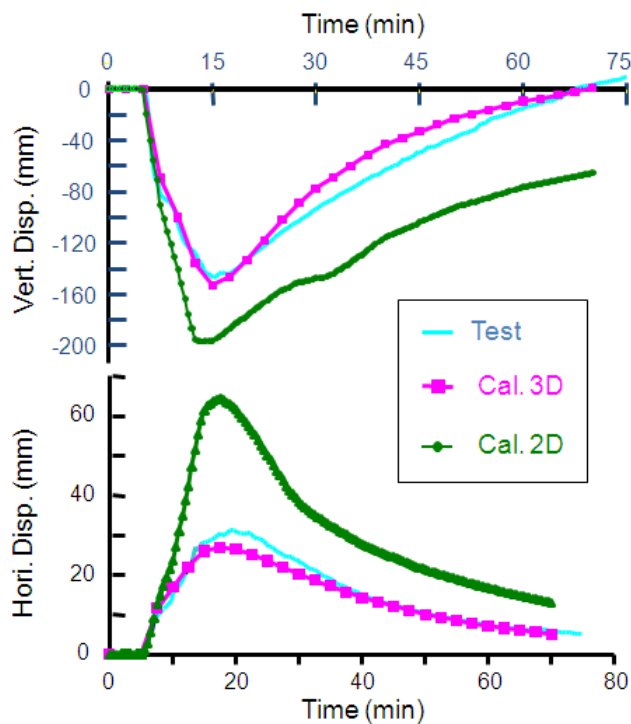
Παρατηρήθηκε ότι οι παραμορφώσεις που προέβλεψε η δισδιάστατη προσομοίωση ήταν μεγαλύτερες από τις μετρηθείσες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής του ανοιχτού χώρου στάθμευσης (βλ. Σχήμα 3.6), με χρήση των τεχνικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στο δεύτερο στάδιο του ερευνητικού έργου στο Cardington.

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται η σύγκριση ανάμεσα στις μετρηθείσες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν στο πείραμα και σε εκείνες που προέβλεπαν το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο μοντέλο. Είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα του πειράματος. Ομοίως, είναι βέβαιο ότι η μεμβράνη σταθεροποίησης επιδρά στη

σύμμικτη πλάκα με θετικό τρόπο ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρές.



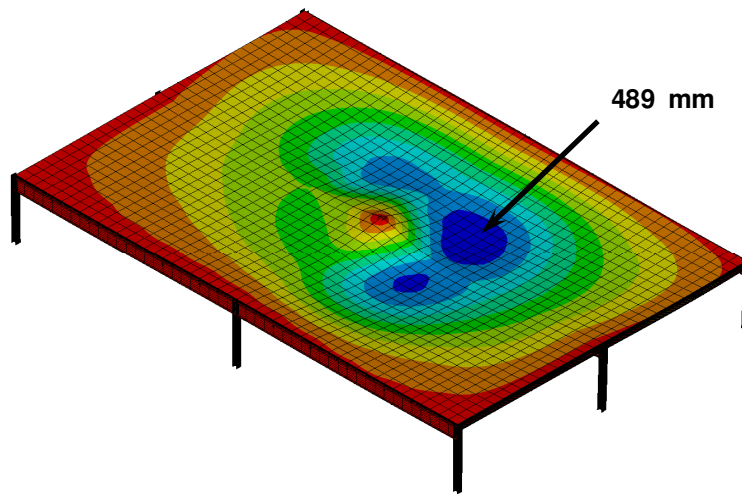
Σχήμα 3.6 Τρισδιάστατο μοντέλο του ανοιχτού χώρου στάθμευσης οχημάτων



Σχήμα 3.7 Σύγκριση των τιμών της κατακόρυφης βύθισης μεταξύ των υπολογισμών και του πειράματος

Ωστόσο, σύμφωνα με την υπόθεση πυρκαγιάς που υιοθετείται από τη μηχανική πυρασφάλειας, τα μεταλλικά μέλη ενός ανοιχτού χώρου στάθμευσης οχημάτων μπορούν να θερμανθούν περίπου ως τους 950°C. Προφανώς σε θερμοκρασίες αυτής της τάξης, η παραμόρφωση της πλάκας ενισχύεται και η κατασκευαστική

αντοχή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης (βλ. Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Παράδειγμα παραμόρφωσης σε ανοιχτό χώρο στάθμευσης οχημάτων σε υπόθεση πυρκαγιάς όπως αυτή προβλέπεται από τη νομοθεσία στη Γαλλία

Ως εκ τούτου, η μεθοδολογία που βασίζεται στο τρισδιάστατο μοντέλο της σύμμικτης πλάκας των ανοιχτών χώρων στάθμευσης οχημάτων, η οποία δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο έργο, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε στη Γαλλία σε διάφορα έργα μηχανικής πυρασφάλειας για τον έλεγχο της ευστάθειας της κατασκευής ανοιχτών χώρων στάθμευσης οχημάτων με μη μονωμένο σύμμικτο μεταλλικό σκελετό. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η βάση για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι η επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης της σύμμικτης πλάκας χάλυβα-σκυροδέματος. Επιπλέον, προς διευκόλυνση της εφαρμογής της μεθοδολογίας, το πείραμα περιλάμβανε πίνακες σχεδίασης⁽³⁸⁾, όπου καταγράφονται τα προτεινόμενα πρότυπα μεγέθη των μεταλλικών μερών, της πλάκας σκυροδέματος και του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης ανάλογα με το εκάστοτε φορτίο που εφαρμόζεται και το εκάστοτε σύστημα δομικού πλαισίου της κατασκευής. Για παράδειγμα, ένας από τους παραπάνω πίνακες απεικονίζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Πίνακας σχεδίασης ανοιχτού χώρου στάθμευσης οχημάτων με στοιχεία σχετικά με την πυραντοχή της κατασκευής

	<p>Slab span: 2.5 m Secondary beam span: 7.5 m Main beam span: 7.5 m Spacing of columns: 7.5 m</p> <p>Applied load (except selfweight) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard level: <ul style="list-style-type: none"> - dead load : 0.20 kN/m² - imposed load : 2.50 kN/m² • Last level: <ul style="list-style-type: none"> - dead load : 1.45 kN/m² - imposed load: 2.50 kN/m² • Selfweight of facade: 7.5 kN/m <p>Orientation of parking place:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perpendicular to secondary beam 												
Net height beneath steel beam: 2.1 m													
Minimum size of secondary beam cross section	<table border="1"> <tr> <td>Standard level</td> <td>IPE240</td> </tr> <tr> <td>Last level</td> <td>IPE270</td> </tr> </table>	Standard level	IPE240	Last level	IPE270								
Standard level	IPE240												
Last level	IPE270												
Minimum size of main beam cross section	<table border="1"> <tr> <td>Standard level</td> <td>IPE400</td> </tr> <tr> <td>Last level</td> <td>IPE450</td> </tr> </table>	Standard level	IPE400	Last level	IPE450								
Standard level	IPE400												
Last level	IPE450												
Design of column cross section	<table border="1"> <tr> <td>Available of section type</td> <td>HEA, HEB et HEM</td> </tr> <tr> <td>Maximum load level (**)</td> <td>0.35</td> </tr> </table>	Available of section type	HEA, HEB et HEM	Maximum load level (**)	0.35								
Available of section type	HEA, HEB et HEM												
Maximum load level (**)	0.35												
Requirement to be applied to concrete slab	<table border="1"> <tr> <td>Total depth of slab</td> <td>≥ 120 mm & ≤ 140 mm</td> </tr> <tr> <td>Maximum height of steel deck</td> <td>62 mm</td> </tr> <tr> <td>Minimum compactness of rib of steel deck (*)</td> <td>0.393</td> </tr> <tr> <td>Minimum thickness of steel sheet</td> <td>0.75 mm</td> </tr> <tr> <td>Minimum mesh of reinforcing steel</td> <td>φ7 150 mmx150 mm</td> </tr> <tr> <td>location of reinforcing steel mesh</td> <td>30 mm from top of slab</td> </tr> </table>	Total depth of slab	≥ 120 mm & ≤ 140 mm	Maximum height of steel deck	62 mm	Minimum compactness of rib of steel deck (*)	0.393	Minimum thickness of steel sheet	0.75 mm	Minimum mesh of reinforcing steel	φ7 150 mmx150 mm	location of reinforcing steel mesh	30 mm from top of slab
Total depth of slab	≥ 120 mm & ≤ 140 mm												
Maximum height of steel deck	62 mm												
Minimum compactness of rib of steel deck (*)	0.393												
Minimum thickness of steel sheet	0.75 mm												
Minimum mesh of reinforcing steel	φ7 150 mmx150 mm												
location of reinforcing steel mesh	30 mm from top of slab												
(*) compactness of rib of steel deck $\frac{(l_1 + l_2)}{2(l_1 + l_3)}$													
(**) Load level: ratio of applied load under fire situation over ultimate load at room temperature design													

4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΥΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟ ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ

Δύο πυρκαγιές σε κτίρια στην Αγγλία στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Broadgate και Churchill Plaza) αποτέλεσαν αφορμή για την παρατήρηση της συμπεριφοράς στην πυρκαγιά των σύγχρονων κτιρίων με μεταλλικό σκελετό. Η εμπειρία από αυτές τις πυρκαγιές επηρέασε σε μεγάλο βαθμό το σκεπτικό της σχεδίασης κτιρίων με πυραντίσταση και ήταν το έναυσμα για τη σειρά πειραμάτων στο Cardington.

Στοιχεία για τη συμπεριφορά κτιρίων σε πυρκαγιά είναι επίσης διαθέσιμα από πειράματα μεγάλης κλίμακας στην Αυστραλία και στη Γερμανία. Τόσο στην Αυστραλία όσο και στη Ν. Ζηλανδία αναπτύχθηκαν σχεδιαστικές προσεγγίσεις με βάση τις οποίες επιτρέπεται η χρήση μη μονωμένου χάλυβα σε πολυώροφα κτίρια με μεταλλικό σκελετό.

4.1 Broadgate

Το 1990 εκδηλώθηκε πυρκαγιά στο συγκρότημα Broadgate στο Λονδίνο σε κτίριο γραφείων 14 ορόφων⁽⁶⁾. Η πυρκαγιά ξεκίνησε μέσα σε έναν μεγάλο εργοταξιακό χώρο στον πρώτο όροφο του κτιρίου. Η θερμοκρασία της πυρκαγιάς υπολογίζεται ότι υπερέβη τους 1000°C.

Η πλάκα ήταν κατασκευασμένη με δικτυωτά ζευκτά μεγάλου ανοίγματος και σύμμικτες δοκούς για υποστήριξη της σύμμικτης πλάκας. Η πλάκα ήταν σχεδιασμένη ώστε να παρέχει πυραντίσταση 90 λεπτών. Όταν εκδηλώθηκε η πυρκαγιά, το κτίριο ήταν υπό κατασκευή και η παθητική πυροπροστασία στη μεταλλική κατασκευή ήταν ημιτελής. Το σύστημα καταιονισμού και άλλα μέτρα ενεργής πυροπροστασίας δεν είχαν ακόμη τεθεί σε λειτουργία.

Μετά από την πυρκαγιά, η μεταλλουργική διερεύνηση έδειξε ότι η θερμοκρασία στη μη μονωμένη μεταλλική κατασκευή κατά πάσα πιθανότητα δεν υπερέβη τους 600°C. Παρόμοια εξέταση στους κοχλίες των συνδέσεων έδειξε ότι η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε στους κοχλίες, είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευής είτε εξαιτίας της πυρκαγιάς, ήταν 540°C.

Οι παραμορφωμένες μεταλλικές δοκοί παρουσίασαν μόνιμες παραμορφώσεις μεταξύ 270 mm και 82 mm. Οι δοκοί που παρουσίασαν μόνιμες παραμορφώσεις στο υψηλότερο όριο αυτής της περιοχής παρουσίασαν ενδείξεις τοπικού λυγισμού στο κάτω πέλμα και στον κορμό κοντά στα στηρίγματά τους. Από αυτές τις ενδείξεις έγινε αντιληπτό ότι η συμπεριφορά των δοκών επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από τη δέσμευση της θερμικής διαστολής. Η περιβάλλουσα κατασκευή, η οποία παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το μέταλλο που εκτέθηκε στην πυρκαγιά, παρείχε αυτή τη δέσμευση. Οι αξονικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στις θερμαινόμενες δοκούς προκάλεσαν αύξηση της κατακόρυφης βύθισης εξαιτίας των φαινομένων 2ας τάξεως. Ο λυγισμός στο κάτω πέλμα και στον κορμό της δοκού κοντά στα στηρίγματά της προκλήθηκε από το συνδυασμό των αξονικών δυνάμεων που ασκήθηκαν και της αρνητικής ροπής εξαιτίας της άκαμπτης σύνδεσης.

Παρόλο που η εξέταση έδειξε την οπτική αρνητική επίδραση της δέσμευσης στις μεταλλικές δοκούς, η πιθανή θετική επίδραση δεν καταγράφηκε λόγω του γεγονότος ότι η θερμοκρασία του μετάλλου διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα. Η θετική επίδραση που θα μπορούσε να έχει αναπτυχθεί αφορά την αλυσιδωτή

δράση των δοκών και τη γεφύρωση ή τη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης στη σύμμικτη πλάκα.

Τα κατασκευασμένα χαλύβδινα ζευκτά είχαν άνοιγμα 13,5 m και παρουσίασαν μόνιμη κατακόρυφη παραμόρφωση 552 mm. Ορισμένα στοιχεία δικτύματος παρουσίασαν σημάδια λυγισμού. Το συμπέρασμα της εξέτασης ήταν ότι η δέσμευση της θερμικής διαστολής που παρείχαν τα άλλα στοιχεία δικτύματος, σε συνδυασμό με την ανομοιόμορφη θέρμανση, προκάλεσαν πρόσθετες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις, που με τη σειρά τους προκάλεσαν λυγισμό.

Όταν εκδηλώθηκε η πυρκαγιά, δεν διέθεταν πυροπροστασία όλοι οι μεταλλικοί στύλοι. Οι μη μονωμένοι μεταλλικοί στύλοι παραμορφώθηκαν και μειώθηκε το ύψος τους κατά περίπου 100 mm (βλ. Σχήμα 4.1). Αυτοί οι στύλοι ήταν προσκείμενοι σε πολύ βαρύτερους στύλους που δεν παρουσίασαν σημάδια μόνιμης παραμόρφωσης. Εκτιμήθηκε ότι οι στύλοι παραμορφώθηκαν εξαιτίας της δεσμευμένης θερμικής διαστολής. Η δέσμευση της θερμικής διαστολής οφείλεται σε άκαμπτη δοκό που βρίσκεται σε ένα από τα ανώτερα επίπεδα του κτιρίου, καθώς επίσης και στους στύλους εκτός της περιοχής που εκτέθηκε στην πυρκαγιά.



Σχήμα 4.1 Λυγισμένος στύλος και παραμορφωμένες δοκοί στο Broadgate

Παρόλο που ορισμένοι στύλοι παραμορφώθηκαν, η κατασκευή δεν παρουσίασε σημάδια κατάρρευσης. Εκτιμήθηκε ότι εκείνα τα μέλη της κατασκευής που επηρεάστηκαν λιγότερο σε σχέση με άλλα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς ήταν ικανά να φέρουν το πρόσθετο φορτίο, το οποίο ανακατανεμήθηκε.

Μετά από την πυρκαγιά, η σύμμικτη πλάκα υπέστη μεγάλου βαθμού παραμορφώσεις με τη μέγιστη κατακόρυφη βύθιση να ανέρχεται σε 600 mm (βλ. Σχήμα 4.2). Παρατηρήθηκε μερική αστοχία της ενίσχυσης. Σε ορισμένες περιοχές το μεταλλικό υπόστρωμα αποκολλήθηκε από το σκυροδέμα. Αυτό θεωρείται ότι προκλήθηκε κυρίως από την έκλυση ατμού του σκυροδέματος, σε συνδυασμό με την επίδραση της θερμικής δέσμευσης και τη διαφορική διαστολή.

Χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός συνδέσεων με γωνιακά ελάσματα και ημιάκαμπτες συνδέσεις ακραίου ελάσματος (ελάσματα κάθετα στον κορμό). Μετά από την πυρκαγιά, δεν παρατηρήθηκε αστοχία σε καμία από τις συνδέσεις, παρόλο που ήταν εμφανής η παραμόρφωσή τους. Στις συνδέσεις με γωνιακό έλασμα παρατηρήθηκε παραμόρφωση στις οπές του κοχλία. Σε μία ημιάκαμπτη σύνδεση ακραίου ελάσματος δύο κοχλίες υπέστησαν θραύση. Σε άλλη ημιάκαμπτη σύνδεση ακραίου ελάσματος η πλάκα αστόχησε από διάτμηση στη μία πλευρά της δοκού,

ωστόσο η σύνδεση διατήρησε την ικανότητα μεταφοράς της διάτμησης. Εκτιμήθηκε ότι η βασική αιτία της παραμόρφωσης ήταν οι δυνάμεις εφελκυσμού που ασκήθηκαν κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Μετά από την πυρκαγιά, δομικά στοιχεία που κάλυπταν επιφάνεια περίπου 40 m x 20 m αντικαταστήθηκαν, είναι ωστόσο σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν σημειώθηκε αστοχία της κατασκευής και ότι η πλάκα διατήρησε την ακεραιότητά της κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Το άμεσο κόστος εξαιτίας της πυρκαγιάς υπερέβη τα 25 εκατ. λίρες Αγγλίας, από τα οποία λιγότερο από 2 εκατ. δαπανήθηκαν για την αποκατάσταση του δομικού σκελετού και της ζημιάς της πλάκας. Το υπόλοιπο κόστος προέκυψε εξαιτίας της ζημιάς που προκάλεσε ο καπνός. Η δομική αποκατάσταση του κτιρίου ολοκληρώθηκε σε 30 μέρες.



Σχήμα 4.2 Όψη της παραμορφωμένης πλάκας πάνω από την πυρκαγιά (μέγιστη παραμόρφωση: περίπου 600 mm)

4.2 Churchill Plaza building, Basingstoke

Το 1991 εκδηλώθηκε πυρκαγιά στο κτίριο Mercantile Credit Insurance, Churchill Plaza, Basingstoke. Το 12ώροφο κτίριο οικοδομήθηκε το 1988. Οι στύλοι διέθεταν πυράντοχη σανίδα εξωτερικά και οι δοκοί της σύμμικτης πλάκας διέθεταν σύστημα προστασίας καταιονισμού. Η κάτω πλευρά της σύμμικτης πλάκας δεν ήταν μονωμένη. Η κατασκευή σχεδιάστηκε ώστε να έχει πυράντοχη 90 λεπτών.

Η πυρκαγιά ξεκίνησε στον όγδοο όροφο και εξαπλώθηκε ταχέως στον ένατο και στη συνέχεια στον δέκατο όροφο, καθώς η υαλόφραξη αστόχησε. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, η πυροπροστασία επέδειξε θετική συμπεριφορά και δεν επήλθε μόνιμη παραμόρφωση του μεταλλικού σκελετού. Η πυρκαγιά χαρακτηρίστηκε σχετικώς "ήπια", επειδή η αστοχία της υαλόφραξης επέτρεψε στον πλάγιο άνεμο να αυξήσει τον αερισμό. Οι μονωμένες συνδέσεις δεν υπέστησαν καμία παραμόρφωση.

Σε ορισμένα σημεία, το μεταλλικό υπόστρωμα παρουσίασε σημάδια αποκόλλησης από την πλάκα σκυροδέματος (όπως παρατηρήθηκε και στην πυρκαγιά Broadgate). Στην περιοχή η οποία επηρεάστηκε περισσότερο από την πυρκαγιά πραγματοποιήθηκε πείραμα φορτίου, με φορτίο 1,5 φορές το συνολικό φορτίο σχεδιασμού. Το πείραμα έδειξε ότι η πλάκα είχε επαρκή φέρουσα ικανότητα και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εκ νέου χωρίς να χρειάζεται αποκατάσταση.

Η μονωμένη μεταλλική κατασκευή δεν υπέστη ζημιές. Το συνολικό κόστος για την αποκατάσταση υπερέβη τα 15 εκατ. λίρες Αγγλίας. Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους οφείλεται στη μόλυνση από τον καπνό, όπως και στην πυρκαγιά Broadgate. Στο ανακαινισμένο κτίριο εγκαταστάθηκαν καταιονητήρες.



Σχήμα 4.3 Churchill Plaza, Basingstoke: μετά από την πυρκαγιά

4.3 Πειράματα πυρκαγιάς στην Αυστραλία

Η BHP, η μεγαλύτερη μεταλλουργική εταιρία στην Αυστραλία, πραγματοποιεί έρευνες και αναφορές^(7,8) στη μηχανική πυρασφάλειας για κτίρια με μεταλλικό σκελετό εδώ και πολλά χρόνια. Σειρά πειραμάτων πυρκαγιάς από φυσικά αίτια μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά κατασκευασμένες εγκαταστάσεις στο Εργαστήριο της Μελβούρνης. Οι εγκαταστάσεις που κατασκευάστηκαν προσομοίωναν γήπεδα, χώρους στάθμευσης οχημάτων και γραφεία. Το πρόγραμμα πειραμάτων γραφείου εστιάστηκε σε έργα ανακαίνισης σε μεγάλα κτίρια στο εμπορικό κέντρο της Μελβούρνης.

4.3.1 Πειράματα πυρκαγιάς στην οδό William και σχεδιαστική προσέγγιση

Το κτίριο 41 ορόφων της οδού William στο κέντρο της Μελβούρνης ήταν το υψηλότερο κτίριο στην Αυστραλία όταν οικοδομήθηκε το 1971. Το κτίριο είχε τετραγωνική κάτοψη με κεντρικό τετραγωνικό πυρήνα. Το κτίριο διέθετε σύστημα καταιονισμού χαμηλού κινδύνου. Η μεταλλική κατασκευή γύρω από τον κεντρικό πυρήνα και οι περιμετρικοί μεταλλικοί στύλοι διέθεταν πυροπροστασία με επένδυση από σκυρόδεμα. Οι δοκοί και το εσωρράχιο του σύμμικτου μεταλλικού υποστρώματος της πλάκας ήταν μονωμένο με υλικό με βάση τον αμίαντο. Κατά τη διάρκεια του προγράμματος ανακαίνισης το 1990, αποφασίστηκε να αφαιρεθεί ο επικίνδυνος αμίαντος.

Η δομή της πλάκας είχε σχεδιαστεί περισσότερο με γνώμονα την λειτουργικότητα παρά τις απαιτήσεις αντοχής. Το παραπάνω σημαίνει ότι υπήρχε διαθέσιμο απόθεμα αντοχής, το οποίο θα μπορούσε να ωφελήσει την προστασία του σκελετού στην πυρκαγιά, εμποδίζοντας την άνοδο της θερμοκρασίας πριν ο σκελετός φτάσει στο οριακό του σημείο.

Κατά τη διάρκεια της ανακαίνισης, η απαιτούμενη πυραντοχή ήταν 120 λεπτά. Τυπικά αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μόνωσης στις μεταλλικές δοκούς και στο εσωρράχιο με πλάκα ελαφριού οπλισμού (Οι κανονισμοί στην Αυστραλία έχουν αναθεωρηθεί και πλέον επιτρέπουν το εσωρράχιο της πλάκας να παραμένει μη μονωμένο για πυραντοχή 120 λεπτών). Επιπλέον, το υπάρχον σύστημα καταιονισμού χαμηλού κινδύνου απαιτούσε αναβάθμιση ώστε να πληρούνται οι ισχύοντες κανονισμοί.

Το 1990 η πυρασφάλεια των κτιρίων έγινε αντικείμενο δημόσιας διαβούλευσης σε εθνικό επίπεδο. Με αυτή την ευκαιρία πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση επικινδυνότητας, με σκοπό να εκτιμηθεί κατά πόσο η πυροπροστασία της μεταλλικής κατασκευής και η αναβάθμιση του συστήματος καταιονισμού ήταν απαραίτητα για το κτίριο. Έγιναν δύο εκτιμήσεις. Η πρώτη έγινε με βάση ότι το κτίριο συμμορφωνόταν με τους τρέχοντες κανονισμούς, χωρίς πρόσθετα μέτρα ασφάλειας. Η δεύτερη δεν πρόβλεπε προστασία στις δοκούς ή το εσωρράχιο της πλάκας, σε συνδυασμό με αναστολή της λειτουργίας του υπάρχοντος συστήματος καταιονισμού. Στη δεύτερη εκτίμηση λήφθηκε επίσης υπόψη η επίδραση των συστημάτων ανίχνευσης και των συστημάτων διαχείρισης κτιρίων. Οι αρχές συμφώνησαν ότι στην περίπτωση που τα αποτελέσματα της δεύτερης ανάλυσης επικινδυνότητας ήταν εξίσου θετικά με τα αντίστοιχα της πρώτης ανάλυσης, θα θεωρούταν αποδεκτή η χρήση του υπάρχοντος συστήματος καταιονισμού και των μη μονωμένων μεταλλικών δοκών και σύμμικτων πλακών.

Τέσσερα πειράματα πραγματοποιήθηκαν ώστε να συλλεχθούν τα δεδομένα για τη δεύτερη ανάλυση επικινδυνότητας. Τα πειράματα είχαν σκοπό την μελέτη ζητημάτων όπως την πιθανή φύση της φωτιάς, τη συμπεριφορά του υπάρχοντος συστήματος καταιονισμού, τη συμπεριφορά της μη μονωμένης σύμμικτης πλάκας και των κυψελωτών δοκών όταν εκτίθενται σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς και την πιθανή παραγωγή καπνού και τοξικών προϊόντων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ένα κτίριο που κατασκευάστηκε ειδικά για τον σκοπό αυτό στο Εργαστήριο της Μελβούρνης του τμήματος Έρευνας της BHP (βλ. Σχήμα 4.4). Με τον τρόπο αυτό επετεύχθη η προσομοίωση ενός τυπικού ορόφου με ύψος 12 m x 12 m σε γωνιακό άνοιγμα του κτιρίου. Το κτίριο του πειράματος επιπλώθηκε ώστε να αντιπροσωπεύει περιβάλλον γραφείου, με ένα μικρό γραφείο, διαστάσεων 4 m x 4 m, προσκείμενο στην περίμετρο του κτιρίου. Το γραφείο κλείστηκε με γυψοσανίδα, υαλοπίνακες, μία πόρτα και την πρόσοψη του κτιρίου. Για το φορτίο του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δεξαμενές νερού.



Σχήμα 4.4 Το κτίριο του πειράματος και το πείραμα πυρκαγιάς της BHP

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα πυρκαγιάς. Τα πρώτα δύο πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του συστήματος καταιονισμού χαμηλού κινδύνου. Στο Πείραμα 1, η πυρκαγιά ξεκίνησε στο μικρό γραφείο και οι καταιονητήρες ενεργοποιήθηκαν αυτόματα. Το γραφείο έφερε πυροθερμικό φορτίο 52 kg/m^2 . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανήλθε στους 60°C μέχρι η πυρκαγιά να ελεγχθεί και να κατασβηστεί από τους καταιονητήρες. Στο Πείραμα 2, η πυρκαγιά ξεκίνησε σε ανοιχτό χώρο στο μέσο μεταξύ τεσσάρων καταιονητήρων. Η περιοχή έφερε φορτίο $53,5 \text{ kg/m}^2$. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανήλθε στους 118°C μέχρι η πυρκαγιά να ελεγχθεί και να κατασβηστεί από τους καταιονητήρες. Τα δύο πειράματα έδειξαν ότι το υπάρχον σύστημα καταιονισμού χαμηλού κινδύνου ήταν κατάλληλο για την αντιμετώπιση της πυρκαγιάς.

Στο Πείραμα 3 εκτιμήθηκε η δομική και θερμική συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας. Οι δοκοί υποστήριξης ήταν μερικώς μονωμένες. Η πυρκαγιά ξεκίνησε στον ανοιχτό χώρο και αναπτύχθηκε ελεύθερα με τους καταιονητήρες απενεργοποιημένους. Η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος ανήλθε στους 1254°C . Η πυρκαγιά κατασβήστηκε όταν υπολογίστηκε ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος έφτασε στην ανώτατη τιμή της. Η πλάκα υποστήριξε το φορτίο που ασκήθηκε. Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στην ανώτερη επιφάνεια της πλάκας ήταν 72°C . Η κάτω πλευρά της πλάκας ήταν μερικώς μονωμένη από το σύστημα οροφής, το οποίο παρέμεινε σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστο κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Στο Πείραμα 4, οι μεταλλικές δοκοί ήταν μη μονωμένες και η πυρκαγιά ξεκίνησε στο μικρό γραφείο. Η πυρκαγιά δεν εξαπλώθηκε στον ανοιχτό χώρο, παρόλο που οι υαλοπίνακες υπέστησαν θραύση από τους χειριστές του πειράματος ώστε να αυξηθεί ο αερισμός. Κατά συνέπεια, η πυρκαγιά προκλήθηκε τεχνητά στον ανοιχτό χώρο. Η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος που καταγράφηκε ήταν 1228°C και η μέγιστη θερμοκρασία στη μεταλλική δοκό 632°C, πάνω από την αναρτημένη οροφή. Η κεντρική βύθιση της κυψελωτής δοκού ήταν 120 mm και κατά το μεγαλύτερο μέρος της η παραμόρφωση αυτή αποκαταστήθηκε όταν η θερμοκρασία της κατασκευής επανήλθε σε τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Τρεις αφόρτιστοι στύλοι τοποθετήθηκαν στο πυροδιαμέρισμα ώστε να εξεταστεί η επίδραση των απλών προστατευτικών καλυμμάτων ακτινοβολίας. Ο ένας στύλος ήταν μονωμένος με γαλβανισμένο μεταλλικό φύλλο, ο δεύτερος με επαργιλωμένο μεταλλικό φύλλο και ο τρίτος ήταν μη μονωμένος ως στύλος αναφοράς. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν για τους τρεις στύλους ήταν 580°C, 427°C και 1064°C αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ότι τα απλά προστατευτικά καλύμματα ακτινοβολίας παρέχουν επαρκή προστασία στα μεταλλικά μέλη σε συνθήκες πυρκαγιάς χαμηλού φορτίου.

Τα τέσσερα πειράματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το υπάρχον σύστημα καταιονισμού χαμηλού κινδύνου ήταν επαρκές και δεν ήταν απαραίτητα άλλα μέτρα πυροπροστασίας για τις μεταλλικές δοκούς ή το εσωρράχιο της σύμμικτης πλάκας. Οποιαδήποτε πυρκαγιά στο κτίριο της οδού William δεν αναμένεται να παραμορφώσει την πλάκα ή τις μεταλλικές δοκούς σε υπερβολικό βαθμό, εφόσον οι θερμοκρασίες του μετάλλου δεν υπερβαίνουν τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν στα πειράματα.

Η άνοδος της θερμοκρασίας στις μεταλλικές δοκούς επηρεάστηκε από το σύστημα αναρτημένης οροφής, το οποίο παρέμεινε σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Το μεγάλο κτίριο γραφείων στο κέντρο της πόλης που υποβλήθηκε σε τεχνική εξέταση ανήκε στη μεγαλύτερη ασφαλιστική εταιρία της Αυστραλίας, η οποία ανέλαβε την πρωτοβουλία και τη χρηματοδότηση του προγράμματος των πειραμάτων. Οι τοπικές αρχές ενέκριναν το κτίριο χωρίς παθητική πυροπροστασία στις δοκούς, αλλά με το σύστημα καταιονισμού χαμηλού κινδύνου βελτιωμένης αξιοπιστίας και το σύστημα αναρτημένης οροφής, τα οποία αποδείχθηκαν ότι ανταποκρίνονται με επιτυχία στην πυρκαγιά κατά τη διάρκεια του προγράμματος των πειραμάτων.

4.3.2 Πειράματα πυρκαγιάς στην οδό Collins

Η διάταξη σε αυτό το πείραμα κατασκευάστηκε με σκοπό την προσομοίωση τμήματος από προτεινόμενο πολυώροφο κτίριο με μεταλλικό σκελετό στην οδό Collins, στη Μελβούρνη. Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή των θερμοκρασιών κατά την πυρκαγιά λόγω καύσης των επίπλων σε ένα τυπικό διαμέρισμα γραφείου.

Το διαμέρισμα είχε διαστάσεις 8,4 m x 3,6 m και ήταν επιπλωμένο με τυπική επίπλωση γραφείου που αντιστοιχούσε σε πυροθερμικό φορτίο μεταξύ 44 και 49 kg/m². Στο διαμέρισμα εγκαταστάθηκε ένα μη αξιολογημένο σε πυρκαγιά σύστημα αναρτημένης οροφής, με πλακίδια από γύψο και προστατευτική επένδυση από υαλόνημα. Το πάνω μέρος του διαμερίσματος κατασκευάστηκε από αφόρτιστη πλάκα σκυροδέματος. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, έγινε καταγραφή των θερμοκρασιών στις μεταλλικές δοκούς ανάμεσα στην πλάκα σκυροδέματος και την αναρτημένη οροφή. Έγινε, επίσης, καταγραφή των θερμοκρασιών τριών εσωτερικών ελεύθερων στύλων. Δύο από τους τρεις αυτούς στύλους ήταν

μονωμένοι με φύλλο αλουμινίου και μεταλλικό φύλλο, που δρουν ως απλά προστατευτικά καλύμματα ακτινοβολίας. Ο τρίτος στύλος παρέμεινε μη μονωμένος. Κατασκευάστηκαν επίσης τρεις αφόρτιστοι εξωτερικοί στύλοι, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε απόσταση 300 mm από τους υαλοπίνακες περιμετρικά του διαμερίσματος.

Η μη αξιολογημένη στην πυρκαγιά αναρτημένη οροφή παρείχε επαρκές φράγμα πυρός, διατηρώντας τη θερμοκρασία στις μεταλλικές δοκούς σε χαμηλά επίπεδα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η αναρτημένη οροφή παρέμεινε ανεπηρέαστη από την πυρκαγιά σε μεγάλο βαθμό. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κάτω από την οροφή κυμάνθηκαν μεταξύ 831°C και 1163°C, με τη χαμηλότερη τιμή να σημειώνεται κοντά στους υαλοπίνακες που υπέστησαν θραύση. Πάνω από την οροφή, οι θερμοκρασίες κυμάνθηκαν μεταξύ 344°C και 724°C, με τις υψηλότερες τιμές να σημειώνονται στα σημεία όπου ρηγματώθηκε η οροφή. Η μέγιστη θερμοκρασία στη μεταλλική δοκό ήταν 470°C.

Οι μη μονωμένοι αφόρτιστοι εσωτερικοί στύλοι παρουσίασαν ανώτατη θερμοκρασία 740°C, ενώ οι μονωμένοι κάτω των 403°C. Στους γυμνούς εξωτερικούς στύλους καταγράφηκε ανώτατη θερμοκρασία 490°C.

Το παραπάνω πείραμα πυρκαγιάς έδειξε ότι οι θερμοκρασίες που σημειώθηκαν στις δοκούς και στους εξωτερικούς στύλους ήταν επαρκώς χαμηλές ώστε να δικαιολογούν τη χρήση μη μονωμένου μετάλλου και ότι, όπως στην περίπτωση των πειραμάτων της οδού William, το μη αξιολογημένο στην πυρκαγιά σύστημα αναρτημένης οροφής παρείχε θετική προστασία.

4.3.3 Συμπεράσματα της έρευνας στην Αυστραλία

Τα πειράματα στην Αυστραλία και οι σχετικές αναλύσεις κινδύνου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι εφόσον τα πολυώροφα κτίρια γραφείων διαθέτουν σύστημα καταιονισμού επαρκούς επιπέδου αξιοπιστίας, η χρήση μη μονωμένων δοκών προσφέρει υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας σε σχέση με παρόμοια κτίρια τα οποία πληρούν τις απαιτήσεις παθητικής πυροπροστασίας του Κώδικα Κατασκευών στην Αυστραλία. Ως τις αρχές του 1999, στην Αυστραλία έλαβαν έγκριση έξι κτίρια 12 ως 41 ορόφων.

4.4 Πειράματα πυρκαγιάς στη Γερμανία

Το 1985 πραγματοποιήθηκε πείραμα πυρκαγιάς σε τετραώροφο κτίριο δοκιμής με μεταλλικό σκελετό που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Stuttgart-Vaihingen στη Γερμανία⁽⁹⁾. Μετά από το πείραμα πυρκαγιάς, το κτίριο χρησιμοποιήθηκε ως γραφείο και εργαστήριο.

Το κτίριο κατασκευάστηκε από διάφορα είδη μεταλλικών στοιχείων και στοιχείων σκυροδέματος. Τα στοιχεία αυτά περιλάμβαναν στύλους με πλήρωση νερού, μερικώς επενδυμένους στύλους, στύλους με πλήρωση σκυροδέματος, σύμμικτες δοκούς και διάφορα είδη σύμμικτης πλάκας.

Το κύριο πείραμα πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε στον τρίτο όροφο, σε διαμέρισμα με εμβαδό περίπου το ένα τρίτο του κτιρίου. Το πυροθερμικό φορτίο παρείχαν ξύλινα σανίδια, ενώ βαρέλια πετρελαίου με νερό παρείχαν το φορτίο βαρύτητας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπερέβη τους 1000°C, ενώ η θερμοκρασία στις δοκούς της πλάκας ανήλθε στους 650°C. Μετά από το πείραμα, η εξέταση των δοκών έδειξε ότι οι κορμοί με εξωτερική επένδυση σκυροδέματος αποσαθρώθηκαν τοπικά, αποκαλύπτοντας τον οπλισμό. Ωστόσο, η συμπεριφορά στην πυρκαγιά των δοκών ήταν θετική, χωρίς σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις μετά από την πυρκαγιά. Οι εξωτερικοί στύλοι και οι στύλοι

περιμετρικά του κεντρικού πυρήνα δεν παρουσίασαν σημάδια μόνιμης παραμόρφωσης. Η σύμμικτη πλάκα υπέστη μέγιστη βύθιση 60 mm κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, ενώ συνολικά διατήρησε την ακεραιότητά της.

Μετά από την πυρκαγιά, το κτίριο ανακαινίστηκε. Οι εργασίες ανακαίνισης περιλάμβαναν ολική αντικατάσταση των εξωτερικών τοιχωμάτων που υπέστησαν ζημιά από την πυρκαγιά, των τμημάτων που υπέστησαν ζημιά στο μεταλλικό υπόστρωμα της πλάκας σκυροδέματος και της επένδυσης σκυροδέματος των δοκών. Συνολικά, αποδείχτηκε ότι η ανακαίνιση του κτιρίου ήταν οικονομικά εφικτή.

4.5 Πειραματικές εργασίες σε θερμοκρασία δωματίου

Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5 βασίστηκε σε θεωρητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια σχεδιασμού για θερμοκρασίες δωματίου και επαληθεύτηκαν με πειραματική διερεύνηση. Από το 1961, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με σκοπό την εξέταση της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης στις πλάκες σκυροδέματος (15, 18, 22, 23, 24) χωρίς οριζόντιες δεσμεύσεις. Σε όλα τα πειράματα, το δείγμα αστόχησε εξαιτίας μεγάλων ρωγμών σε όλο το πάχος της πλάκας κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος και παρατηρήθηκε εμφανώς η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1

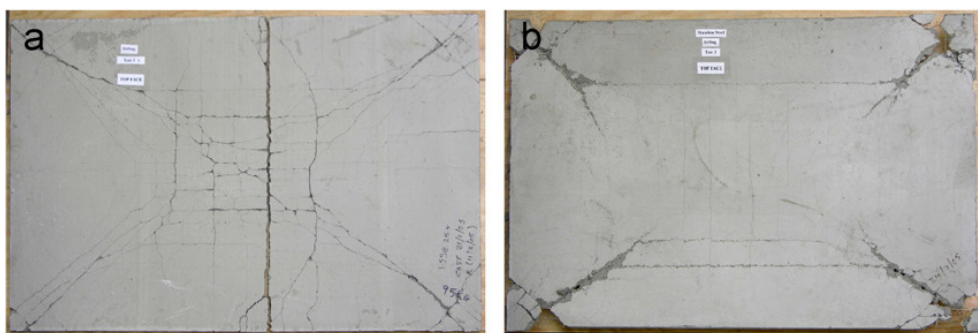
Πίνακας 4.1 Σύγκριση μεταξύ της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού και πειραμάτων σε θερμοκρασία δωματίου⁽²⁶⁾

Αναφορά	Αρ. Πειράμ.	Μέγεθος πλάκας (m)	Φορτίο γραμμής διαρροής (kN/m ²)	Φορτίο πειρ. (kN/m ²)	Ενίσχυση που παρατηρήθηκε στο πείραμα	Υπολογισμένη ενίσχυση
Hayes & Taylor ⁽²²⁾	R11	0.914x0.914	15.43	31.97*	2.07	2.07
	R12	0.914x0.914	55.64	89.0*	1.60	2.11
	R13	0.914x0.914	29.05	60.8*	2.09	2.09
	R21	1.372x0.914	20.24	36.48*	1.80	1.80
	R31	1.828x0.914	16.37	25.08*	1.53	1.49
Taylor, Maher & Hayes ⁽²³⁾	S1	1.829x1.829	23.83	42.90*	1.80	1.48
	S7	1.829x1.829	23.83	39.03*	1.64	1.68
	S9	1.829x1.829	23.83	38.13*	1.60	1.31
Sawczuk & Winnicki ⁽¹⁸⁾	Type 1 (α = 2.0)	2.0x1.0	20.6	38.26*	1.86	1.71
	Type 2 (α = 2.0)	2.0x1.0	10.99	17.18*	1.56	1.46
	Type 1 (α = 1.45)	1.6x1.1	21.04	45.13*	2.14	2.15
Wood ⁽¹⁵⁾		0.610 x0.610	10.45 (kN)	17.14* (kN)	1.64	1.36
BRE ⁽²⁰⁾		9.5 x 6.46	2.58	4.81	1.86	1.68

* δηλώνει πως δεν παρατηρήθηκε αστοχία της πλάκας.

Μία σειρά 22 πειραμάτων μικρής κλίμακας πραγματοποιήθηκαν σε οριζοντίως μη δεσμευμένες πλάκες σκυροδέματος, με λόγο διαστάσεων 1,00 ή 1,55, από τους Bailey και Toh (27). Σε αυτά τα πειράματα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος,

παρατηρήθηκαν εν γένει δύο διαφορετικοί τρόποι αστοχίας, με βάση το ποσοστό οπλισμού, το λόγο των διαστάσεων και την ολκιμότητα του οπλισμού. Η θραύση του οπλισμού κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος (Σχήμα 4.5(α)) ήταν ο κατεξοχήν τρόπος αστοχίας στις περισσότερες πλάκες με ελαφρύ οπλισμό, ενώ στις πλάκες με βαρύ οπλισμό και στις πλάκες με οπλισμό υψηλής ολκιμότητας η αστοχία προκλήθηκε κυρίως λόγω θλίψης στα άκρα της πλάκας (Σχήμα 4.5(β)). Τα παραπάνω εμπειρικά δεδομένα παρείχαν τις απαραίτητες πληροφορίες για την επέκταση της μεθόδου στην ορθοτροπική ενίσχυση και για την εξέταση της αστοχίας σε θλίψη του σκυροδέματος ως έναν πρόσθετο πιθανό τρόπο αστοχίας.



Σχήμα 4.5 Δύο τυπικοί τρόποι αστοχίας των πλακών σε πειράματα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

4.6 Πειραματικές εργασίες σε υψηλές θερμοκρασίες

Εκτός από τα επτά πειράματα πραγματικής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο οκτώροφο κτίριο πραγματικής κλίμακας με μεταλλικό σκελετό και σύμμικτες πλάκες στο Cardington το 1996 και το 2003 (28, 29), πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα μικρής κλίμακας σε υψηλές θερμοκρασίες από τους Bailey και Toh (27), με σκοπό την περαιτέρω εξέταση της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης στις σύμμικτες πλάκες. Ως αποτέλεσμα αυτών των πειραμάτων, η μέθοδος σχεδιασμού που είχε αναπτυχθεί αρχικά από τους Bailey και Moore τροποποιήθηκε, αποκτώντας την τυποποιημένη μορφή της, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Οι Bailey και Toh (27) πραγματοποίησαν μια σειρά από 15 πειράματα μικρής κλίμακας σε οριζοντίως μη δεσμευμένες πλάκες σκυροδέματος, με λόγο διαστάσεων 1,00 ή 1,55. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε αντίθεση με τις πλάκες των πειραμάτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπου ο τρόπος αστοχίας επηρεάζεται από τη θλίψη του σκυροδέματος, και στις 15 πλάκες αυτών των πειραμάτων η θραύση του οπλισμού κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος ήταν ο κατεξοχήν τρόπος αστοχίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Τρόπος αστοχίας των πλακών σε πειράματα με υψηλές θερμοκρασίες

5 Η ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Μετά από το καινοτόμο έργο του Johansen πάνω στην ανάλυση γραμμών διαρροής⁽¹⁰⁾, οι ερευνητές παρατήρησαν τη θετική επίδραση των εφελκυστικών δυνάμεων της μεμβράνης για τη βελτιστοποίηση της φέρουσας ικανότητας των πλακών σκυροδέματος, σε σύγκριση με τους υπολογισμούς για τη φέρουσα ικανότητα που βασίζεται μόνο στην καμπτική συμπεριφορά⁽¹¹⁾.

Μια σειρά εμπειρικών και θεωρητικών διερευνήσεων πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εξέταση της θετικής επίδρασης των δυνάμεων εντός επιπέδου σε θερμοκρασία δωματίου, οι οποίες οδήγησαν στη διαμόρφωση μιας καλής θεωρητικής βάσης για την αντίστοιχη συμπεριφορά. Μετά από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Cardington, η παραπάνω θεωρία επεκτάθηκε σε σενάρια σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Τα πειράματα στο Cardington και τα στοιχεία από άλλες πραγματικές πυρκαγιές σε κτιριακές κατασκευές βοήθησαν να αποδειχθεί ότι τα σύμμικτα κτίρια μετάλλου-σκυροδέματος διαθέτουν σημαντικά αποθέματα αντοχής, και κατά συνέπεια η συμπεριφορά των κατασκευών αυτών στην πυρκαγιά είναι καλύτερη της προβλεπόμενης βάσει των πρότυπων πειραμάτων πυρκαγιάς σε μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Στο Cardington αποδείχτηκε ότι είναι δυνατό να παραμείνουν μη μονωμένες οι σύμμικτες μεταλλικές δοκοί που υποστηρίζουν την πλάκα σκυροδέματος. Στη συνέχεια, ξεκίνησαν εργασίες με σκοπό την εξέταση των κατάλληλων μοντέλων σχεδιασμού, ώστε οι δομοστατικοί μηχανικοί να έχουν τη δυνατότητα να αιτιολογήσουν το σχεδιασμό πυράντοχης πλάκας δαπέδου που υποστηρίζεται από μη μονωμένες μεταλλικές δοκούς.

Οι ερευνητές της Building Research Establishment (BRE), με χρηματοδότηση από το Ινστιτούτο Κατασκευής Χάλυβα (SCI), ανέπτυξαν την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού για σύμμικτες πλάκες δαπέδου χάλυβα-σκυροδέματος, μετά από τα πειράματα στο Cardington^(12,13). Η εγκυρότητα του μοντέλου της BRE εξετάστηκε στα αποτελέσματα από τα πειράματα μεγάλης κλίμακας στο Cardington και από προηγούμενες πειραματικές διερευνήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται και περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5.2.

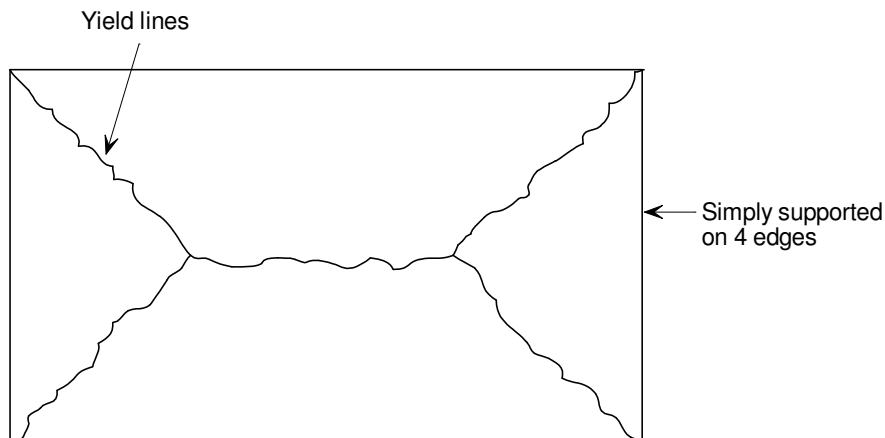
Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες απλοποιημένες διαδικασίες όπως προβλέπονται από τους κανονισμούς^(32,33), επειδή λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά ενός συνόλου δομικών στοιχείων που δρουν συνδυαστικά, και όχι τη συμπεριφορά μεμονωμένων στοιχείων. Παρόλο που από τεχνική άποψη είναι δυνατή η χρήση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας σε πυρκαγιά, αυτή η λύση είναι περισσότερο ακριβή, καθώς απαιτεί σημαντική εμπειρία και πρότερη γνώση. Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο παρόν έγγραφο είναι περισσότερο προσβάσιμη στους δομοστατικούς μηχανικούς που διαθέτουν βασικές γνώσεις μηχανικής πυρασφάλειας.

5.1 Εισαγωγή στη θεωρία γραμμών διαρροής και στη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης

Η θεωρία γραμμών διαρροής πάνω στην οποία επέδειξε καινοτόμο έργο ο Johansson είναι μία θεωρία οριακού φορτίου που βασίζεται στους υποθετικούς μηχανισμούς κατάρρευσης και στις πλαστικές ιδιότητες των κάτω-οπλισμένων πλακών σκυροδέματος. Ο μηχανισμός κατάρρευσης προσδιορίζεται από τη διάταξη των γραμμών διαρροής κατά τις οποίες διαρρέει ο οπλισμός και η πλάκα υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις. Οι περιοχές που περικλείονται από τις γραμμές διαρροής θεωρείται ότι παραμένουν άκαμπτες, ενώ η συνολική στροφή πραγματοποιείται στη γραμμή διαρροής.

Η εγκυρότητα της θεωρίας γραμμών διαρροής έγκειται στην πρόληψη της διατμητικής αστοχίας, της αστοχίας δεσμού (αποκόλληση) και της αστοχίας σε θλίψη. Η απόκριση ροπής-καμπυλότητας της πλάκας πρέπει να είναι επαρκώς όλκιμη για να σχηματίζεται ο μηχανισμός. Στην πράξη, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, εφόσον οι πλάκες είναι πάντοτε κάτω-οπλισμένες, με αποτέλεσμα την όλκιμη διαρροή του οπλισμού πριν την εμφάνιση περισσότερο ψαθυρών τρόπων αστοχίας, όπως η αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος.

Οι τετράγωνα και ορθογώνια πλάκες που είναι απλά εδραζόμενες στα ελεύθερα άκρα τους αναμένεται να παρουσιάσουν τη διάταξη των γραμμών διαρροής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Στην παρακάτω θεωρητική ανάπτυξη λαμβάνεται υπόψη ως υπόθεση αυτή η διάταξη των γραμμών διαρροής. Στην πράξη, στα κτίρια με μεταλλικό σκελετό, η πλάκα υποστηρίζεται σε μεταλλικές δοκούς που διαθέτουν ορισμένη ακαμψία μεταξύ των θέσεων των στύλων. Η παραπάνω περίπτωση παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.



Σχήμα 5.1 Τυπική διάταξη των γραμμών διαρροής σε ορθογώνια πλάκα απλά εδραζόμενη σε τέσσερα άκρα

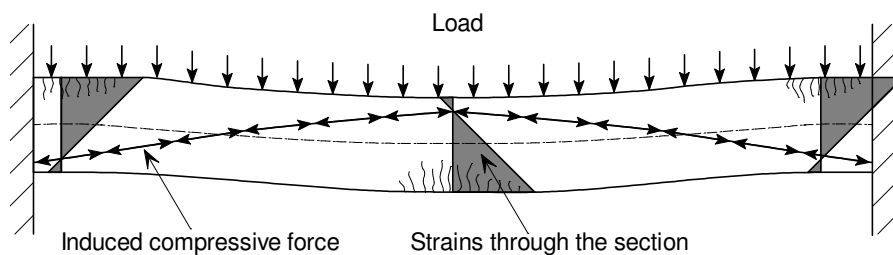
Η άνω οριακή (upper bound) επίλυση μπορεί να προκύψει από την υποθετική διάταξη των γραμμών διαρροής. Η λύση βασίζεται στην ενεργειακή θεωρία, με το εξωτερικό έργο να πραγματοποιείται από το υφιστάμενο φορτίο εξαιτίας της μοναδιαίας μετακίνησης των άκαμπτων περιοχών που είναι ισοδύναμο με το εσωτερικό έργο που πραγματοποιείται από τη στροφή της διάταξης των γραμμών διαρροής. Το φορτίο που αντιστοιχεί σε οποιονδήποτε υποθετικό μηχανισμό αστοχίας θα είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το πραγματικό φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής, προσφέροντας με τον τρόπο αυτό την άνω οριακή επίλυση.

Ωστόσο, εξαιτίας της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης στην πλάκα και της κράτυνσης του οπλισμού μετά από τη διαρροή, η παραπάνω θεωρητική άνω οριακή επίλυση της ανάλυσης των γραμμών διαρροής τείνει να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με το πραγματικό φορτίο αστοχίας της πλάκας, όπως παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Η δράση της μεμβράνης στις πλάκες δημιουργεί δυνάμεις εντός επιπέδου, οι οποίες εξαρτώνται από τις εντός επιπέδου συνοριακές συνθήκες της πλάκας. Στη συνέχεια εξετάζονται δύο ακραίες περιπτώσεις, πλήρους δέσμευσης και χωρίς καμία δέσμευση ελευθερίας.

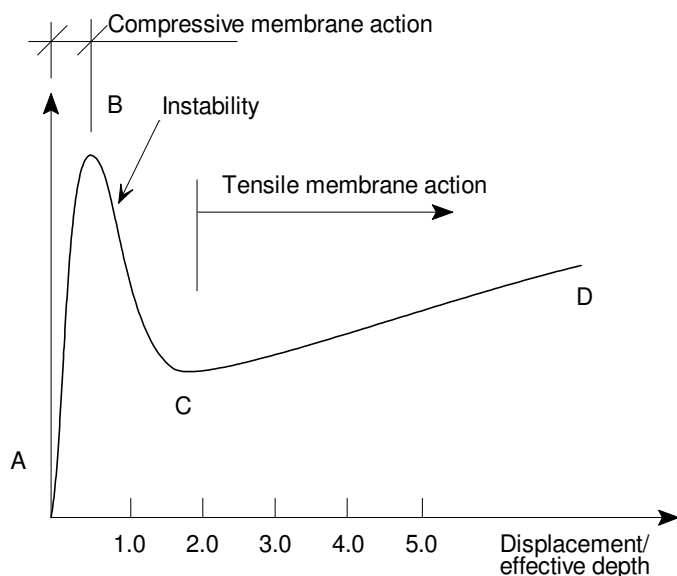
5.1.1 Πλάκα με πλήρη δέσμευση ελευθεριών εντός επιπέδου

Όταν υπάρχει πλήρης δέσμευση ελευθεριών εντός επιπέδου στα άκρα των πλακών, η αρχική βύθιση λόγω κάμψης της πλάκας προκαλεί μια θλιπτική δράση της μεμβράνης^(14,15). Ο παραπάνω μηχανισμός απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2, για διέρριστη πλάκα. Η θλιπτική τοξωτή δράση ξεκινάει από την κάτω επιφάνεια του άκρου της πλάκας και διέρχεται από την άνω επιφάνεια του μέσου της πλάκας για να καταλήξει πάλι στο απέναντι άκρο, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η αντοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Ωστόσο, η δράση τόξου γίνεται ασταθής μόλις το μέγεθος της κατακόρυφης βύθισης υπερβεί την τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο ήμισυ του πάχους της πλάκας, με αποτέλεσμα η αντοχή να μειώνεται απότομα. Στη συνέχεια η πλάκα εμφανίζει τη δράση εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης σε μεγαλύτερες τιμές βυθίσεων.



Σχήμα 5.2 Θλιπτική δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης σε δεσμευμένη πλάκα

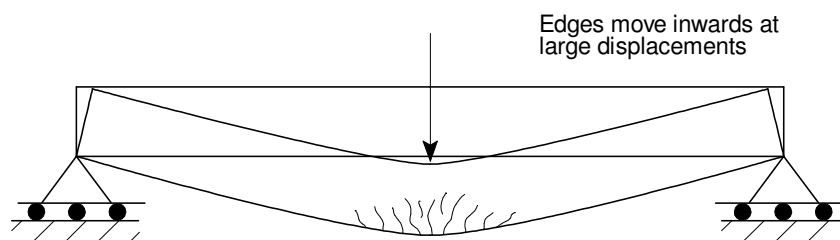
Ο Park⁽¹⁴⁾ απεικονίζει την επίδραση της θλιπτικής δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης σε δεσμευμένη πλάκα σε σχήμα παρόμοιο με το Σχήμα 5.3. Το αρχικό ανώτατο φορτίο στο παραπάνω σχήμα, σε βυθίσεις μικρότερες από το πάχος της πλάκας, οφείλεται στη θλιπτική δράση της μεμβράνης. Μόλις σημειωθεί αστοχία σε θλίψη στο σκυρόδεμα, παρατηρείται απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας, σε συνδυασμό με αύξηση της μετατόπισης. Στη συνέχεια, η φέρουσα ικανότητα αυξάνεται, όσο αυξάνεται η βύθιση έως ότου ο οπλισμός να υποστεί θραύση.



Σχήμα 5.3 Δράση της μεμβράνης σε πλάκα με δεσμευμένα άκρα εντός επιπέδου⁽¹⁵⁾

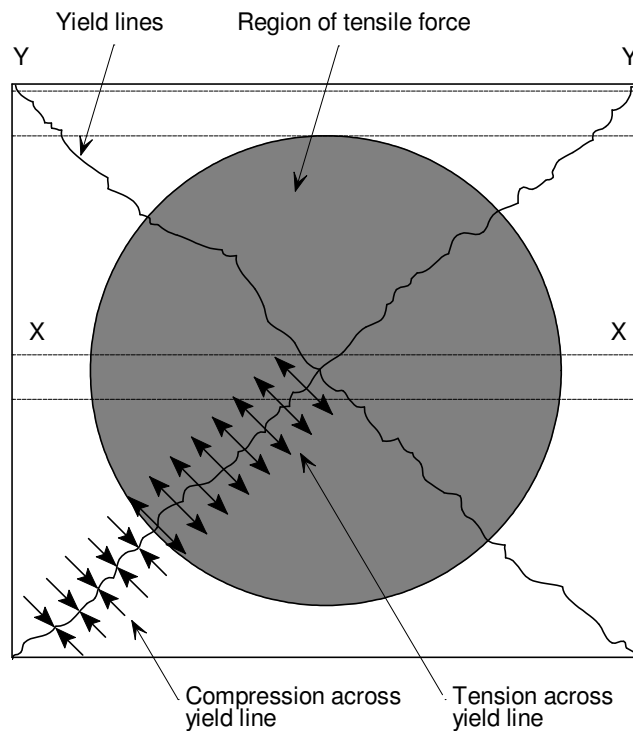
5.1.2 Πλάκα χωρίς δέσμευση ελευθεριών εντός επιπέδου

Στις περιπτώσεις όπου τα άκρα της πλάκας δεν είναι δεσμευμένα, η συμπεριφορά της πλάκας διαφοροποιείται. Η θλιπτική δράση της μεμβράνης δεν εμφανίζεται και η συμπεριφορά μετά από τη διαρροή χαρακτηρίζεται από την εφελκυστική δράση της μεμβράνης. Στην διέριστη πλάκα, οι μεγάλες κατακόρυφες βυθίσεις προκαλούν συρρίκνωση των άκρων της πλάκας. Αν η συρρίκνωση εμποδιστεί, αναπτύσσονται δυνάμεις εφελκυσμού. Στην διέριστη πλάκα, αυτές οι δυνάμεις παρεμπόδισης πρέπει να εφαρμοστούν εξωτερικά στη στήριξη. Ωστόσο, στις τετραέριστες πλάκες, δηλαδή στις πλάκες απλής έδρασης σε τέσσερις πλευρές, οι εξωτερικές οριζόντιες δεσμεύσεις δεν είναι αναγκαίες, καθώς η πλάκα εμφανίζει ένα εσωτερικό σύστημα δυνάμεων εντός επιπέδου που επιδρούν με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 5.4 Δομικά στοιχεία μονοαξονικής έντασης

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση τετραέριστης πλάκας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Η πλάκα διαθέτει κατακόρυφη περιμετρική στήριξη, αλλά δεν διαθέτει οριζόντιες δεσμεύσεις εντός επιπέδου. Η λωρίδα στο κέντρο της πλάκας που σημειώνεται ως X-X έχει την τάση να συρρικνώνεται, όπως στην περίπτωση της διέριστης πλάκας που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Ωστόσο, οι λωρίδες που σημειώνονται ως Y-Y στα άκρα της πλάκας δεν παρουσιάζουν την ίδια κατακόρυφη βύθιση και κατά συνέπεια δεν εμφανίζουν σημαντική συρρίκνωση των άκρων. Το αποτέλεσμα είναι να αναπτύσσονται δυνάμεις εντός επιπέδου στη διεπιφάνεια αυτών των λωρίδων της πλάκας, έτσι ώστε να διατηρείται η ισορροπία με εφελκυστικές τάσεις στις ζώνες X-X και θλιπτικές τάσεις στις ζώνες Y-Y. Καθώς η παραπάνω συμπεριφορά παρατηρείται σε δύο διευθύνσεις, το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται μία περιοχή με εφελκυστικές τάσεις στο κέντρο της πλάκας, όπως σημειώνεται στη σκιασμένη περιοχή του Σχήματος 5.5, και μία θλιπτική δακτύλιος περιμετρικά της πλάκας.



Σχήμα 5.5 Ανάπτυξη δυνάμεων μεμβράνης εντός επιπέδου

5.1.3 Επίδραση των τάσεων μεμβράνης στις γραμμές διαρροής

Η ανάπτυξη των εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων εντός επιπέδου επηρεάζει τις γραμμές διαρροής που αναπτύσσονται στην πλάκα, μειώνοντας την καμπτική αντοχή στην εφελκυστική περιοχή και ενισχύοντας την καμπτική αντοχή των γραμμών διαρροής στη θλιπτική περιοχή. Εκτός από την επίδραση στην καμπτική αντοχή, παρατηρείται επίσης αυξημένη φέρουσα ικανότητα χάρη στην εφελκυστική δράση της μεμβράνης.

Μετά από το έργο του Johansson πάνω στην ανάλυση των γραμμών διαρροής, ο Ockleston αναφέρει πειράματα καταστροφής ολόκληρου κτιρίου⁽¹¹⁾. Τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι το φορτίο που μπορούν να φέρουν οι πλάκες ήταν πολύ μεγαλύτερο από το φορτίο που προβλέπεται με βάση τη θεωρία γραμμών διαρροής. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε σημαντικό σημείο ενδιαφέροντος για την έρευνα πάνω στην επίδραση της μεμβράνης και αρκετοί ερευνητές εξέτασαν την επίδραση αυτή, τόσο εμπειρικά όσο και αναλυτικά τα έτη που ακολούθησαν.

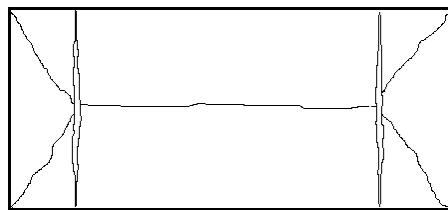
Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των πειραμάτων σε μη δεσμευμένες πλάκες, η διάταξη των γραμμών διαρροής δεν μεταβάλλεται σε μεγάλες μετακινήσεις. Αποδείχτηκε ότι η τελική μορφή αστοχίας ήταν η ανάπτυξη μεγάλων ρωγμών κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος της πλάκας και η θραύση του οπλισμού, όπως αναφέρει σχετικά ο Wood⁽¹⁵⁾.

Μέθοδοι ανάλυσης οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη δράση της μεμβράνης έχουν αναπτυχθεί από τους Wood⁽¹⁵⁾, Kemp⁽¹⁷⁾, Taylor⁽¹⁶⁾, Sawczuk⁽¹⁸⁾, Hayes⁽¹⁹⁾ και Bailey και Moore^(12,13).

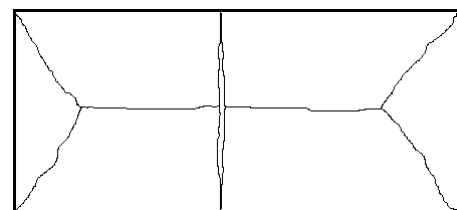
Ο Wood ανέπτυξε μια επίλυση για την περίπτωση της κυκλικής πλάκας με απλώς εδραζόμενα άκρα που υπόκεινται σε κατανεμημένο φορτίο. Μια παρόμοια επίλυση αναπτύχθηκε από τον Kemp για την περίπτωση της τετράγωνης πλάκας. Η μέθοδος του Kemp αφορά μια αυστηρά άκαμπτη-πλαστική επίλυση, κατά την οποία η φέρουσα ικανότητα καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία των

άκαμπτων περιοχών της πλάκας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να προσδιοριστούν τα μεγέθη των δυνάμεων μεμβράνης και των ροπών στις γραμμές διαρροής ως συνάρτηση της βύθισης της πλάκας. Η θεωρία του Kemp δείχνει ότι η φέρουσα ικανότητα της πλάκας αποτελεί συνάρτηση της βύθισης της πλάκας. Σημειώνει ότι, στην πράξη, η τιμή του φορτίου κατάρρευσης επιτυγχάνεται όταν ο οπλισμός υφίσταται θραύση ή όταν το σκυρόδεμα στην εξωτερική περιοχή συνθλίβεται. Ωστόσο, το μοντέλο του δεν επιχειρεί να προσδιορίσει αυτό το τελικό σημείο της συνάρτησης φορτίου-βυθίσεων.

Στην προσέγγιση του Sawczuk περιλαμβάνεται ο σχηματισμός ρωγμής κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος. Ο Sawczuk εξακρίβωσε ότι τα άκαμπτα τριγωνικά στοιχεία της πλάκας υφίστανται ροπή εντός επιπέδου εξαιτίας της μεταβολής των δυνάμεων της μεμβράνης κατά μήκος των γραμμών διαρροής. Υπολογίζοντας την καμπτική αντοχή των άκαμπτων περιοχών, ο Sawczuk πρόβλεψε την εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της πλάκας και την εμφάνιση ρωγμών κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος. Οι ρωγμές αυτές δεν είναι επιτρεπτές στις μεθόδους που ανέπτυξαν ο Taylor και ο Kemp. Η μέθοδος του Sawczuk που βασίζεται στην ενέργεια λαμβάνει υπόψη δύο πιθανούς σχηματισμούς ρωγμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Το συμπέρασμα αυτής της μεθόδου είναι ότι η οριστική μορφή αστοχίας προκαλείται από τις ρωγμές που εμφανίζονται κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος, στην τομή των γραμμών διαρροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6 (α).



(a) Crack forming at the intersection of the yield lines



(b) Crack forming at the centre of the slab

Σχήμα 5.6 Τρόποι αστοχίας κατά Sawczuk

Ο Hayes σημειώνει ότι στην ανάλυση του Sawczuk θεωρείται δεδομένη η εμφάνιση συνοριακών δυνάμεων, ενώ στην πραγματικότητα οι δυνάμεις αυτές δεν είναι δυνατό να εμφανιστούν σε μη δεσμευμένα απλά εδραζόμενα άκρα. Ο Hayes σημειώνει επίσης ότι δεν παρατηρείται αύξηση της φέρουσας ικανότητας, όταν λαμβάνεται υπόψη η ισορροπία ροπών των άκαμπτων περιοχών. Ο Hayes ανέπτυξε τη δική του επίλυση για την περίπτωση της ορθοτροπικά οπλισμένης ορθογώνιας πλάκας, όπου ενσωματώνει την κριτική του για το μοντέλο επίλυσης του Sawczuk, ενώ αποδέχεται το μοντέλο επίλυσης του Kemp για την περίπτωση της τετράγωνης πλάκας. Στη μέθοδο που ανέπτυξε ο Hayes, θεωρεί, επίσης, ότι οι ρωγμές κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος εμφανίζονται στην τομή των γραμμών διαρροής. Μέσα από τη σύγκριση της δικής του μεθόδου με αυτήν του Sawczuk, ο Hayes διαπιστώνει τελικά μόνο μικρές διαφοροποιήσεις. Πλέον σημαντική παρατήρηση του Hayes είναι ότι η ενίσχυση χάρη στην επίδραση της μεμβράνης μειώνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος των διαστάσεων της πλάκας ή η ορθοτροπία του οπλισμού.

Η υπόθεση του Sawczuk, την οποία υιοθετεί και ο Hayes, ότι ο τρόπος αστοχίας αφορά δύο ρωγμές κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος της πλάκας στην τομή των γραμμών διαρροής έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των περισσότερων πειραμάτων, συμπεριλαμβανομένου ενός πειράματος που

πραγματοποιήθηκε από την BRE το 2000⁽²⁰⁾. Κατά συνέπεια, οι Bailey και Moore^(12,13) τροποποίησαν τη μέθοδο προσέγγισης που ανέπτυξε ο Hayes και στήριξαν τη μέθοδο ισορροπίας που ανέπτυξαν οι ίδιοι στο σχηματισμό μίας μοναδικής ρωγμής στο κέντρο της πλάκας, δηλαδή τον τρόπο αστοχίας που παρατηρήθηκε με τη μεγαλύτερη συχνότητα στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες - βλ. Σχήμα 5.7 (β). Η μέθοδος που χρησιμοποιούν οι Bailey και Moore παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.2. Αρχικά, αναπτύχθηκε για ισοτροπικό οπλισμό, αλλά ενημερώθηκε ώστε να περιλαμβάνει την επίδραση του ορθοτροπικού οπλισμού και της αλυσιδωτής δράσης των μεταλλικών δοκών⁽²¹⁾.

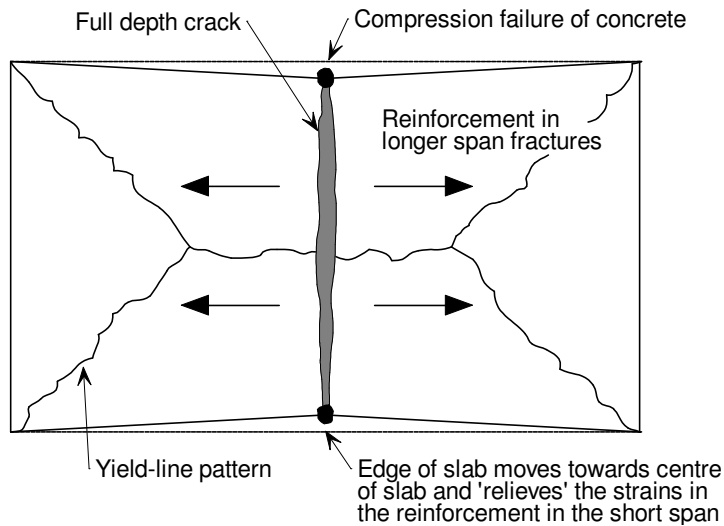
5.2 Υπολογισμός της αντοχής σύμμικτης πλάκας σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει την ανάπτυξη μιας απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντοχής ορθογώνιων σύμμικτων πλακών δαπέδου. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στην πάροδο των ετών. Στην αρχική της μορφή^(12,13) χρησιμοποιήθηκε για τον ισοτροπικό οπλισμό λαμβάνοντας υπόψη μόνο έναν τρόπο αστοχίας, από θραύση του πλέγματος κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 (α). Οι μεταγενέστερες εκδοχές της μεθόδου^(21,25) περιλάμβαναν μία γενικότερη επίλυση, επιτρέποντας τη χρήση ορθοτροπικού οπλισμού και λαμβάνοντας, επίσης, υπόψη την αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος στα άκρα της πλάκας (βλ. Σχήμα 5.7 (β)).

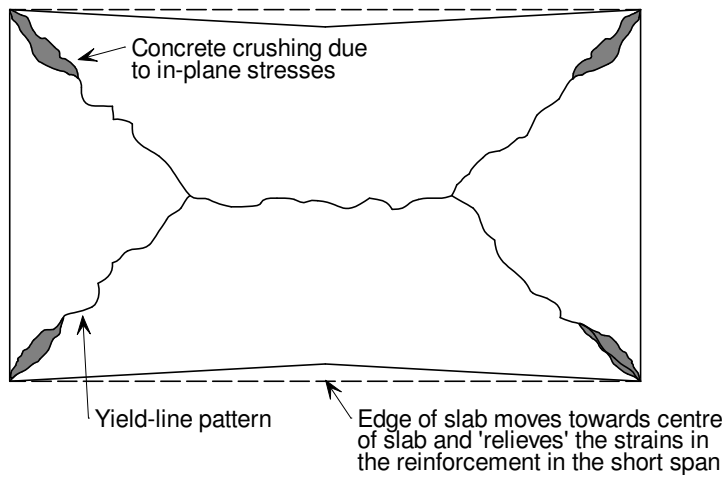
5.2.1 Υπολογισμός της αντοχής

Η φέρουσα ικανότητα της απλά εδραζόμενης τετραέρειστης πλάκας, χωρίς οριζόντιες δεσμεύσεις εντός επιπέδου στα άκρα της, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την υπολογιζόμενη φέρουσα ικανότητα με χρήση της απλής θεωρίας γραμμών διαρροής. Η ενίσχυση της αντοχής οφείλεται αφενός στην εφελκυστική δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης που αναπτύσσεται στην πλάκα σε μεγάλες μετακινήσεις και αφετέρου στην αύξηση της ροπής διαρροής στις εξωτερικές περιοχές της πλάκας, όπου σημειώνονται θλιπτικές τάσεις κατά μήκος των γραμμών διαρροής (βλ. Σχήμα 5.8).

Η ενίσχυση της αντοχής που προσδιορίζεται ως επίλυση κατώτερου ορίου για την αστοχία των γραμμών διαρροής βασίζεται στην υπόθεση ότι σε οριακές συνθήκες η διάταξη των γραμμών διαρροής θα είναι όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7 (α) και η αστοχία θα επέλθει εξαιτίας της θραύσης του πλέγματος κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος στο κέντρο της πλάκας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να προκύψει ένας δεύτερος τρόπος αστοχίας, εξαιτίας της σύνθλιψης του σκυροδέματος στα άκρα της πλάκας, όπου αναπτύσσονται υψηλές θλιπτικές δυνάμεις εντός επιπέδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 (β). Αυτός ο τρόπος αστοχίας παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.3.



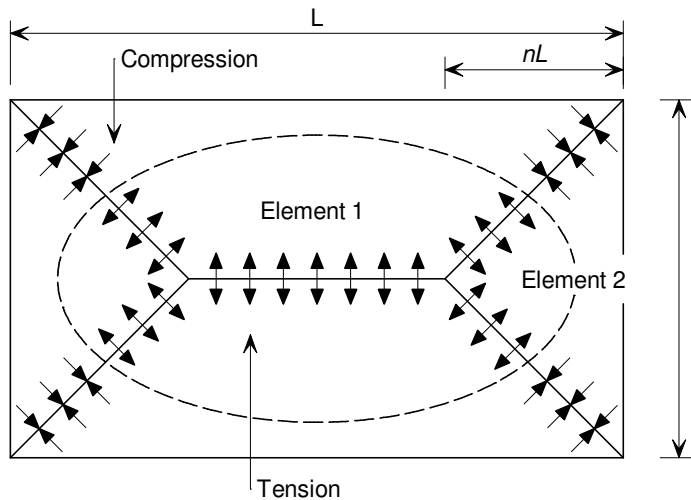
(a) Αστοχία εφελκυσμού του πλέγματος ενίσχυσης



(b) αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος

Σχήμα 5.7 Υποθετικός τρόπος αστοχίας της σύμμικτης πλάκας

Ο πρώτος τρόπος αστοχίας επέρχεται όταν η αντοχή θλίψης του σκυροδέματος υπερβαίνει την οριακή αντοχή του πλέγματος σε εφελκυσμό, προκαλώντας θραύση στο πλέγμα. Ο δεύτερος τρόπος αστοχίας επέρχεται όταν η οριακή αντοχή του πλέγματος υπερβαίνει την αντοχή θλίψης του σκυροδέματος, προκαλώντας αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος στα άκρα της πλάκας.



Σχήμα 5.8 Ορθογώνια πλάκα απλά εδραζόμενη σε τέσσερις πλευρές στην οποία εμφανίζονται οι δυνάμεις εντός επιπέδου κατά μήκος των γραμμών διαρροής, εξαιτίας της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης.

Το Σχήμα 5.8 απεικονίζει ορθογώνια πλάκα απλά εδραζόμενη περιμετρικά και την αναμενόμενη διάταξη κατώτατου ορίου των γραμμών διαρροής, που θα εμφανιστεί εξαιτίας του ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου. Η τομή των γραμμών διαρροής ορίζεται από την παράμετρο n που υπολογίζεται με βάση τη θεωρία γραμμών διαρροής ως εξής:

$$n = \frac{1}{2\mu a^2} (\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1) \quad (5-1)$$

όπου

- a ο λόγος διαστάσεων της πλάκας (L/l)
- μ ο λόγος της οριακής καμπτικής αντοχής της πλάκας σε ορθογωνικές διευθύνσεις (πρέπει να έχει τιμή μικρότερη ή ίση του 1,00)

Το μικρότερο άνοιγμα ορίζεται από το άνοιγμα με τη χαμηλότερη καμπτική αντοχή έτσι ώστε ο συντελεστής ορθοτροπίας (μ) να είναι πάντα μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Άρα η τιμή του n περιορίζεται κατά μέγιστο στο 0,5 έτσι ώστε να ισχύει η διάταξη των γραμμών διαρροής.

Η αντοχή του μηχανισμού που οφείλεται στο σχηματισμό των γραμμών διαρροής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

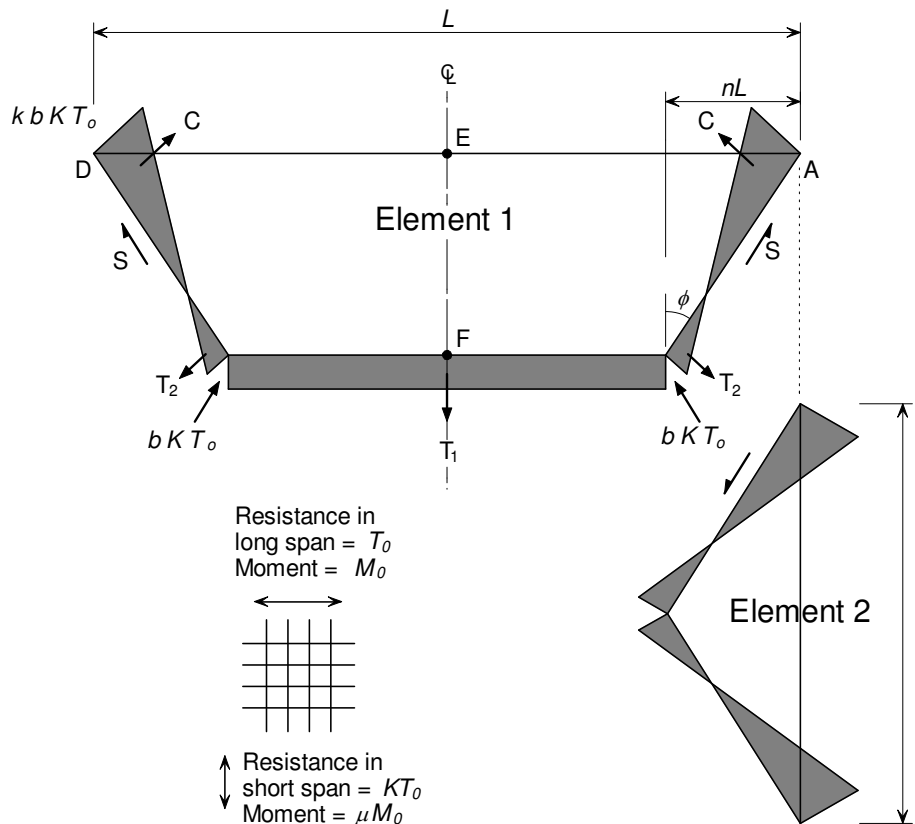
$$P = \frac{24\mu M}{l^2} \left[\sqrt{3 + \frac{1}{(a')^2} - \frac{1}{a'}} \right]^{-2} \quad (5-2)$$

όπου

$$a' = \sqrt{\mu a}$$

Ο Hayes⁽¹⁹⁾ σημειώνει ότι στην υπόθεση της άκαμπτης-πλαστικής συμπεριφοράς, είναι επιτρεπές μόνο οι μετατοπίσεις άκαμπτων σωμάτων και οι στροφές. Επιπλέον, οι υποθέσεις ότι οι ουδέτεροι άξονες κατά μήκος των γραμμών διαρροής είναι ευθείες γραμμές και ότι το πεδίο τάσεων του σκυροδέματος είναι ορθογώνιο

συνεπάγονται ότι οι μεταβολές των δυνάμεων της μεμβράνης κατά μήκος των γραμμών διαρροής θα είναι γραμμικές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Οι παραπάνω υποθέσεις και η κατανομή των δυνάμεων της μεμβράνης υιοθετήθηκαν επίσης από τον Bailey^(12,26).



Σχήμα 5.9 Κατανομή τάσης εντός επιπέδου για τα στοιχεία 1 και 2

5.2.2 Εξαγωγή έκφρασης για την παράμετρο k

Λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία των δυνάμεων εντός επιπέδου T_1 , T_2 και C που δρουν στο Στοιχείο 1, είναι δυνατό να εξαχθούν οι παρακάτω σχέσεις:

$$S \sin \phi = (C - T_2) \cos \phi$$

και

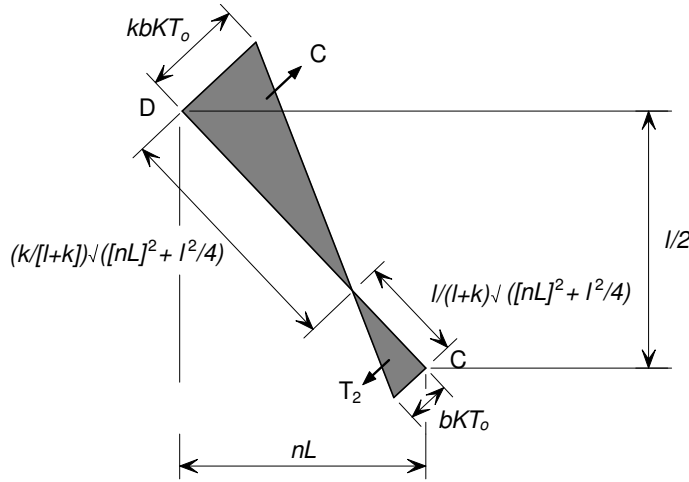
$$-S \cos \phi = (C - T_2) \sin \phi - \frac{T_1}{2}$$

Άρα,

$$\frac{T_1}{2} \sin \phi = (C - T_2) \quad (5-3)$$

όπου

ϕ η γωνία που ορίζει τη διάταξη των γραμμών διαρροής.



Σχήμα 5.10 Κατανομή της τάσης εντός επιπέδου κατά μήκος της γραμμής διαρροής CD

Το Σχήμα 5.10 απεικονίζει τη γεωμετρία της κατανομής της τάσης κατά μήκος της γραμμής διαρροής CD. Λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 5.9 και το Σχήμα 5.10,

$$T_1 = bKT_0 (L - 2nL)$$

$$T_2 = \frac{bKT_0}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}$$

$$C = \frac{kbKT_0}{2} \left(\frac{k}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}$$

$$\sin \phi = \frac{nL}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

όπου

b, k οι παράμετροι που ορίζουν το μέγεθος της δύναμης της μεμβράνης,

KT_0 η αντοχή του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης ανά μονάδα πλάτους,

n η παράμετρος που ορίζει τη διάταξη των γραμμών διαρροής

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην εξίσωση (1), έχουμε,

$$\frac{bKT_0(L - 2nL)}{2} \frac{nL}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{kbKT_0}{2} \left(\frac{k}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} - \frac{bKT_0}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}$$

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να δώσει μια σχέση για την παράμετρο k .

$$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2+1} + 1 \quad (5-4)$$

5.2.3 Εξαγωγή έκφρασης για την παράμετρο b

Λαμβάνοντας υπόψη τη θραύση της ενίσχυσης κατά μήκος του μικρού ανοίγματος της πλάκας, μπορεί να δημιουργηθεί μία έκφραση για την παράμετρο b . Η γραμμή EF που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11 αναπαριστά την τοποθεσία της θραύσης του πλέγματος, η οποία πρόκειται να προκαλέσει ρωγμή σε όλο το βάθος της πλάκας. Η άνω οριακή επίλυση για την ροπή αντοχής εντός επιπέδου κατά μήκος της γραμμής EF μπορεί να προκύψει από την υπόθεση ότι όλη η ενίσχυση κατά μήκος του τμήματος υφίσταται οριακή τάση (f_u) και ότι το κέντρο του θλιπτικού πεδίου βρίσκεται στην θέση E, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11.

Έστω ότι,

$$f_t = k_t f_{sy} \quad (5-5)$$

Όπου

f_y η τάση διαρροής του μεταλλικού πλέγματος

k_t ο λόγος της εφελκυστικής οριακής τάσης προς την τάση διαρροής, (f_t/f_{sy}).

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 μέρος 1.1, ο συντελεστής k_t κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 1.05 ως 1.35 για σχεδιασμό σε θερμοκρασία δωματίου. Παρόλα αυτά, σε κατάσταση πυρκαγιάς, ο συντελεστής αυτός πρέπει να ληφθεί ίσος με 1.0.

Λαμβάνοντας ροπές ως προς το E στο Σχήμα 5.11,

$$S = \frac{bKT_o l}{4nL} (k-1) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}$$

$$\cos \phi = \frac{(l/2)}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

$$\sin \phi = \frac{nL}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

$$\tan \phi = \frac{nL}{(l/2)}$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις στην Εξίσωση (5-6) έχουμε,

$$\frac{bKT_o}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \left[\left(\frac{\left(\frac{l}{2} \right)}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}} \frac{L}{2} - \frac{\left(\frac{L}{2} - nL \right)}{\left(\frac{l}{2} \right)} \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \right) \left(\frac{l}{2} \right) \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \right]$$

$$+ \frac{kbKT_o}{2} \left(\frac{k}{k+1} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \left[\frac{nL}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}} \frac{L}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{k}{1+k} \right) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \right]$$

$$+ \frac{bKT_o l}{4nL} (k-1) \sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}} \frac{\left(\frac{l}{2} \right)}{\sqrt{(nL)^2 + \frac{l^2}{4}}} \left(\frac{L}{2} \right) - bKT_o \left(\frac{L}{2} - nL \right) \left[\frac{l}{2} \left(\frac{L}{2} - nL \right) \right] = \frac{k_i T_o l^2}{8}$$

και με προσαρμογή έχουμε,

$$\frac{b}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left[\left(\frac{l^2}{8n} - \frac{\left(\frac{L}{2} - nL \right)}{nL} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right) \right] \\ + \frac{b}{2} \left(\frac{k^2}{1+k} \right) \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right] \\ + \frac{bl^2}{16n} (k-1) - b \left(\frac{L}{2} - nL \right) \left(\frac{L}{4} - \frac{nL}{2} \right) = \frac{k_i l^2}{8K} \quad (5-7)$$

Η εξίσωση (5-7) μπορεί να αναδιατυπωθεί ως εξής,

$$Ab + Bb + Cb - Db = \frac{1 \cdot l^2}{8K}$$

Επομένως:

$$b = \frac{k_t l^2}{8K(A + B + C - D)} \quad (5-8)$$

όπου

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left[\frac{l^2}{8n} - \frac{\left(\frac{L}{2} - nL \right)}{nL} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right],$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{k^2}{1+k} \right) \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right],$$

$$C = \frac{l^2}{16n} (k-1),$$

$$D = \left(\frac{L}{2} - nL \right) \left(\frac{L}{4} - \frac{nl}{2} \right).$$

Οι παράμετροι k και b , που ορίζουν τις δυνάμεις εντός επιπέδου, μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (5-4) και (5-8) αντίστοιχα.

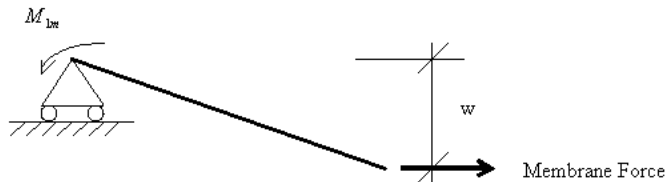
5.2.4 Δυνάμεις της μεμβράνης σταθεροποίησης

Η φέρουσα ικανότητα των Στοιχείων 1 και 2 της πλάκας μπορεί να οριστεί λαμβάνοντας υπόψη αφενός τη συνεισφορά των δυνάμεων της μεμβράνης στην αντοχή και αφετέρου την αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά μήκος των γραμμών διαρροής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι επιδράσεις αυτές εκφράζονται με έναν συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος υφίσταται στο κατώτερο όριο αντοχής της γραμμής διαρροής. Αρχικά, οι επιδράσεις της διάτμησης εντός επιπέδου S (Σχήμα 5.9) ή οποιασδήποτε κατακόρυφης διάτμησης δεν λήφθηκε υπόψη, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό δύο άνισων φορτίων για τα Στοιχεία 1 και 2 αντίστοιχα. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση τιμή, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά των δυνάμεων διάτμησης.

Συνεισφορά των δυνάμεων μεμβράνης στη φέρουσα ικανότητα.

α) Στοιχείο 1

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.12, η ροπή που αναπτύσσεται στη στήριξη εξαιτίας της δύναμης της μεμβράνης, υπολογίζεται ως εξής:



Σχήμα 5.12 Υπολογισμός της ροπής εξαιτίας της δύναμης της μεμβράνης

$$M_{1m} = bKT_0 (L - 2nL)w + bKT_0 nLw \left(\frac{3k + 2}{3(1+k)^2} \right) - bKT_0 nLw \left(\frac{k^3}{3(1+k)^2} \right)$$

όπου

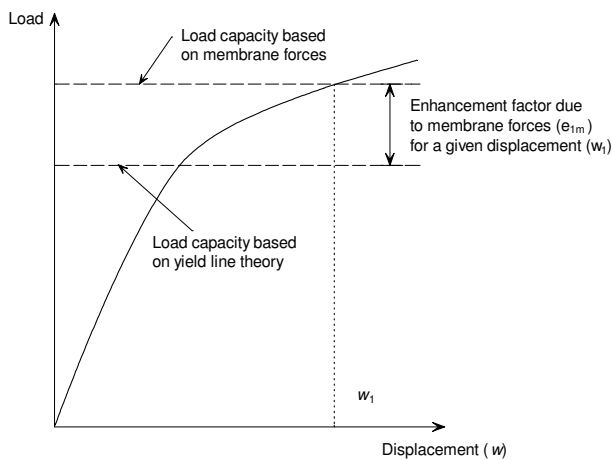
M_{1m} η ροπή που αναπτύσσεται στη στήριξη εξαιτίας των δυνάμεων μεμβράνης για το Στοιχείο 1.

Η έκφραση μειώνεται σε:

$$M_{1m} = KT_0 Lbw \left((1 - 2n) + \frac{n(3k + 2) - nk^3}{3(1 + k)^2} \right).$$

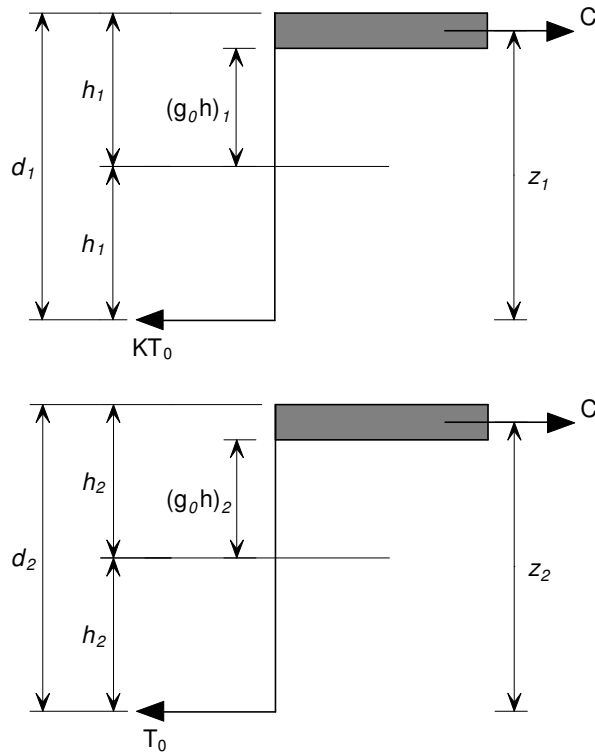
Ο παραπάνω τύπος ορίζει τη συνεισφορά των δυνάμεων της μεμβράνης στη φέρουσα ικανότητα, η οποία πρέπει να προστεθεί στη συνεισφορά χάρη στην ενισχυμένη καμπτική αντοχή στις περιοχές όπου η πλάκα υφίσταται θλιπτικές δυνάμεις. Για λόγους απλοποίησης, η συνεισφορά των δυνάμεων της μεμβράνης και η ενισχυμένη καμπτική δράση σχετίζονται με το κανονικό φορτίο της γραμμής διαρροής. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης τόσο για τη δύναμη της μεμβράνης όσο και για την ενισχυμένη καμπτική ροπή. Αυτοί οι συντελεστές ενίσχυσης μπορούν τέλος να προστεθούν ώστε να δώσουν τη συνολική ενίσχυση της πλάκας εξαιτίας της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης.

Διαιρώντας τη ροπή M_{1m} με $\mu M_o L$, η ροπή αντίστασης της πλάκας, όταν δεν υφίσταται καμία αξονική δύναμη, επιτρέπει τη δράση εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης να εκφραστεί ως ενίσχυση της αντοχής της γραμμής διαρροής (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 Συντελεστής ενίσχυσης εξαιτίας της δύναμης της μεμβράνης

Η τιμή της ροπής μM_o δίνεται λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.14 Υπολογισμός της ροπής αντοχής

Οι καμπτικές ροπές μM_0 και M_0 ανά μονάδα πλάτους της πλάκας σε κάθε ορθογωνική διεύθυνση, υπολογίζονται ως εξής:

$$\mu M_0 = KT_0 d_1 \left(\frac{3 + (g_0)_1}{4} \right)$$

$$M_0 = T_0 d_2 \left(\frac{3 + (g_0)_2}{4} \right)$$

όπου

$(g_0)_1, (g_0)_2$ οι παράμετροι που ορίζουν το καμπτικό πεδίο τάσεων στις δυο ορθογωνικές διευθύνσεις (βλ. Σχήμα 5.14)

d_1, d_2 τα ενεργά ύψη της ενίσχυσης σε κάθε διεύθυνση.

Ο συντελεστής ενίσχυσης, e_{1m} , υπολογίζεται ως εξής:

$$e_{1m} = \frac{M_{1m}}{\mu M_0 L} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \left(\frac{w}{d_1} \right) \left((1 - 2n) + \frac{n(3k + 2) - nk^3}{3(1 + k)^2} \right) \quad (5-9)$$

β) Στοιχείο 2

Η ροπή που αναπτύσσεται στη στήριξη εξαιτίας των δυνάμεων της μεμβράνης, υπολογίζονται ως εξής:

$$M_{2m} = KT_0 lbw \left(\frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2} \right)$$

όπου

M_{2m} η ροπή που αναπτύσσεται στη στήριξη εξαιτίας της δύναμης της μεμβράνης για το Στοιχείο 2.

Η επίδραση της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης μπορεί να εκφραστεί ως ενίσχυση της αντοχής της γραμμής διαρροής, διαιρώντας τη ροπή που αναπτύσσεται στη στήριξη εξαιτίας της δράσης της μεμβράνης M_{2m} με τη ροπή αντοχής στην επιμήκη διεύθυνση, όταν δεν υφίσταται καμία αξονική δύναμη, $M_0 l$ από όπου προκύπτει ότι,

$$e_{2m} = \frac{M_{2m}}{M_0 l} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \left(\frac{w}{d_2} \right) \left(\frac{2 + 3k - k^3}{6(1+k)^2} \right) \quad (5-10)$$

Η επίδραση των δυνάμεων της μεμβράνης στην καμπτική αντοχή κατά μήκος των γραμμών διαρροής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο διαρροής όταν υφίσταται επίσης αξονικό φορτίο, όπως ορίζει ο Wood ^[6]. Στην περίπτωση μικρού ανοίγματος, η καμπτική αντοχή όταν υφίσταται αξονική δύναμη υπολογίζεται ως

$$\frac{M_N}{\mu M_0} = 1 + \alpha_1 \left(\frac{N}{KT_0} \right) - \beta_1 \left(\frac{N}{KT_0} \right)^2 \quad (5-11)$$

όπου

$$\alpha_1 = \frac{2(g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$$

και

$$\beta_1 = \frac{1 - (g_0)_1}{3 + (g_0)_1}$$

Ομοίως σε μεγάλο άνοιγμα,

$$\frac{M_N}{\mu M_0} = 1 + \alpha_2 \left(\frac{N}{T_0} \right) - \beta_2 \left(\frac{N}{T_0} \right)^2 \quad (5-12)$$

όπου

$$\alpha_2 = \frac{2(g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$$

και

$$\beta_2 = \frac{1 - (g_0)_2}{3 + (g_0)_2}$$

Επίδραση των δυνάμεων μεμβράνης στην καμπτική αντοχή

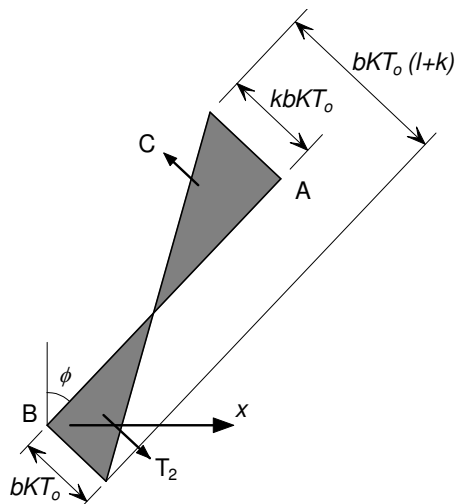
α) Στοιχείο 1

Η επίδραση των δυνάμεων μεμβράνης στην καμπτική αντοχή λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά για κάθε γραμμή διαρροής:

Για τη γραμμή διαρροής BC, η δύναμη της μεμβράνης είναι σταθερή και ισούται με $-bKT_0$, επομένως:

$$\left(\frac{M_N}{M_0}\right)_{BC} = 1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2$$

Για τη γραμμή διαρροής AB (Σχήμα 5.15),



Σχήμα 5.15 Δυνάμεις που εφαρμόζονται στο Στοιχείο 1, στη γραμμή διαρροής CD

Η δύναμη της μεμβράνης κατά μήκος της γραμμής διαρροής, σε απόσταση x από B, υπολογίζεται ως εξής:

$$N_x = -bKT_0 + \frac{x}{nL}(K+1)bKT_0$$

$$N_x = bKT_0 \left(\frac{x(k+1)}{nL} - 1 \right)$$

Η αντικατάσταση στην Εξίσωση (5-11) δίνει, για τις γραμμές διαρροής AB και CD:

$$2 \int_0^{nL} \frac{M}{M_0} dx = 2 \int_0^{nL} \left[1 + \alpha_1 b \left(\frac{x(k+1)}{nL} - 1 \right) - \beta_1 b^2 \left(\frac{x(k+1)}{nL} - 1 \right)^2 \right] dx$$

Με αποτέλεσμα:

$$2 \int_0^{nL} \frac{M}{M_0} dx = 2nL \left[1 + \frac{\alpha_1 b}{2}(k-1) - \frac{\beta_1 b^2}{3}(k^2 - k + 1) \right]$$

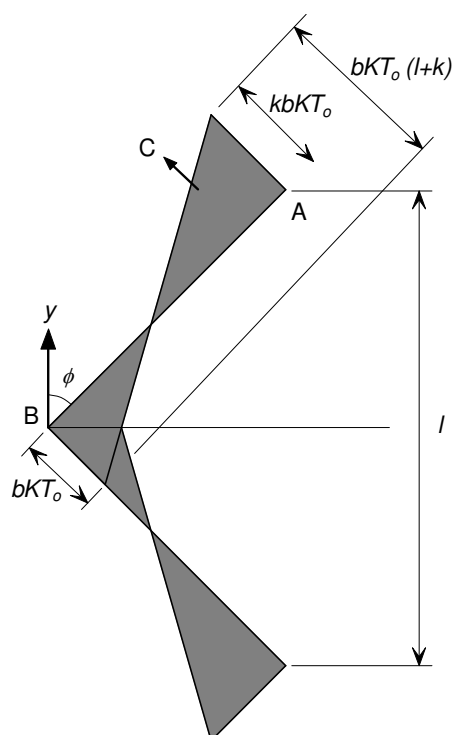
Η ενίσχυση της καμπτικής αντοχής εξαιτίας των δυνάμεων της μεμβράνης στο Στοιχείο 1 υπολογίζεται ως εξής:

$$e_{1b} = \frac{M}{\mu M_0 L} = 2n \left[1 + \frac{\alpha_1 b}{2} (k-1) - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right] + (1-2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2) \quad (5-13)$$

β) Στοιχείο 2

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.16 για το Στοιχείο 2, η δύναμη σε απόσταση y από Β εκφράζεται ως:

$$N_y = -bKT_0 + \frac{y}{l/2} (k+1)bKT_0$$



Σχήμα 5.16 Δυνάμεις που ασκούνται στο Στοιχείο 2

Με προσαρμογή

$$N_y = bKT_0 \left(\frac{2y(k+1)}{l} - 1 \right)$$

Με αντικατάσταση στην Εξίσωση (5-12) έχουμε:

$$\int_0^{l/2} \frac{M}{M_0} dy = 2 \int_0^{l/2} \left[1 + \alpha_2 b K \left(\frac{2y(k+1)}{l} - 1 \right) - \beta_2 b^2 K \left(\frac{2y(k+1)}{l} - 1 \right)^2 \right] dy$$

Με αποτέλεσμα,

$$2 \int_0^{l/2} \frac{M}{M_0} dx = l \left[1 + \frac{\alpha_2 b}{2} (k-1) - \frac{\beta_2 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right]$$

Η παραπάνω εξίσωση δίνει τον συντελεστή ενίσχυσης εξαιτίας των δυνάμεων της μεμβράνης στην καμπτική αντοχή, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο,

$$e_{2b} = \frac{M}{M_0 l} = 1 + \frac{a_2 b K}{2} (k-1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1) \quad (5-14)$$

Οι εξισώσεις (5-9), (5-10), (5-13) και (5-14) εκφράζουν τη συνεισφορά στη φέρουσα ικανότητα εξαιτίας των δυνάμεων της μεμβράνης και την επίδραση των δυνάμεων της μεμβράνης στην καμπτική αντοχή της πλάκας.

Κατά συνέπεια, ο συνδυαστικός συντελεστής ενίσχυσης για κάθε στοιχείο υπολογίζεται ως εξής

$$e_1 = e_{1m} + e_{1b} \quad (5-15)$$

$$e_2 = e_{2m} + e_{2b} \quad (5-16)$$

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, οι τιμές e_1 και e_2 που υπολογίζονται με βάση την ισορροπία των στοιχείων 1 και 2 δεν θα είναι ίσες, και σύμφωνα με τον Hayes οι διαφορές αυτές μπορούν να εξηγηθούν από την επίδραση της κατακόρυφης ή εντός επιπέδου διάτμησης και η συνολική ενίσχυση υπολογίζεται ως εξής

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2} \quad (5-17)$$

5.3 Αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος

Ο συντελεστής ενίσχυσης στην Παράγραφο 5.2.1 υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την αστοχία σε εφελκυσμό του πλέγματος ενίσχυσης. Ωστόσο, η αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος κοντά στα γωνιακά άκρα της πλάκας πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ως πιθανός τρόπος αστοχίας, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να προηγηθεί της θραύσης του πλέγματος. Αυτό επιτεύχθηκε περιορίζοντας την τιμή της παραμέτρου 'b', η οποία αναπαριστά το μέγεθος των τάσεων εντός επιπέδου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, η μέγιστη εντός-επιπέδου θλιπτική δύναμη στα γωνιακά άκρα της πλάκας δίνεται ως $kbKT_0$. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η θλιπτική δύναμη εξαιτίας της κάμψης. Υποθέτοντας ότι το μέγιστο ύψος του πεδίου τάσεων περιορίζεται σε $0.45d$, και υιοθετώντας ένα μέσο ενεργό ύψος της ενίσχυσης και στις δύο ορθογωνικές διευθύνσεις, το αποτέλεσμα είναι:

$$kbKT_0 + \left(\frac{KT_0 + T_0}{2} \right) = 0.85 f_{ck} \times 0.45 \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)$$

Όπου, f_{ck} η κυλινδρική αντοχή σκυροδέματος.

Η επίλυση για τη σταθερά b δίνεται ως εξής:

$$b = \frac{1}{kKT_0} \left(0.85 f_{ck} \times 0.45 \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) - T_0 \left(\frac{K+1}{2} \right) \right) \quad (5-18)$$

Η σταθερά b λαμβάνεται ως η ελάχιστη τιμή όπως υπολογίζεται από της Εξισώσεις (5-8) και (5-18).

6 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Τα πειράματα που προηγήθηκαν σε κανονική θερμοκρασία, όπως παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 4.5, έδειξαν ότι η φέρουσα ικανότητα των πλακών σκυροδέματος ενισχύεται από τις δυνάμεις της μεμβράνης σταθεροποίησης, εφόσον η κατακόρυφη στήριξη διατηρείται στα όρια της πλάκας. Οι επίπεδες πλάκες, οι οποίες έχουν μόνο κατακόρυφη στήριξη στα άκρα τους, δεν αναπτύσσουν σημαντικές δυνάμεις εφελκυσμού και, κατά συνέπεια, ωφελούνται σε περιορισμένο βαθμό από την ενίσχυση εξαιτίας της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης.

Κατά συνέπεια, για τις σύμμικτες πλάκες με στήριξη σε εσχάρα μεταλλικών δοκών σε συνθήκες πυρκαγιάς, είναι σημαντικό η πλάκα να διαχωρίζεται σε ορθογώνια τμήματα - ζώνες επιρροής της πλάκας, όπου η κατακόρυφη στήριξη μπορεί να διατηρηθεί περιμετρικά σε κάθε τμήμα. Αυτές οι γραμμές κατακόρυφης στήριξης μπορούν να επιτευχθούν εφόσον διασφαλιστεί ότι οι περιμετρικές δοκοί πλαισιώνονται μέσα σε θέσεις στύλων και είναι πυροπροστατευμένες.

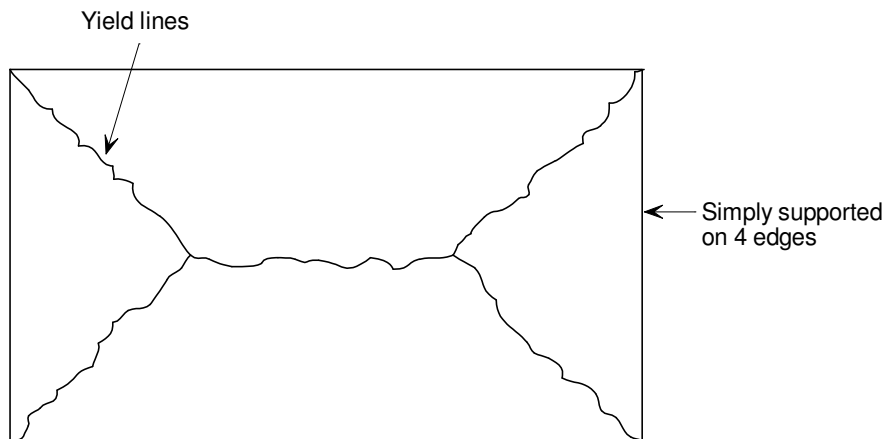
Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η πλάκα είναι συνεχής και διαπερνά τα όρια κάθε ζώνης επιρροής της πλάκας. Ωστόσο, σε συνθήκες πυρκαγιάς είναι πιθανό να σχηματιστούν ρωγμές στις περιμετρικές δοκούς, εξαιτίας των έντονων θερμικών καμπυλώσεων που υφίσταται η πλάκα. Αυτό ενδέχεται να επιφέρει θραύση στην ενίσχυση, είτε λόγω της καμπυλότητας είτε εξαιτίας των καμπτικών τάσεων και των τάσεων μεμβράνης. Η θραύση της ενίσχυσης στις θλιπτικές περιοχές προηγείται της θραύσης της ενίσχυσης στο κέντρο της ζώνης επιρροής της πλάκας. Κατά συνέπεια, οι ζώνες επιρροής της πλάκας θεωρείται ότι δεν παρουσιάζουν στροφική ή μεταφορική δέσμευση κατά μήκος των ορίων της πλάκας.

6.1 Παραδοχές σχεδιασμού

Στις σύμμικτες πλάκες η διάταξη της γραμμής διαρροής εξαρτάται από τη συμπεριφορά των μη μονωμένων σύμμικτων δοκών, η αντοχή των οποίων μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Σε αντίθεση με τις συνθήκες που επικρατούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ικανότητα του φέροντα μηχανισμού της πλάκας μεταβάλλεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αρχικά, η σύμμικτη πλάκα δρα ως διέρευση πλάκα στηριζόμενη στις δευτερεύουσες δοκούς. Καθώς οι δοκοί αυτοί χάνουν την αντοχή τους με την άνοδο της θερμοκρασίας, η συμπεριφορά της πλάκας αρχίζει να μοιάζει σε απλά εδραζόμενη τετραέρευση πλάκα, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό της διάταξης της γραμμής διαρροής όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 6.1. Υποθέτοντας ότι αυτή η οριακή κατάσταση αστοχίας επέρχεται όταν η αντοχή της δοκού είναι χαμηλή σε σχέση με την πλάκα, είναι σχετικά απλό να υπολογιστεί μία συντηρητική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της πλάκας.

Η φέρουσα ικανότητα της πλάκας υπολογίζεται με βάση την υπόθεση ότι οι σύμμικτες δοκοί έχουν μηδενική αντοχή και βασίζεται στη συγκεκριμένη διάταξη των γραμμών που είναι συμβατή με τις συνοριακές συνθήκες και δίνει το χαμηλότερο φορτίο σε φέρουσα ικανότητα. Η αντοχή αυτή στη συνέχεια ενισχύεται λαμβάνοντας υπόψη τη δράση εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης, με βάση την εκτιμώμενη βύθιση της πλάκας και τους τρόπους αστοχίας που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5. Η καμπτική αντοχή των σύμμικτων

δοκών προστίθεται στην ενισχυμένη αντοχή της πλάκας, δίνοντας έτσι τη συνολική φέρουσα ικανότητα του συστήματος.

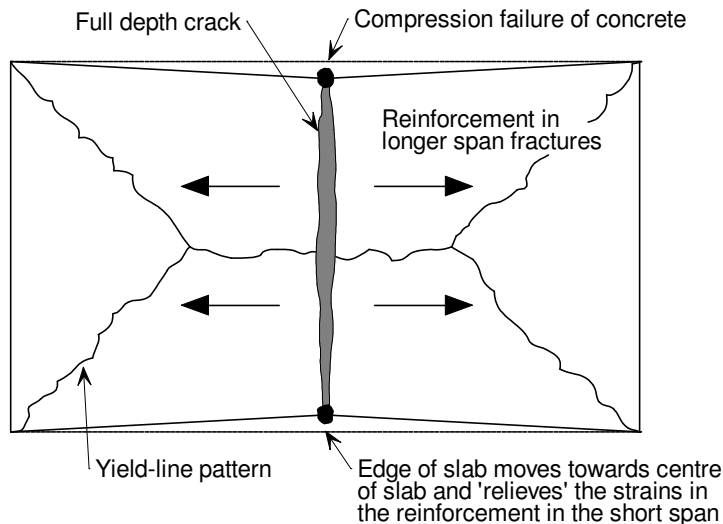


Σχήμα 6.1 *Τυπική διάταξη γραμμών διαρροής σε ορθογώνια πλάκα απλά εδραζόμενη σε τέσσερις πλευρές*

6.2 Κριτήριο αστοχίας

Σε πειράματα σε θερμοκρασία δωματίου και σε υψηλές θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν δύο τρόποι αστοχίας, ανάλογα με τον λόγο του οπλισμού, τον λόγο διαστάσεων της πλάκας και την ολκιμότητα του οπλισμού. Η θραύση της ενίσχυσης κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος αποτελεί τον επικρατέστερο τρόπο αστοχίας στις πλάκες με ελαφρύ οπλισμό, ενώ οι πλάκες με περισσότερο οπλισμό και οι πλάκες με οπλισμό αυξημένης ολκιμότητας είναι πιθανό να παρουσιάσουν αστοχία σε θλίψη στα γωνιακά άκρα της πλάκας. Και οι δύο παραπάνω τρόποι αστοχίας λαμβάνονται υπόψη στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 5.2.

Τα περισσότερα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες σε απλά εδραζόμενες πλάκες σκυροδέματος, η αστοχία επήλθε εξαιτίας του σχηματισμού ρωγμής σε όλο το πάχος κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος (l), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Η μέθοδος σχεδίασης που παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.2 προβλέπει τη φέρουσα ικανότητα για ορισμένη τιμή μετατόπισης της πλάκας. Στην Παράγραφο 6.2.1 περιγράφεται η ανάπτυξη μίας έκφρασης για την εκτίμηση της βύθισης της πλάκας αμέσως πριν από την αστοχία, η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της επίδρασης της μεμβράνης σταθεροποίησης..



Σχήμα 6.2 Αστοχία σε θλίψη της πλάκας εξαιτίας θραύσης της ενίσχυσης

6.2.1 Βύθιση της πλάκας

Καθώς η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού βασίζεται στην πλαστική θεωρία, η βύθιση δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί με αυτή τη μέθοδο. Ωστόσο, για τον υπολογισμό των δυνάμεων της μεμβράνης είναι απαραίτητη η εκτίμηση της τιμής της βύθισης της πλάκας λίγο πριν την αστοχία. Η εκτίμηση της βύθισης της πλάκας περιλαμβάνει τόσο θερμικές παραμορφώσεις, εξαιτίας της ανομοιόμορφης θερμοκρασίας στην πλάκα, όσο και μηχανικές παραμορφώσεις στην ενίσχυση.

6.2.1.1 Θερμικές επιδράσεις

Βάσει προηγούμενων διερευνήσεων, όταν η μέγιστη βύθιση της πλάκας είναι μεγαλύτερη από 0,5 φορές το βάθος της πλάκας και οι δυνάμεις εφελκυσμού αρχίζουν να εμφανίζονται στο κέντρο της πλάκας, οποιαδήποτε δέσμευση εντός επιπέδου της θερμικής διαστολής, επιφέρει αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης (δηλαδή η πλάκα βρίσκεται στη μεταλυγισμική φάση) και, επομένως, τη εφελκυστική δράση της μεμβράνης. Συντηρητικά και έχοντας ως στόχο να γίνει δυνατή η χρήση αυτής της μεθόδου και για τις ακραίες δοκούς, η παραπάνω θετική επίδραση δεν λαμβάνεται υπόψη και θεωρείται ότι η πλάκα είναι μη δεσμευμένη.

Η σύμμικτη πλάκα σε συνθήκες πυρκαγιάς υφίσταται θερμική καμπύλωση, η οποία στις μη δεσμευμένες πλάκες, επιφέρει αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης, χωρίς να εισάγει μηχανικές παραμορφώσεις στο πλέγμα ενίσχυσης. Αν η κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα θεωρηθεί ότι είναι γραμμική, η μετατόπιση που προκαλείται από τη βύθιση εξαιτίας της θερμότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)}{h}$$

όπου

w = Κατακόρυφη μετατόπιση

α = Συντελεστής θερμικής διαστολής

T_2 = Θερμοκρασία στην κάτω πλευρά

T_1 = Θερμοκρασία στην άνω πλευρά

h = Ύψος της πλάκας

Η κατακόρυφη μετατόπιση της πλάκας εξαιτίας της θερμικής καμπύλωσης μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας την παραπάνω Εξίσωση, οπότε:

$$w_{\theta} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{8h}$$

όπου

l το μήκος του μικρότερου ανοίγματος της πλάκας

Ο παραπάνω τύπος βασίζεται σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Στην παραπάνω έκφραση της βύθισης, και για να ληφθούν υπόψη οι πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς όπου η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν απίθανη, εφαρμόζεται συντελεστής μείωσης 2,0. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την τιμή σχεδιασμού της κατακόρυφης μετατόπισης εξαιτίας της θερμικής καμπύλωσης να ισούται με:

$$w_{\theta} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{16h}$$

6.2.1.2 Μηχανικές παραμορφώσεις στον οπλισμό

Υποθέτοντας ότι το διάγραμμα παραμορφώσεων της πλάκας, εξαιτίας της κατανομής του φορτίου, είναι παραβολικό, το μήκος παραμόρφωσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο, στον οποίο το μεγαλύτερο άνοιγμα είναι (L).

$$L_c = L \left(1 + \frac{8w^2}{3L^2} - \frac{32w^4}{5L^4} + \dots \right)$$

όπου

L_c το μήκος καμπύλωσης,

L το μήκος του μεγαλύτερου ανοίγματος της πλάκας για μηδενική μετατόπιση,

w η κατακόρυφη μετατόπιση.

Για επίπεδη καμπύλωση,

$$L_c = L \left(1 + \frac{8w^2}{3L^2} \right)$$

Άρα, η παραμόρφωση του πλέγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{8w^2}{3L^2}$$

Η παραπάνω εξίσωση θεωρεί ότι η παραμόρφωση έχει την ίδια τιμή κατά μήκος της πλάκας. Στην πραγματικότητα, η πλάκα υφίσταται εφελκυστική ενδυνάμωση και οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται εκεί όπου σημειώνονται ρωγμές. Ο οπλισμός κατά μήκος μίας ρωγμής επίσης υφίσταται αυξημένη παραμόρφωση με αποτέλεσμα την τελική θραύση του οπλισμού. Κατά συνέπεια, για να ληφθεί υπόψη η εφελκυστική ενδυνάμωση, η βύθιση λόγω της παραμόρφωσης του οπλισμού w_{ε} ,

βασίζεται στη συντηρητική τιμή της μέσης παραμόρφωσης υπολογιζόμενη για τάση ίση με τη μισή τάση διαρροής για θερμοκρασία δωματίου. Τότε, η μετατόπιση δίνεται:

$$w_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}} \quad (1)$$

όπου

E_s το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού σε θερμοκρασία δωματίου

f_{sy} η τάση διαρροής του οπλισμού σε θερμοκρασία δωματίου

Οι μετατοπίσεις εξαιτίας της παραμόρφωσης του οπλισμού που υπολογίζονται από την Εξίσωση (1) συγκρίνονται με τις μέγιστες βυθίσεις που μετρήθηκαν στα πειράματα σε θερμοκρασία δωματίου. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μετατόπιση που προβλέφθηκε από την εξίσωση 1 ήταν μικρότερη από τη μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε στο πείραμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Σύγκριση της επιτρεπόμενης βύθισης από την Εξίσωση (1) και των μέγιστων βυθίσεων που μετρήθηκαν στα πειράματα σε θερμοκρασία δωματίου.

Πείραμα	Μέγεθος πλάκας (m)	Ενεργό ύψος (mm)	Διάμετρος οπλισμού (mm)	Αποστάσεις ράβδων (mm)	Όριο διαρροής (N/mm ²)	Μέγ. βύθιση πειράματος (mm)	Επιτρεπόμενη βύθιση Εξίσωσης (1) (mm)
BRE	9.56x6.46	66.0	6.0	200	580	223	216
Sawczuk & Winnicki	1.6x1.1	26.0	3.0	30.0	263	127*	25
	2.0x1.0	26.0	3.0	60.0	263	76*	31
Hayes & Taylor	0.914x0.914	15.9	9.5	-†	505	50.8*	19.4
	0.914x1.372	15.9	9.5	-†	505	50.8*	29.1
	0.914x1.829	15.9	9.5	-†	505	50.8*	38.8
Taylor, Maher & Hayes	1.829x1.829	43.6	4.8	76.2	376	81	33.5
	1.829x1.829	37.3	4.8	63.5	376	98	33.5
	1.829x1.829	69.0	4.8	122	376	84	33.5
Brothie & Holley	0.381x0.381	14.2	2.3	-†	414	11.6	7.32
	0.381x0.381	31.0	3.4	-†	379	7.45	7.0

*το πείραμα ολοκληρώθηκε πριν από την εμφάνιση θραύσης του οπλισμού

† Δεν αναφέρονται δεδομένα

6.2.1.3 Υπολογισμός της βύθισης της πλάκας ώστε να επιτρέπεται ο υπολογισμός των δυνάμεων της μεμβράνης

Η δράση εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης της πλάκας υπολογίζεται στη συνέχεια με βάση τη μετατόπιση της πλάκας που εκτιμάται συνδυάζοντας τις συνιστώσες που προκύπτουν από τη θερμική καμπύλωση και την παραμόρφωση του οπλισμού, με αποτέλεσμα:

$$w_m = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{16h} + \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}} \quad (2)$$

Η παραπάνω εξίσωση οδηγεί σε συντηρητική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας, εφόσον:

- οι εκτιμώμενες κατακόρυφες μετατοπίσεις εξαιτίας της θερμικής καμπύλωσης διαιρούνται διά του δύο.

- η θερμική καμπύλωση υπολογίζεται με βάση το μικρότερο άνοιγμα της πλάκας
- οποιαδήποτε πρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση εμφανίζεται εξαιτίας οποιασδήποτε δεσμευμένης θερμικής διαστολής, όταν η πλάκα βρίσκεται σε μεταλυσισμικό στάδιο, αγνοείται
- οποιαδήποτε συνεισφορά του μεταλλικού υποστρώματος αγνοείται
- η αύξηση της ολκιμότητας του πλέγματος με την άνοδο της θερμοκρασίας αγνοείται.

6.2.2 Βαθμονόμηση στα πειράματα πυρκαγιάς Cardington

Οι Bailey & Moore⁽¹²⁾ έδειξαν ότι η μέθοδος σχεδιασμού που παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.2 προσφέρει επαρκή πρόβλεψη της φέρουσας ικανότητας της πλάκας σε σύγκριση με τα πειράματα πυρκαγιάς Cardington. Ως μέρος του παραπάνω έργου, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα με κλίβανο, το οποίο περιγράφεται στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Η παραπάνω έκφραση της βύθισης της πλάκας συγκρίνεται με τις μέγιστες βυθίσεις που καταγράφηκαν στα πειράματα πυρκαγιάς Cardington. Ο σκοπός είναι να διασφαλιστεί ότι οι εκτιμώμενες βυθίσεις είναι συντηρητικές σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά της πλάκας αμέσως πριν από την αστοχία. Το μειονέκτημα των συγκεκριμένων πειραμάτων για τον σκοπό αυτό είναι ότι οι πλάκες δεν αστόχησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, οπότε οι μέγιστες μετρηθείσες βυθίσεις δεν αντιστοιχούν σε πραγματική αστοχία της πλάκας. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι συντηρητικά, αν και δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ποσοτικά ο βαθμός συντηρητικότητάς τους.

Ο Πίνακας 6.2 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ της οριακής βύθισης που δίνεται από την εξίσωση (2) και της μέγιστης μετρηθείσας βύθισης σε καθένα από τα πειράματα πυρκαγιάς Cardington. Η σύγκριση αυτή περιλαμβάνει τόσο τις θερμικές όσο και τις μηχανικές παραμορφώσεις, οι οποίες είναι αδύνατο να διαχωριστούν στα πειραματικά αποτελέσματα.

Σε κάθε περίπτωση, η Εξίσωση (2) δίνει παραμορφώσεις που είναι μεγαλύτερες από τις μετρηθείσες. Για να διασφαλιστεί ότι η οριακή βύθιση είναι συντηρητική, οι Bailey και Moore⁽¹²⁾ περιόρισαν τη βύθιση στις τιμές που καταγράφηκαν στα πειράματα.

Πίνακας 6.2 Σύγκριση της βύθισης που δίνεται από την εξίσωση (2) με τις μέγιστες βυθίσεις που καταγράφηκαν στα έξι πειράματα πυρκαγιάς Cardington.

Πείραμα	L (m)	I (m)	Βύθιση λόγω θερμικής καμπύλωσης (mm)	Βύθιση λόγω μηχανικής παραμόρφω σης (mm)	Οριακή βύθιση Εξίσωσης (2) (mm)	Μέγιστη βύθιση που καταγράφ ηκε στο πείραμα (mm)	Όριακή βύθιση / βύθιση πειράμα τος
Πείραμα Γωνιακό διαμέρισμα BRE	9.0	6.0	135	208	343	269	1.28
Δεσμειμένη δοκός British Steel	9.0	6.0	135	208	343	232	1.50
Δισδιάστατο πείραμα British Steel	14.0	9.0	0*	324	324	293	1.11
Πείραμα Γωνιακό διαμέρισμα BS	10.223	7.875	231	237	468	428	1.09
Πείραμα μεγάλου διαμερίσματος BRE	21.0	9.0	303	486	789	557	1.42
Πείραμα σε πραγματικό γραφείο BS	14.6	10.0	373	338	711	641	1.11

*Καθώς η περιοχή της πλάκας που θερμάνθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν μικρή, η μετατόπιση λόγω θερμικής καμπύλωσης λαμβάνεται μηδενική.

Οι Bailey and Moore εισάγουν ένα πρόσθετο όριο για τις μηχανικές παραμορφώσεις, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους.

$$w_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{0.5f_y}{E}\right)_{reinf} \frac{3L^2}{8}} \text{ but } w_{\varepsilon} \leq \frac{l}{30}$$

Επίσης, για τις θερμικές παραμορφώσεις αυξάνουν τον "συντελεστή ασφάλειας" από 2 σε 2,4 ώστε να προκύψουν οι παρακάτω συντηρητικές εκφράσεις για την εκτίμηση των βυθίσεων της πλάκας:

$$w_m = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h} + \sqrt{\left(\frac{0.5f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}} \quad (3)$$

$$\text{αλλά όχι μεγαλύτερο από } \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h} + \frac{l}{30}$$

Ο Πίνακας 6.3 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των οριακών βυθίσεων της Εξίσωσης (3). Δεδομένου ότι δεν σημειώθηκε αστοχία σε κανένα από τα πειράματα, εκτιμήθηκε ότι θα ήταν υπερβολικά συντηρητικό να μειωθεί η οριακή βύθιση σε τέτοιο σημείο ώστε ο λόγος της οριακής βύθισης προς τη μετρηθείσα βύθιση να είναι ίσος με τη μονάδα σε όλα τα πειράματα. Στα πειράματα μεγάλου διαμερίσματος το παραπάνω όριο φαίνεται να είναι λογικό.

Πίνακας 6.3 Σύγκριση της βύθισης που δίνεται από την εξίσωση (3) με τις μέγιστες βυθίσεις που καταγράφηκαν στα έξι πειράματα πυρκαγιάς Cardington.

Πείραμα	L (m)	I (m)	Βύθιση λόγω θερμικής καμπύλωσης (mm)	Βύθιση λόγω μηχανικής παραμόρφ ωσης (mm)	Οριακή βύθιση Εξίσωσης (3) (mm)	Μέγιστη βύθιση που καταγράφ ηκε στο πείραμα (mm)	Οριακή βύθιση / βύθιση πειράματος
Πείραμα Γωνιακό διαμέρισμα BRE	9.0	6.0	112	200	312	269	1.16
Δεσμειμένη δοκός British Steel	9.0	6.0	112	200	312	232	1.34
Δισδιάστατο πείραμα British Steel	14.0	9.0	0*	300	300	293	1.02
Πείραμα Γωνιακό διαμέρισμα BS	10.223	7.875	193	237	430	428	1.00
Πείραμα μεγάλου διαμερίσματος BRE	21.0	9.0	252	300	552	557	0.99
Πείραμα σε πραγματικό γραφείο BS	14.6	10.0	311	333	644	641	1.00

*Καθώς η περιοχή της πλάκας που θερμάνθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν μικρή, η μετατόπιση λόγω θερμικής καμπύλωσης λαμβάνεται μηδενική.

6.3 Μεθοδολογία σχεδίασης

Η μεθοδολογία σχεδίασης που περιγράφεται στο παρόν έγγραφο στηρίζεται σε δύο βασικές αρχές.

- Στον κίνδυνο που διατρέχει η ζωή των ανθρώπων στο κτίριο, των πυροσβεστών και άλλων οι οποίοι βρίσκονται κοντά στο κτίριο όταν σημειωθεί πυρκαγιά, ο οποίος δεν θα πρέπει να αυξάνεται σε σχέση με τις ισχύουσες πρακτικές ως αποτέλεσμα της χρήσης της παραπάνω μεθόδου.
- Η πυρκαγιά θα πρέπει να περιορίζεται εντός του διαμερίσματος όπου σημειώνεται αρχικά και η εφαρμογή της μεθόδου σχεδιασμού δεν θα πρέπει να οδηγεί σε αστοχία της διαμερισματοποίησης του κτιρίου

Η μέθοδος σχεδιασμού έχει μελετηθεί ώστε να εφαρμόζεται σε σύμμικτες πλάκες χάλυβα-σκυροδέματος εδραζόμενες σε σύμμικτους ή μη σύμμικτους στύλους. Το δομικό πλαίσιο πρέπει να είναι πλευρικός αντιστηριζόμενο, οι συνδέσεις να είναι απλές αρθρωτές συνδέσεις και η πλάκα σκυροδέματος να είναι κατασκευασμένη με χρήση μεταλλικού υποστρώματος, το οποίο να μην υπερβαίνει σε πάχος τα 80 mm και το οποίο να στηρίζεται στο άνω πέλαμα της μεταλλικής διατομής. Οι μεταλλικές δοκοί πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να δρουν σύμμικτα με την πλάκα, σύμφωνα με τις προτάσεις του EN 1994-1-1. Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου δεν συμπεριλαμβάνει τις πλάκες οι οποίες διαθέτουν εκτεθειμένο εσωρράχιο σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένων των πλακών προκατασκευασμένου σκυροδέματος.

Για να εφαρμοστεί η απλή μέθοδος σχεδιασμού που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, η πλάκα έδρασης που χρησιμοποιείται στο υποθετικό σενάριο πυρκαγιάς πρέπει να διαχωρίζεται σε "ζώνες σχεδιασμού". Αυτές οι ζώνες σχεδιασμού της πλάκας ορίζονται στην περίμετρό τους από δοκούς (συνήθως μονωμένες), οι οποίες ικανοποιούν τις ειδικές απαιτήσεις πυραντίστασης που καθορίζονται από την πλάκα. Κάθε ζώνη σχεδιασμού της πλάκας περιλαμβάνει έναν αριθμό εσωτερικών δευτερευουσών δοκών χωρίς πυροπροστασία, οι οποίες έχουν πολύ χαμηλότερη αντοχή στην πυρκαγιά. Η πρόβλεψη των μονωμένων δοκών στην περίμετρο της πλάκας έχει ως στόχο η συμπεριφορά της πλάκας να είναι τέτοια ώστε να τηρείται η υπόθεση ότι η περίμετρος της ζώνης επιρροής είναι απλά εδραζόμενη.

Για χρονικά διαστήματα πυραντοχής 60 λεπτών ή περισσότερο, η περίμετρος των ζωνών σχεδιασμού της πλάκας πρέπει να αντιστοιχεί στις κεντροβαρικές γραμμές των στύλων και οι περιμετρικές δοκοί πρέπει να συνδέονται με τους στύλους και στα δύο άκρα.

Η σύμμικτη πλάκα μπορεί να σχεδιαστεί σύμφωνα με το EN 1994-1-1, ενώ θα πρέπει παράλληλα να διαθέτει το ελάχιστο πάχος μόνωσης όπως ορίζεται από το EN 1994-1-2 σε κατάσταση πυρκαγιάς. Η ενίσχυση της σύμμικτης πλάκας πρέπει να παρέχεται από μεταλλικό πλέγμα. Η ενίσχυση των εσοχών της πλάκας δεν λαμβάνεται υπόψη στη συγκεκριμένη μέθοδο σχεδιασμού. Η ενσωμάτωση της παραπάνω ενίσχυσης ενδέχεται να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά αποτελέσματα στη συμπεριφορά της πλάκας σε κατάσταση πυρκαγιάς, καθώς είναι πιθανό να εμφανιστεί πρόωρη αστοχία σε θλίψη του σκυροδέματος εφόσον η πλάκα είναι υπερβολικά ενισχυμένη.

6.3.1 Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας της πλάκας

Ο υπολογισμός της αντοχής των γραμμών διαρροής της σύμμικτης πλάκας και η σχετική ενίσχυση της αντοχής λόγω των μεγάλων βυθίσεων της πλάκας περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.

6.3.2 Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας των μη μονωμένων δοκών

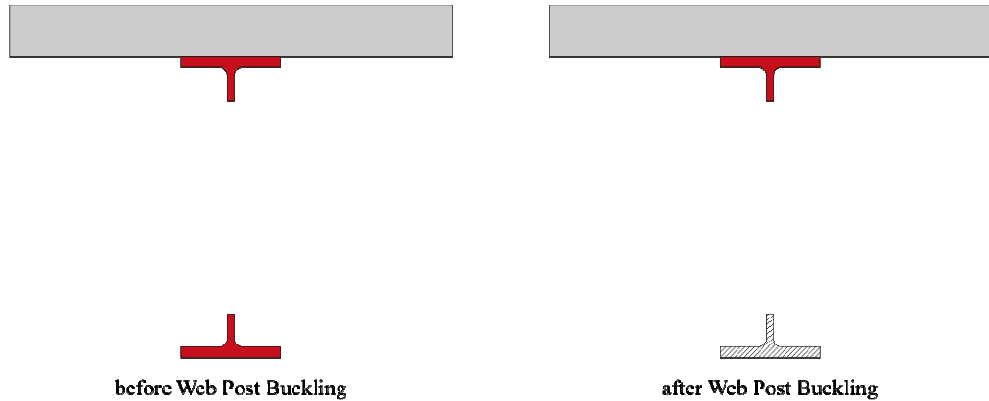
Σε κατάσταση πυρκαγιάς, οι μη μονωμένες δοκοί εντός των ζωνών σχεδιασμού της πλάκας συνεισφέρουν στην εφελκυστική αντοχή της πλάκας μέσω της αλυσιδωτής δράσης.

Η θερμοκρασία της διατομής των μη μονωμένων δοκών υπολογίζεται με βάση τη μεθοδολογία που δίνεται στο EN 1994-1-2, 4.3.4.2.2. Το κάτω πέλμα, ο κορμός και το άνω πέλμα του μεταλλικού προφίλ θεωρείται ότι παρουσιάζουν ομοιόμορφη θερμοκρασία για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης.

Ο υπολογισμός της πλαστικής ροπής αντίστασης των δοκών σε υψηλές θερμοκρασίες ακολουθεί τις αρχές του EN 1994-1-2, 4.3, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό της διατμητικής σύνδεσης ανάμεσα στη μεταλλική διατομή και το σκυρόδεμα. Η θερμοκρασία της πλάκας λαμβάνεται ίση με το 40 % της θερμοκρασίας στο άνω πέλμα.

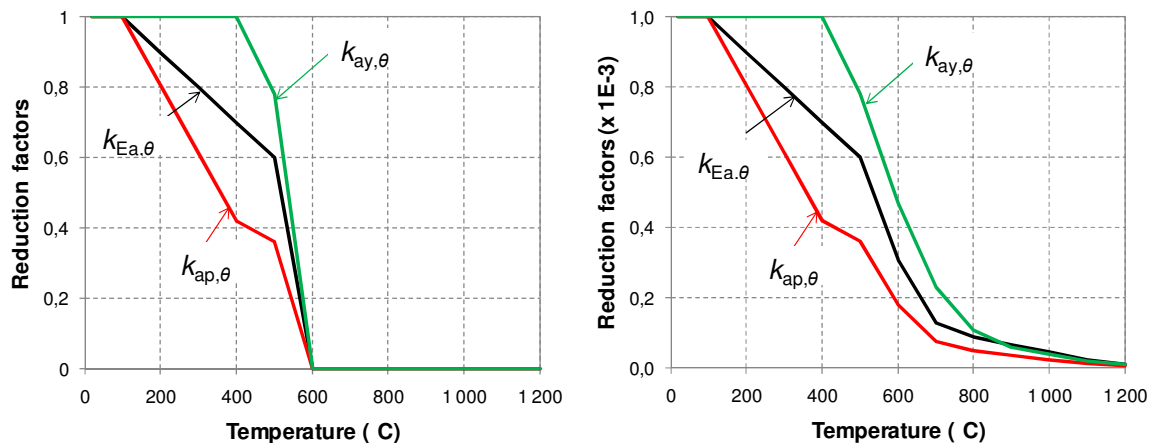
Στα απλά προφίλ διατομών, λαμβάνεται υπόψη ολόκληρο το μεταλλικό προφίλ. Για τις κυψελωτές δοκούς, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Ulster (βλ. παράγραφο 7.4) έδειξαν ότι μετά το μεταλυγισμικό στάδιο του κορμού της κυψελωτής δοκού, δεν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πλαστική αντίσταση ολόκληρης της δοκού. Κατά συνέπεια, μετά το μεταλυγισμικό στάδιο του κορμού

της κυψελωτής δοκού, λαμβάνεται υπόψη για λόγους ασφαλείας μόνο ο εφελκυσμός που εμφανίζεται στο άνω ταφ της διατομής.



Σχήμα 6.3 : Μεταλλική διατομή πριν και μετά από το μεταλυγισμικό στάδιο του κορμού

Για την εφαρμογή των παραπάνω στο πλαίσιο της αναλυτικής μεθόδου και για τη διασφάλιση της μετάβασης από ολόκληρο το προφίλ της κυψελωτής δοκού στην κυψελωτή δοκό μετά από το μεταλυγισμικό στάδιο του κορμού, δημιουργήθηκε ένας καινούριος νόμος υλικού για το μέταλλο του κάτω μέλους:



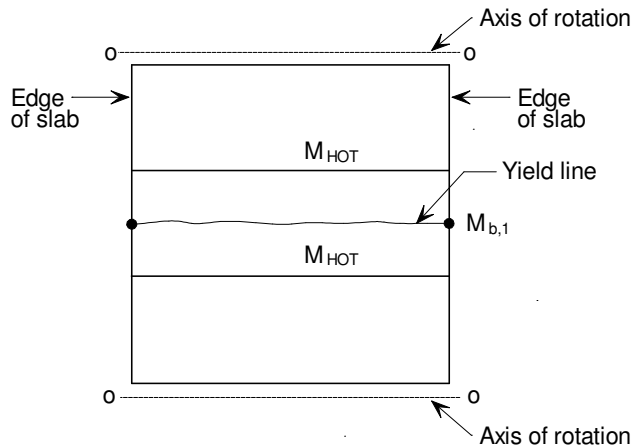
a) $\theta < 600 \text{ }^\circ\text{C}$ b) $\theta \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$ and cooling phase

Σχήμα 6.4 : Συντελεστές μείωσης του δομικού μετάλλου στο κάτω ταφ μη μονωμένης κυψελωτής δοκού

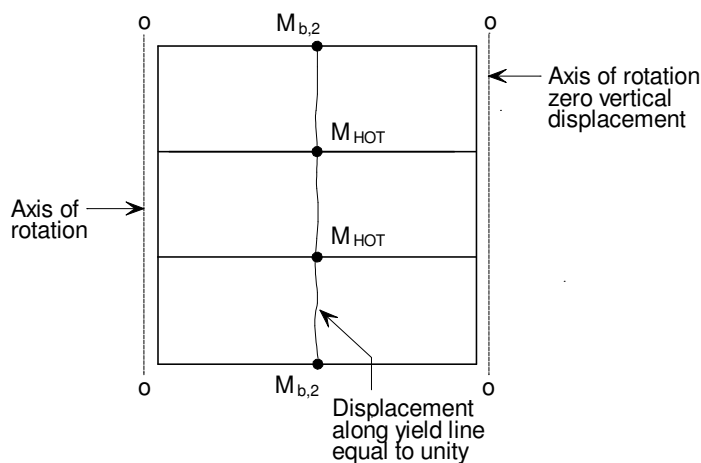
6.4 Σχεδίαση των πυράντοχων περιμετρικών δοκών

Οι περιμετρικές δοκοί που ορίζουν κάθε ζώνη σχεδιασμού της πλάκας πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το χρονικό διάστημα πυραντοχής που απαιτεί η πλάκα έδρασης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η διάταξη των γραμμών διαρροής και η σχετική ενίσχυση εξαιτίας της εφελκυστικής δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης, οι οποίες θεωρείται ότι εμφανίζονται σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού, είναι αυτές που εμφανίζονται και στην πραγματικότητα. Η απαιτούμενη ροπή αντίστασης των ακραίων δοκών υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικές διατάξεις γραμμών διαρροής, οι οποίες επιτρέπουν στην πλάκα να διπλώσει κατά μήκος ενός άξονα συμμετρίας,

χωρίς να εμφανιστεί εφελκυστική δράση της μεμβράνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5 και στο Σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.5 Εναλλακτικές διατάξεις γραμμών διαρροής που περιλαμβάνουν το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις περιμετρικές δοκούς



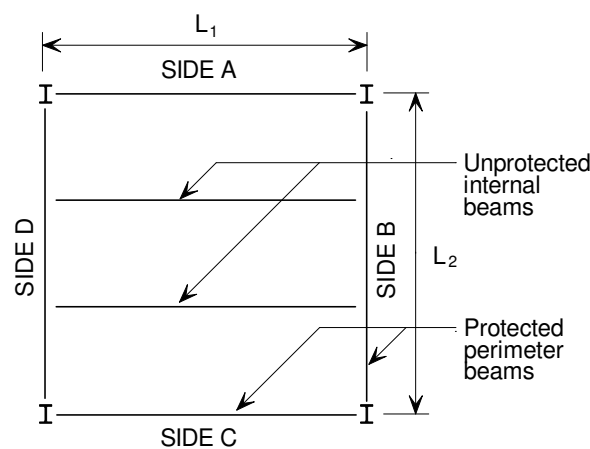
Σχήμα 6.6 Εναλλακτικές διατάξεις γραμμών διαρροής που περιλαμβάνουν το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις περιμετρικές δοκούς

Έχοντας υπολογίσει την απαιτούμενη ροπή αντίστασης των δοκών ώστε να διασφαλίζεται ότι προσφέρουν επαρκή στήριξη για να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα της πλάκας λόγω της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης, είναι δυνατό να υπολογιστεί η κρίσιμη θερμοκρασία των δοκών και να εφαρμοστεί η κατάλληλη μόνωση ώστε η κρίσιμη αυτή θερμοκρασία να μην ξεπεραστεί στον απαιτούμενο χρόνο πυραντίστασης.

Η μέθοδος σχεδιασμού που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 θεωρεί ότι στην πλάκα σχηματίζεται διάταξη φακέλου των γραμμών διαρροής σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Για να συμβεί αυτό, οι δοκοί στην περίμετρο της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας πρέπει να παρουσιάζουν επαρκή ροπή αντίστασης, για να εμποδίσουν έναν μηχανισμό δοκού και πλάκας σε χαμηλότερα επίπεδα φορτίου.

Για μία τυπική ζώνη σχεδιασμού της πλάκας, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 6.7, λαμβάνονται υπόψη δύο γραμμές διαρροής που περιλαμβάνουν το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στις περιμετρικές δοκούς. Οι γραμμές διαρροής μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του κέντρου της πλάκας, είτε παράλληλα στις μη μονωμένες δοκούς στη διεύθυνση ανοίγματος 1 με τις πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές A και C, είτε κάθετα στις μη μονωμένες δοκούς στη διεύθυνση ανοίγματος 2 με τις πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές B και D και στις μη μονωμένες δοκούς.

Με τη χρήση αυτής της διάταξης γραμμών διαρροής και εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο για τον μηχανισμό, προσδιορίζεται η ροπή αντίστασης των περιμετρικών δοκών που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί φέρουσα ικανότητα ίση με αυτή της πλάκας. Η ανάλυση των κατάλληλων εξισώσεων για τον υπολογισμό δίνονται παρακάτω.

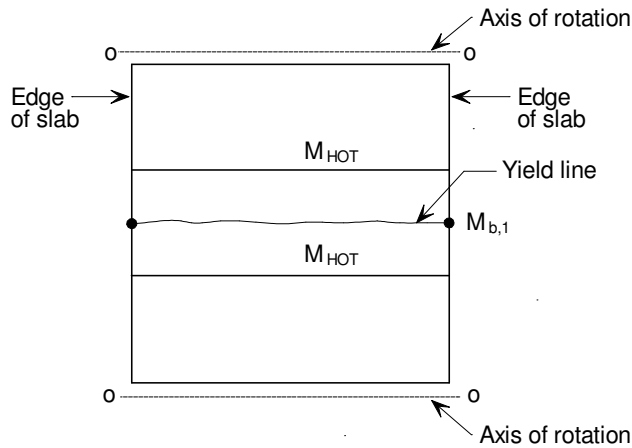


Σχήμα 6.7 Τυπική ζώνη σχεδιασμού της πλάκας

6.4.1 Μη μονωμένες δοκοί με ακραίες δοκούς στις δύο πλευρές

6.4.1.1 Γραμμή διαρροής παράλληλα στις μη μονωμένες δοκούς

Αυτή η περίπτωση υπολογίζει την απαιτούμενη ροπή αντίστασης των περιμετρικών δοκών στις πλευρές B και D της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας. Θεωρείται, επίσης, ότι οι δοκοί αυτές βρίσκονται στα άκρα της πλάκας. Μία μοναδική γραμμή διαρροής θεωρείται ότι σχηματίζεται κατά μήκος του κέντρου της ζώνης σχεδιασμού στη διεύθυνση του ανοίγματος 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8. Για τη διατήρηση των παραδοχών της μεθόδου σχεδιασμού, θεωρείται ότι η περίμετρος της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας είναι απλά εδραζόμενη.



Σχήμα 6.8 Γραμμή διαρροής παράλληλη με τις μη μονωμένες δοκούς στις πλευρές B και D

Θεωρώντας μοναδιαία μετατόπιση της γραμμής διαρροής, η στροφή της γραμμής διαρροής υπολογίζεται:

$$\text{Στροφή γραμμής διαρροής} = 2 \frac{1}{L_2/2} = \frac{4}{L_2}$$

Το εσωτερικό έργο που πραγματοποιείται εξαιτίας της στροφής της γραμμής διαρροής υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Εσωτερικό έργο} = (ML_{1,\text{eff}} + 2M_{b,1}) \frac{4}{L_2} = \frac{4ML_{1,\text{eff}}}{L_2} + \frac{8M_{b,1}}{L_2}$$

όπου

$L_{1,\text{eff}}$ το ενεργό μήκος της γραμμής διαρροής αφαιρώντας το ενεργό πλάτος της πλάκας που θεωρείται ότι δρα με τις περιμετρικές δοκούς, όπου αυτές είναι σχεδιασμένες ως σύμμικτα μέλη.

M η ροπή αντίστασης της πλάκας ανά μονάδα μήκους της γραμμής διαρροής

Για ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στην πλάκα, p , το εξωτερικό έργο λόγω της μετατόπισης, δίνεται:

$$\text{Εξωτερικό έργο} = \frac{1}{2} p L_1 L_2$$

Εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο:

$$p L_1 L_2 = \frac{8ML_{1,\text{eff}}}{L_2} + \frac{16M_{b,1}}{L_2}$$

Αν το φορτίο της πλάκας αντιστοιχεί στη φορτίο της φέρουσας ικανότητας όπως καθορίστηκε στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές της ροπής αντίστασης στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές B και D δίνονται:

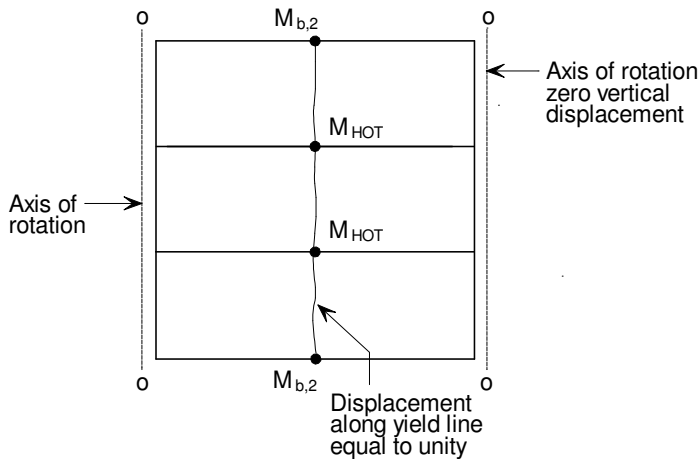
$$M_{b,1} = \frac{p L_1 L_2^2 - 8ML_{1,\text{eff}}}{16}$$

όπου

p το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που εδράζεται στη ζώνη σχεδιασμού της πλάκας σε κατάσταση πυρκαγιάς.

6.4.1.2 Γραμμή διαρροής κάθετα στις μη μονωμένες δοκούς

Αυτή η περίπτωση υπολογίζει την απαιτούμενη ροπή αντίστασης των περιμετρικών δοκών στις Πλευρές Α και C της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας. Μία μοναδική γραμμή διαρροής θεωρείται ότι σχηματίζεται κατά μήκος του κέντρου της ζώνης σχεδιασμού στη διεύθυνση του ανοίγματος 2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Για τη διατήρηση των παραδοχών της μεθόδου σχεδιασμού, θεωρείται ότι η περίμετρος της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας είναι απλά εδραζόμενη.



Σχήμα 6.9 Γραμμή διαρροής κάθετη στις μη μονωμένες δοκούς στις πλευρές Α και C

Θεωρώντας μοναδιαία μετατόπιση της γραμμής διαρροής, η στροφή της γραμμής διαρροής υπολογίζεται:

$$\text{Στροφή γραμμής διαρροής} = 2 \frac{1}{L_1/2} = \frac{4}{L_1}$$

Το εσωτερικό έργο που πραγματοποιείται εξαιτίας της στροφής της γραμμής διαρροής υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Εσωτερικό έργο} &= (ML_{2,\text{eff}} + 2M_{b,2} + nM_{\text{HOT}}) \frac{4}{L_1} \\ &= \frac{4ML_{2,\text{eff}}}{L_1} + \frac{8M_{b,2}}{L_1} + \frac{4nM_{\text{HOT}}}{L_1} \end{aligned}$$

όπου

$L_{2,\text{eff}}$ το ενεργό μήκος της γραμμής διαρροής αφαιρώντας το ενεργό πλάτος της πλάκας που θεωρείται ότι δρα με τις περιμετρικές δοκούς, όπου αυτές είναι σχεδιασμένες ως σύμμικτα μέλη και τις σύμμικτες μη μονωμένες εσωτερικές δοκούς

M η ροπή αντίστασης της πλάκας ανά μονάδα μήκους της γραμμής διαρροής

Το εξωτερικό έργο λόγω της μετατόπισης της πλάκας δίνεται:

$$\text{Εξωτερικό έργο} = \frac{1}{2} p L_1 L_2$$

Εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο:

$$pL_1L_2 = \frac{8ML_{2,\text{eff}}}{L_1} + \frac{16M_{b,2}}{L_1} + \frac{8nM_{\text{HOT}}}{L_1}$$

Αν το φορτίο της πλάκας αντιστοιχεί στη φορτίο της φέρουσας ικανότητας όπως καθορίστηκε στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές της ροπής αντίστασης στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές A και C δίνονται:

$$M_{b,2} = \frac{pL_1^2 L_2 - 8ML_{2,\text{eff}} - 8nM_{\text{HOT}}}{16}$$

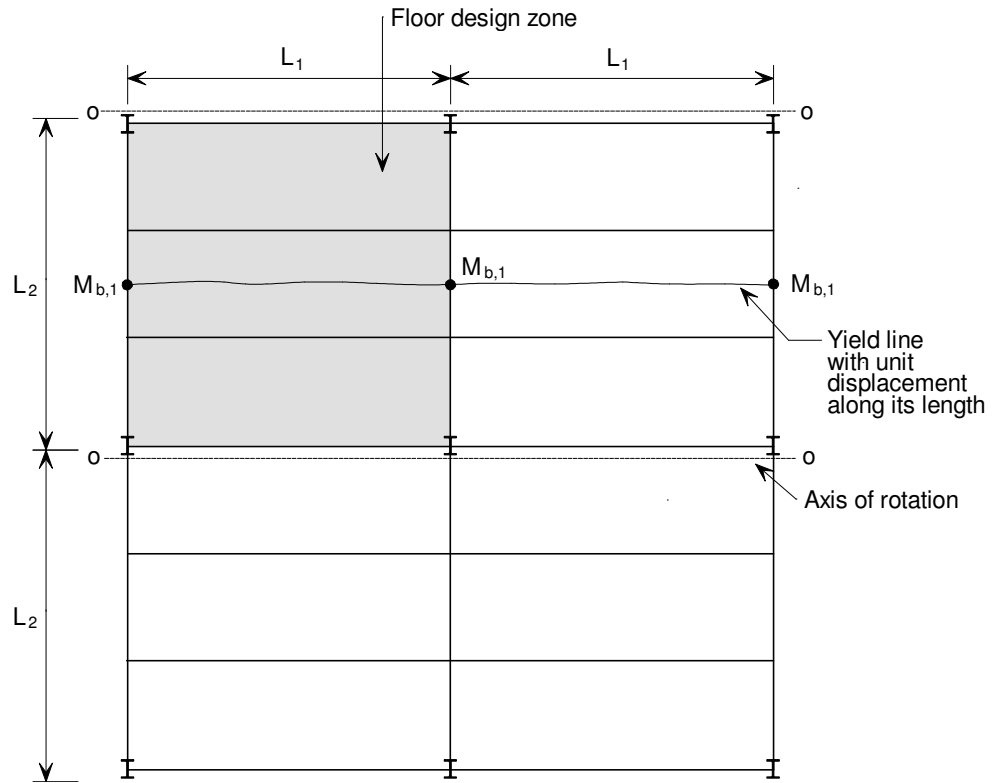
όπου

p το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που εδράζεται στη ζώνη σχεδιασμού της πλάκας σε κατάσταση πυρκαγιάς.

6.4.2 Μη μονωμένες δοκοί με μία ακραία δοκό στη μία πλευρά

6.4.2.1 Γραμμή διαρροής παράλληλη στις μη μονωμένες δοκούς

Αυτή η περίπτωση υπολογίζει την απαιτούμενη ροπή αντίστασης των περιμετρικών δοκών στις πλευρές B και D της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας. Σε αυτή την περίπτωση η δοκός στην Πλευρά B είναι εσωτερική περιμετρική δοκός. Καθώς το λογισμικό επεξεργάζεται μόνο μία μεμονωμένη πλάκα έδρασης, για τον υπολογισμό της αντοχής της εσωτερικής περιμετρικής δοκού θεωρείται ότι η ζώνη σχεδιασμού της πλάκας είναι προσκείμενη σε μία όμοια περιοχή της πλάκας, όπου οι εσωτερικές δοκοί έχουν προσδιοριστεί. Μία μοναδική γραμμή διαρροής θεωρείται ότι σχηματίζεται κατά μήκος του κέντρου της ζώνης σχεδιασμού στη διεύθυνση ανοίγματος 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.10 Γραμμή διαρροής παράλληλη με τις μη μονωμένες δοκούς στην Πλευρά D

Θεωρώντας μοναδιαία μετατόπιση της γραμμής διαρροής, η στροφή της γραμμής διαρροής υπολογίζεται:

$$\text{Στροφή γραμμής διαρροής} = 2 \frac{1}{L_2/2} = \frac{4}{L_2}$$

Το εσωτερικό έργο που πραγματοποιείται εξαιτίας της στροφής της γραμμής διαρροής υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Εσωτερικό έργο} = \left(2ML_{1,\text{eff}} + 3M_{b,1} \right) \frac{4}{L_2} = \frac{8ML_{1,\text{eff}}}{L_2} + \frac{12M_{b,1}}{L_2}$$

Το εξωτερικό έργο λόγω της μετατόπισης της πλάκας δίνεται:

$$\text{Εξωτερικό έργο} = \frac{1}{2} p 2L_1 L_2$$

Εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο:

$$pL_1 L_2 = \frac{8ML_{1,\text{eff}}}{L_2} + \frac{12M_{b,1}}{L_2}$$

Αν το φορτίο της πλάκας αντιστοιχεί στη φορτίο της φέρουσας ικανότητας όπως καθορίστηκε στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές της ροπής αντίστασης στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές B και D δίνονται:

$$M_{b,1} = \frac{pL_1 L_2^2 - 8ML_{1,eff}}{12}$$

όπου

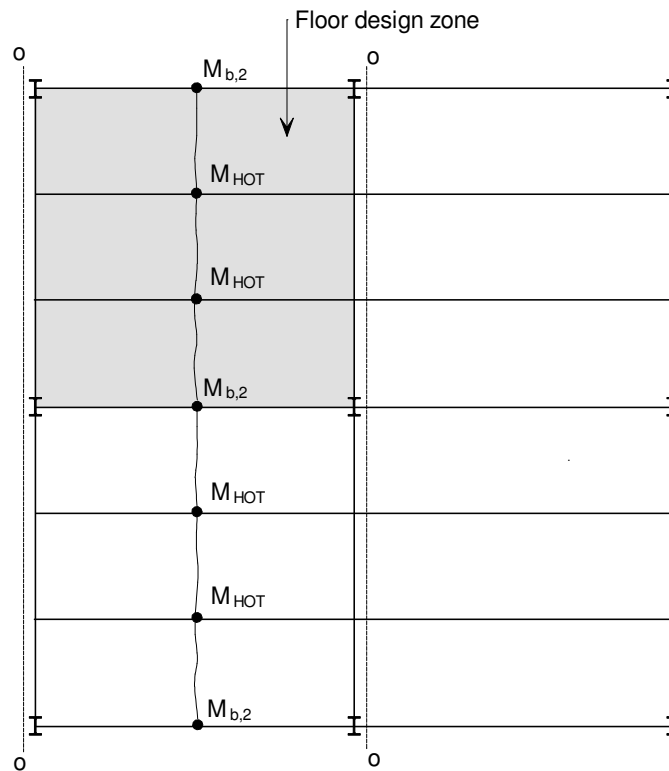
$L_{1,eff}$ το ενεργό μήκος της γραμμής διαρροής αφαιρώντας το ενεργό πλάτος της πλάκας που θεωρείται ότι δρα με τις περιμετρικές δοκούς, όπου αυτές είναι σχεδιασμένες ως σύμμικτα μέλη

M η ροπή αντίστασης της πλάκας ανά μονάδα μήκους της γραμμής διαρροής

p το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που εδράζεται στη ζώνη σχεδιασμού της πλάκας σε κατάσταση πυρκαγιάς.

6.4.2.2 Γραμμή διαρροής κάθετη στις μη μονωμένες δοκούς

Μία μοναδική γραμμή διαρροής θεωρείται ότι σχηματίζεται κατά μήκος του κέντρου της ζώνης σχεδιασμού της πλάκας στη διεύθυνση ανοίγματος 2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11 Γραμμή διαρροής κάθετη στις μη μονωμένες δοκούς στην Πλευρά Α

Θεωρώντας μοναδιαία μετατόπιση της γραμμής διαρροής, η στροφή της γραμμής διαρροής υπολογίζεται:

$$\text{Στροφή γραμμής διαρροής} = 2 \frac{1}{L_1/2} = \frac{4}{L_1}$$

Το εσωτερικό έργο που πραγματοποιείται εξαιτίας της στροφής της γραμμής διαρροής υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Εσωτερικό έργο} &= \left(2ML_{2,\text{eff}} + 3M_{b,2} + 2nM_{\text{HOT}} \right) \frac{4}{L_1} \\ &= \frac{8ML_{2,\text{eff}}}{L_1} + \frac{12M_{b,2}}{L_1} + \frac{8nM_{\text{HOT}}}{L_1} \end{aligned}$$

Το εξωτερικό έργο λόγω της μετατόπισης της πλάκας δίνεται:

$$\text{Εξωτερικό έργο} = \frac{1}{2} pL_1 2L_2$$

Εξισώνοντας το εσωτερικό με το εξωτερικό έργο:

$$pL_1 L_2 = \frac{8ML_{2,\text{eff}}}{L_1} + \frac{12M_{b,2}}{L_1} + \frac{8nM_{\text{HOT}}}{L_1}$$

Αν το φορτίο της πλάκας αντιστοιχεί στο φορτίο της φέρουσας ικανότητας όπως καθορίστηκε στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές της ροπής αντίστασης στις περιμετρικές δοκούς στις πλευρές Α και C δίνονται:

$$M_{b,2} = \frac{pL_1^2 L_2 - 8ML_{2,\text{eff}} - 8nM_{\text{HOT}}}{12}$$

όπου

$L_{2,\text{eff}}$ το ενεργό μήκος της γραμμής διαρροής αφαιρώντας το ενεργό πλάτος της πλάκας που θεωρείται ότι δρα με τις περιμετρικές δοκούς, όπου αυτές είναι σχεδιασμένες ως σύμμικτα μέλη και τις μη μονωμένες εσωτερικές δοκούς

M η ροπή αντίστασης της πλάκας ανά μονάδα μήκους της γραμμής διαρροής

p το ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο που εδράζεται στη ζώνη σχεδιασμού της πλάκας σε κατάσταση πυρκαγιάς.

6.4.3 Ζώνη σχεδιασμού πλάκας χωρίς ακραίες δοκούς

Στις ζώνες όπου καμία από τις περιμετρικές δοκούς δεν είναι ακραία δοκός, η χρήση των τιμών που καθορίζονται από τις εξισώσεις της παραγράφου **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** είναι συντηρητική.

6.4.4 Σχεδιασμός των ακραίων δοκών

Αποτελεί κοινή πρακτική οι δοκοί στα άκρα της πλάκας να είναι σχεδιασμένες ως μη σύμμικτες. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος για την κατάλληλη τοποθέτηση του εγκάρσιου οπλισμού διάτμησης είναι μεγαλύτερο από το κόστος τοποθέτησης μιας μεγαλύτερης διατομής δοκού. Παρόλ' αυτά, στο σχεδιασμό πυροπροστασίας, είναι σημαντικό η πλάκα να είναι επαρκώς αγκυρωμένη στις ακραίες δοκούς, καθώς αυτές οι δοκοί βρίσκονται στα άκρα των ζωνών σχεδιασμού της πλάκας. Για τον σκοπό αυτό, αν οι ακραίες δοκοί είναι σχεδιασμένες ως μη σύμμικτες, πρέπει να διαθέτουν συνδέσμους διάτμησης σε απόσταση κέντρων όχι μεγαλύτερη από 300 mm και ράβδοι σχήματος U πρέπει να διατίθενται για να συνδέουν τις ακραίες δοκούς με τη σύμμικτη πλάκα.

6.5 Θερμική ανάλυση

Το λογισμικό FRACOF χρησιμοποιεί μία δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών θερμικής μεταφοράς για την πρόβλεψη της κατανομής της θερμοκρασίας στη σύμμικτη πλάκα. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί επί σειρά ετών από το SCI για την πρόβλεψη της κατανομής της θερμοκρασίας σε μεταλλικές και σύμμικτες διατομές και έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να προβλέψει σε λογικά πλαίσια τη συμπεριφορά τμημάτων της κατασκευής κατά τη διάρκεια πειραμάτων πυραντοχής.

Το αντικείμενο που πρόκειται να αναλυθεί πρέπει να ορίζεται σε ορθογωνικό κάρναβο. Η μέθοδος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των κεκλιμένων πλευρών τραπεζοειδών σύμμικτων πλακών ή σύμμικτων πλακών με εσοχές, με τη χρήση των παρακάτω συντελεστών σχήματος.

Οι θερμικές ιδιότητες του μετάλλου και του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό FRACOF βασίζονται στις τιμές που δίνονται στο EN1994-1-2.

Οι θερμικές δράσεις υπολογίζονται με βάση την καθαρή ροή θερμότητας \dot{h}_{net} στην οποία εκτίθεται η επιφάνεια του μέλους. Η καθαρή ροή θερμότητας καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά θερμότητας με μετάδοση και ακτινοβολία.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (12)$$

Η καθαρή ροή θερμότητας λόγω μετάδοσης ορίζεται ως εξής:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (13)$$

Όπου

α_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μετάδοση

θ_g η θερμοκρασία αερίου

θ_m η θερμοκρασία επιφάνειας του μέλους

Κατά τη θερμική ανάλυση μέλους που είναι εκτεθειμένο στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μετάδοση στην εκτεθειμένη επιφάνεια ορίζεται ως $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Στα μοντέλα φυσικής πυρκαγιάς, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μετάδοση αυξάνεται στα $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Στη μη εκτεθειμένη πλευρά της πλάκας η καθαρή ροή θερμότητας βασίζεται στη μεταφορά θερμότητας με μετάδοση, ενώ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μετάδοση ορίζεται ως $\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$, ώστε να συμπεριλαμβάνονται και οι επιδράσεις της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, οι οποίες δεν θεωρούνται ξεχωριστά στο μοντέλο.

Η καθαρή ροή θερμότητας με ακτινοβολία ορίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (14)$$

Όπου

Φ ο συντελεστής σχήματος

ε_m η εκπεμπιμότητα της επιφάνειας του μέλους

ε_f η εκπεμπιμότητα της πυρκαγιάς

σ η σταθερά Stephan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

θ_r η ενεργή θερμοκρασία ακτινοβολίας της πυρκαγιάς

θ_m η θερμοκρασία της επιφάνειας του μέλους

Η εκπεμπιμότητα της πυρκαγιάς δίνεται ως $\varepsilon_f = 1.0$ σύμφωνα με την προτεινόμενη τιμή στο EN1994-1-2. Η εκπεμπιμότητα του μέλους μπορεί να οριστεί από τον Πίνακα 6.4.

6.5.1 Συντελεστές σχήματος

Στα μεταλλικά προφίλ υποστρωμάτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συντελεστές σχήματος για να προσαρμόσουν την καθαρή μεταφορά θερμότητας σε κάθε επιφάνεια. Οι θέσεις όπου εφαρμόζονται οι παρακάτω συντελεστές απεικονίζονται στο Σχήμα 6.12 για τα τραπεζοειδή προφίλ υποστρωμάτων και στο Σχήμα 6.13 για τα προφίλ υποστρωμάτων με εσοχές.

Τραπεζοειδή προφίλ

Το κάτω πέλμα του τραπεζοειδούς προφίλ θεωρείται ότι έχει συντελεστή σχήματος 1,00. Ο συντελεστής σχήματος του άνω πέλματος, Φ_{TOP} , υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_{\text{TOP}} = \frac{2 \tan^{-1} \left(\frac{h}{2(p - b_1)} \right)}{3.14}$$

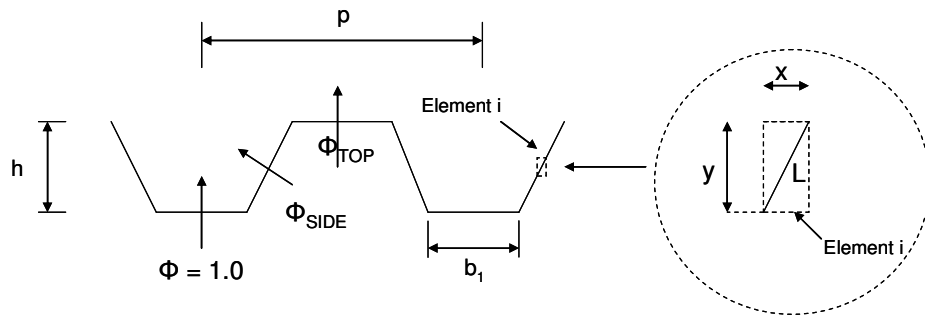
Ομοίως, στον κεκλιμένο κορμό του τραπεζοειδούς προφίλ, ο συντελεστής σχήματος, Φ_{SIDE} , υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_{\text{SIDE}} = 0.5 \frac{L}{x + y}$$

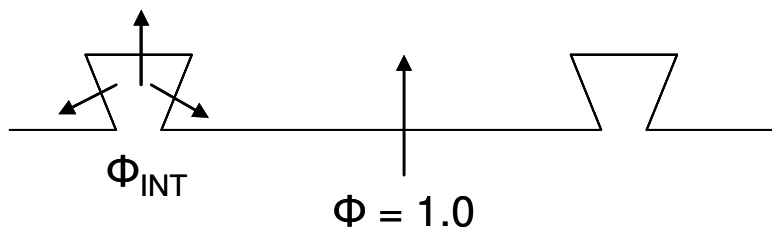
Υπόστρωμα με εσοχές

Το κάτω πέλμα του μεταλλικού προφίλ με εσοχές θεωρείται ότι έχει συντελεστή σχήματος 1,00. Ο συντελεστής σχήματος για τις επιφάνειες των εσοχών συναρμογής υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_{\text{INT}} = 0.3 \frac{L}{x + y}$$



Σχήμα 6.12 Συντελεστές σχήματος τραπεζοειδών υποστρωμάτων



Σχήμα 6.13 Συντελεστές σχήματος υποστρωμάτων με εσοχές

6.5.2 Ιδιότητες υλικών

Οι παρακάτω ιδιότητες υλικών χρησιμοποιούνται για το μέταλλο και το σκυρόδεμα. Οι τιμές αυτές βασίζονται στις προτάσεις του EN1994-1-2. Ο Πίνακας 6.4 δείχνει τις τιμές εκπεμπιμότητα της επιφάνειας, την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία του μετάλλου, του κανονικού σκυροδέματος και του ελαφροσκυροδέματος.

Πίνακας 6.4 Ιδιότητες υλικών για το μέταλλο και το σκυρόδεμα

	Μέταλλο	NWC	LWC
Εκπεμπιμότητα, ϵ_m	0.7	0.7	0.7
Πυκνότητα, ρ	7850	2300	1850
% υγρασία ανά μάζα	0	4	4

Η ειδική θερμότητα του μετάλλου, C_a , για το δομικό μέταλλο και το χάλυβα οπλισμού δίνεται από τον παρακάτω τύπο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία:

$$C_a = 425 + 0.773\theta - 0.00169\theta^2 + 0.00000222\theta^3 \quad (\text{J/kg K}) \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$$

$$C_a = 666 - \frac{13002}{(\theta - 738)} \quad (\text{J/kg K}) \quad \text{for } 600^\circ\text{C} \leq \theta \leq 735^\circ\text{C}$$

$$C_a = 545 - \frac{17820}{(\theta - 731)} \quad \begin{matrix} \text{(J/kg} \\ \text{K)} \end{matrix} \quad \text{for} \quad 735^\circ\text{C} \leq \theta \leq 900^\circ\text{C}$$

$$C_a = 650 \quad \begin{matrix} \text{(J/kg} \\ \text{K)} \end{matrix} \quad \text{for} \quad 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Οι παρακάτω τιμές ειδικής θερμότητας, C_c , που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται σε κανονικού βάρους σκυροδέματα με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή.

$$C_c = 900 \quad \begin{matrix} \text{(J/kg K)} \\ \end{matrix} \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$C_c = 900 + (\theta - 100) \quad \begin{matrix} \text{(J/kg K)} \\ \end{matrix} \quad \text{for } 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}$$

$$C_c = 1000 + (\theta - 200)/2 \quad \begin{matrix} \text{(J/kg K)} \\ \end{matrix} \quad \text{for } 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$$

$$C_c = 1100 \quad \begin{matrix} \text{(J/kg K)} \\ \end{matrix} \quad \text{for } 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Σύμφωνα με τις προτάσεις του EN1994-1-2, η παρακάτω ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία τιμή ειδικής θερμότητας θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο ελαφρύ σκυρόδεμα.

$$C_c = 840 \quad \begin{matrix} \text{(J/kg K)} \\ \end{matrix} \quad \text{for all temperatures}$$

Η θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

$$\lambda_a = 54 - 0.033(\theta - 20) \quad \text{but not less than } 27.3 \quad \text{(W/mK)}$$

Στο κανονικό σκυρόδεμα, το ανώτερο όριο της θερμικής αγωγιμότητας ορίζεται στον EN1994-1-2. Η θερμική αγωγιμότητα του κανονικού σκυροδέματος ορίζεται από την παρακάτω σχέση, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

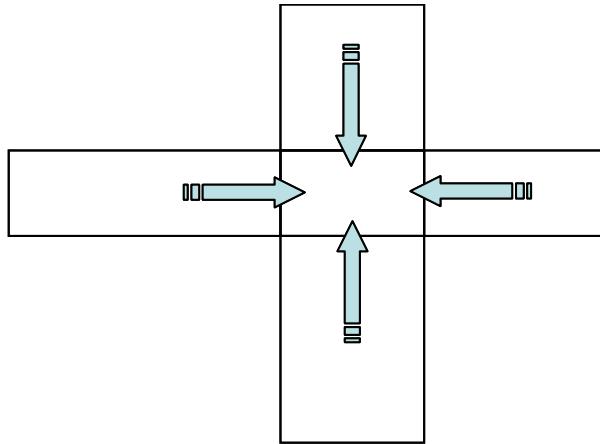
$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta/100) + 0.0107(\theta/100)^2 \quad \text{(W/mK)}$$

Η θερμική αγωγιμότητα του ελαφροσκυροδέματος εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\lambda_c = 1 - (\theta/1600) \quad \text{but not less than } 0.5 \quad \text{(W/mK)}$$

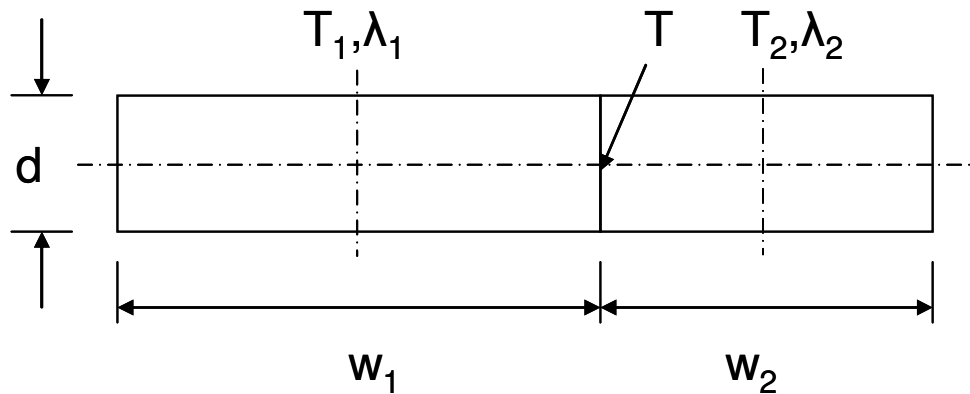
6.5.3 Εσωτερική μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η θερμική ανάλυση υπολογίζει τη μεταφορά αγωγικής θερμότητας ανάμεσα σε ένα κελί και τα τέσσερα περιμετρικά κελιά - πάνω, κάτω και πλευρικά από το κελί αυτό (Σχήμα 6.14). Στην ανάλυση δεν λαμβάνονται υπόψη άλλα κελιά.



Σχήμα 6.14 Βάση μεταφοράς αγωγίμης θερμότητας

Η θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου εξαρτάται από το μέγεθος των κελιών, τη θερμοκρασία κάθε κελιού και τη θερμική αγωγιμότητα κάθε κελιού. Κάθε ζεύγος κελιών εξετάζεται σε σειρά και υπολογίζεται η καθαρή μεταφερόμενη θερμότητα από και προς το κάθε κελί. Το βασικό μοντέλο αγωγιμότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.15 Βασικό μοντέλο αγωγιμότητας

Η θερμοκρασία κάθε κελιού ορίζεται στο κέντρο του (T_1, T_2). Η θερμοκρασία της διεπιφάνειας ανάμεσα στα κελιά ορίζεται ως T . Η μεταφορά θερμότητας από το κελί 1 στη διεπιφάνεια είναι ίση με τη μεταφορά θερμότητας από τη διεπιφάνεια στο κελί 2. Οι θερμικές αγωγιμότητες των κελιών ορίζονται ως λ_1 και λ_2 .

Η μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνο από το κέντρο του κελιού 1 στη διεπιφάνεια υπολογίζεται ως εξής:

$$h = \frac{2D\lambda_1}{w_1}(T - T_1)$$

Η παραπάνω τιμή είναι ίση με την τιμή της μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα χρόνο από τη διεπιφάνεια στο κέντρο του κελιού 2:

$$h = \frac{2D\lambda_2}{w_2}(T_2 - T)$$

Άρα, απαλείφοντας τη θερμοκρασία της διεπιφάνειας, T , έχουμε:

$$h = \frac{(T_2 - T_1)}{\left(\frac{w_1}{2D\lambda_1} + \frac{w_2}{2D\lambda_2} \right)} \text{ ανά μονάδα χρόνου}$$

Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε όλα τα κελιά. Για κάθε κελί, η τιμή:

$$\frac{w}{2D}$$

προϋπολογίζεται. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας πολύ συχνά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και υπολογίζεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως κάθε 30 δευτερόλεπτα) ώστε να επιταχύνεται ο υπολογισμός.

6.5.4 Θερμοκρασίες σχεδιασμού για μη μονωμένες μεταλλικές δοκούς

Η θερμοκρασία σχεδιασμού των μη μονωμένων μεταλλικών δοκών υπολογίζεται με βάση την απλοποιημένη μέθοδο που περιγράφεται στο EN1994-1-2 παράγραφος 4.3.4.2.2. Η αύξηση της θερμοκρασίας του μετάλλου κατά τη διάρκεια ενός σύντομου χρονικού διαστήματος υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{\text{shadow}} \left(\frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \dot{h}_{\text{net}} \Delta t$$

Όπου

k_{shadow} ο συντελεστής διόρθωσης των συνεπειών της σκιάς

ρ_a η πυκνότητα του μετάλλου

Δt το χρονικό διάστημα

A_i/V_i ο συντελεστής διατομής του τμήματος i της διατομής

Το λογισμικό FRACOF υπολογίζει τη θερμοκρασία του μετάλλου στο κάτω πέλμα ενός τμήματος σε χρονικά ορόσημα 2,5 δευτερολέπτων. Ο συντελεστής διόρθωσης των συνεπειών της σκιάς θεωρείται ότι είναι 1,00.

Ο συντελεστής διατομής στο κάτω πέλμα εκφράζεται ως συνάρτηση του πάχους του πέλματος, e_1 , ως εξής:

$$A_i/V_i = \frac{2000}{e_1}$$

Οι ιδιότητες υλικών περιγράφονται στην παράγραφο 6.5.2.

Η καθαρή ροή θερμότητας υπολογίζεται με την Εξίσωση 12 και οι συνιστώσες μετάδοσης και ακτινοβολίας υπολογίζονται με τις Εξισώσεις 13 και 14 αντίστοιχα.

Κατά τον υπολογισμό της ροής θερμότητας με ακτινοβολία με την Εξίσωση 14, ο συντελεστής σχήματος θα πρέπει να θεωρείται ότι είναι 1,00.

7 ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΥΡΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΑΚΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

7.1 Πεδίο εφαρμογής

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού αναπτύχθηκε κυρίως με βάση πειράματα φυσικής πυρκαγιάς σε πραγματική κλίμακα, στα οποία οι πλάκες υποβλήθηκαν σε πυρκαγιές πλήρους ανάπτυξης εντός των πυροδιαμερισμάτων. Οι αρχές της παραπάνω ιδέας σχεδίασης μπορούν να εφαρμοστούν και για το σχεδιασμό πυροπροστασίας, χρησιμοποιώντας την πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου. Ωστόσο, κάποια ερωτήματα απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση, όπως για παράδειγμα η επιρροή:

- πυρκαγιών μεγάλης διάρκειας (έως 120 λεπτά)
- των διαφοροποιημένων λεπτομερειών της κατασκευής
- της επίδρασης υψηλότερων τιμών των δράσεων σχεδίασης

Τα παραπάνω ερωτήματα οδήγησαν στη δημιουργία ενός καινούριου πειράματος με κλίβανο ως μέρος του έργου FRACOF. Αυτό είχε ως στόχο αφενός να παρέχει πειραματικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας χάλυβα-σκυροδέματος που εκτίθεται στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου και αφετέρου να διευρύνει το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου σχεδιασμού με τη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης. Επιπλέον, για την εξέταση της πυραντοχής των συνδέσεων ανάμεσα στην πλάκα σκυροδέματος και τα μεταλλικά μέλη στα ακραία τμήματα της σύμμικτης πλάκας που υφίσταται μεγάλη παραμόρφωση υπό τη δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης, πραγματοποιήθηκε ένα ακόμα πείραμα στο πλαίσιο του έργου COSSFIRE. Τα σχετικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο πραγματικής κλίμακας σύμμικτες πλάκες χάλυβα-σκυροδέματος, σύμφωνα με το EN1365-2. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά αυτών των συστημάτων πλάκας απέναντι στην πυρκαγιά ήταν πολύ ικανοποιητική και απέδειξε τη στιβαρότητα και ακεραιότητα αυτού του δομικού συστήματος σε περίπτωση πυρκαγιάς.

7.2 Πείραμα FRACOF

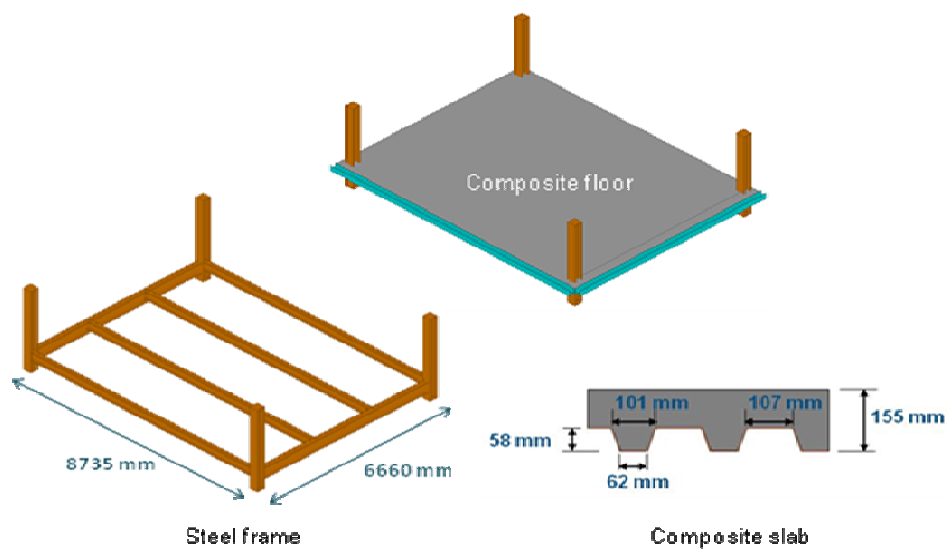
7.2.1 Πειραματικό δοκίμιο

Η διάταξη του πειραματικού δοκιμίου απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Η σύμμικτη πλάκα χάλυβα-σκυροδέματος αποτελούταν από τέσσερις δευτερεύουσες δοκούς, δύο κύριες δοκούς, τέσσερις κοντούς στύλους και πλάκα δαπέδου πάχους 155 mm.

Το πειραματικό δοκίμιο είχε σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει 120 λεπτά πυραντοχής. Οι δοκοί που πλαισίωναν τις θέσεις των στύλων ήταν μονωμένες και οι δευτερεύουσες δοκοί στο κέντρο της πλάκας δεν διέθεταν προστασία. Η φέρουσα ικανότητα του πειραματικού δοκιμίου υπολογίστηκε σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού, με το πειραματικό δοκίμιο να θεωρείται ως ζώνη σχεδιασμού της πλάκας (βλ. Κεφάλαιο 6). Η μελέτη έδειξε ότι η τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης με επιφάνεια 256 mm²/m και στις δύο διευθύνσεις κατά 50 mm κάτω από την επιφάνεια της πλάκας αρκεί για να παρέχει επαρκή φέρουσα ικανότητα στο σύστημα. Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού πρόβλεψε ότι το πειραματικό δοκίμιο παρουσιάζει φέρουσα ικανότητα

7,58 kN/m², μετά από 120 λεπτά έκθεσης στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου. Το πάχος της πλάκας επιλέχθηκε έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μόνωσης για 120 λεπτά πυραντοχής, σύμφωνα με τον οδηγό που περιγράφεται στο EN 1994-1-2⁽³³⁾.

Οι μεταλλικές δοκοί ήταν συνδεδεμένες με την πλάκα σκυροδέματος με ήλους διάτμησης. Οι συνδέσεις δοκών σε στύλους ήταν με εύκαμπτες ακραίες μετωπικές πλάκες (στα πέλαμα των στύλων) και διπλά γωνιακά ελάσματα (στον κορμό των στύλων). Οι συνδέσεις δοκού σε δοκό ήταν από διπλά γωνιακά ελάσματα (Σχήμα 7.2). Η σύμμικτη πλάκα χάλυβα-σκυροδέματος κατασκευάστηκε με μεταλλικό υπόστρωμα COFRAPLUS60, πάχους 0,75mm, με τραπεζοειδή προφίλ. Αυτό το μεταλλικό υπόστρωμα χρησιμοποιείται συχνά στη Γαλλία. Το υπόστρωμα αυτό διαθέτει μικρή ποσότητα σκυροδέματος στις εσοχές και κατά συνέπεια είναι περισσότερο πιθανό να θερμαίνεται γρηγορότερα στην πυρκαγιά σε σχέση με άλλα υποστρώματα παρόμοιας γεωμετρίας.



Σχήμα 7.1 Διάταξη πειράματος

Οι διαστάσεις του πειραματικού δοκιμίου ήταν:

- άνοιγμα της δευτερεύουσας δοκού: 8,735 m
- άνοιγμα της κύριας δοκού: 6,66 m
- άνοιγμα της σύμμικτης πλάκας: 2,22 m
- συνολικό ύψος κάθε μεταλλικού στύλου: 2,5 m, από τα οποία 0,8 m κάτω από τη σύμμικτη πλάκα

Οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές για τις δράσεις λήφθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό των δομικών μελών της πλάκας:

- Μόνιμη δράση: ίδιο βάρος της κατασκευής συν 1,25 kN/m² για τα μη δομικά στοιχεία.
- μεταβλητή δράση: 5,00 kN/m²

Κατά το σχεδιασμό σε θερμοκρασία δωματίου, θεωρήθηκε ο παρακάτω συνδυασμός δράσεων, σύμφωνα με το EN1990.

$$\sum \gamma_{G,j,\text{sup}} G_{k,j,\text{sup}} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$$

Όπου

$\gamma_{G,j,\text{sup}}$ ο μερικός συντελεστής της μόνιμης δράσης, j (λαμβάνεται ως 1,35)

$G_{k,j,\text{sup}}$ η μόνιμη δράση, j

$\gamma_{Q,1}$ ο μερικός συντελεστής της κύριας μεταβλητής δράσης (λαμβάνεται ως 1,5)

$Q_{k,1}$ η κύρια μεταβλητή δράση.

Με βάση το παραπάνω φορτίο, οι διατομές όλων των μεταλλικών μελών και η διατμητική σύνδεση των σύμμικτων δοκών επαληθεύτηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 1994-1-1⁽³⁴⁾ σε θερμοκρασία δωματίου. Οι μεταλλικές συνδέσεις σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 1993-1-8⁽³⁵⁾. Τα παρακάτω μεγέθη διατομών επιλέχθηκαν για τα κύρια δομικά στοιχεία:

- δευτερεύουσες δοκοί: IPE300 με ποιότητα μετάλλου S235
- κύριες δοκοί: IPE400 με ποιότητα μετάλλου S355
- στύλοι: HEB260 με ποιότητα μετάλλου S235

Για την πλάκα χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κανονικού βάρους ποιότητας C30/37.



(a) Σύνδεση δοκού με στύλο με μετωπική πλάκα και διπλά γωνιακά (b) Σύνδεση δοκού με δοκό με διπλά γωνιακά

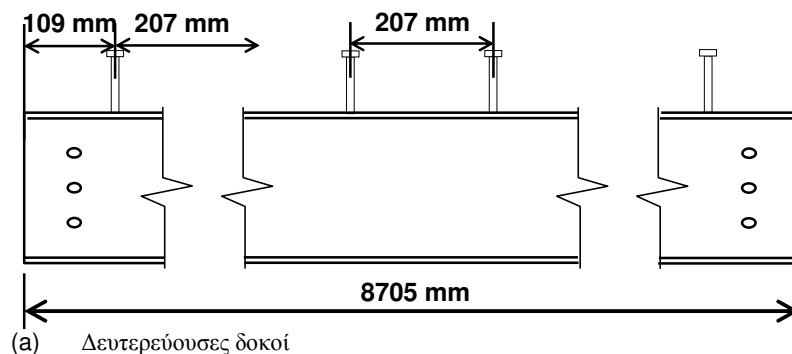
Σχήμα 7.2 Συνδέσεις μεταλλικών μελών

Οι πραγματικές ιδιότητες υλικών για το μέταλλο και το σκυρόδεμα μετρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Οι ονομαστικές και μετρηθείσες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

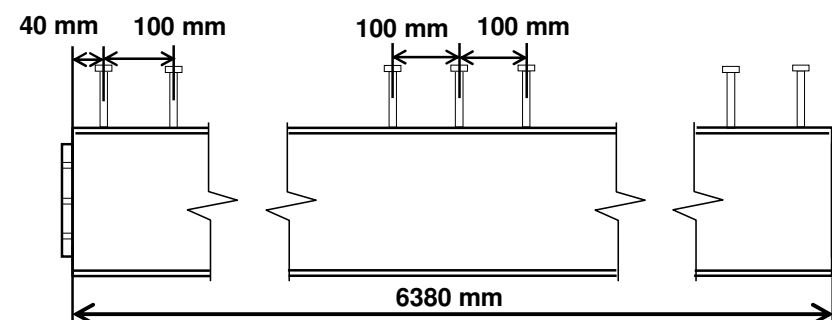
Πίνακας 7.1 Ιδιότητες υλικών των στοιχείων του πειράματος

Είδος υλικού	Μηχανικές ιδιότητες		
	Δευτερεύουσες δοκοί ποιότητας S235	Τάση διαρροής (MPa)	
Ονομαστική		Μετρηθείσα	Μετρηθείσα
235		311	446
Κύριες δοκοί ποιότητας S355	Τάση διαρροής (MPa)		Οριακή αντοχή εφελκυσμού (MPa)
	Ονομαστική	Μετρηθείσα	Μετρηθείσα
	355	423	549
Μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης ποιότητας B500A	Τάση διαρροής (MPa)		Οριακή αντοχή εφελκυσμού (MPa)
	Ονομαστική	Μετρηθείσα	631
	500	594	
Σκυρόδεμα C30/37	Αντοχή θλίψης (MPa)		
	Χαρακτηριστική τιμή		Μετρηθείσα τιμή
	30		36.7

Οι σύνδεσμοι διάτμησης ήταν ήλοι διάτμησης με διάμετρο 19 mm και ύψος 125 mm, η κατανομή των οποίων απεικονίζεται στο Σχήμα 7.3.



(a) Δευτερεύουσες δοκοί

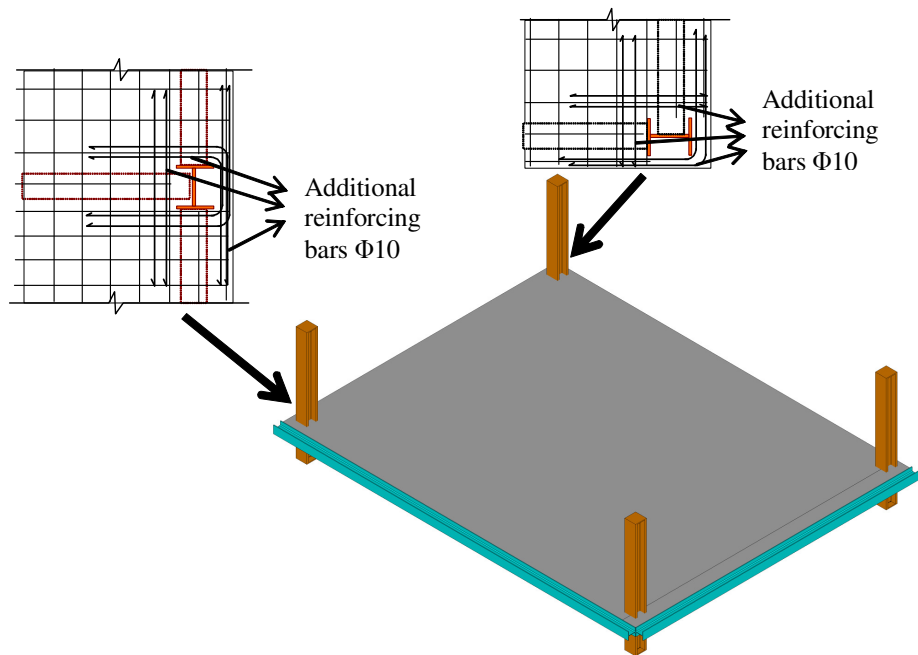


(b) Κύριες δοκοί

Σχήμα 7.3 Κατανομή των συνδέσμων διάτμησης στις μεταλλικές δοκούς

Το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης τοποθετήθηκε σε απόσταση 50 mm από την άνω επιφάνεια της πλάκας. Το πλέγμα κατασκευάστηκε από ράβδους διαμέτρου 7 mm, με ποιότητα μετάλλου S500, σε απόσταση 150 mm από κέντρο σε κέντρο και στις δύο διευθύνσεις. Πρόσθετες ράβδοι ενίσχυσης διαμέτρου 10 mm

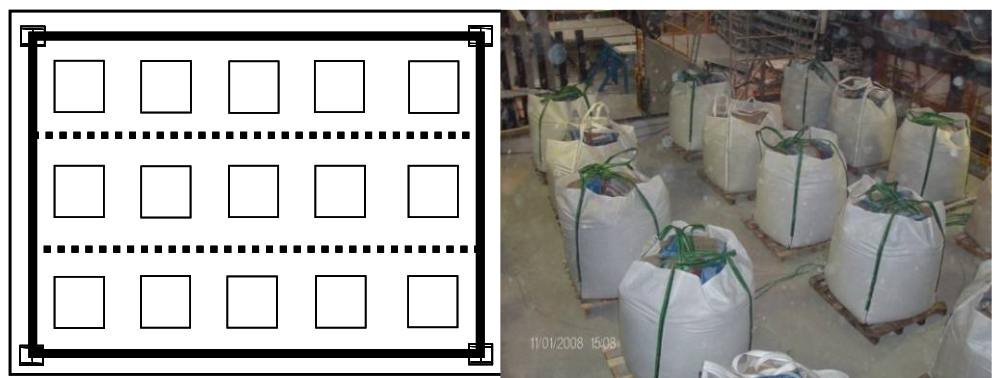
χρησιμοποιήθηκαν στην ακραία μεταλλική και σύμμικτη σύνδεση από σκυρόδεμα (βλ. Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4 Διατάξεις συνδέσεων που εξετάστηκαν στο πείραμα πυρκαγιάς

7.2.2 Μεθοδολογία του πειράματος

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το μηχανικό φορτίο της πλάκας παρείχαν δεκαπέντε σάκοι άμμου, ομοιόμορφα κατανεμημένοι πάνω στην πλάκα (βλ. Σχήμα 7.5). Κάθε σάκος άμμου ζύγιζε ακριβώς 15 kN, αντιστοιχώντας σε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 3,87 kN/m². Αυτή η τιμή είναι σχετικά υψηλότερη από την τιμή σχεδιασμού των 3,75 kN/m² στο συνδυασμό δράσεων του Ευρωκώδικα για κτίρια γραφείων σε κατάσταση πυρκαγιάς, με χρήση της προτεινόμενης τιμής 0,5 για τον συντελεστή συνδυασμού δράσεων, ψ_1 .

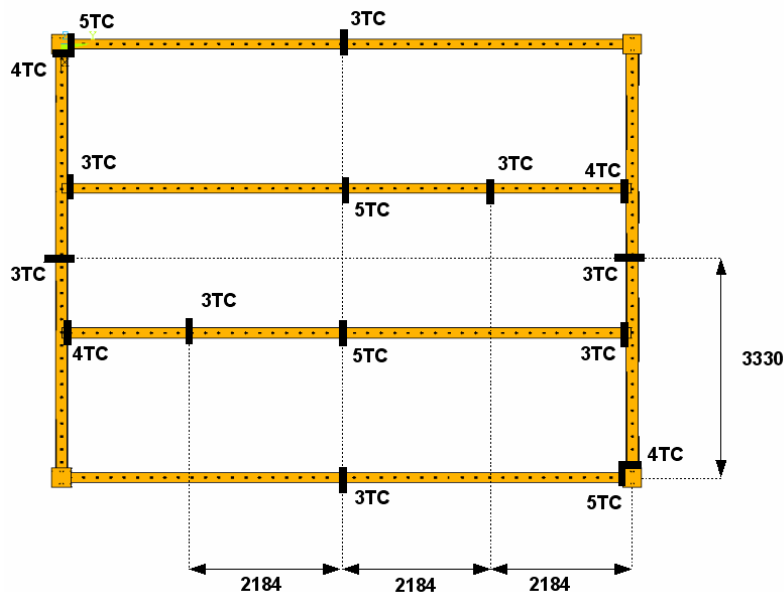


Σχήμα 7.5 Φορτίο σάκων άμμου στην πλάκα

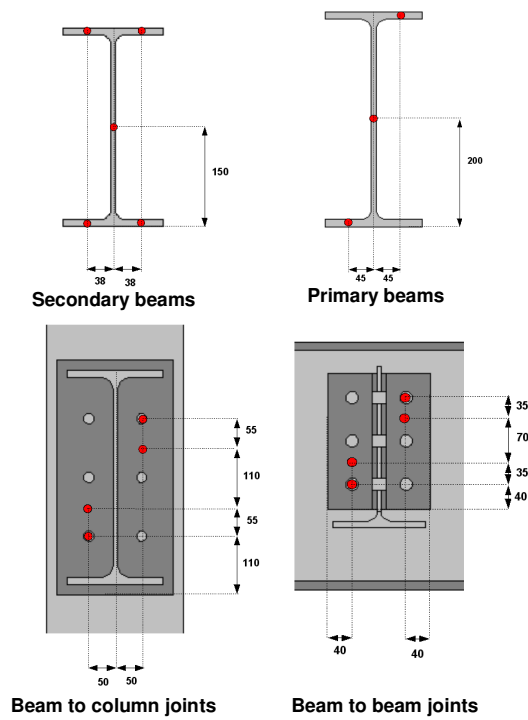
Σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού που περιγράφεται στο Κεφάλαιο Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. για αυτό τον τύπο πλάκας, οι δύο δευτερεύουσες δοκοί και η σύμμικτη πλάκα δεν ήταν

μονωμένες. Ωστόσο, όλες οι συνοριακές δοκοί στην περίμετρο των ζωνών σχεδιασμού της πλάκας (όλες οι δοκοί που συνδέονταν απευθείας σε στύλους) και όλοι οι στύλοι ήταν μονωμένοι, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι διατηρούν την ευστάθειά τους στην πυρκαγιά. Όλες οι συνδέσεις ήταν επίσης μονωμένες. Το υλικό πυροπροστασίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν δύο στρώματα ινωδών τεχνητών μανδυνών από ορυκτά [25 mm-128 kg/m³]. Το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης στις δύο πλευρές της πλάκας ήταν συγκολλημένο σε δύο μεταλλικές δοκούς, τοποθετημένες κατά μήκος του άκρου της πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Αυτές οι δοκοί στερεώθηκαν στη συνέχεια στα όρια της κατασκευής του κλιβάνου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της συνθήκης συνέχειας της σύμμικτης πλάκας.

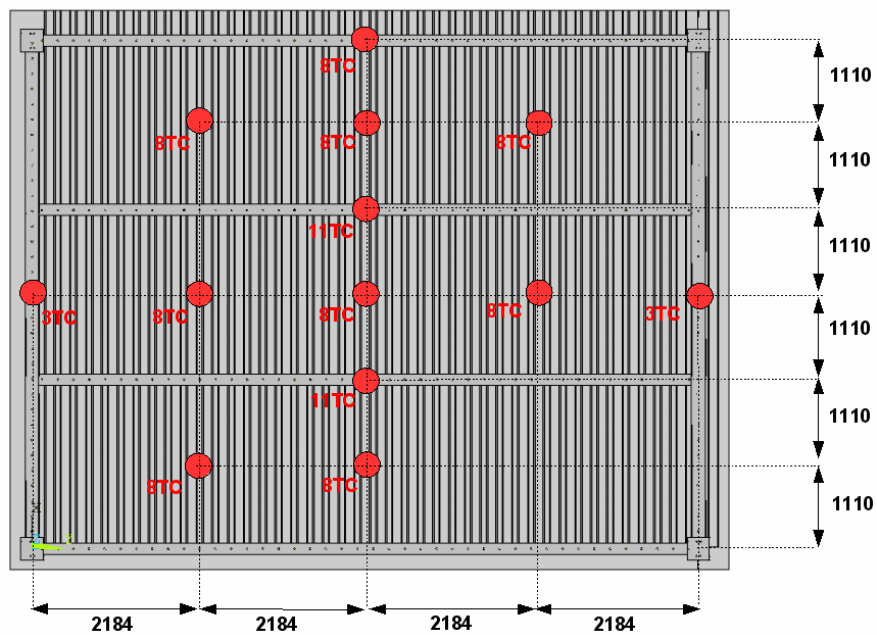
Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 194 θέσεις μετρήσεων για την καταγραφή της συμπεριφοράς της πλάκας. Οι βασικές μετρήσεις αφορούσαν τη θερμοκρασία και το παραμορφωμένο σχήμα της πλάκας. Κατά προσέγγιση 170 θερμοζεύγη χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της θερμοκρασίας του μεταλλικού πλαισίου (βλ. Σχήμα 7.6 και Σχήμα 7.7) και για την καταγραφή της κατανομής της θερμοκρασίας στην πλάκα (βλ. Σχήμα 7.8 και Σχήμα 7.9). Επτά μετρητές μετατόπισης εγκαταστάθηκαν για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης της πλάκας (βλ. Σχήμα 7.10). Δύο ακόμα μετρητές χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της οριζόντιας μετατόπισης της πλάκας. Ειδική βιντεοκάμερα υψηλών θερμοκρασιών τοποθετήθηκε εντός του κλιβάνου για την οπτική καταγραφή των παραμορφώσεων της πλάκας με την πάροδο του χρόνου.



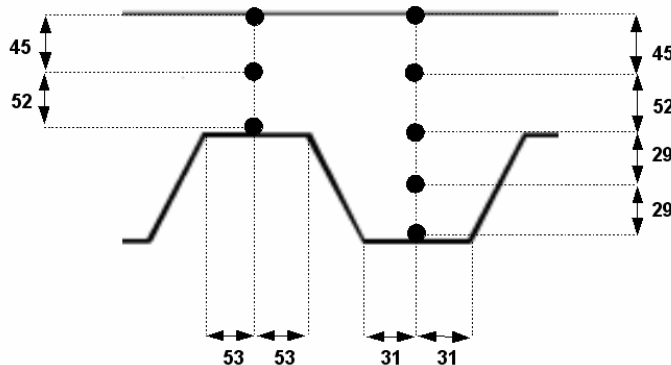
Σχήμα 7.6 Τοποθεσία των θερμοζευγών στο μεταλλικό πλαίσιο



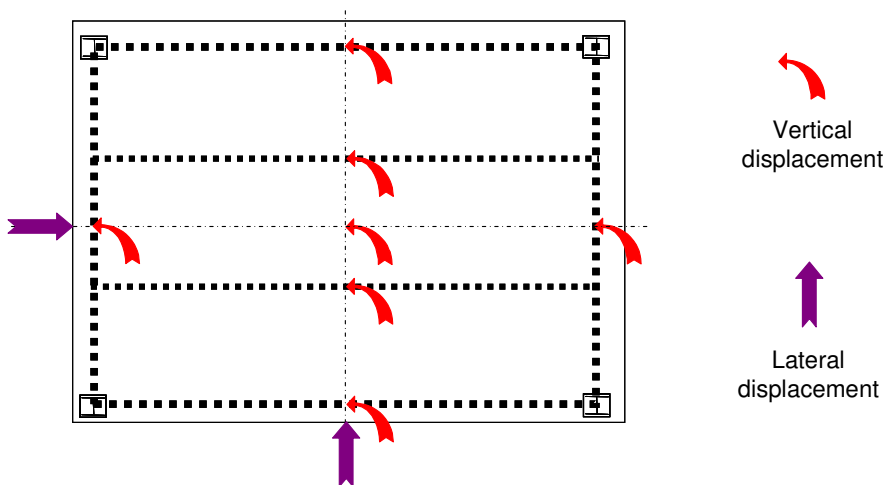
Σχήμα 7.7 Τοποθεσία των θερμοζευγών σε κάθε μετρηθείσα μεταλλική διατομή



Σχήμα 7.8 Τοποθεσίες και πλήθος θερμοζευγών στη σύμμικτη πλάκα



Σχήμα 7.9 Τυπική διατομή σύμμικτης πλάκας όπου εμφανίζονται οι τοποθεσίες των θερμοζευγών



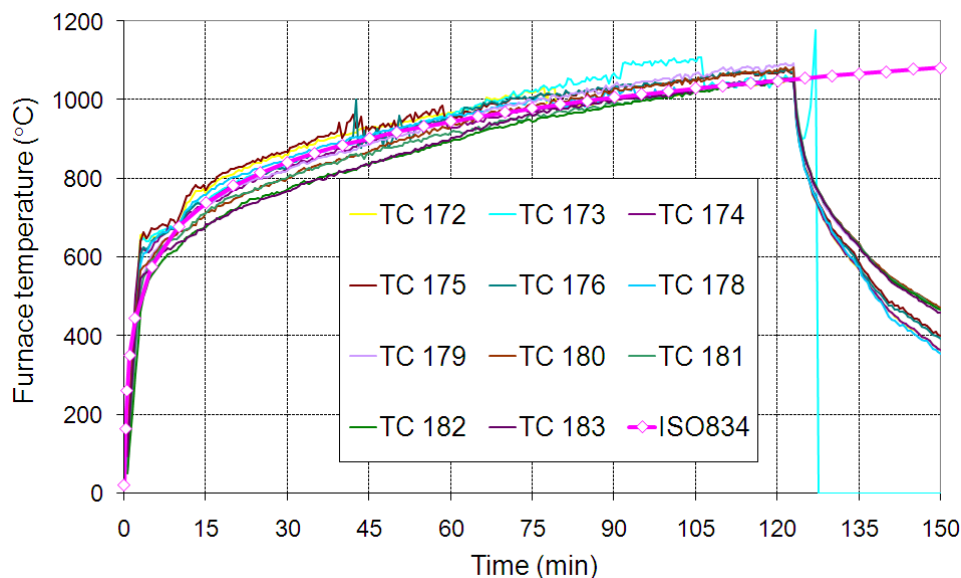
Σχήμα 7.10 Τοποθεσία των μετρητών μετατόπισης

7.2.3 Αποτελέσματα

Το πείραμα είχε διάρκεια μεγαλύτερη των 120 λεπτών και η πυρκαγιά σταμάτησε μετά από την εμφάνιση αστοχίας της δομικής ακεραιότητας της πλάκας. Ωστόσο, η καταγραφή της συμπεριφοράς του δοκιμίου συνεχίστηκε έως τα 900 λεπτά, επιτρέποντας την καταγραφή της συμπεριφοράς της πλάκας κατά τη φάση ψύξης.

7.2.3.1 Μεταβολή θερμοκρασίας στην κατασκευή

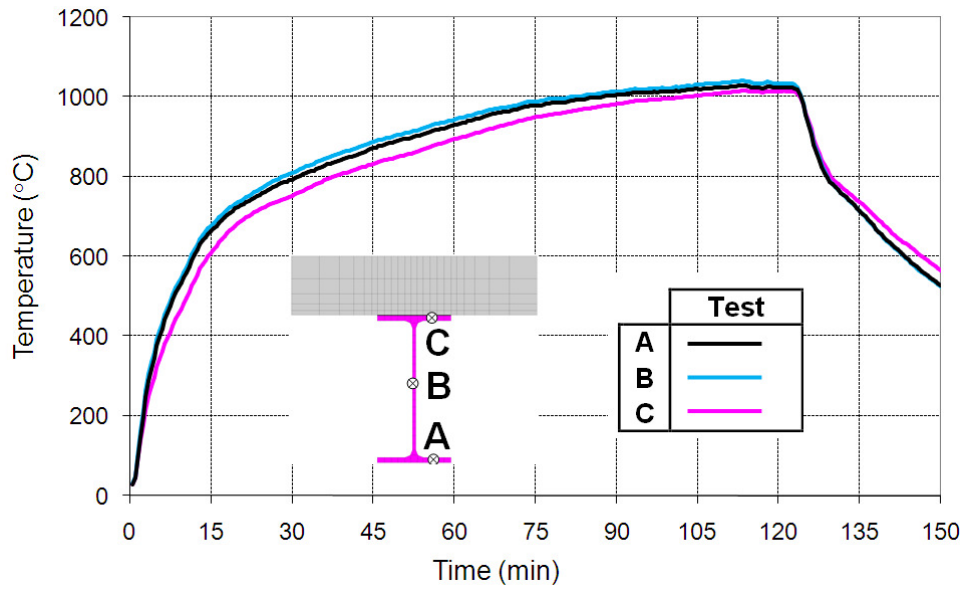
Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η θερμοκρασία του κλιβάνου ελεγχόταν από θερμοζεύγη πλάκας, σύμφωνα με τις προτάσεις του EN1363-1. Αυτά τα θερμοζεύγη της πλάκας τοποθετήθηκαν ακριβώς κάτω από την πλάκα και οι καταγεγραμμένες θερμοκρασίες αυτών των οργάνων μέτρησης κατέδειξαν ότι η θερμοκρασία του κλιβάνου βρισκόταν εντός της επιτρεπόμενης ανοχής όπως ορίζουν τα πρότυπα πυρκαγιάς κατά EN1363-1 (βλ. Σχήμα 7.11).



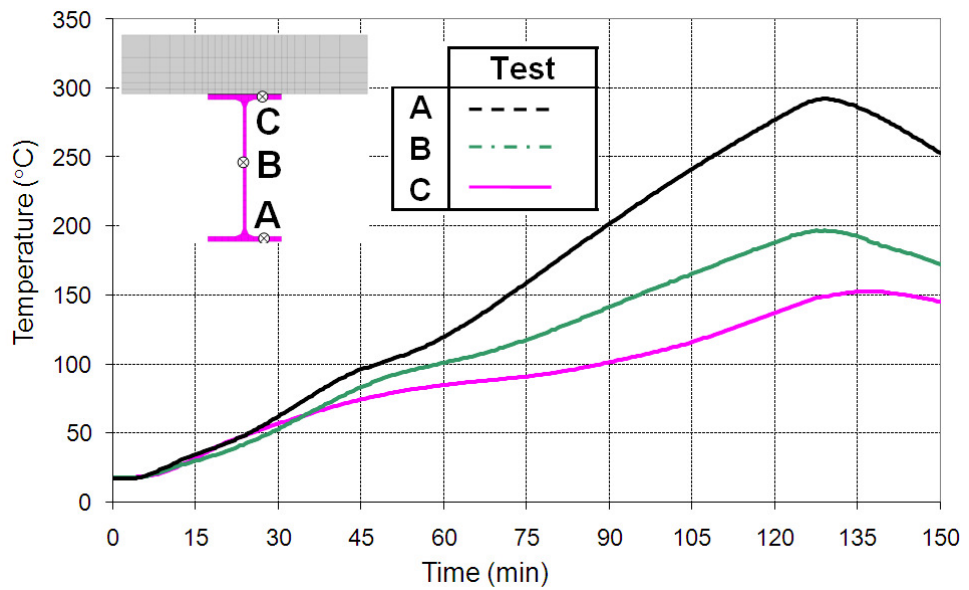
Σχήμα 7.11 Θερμοκρασία κλίβανου και πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στο μέσο του ανοίγματος των σύμμικτων δοκών λήφθηκαν από το κάτω πέλμα, τον κορμό και το άνω πέλμα κάθε διατομής. Μια σύνοψη των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν στις δοκούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.12 και στο Σχήμα 7.13. Οι μη μονωμένες μεταλλικές δοκοί παρουσίασαν μέγιστη θερμοκρασία 1040°C. Αντίθετα, οι μονωμένες μεταλλικές δοκοί παρουσίασαν μέγιστη θερμοκρασία 300°C, δηλαδή χαμηλότερη από αυτή που αναμενόταν στην πραγματικότητα, εξαιτίας της μειωμένης έκθεσης των μελών καθώς βρισκόταν στα όρια του κλιβάνου.

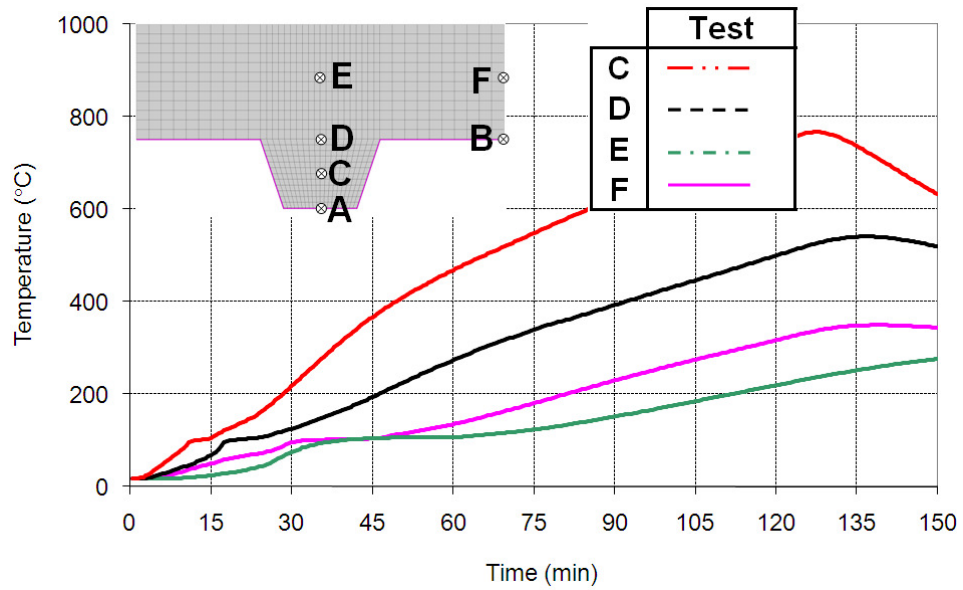
Στο Σχήμα 7.14 παρουσιάζεται μια σύνοψη των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν στη σύμμικτη πλάκα. Οι θερμοκρασίες στα σημεία A και B δεν καταγράφηκαν διότι τα θερμοζεύγη που ήταν στερεωμένα στο μεταλλικό φύλλο αστόχησαν νωρίς κατά τη διάρκεια του πειράματος, πιθανόν εξαιτίας της αποκόλλησης του μεταλλικού φύλλου από το σκυρόδεμα μόλις εκτέθηκε στην πυρκαγιά. Η αποκόλληση του μεταλλικού φύλλου παρατηρήθηκε σε μεγάλο μέρος του εσωρράχιου της σύμμικτης πλάκας. Η θερμοκρασία που καταγράφηκε στην μη εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας φαίνεται στο Σχήμα 7.15. Η άνοδος της θερμοκρασίας στη μη εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας μετά από 120 λεπτά πυρκαγιάς ήταν ελάχιστη πάνω από 100°C, δηλαδή κατώτερη του άνω ορίου των 140°C που ορίζει το κριτήριο μόνωσης.



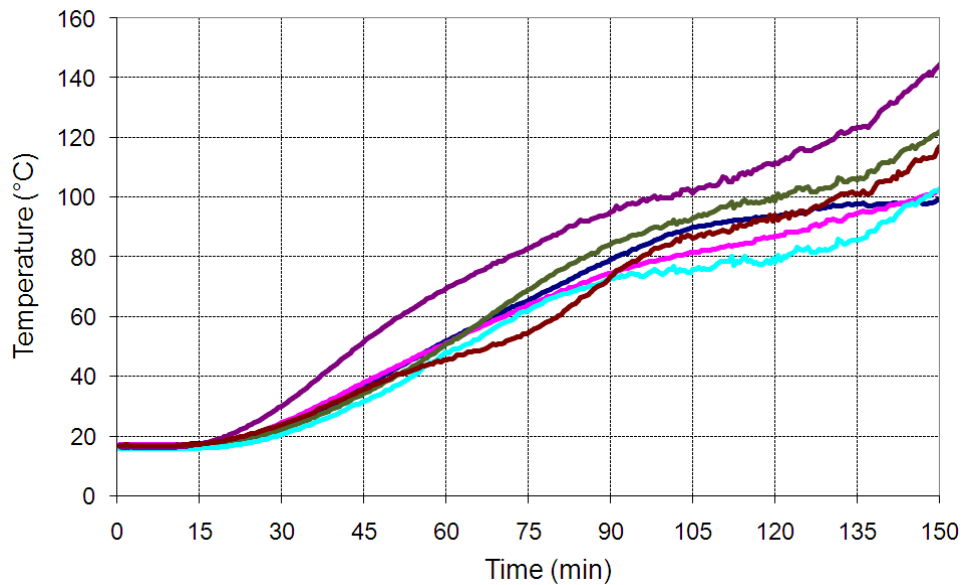
Σχήμα 7.12 Θέρμανση των μη μονωμένων μεταλλικών δοκών



Σχήμα 7.13 Θέρμανση των μονωμένων μεταλλικών δοκών



Σχήμα 7.14 Θέρμανση της σύμμικτης πλάκας



Σχήμα 7.15 Θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στην μη εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας

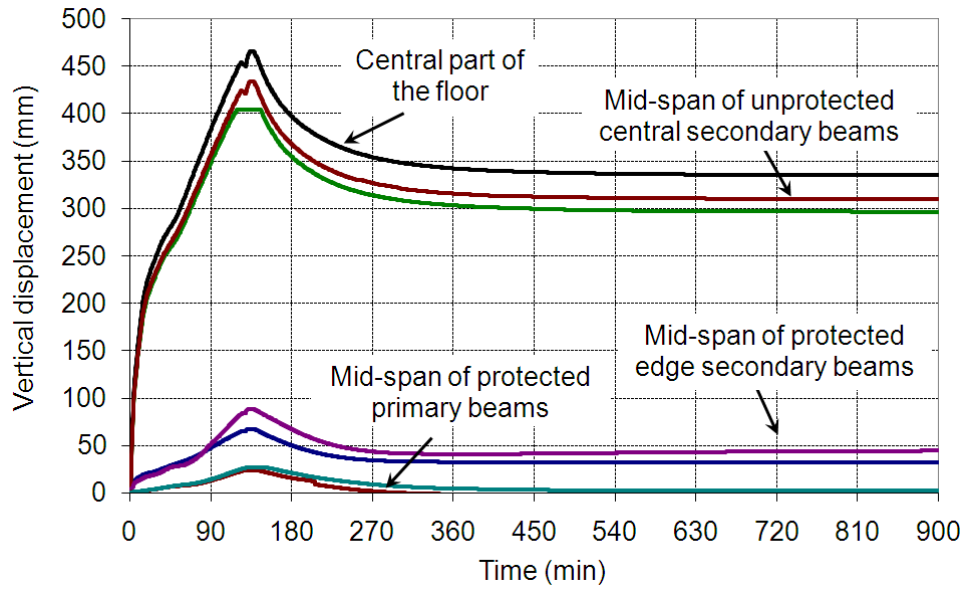
7.2.3.2 Μετακινήσεις των δομικών στοιχείων

Το Σχήμα 7.16 απεικονίζει την κατακόρυφη μετατόπιση της πλάκας σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μείωση της παραμόρφωσης μετά από 120 λεπτά αντιστοιχεί στον χρόνο κατά τον οποίο τα φλόγιστρα του καυστήρα τέθηκαν εκτός λειτουργίας. Το Σχήμα 7.17 απεικονίζει ένα περισσότερο λεπτομερές γράφημα αυτών των μετατοπίσεων, κυρίως κατά τη φάση θέρμανσης του πειράματος. Παρατηρείται ότι η μέγιστη παραμόρφωση της πλάκας ήταν περίπου 450 mm και ότι οι μετρηθείσες παραμορφώσεις στις δύο θέσεις των μη μονωμένων μεταλλικών

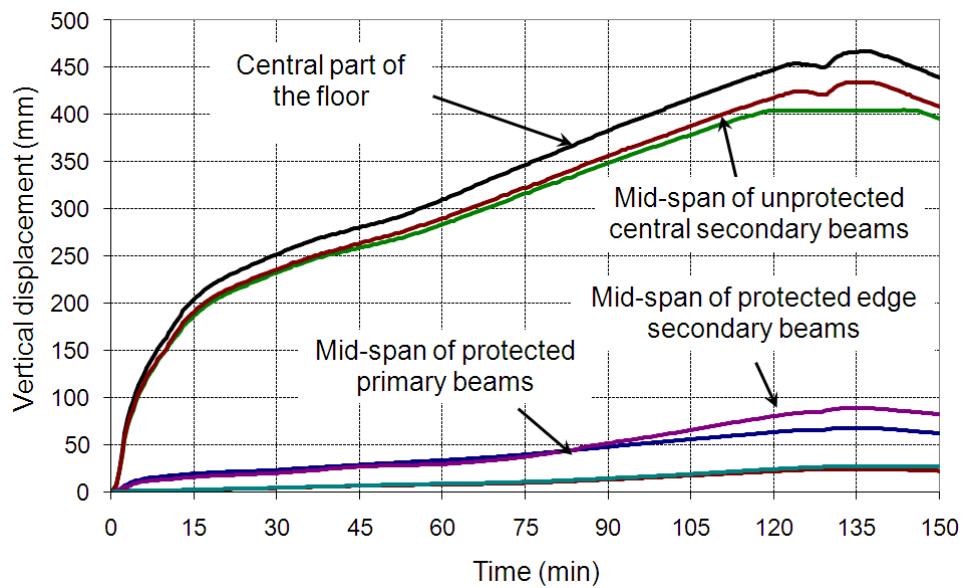
δοκών ήταν κατά προσέγγιση 420 mm, μικρότερες από ένα εικοστό του ανοίγματος. Κατά τη φάση ψύξης, η παραμόρφωση αυξήθηκε ελάχιστα και σημείωσε μέγιστη τιμή περίπου στα 135 λεπτά. Παρόλο που η θερμοκρασία στον κλίβανο σημείωσε πτώση από τους 1050°C μόλις στους 600°C (βλ. Σχήμα), η αγωγή θερμότητα μεταφέρθηκε στο πάχος της σύμμικτης πλάκας και την ίδια χρονική στιγμή σημειώθηκε η μέγιστη θερμοκρασία του πλέγματος ενίσχυσης (βλ. Σχήμα 7.14).

Οι μονωμένες δοκοί που ήταν τοποθετημένες περιμετρικά του δοκιμίου σημείωσαν ανώτερη θερμοκρασία μόλις 300°C. Καθώς το μέταλλο διατηρεί την τάση διαρροής σε ποσοστό 100% σε θερμοκρασία δωματίου 300°C, οι παραμορφώσεις αυτών των δοκών ήταν μικρότερες από τις προβλεπόμενες, με μέγιστη μετρηθείσα παραμόρφωση 100mm στο μέσο του ανοίγματος των δευτερευουσών δοκών. Στην πράξη θα ήταν λογική η υπόθεση ότι η κρίσιμη θερμοκρασία σε αυτές τις δοκούς θα είναι μεταξύ 500°C και 600°C, με παραμόρφωση μεγαλύτερη του ανοίγματος/30.

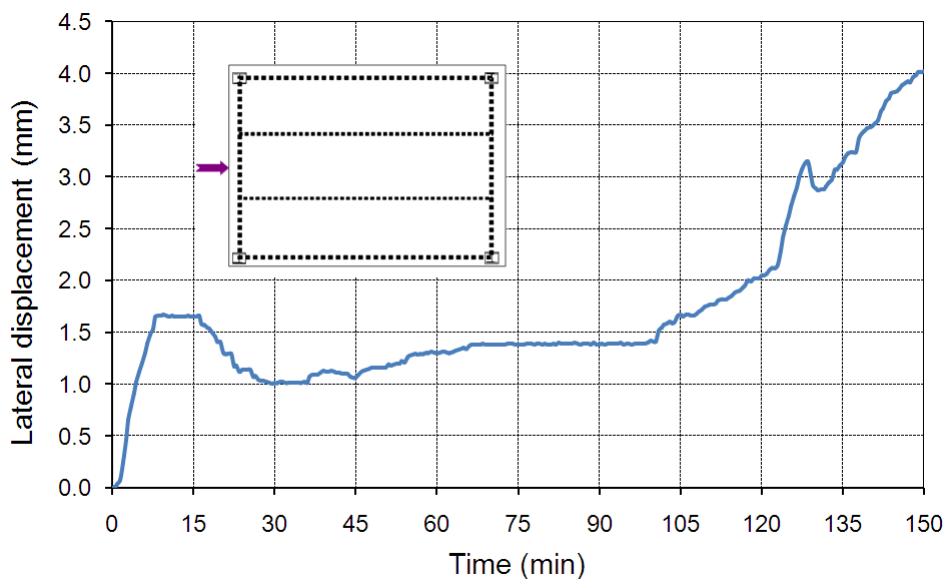
Αν εξεταστεί με μεγαλύτερη προσοχή η παραμόρφωση της πλάκας, είναι δυνατό να διαπιστωθεί ότι η εξέλιξη της παραμόρφωσης ήταν πολύ ταχεία στα πρώτα 20 λεπτά της πυρκαγιάς, ενώ στη συνέχεια αυξήθηκε σχεδόν με σταθερή ταχύτητα. Αν αυτή η παραμόρφωση σχετίζεται με τη θέρμανση των μη μονωμένων δοκών, διαπιστώνεται επίσης ότι οι δοκοί αυτές θερμάνθηκαν σταδιακά μέχρι τους 700 °C. Είναι προφανές ότι η καμπτική φέρουσα ικανότητα σε αυτά τα επίπεδα θέρμανσης δεν επιτρέπει πλέον στις δοκούς να διατηρήσουν από μόνες τους το φορτίο. Συνεπώς, οι επιδράσεις της μεμβράνης σταθεροποίησης ενεργοποιήθηκαν σταδιακά, έτσι ώστε να διατηρηθεί η συνολική ευστάθεια της πλάκας. Η δράση εφελκυσμού της μεμβράνης διαπιστώθηκε επίσης χάρη στις μετρήσεις της πλευρικής μετατόπισης στο άκρο της πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.18. Ακόμα μία φορά, διαπιστώνεται ότι μετά από 15 λεπτά πυρκαγιάς το ακραίο τμήμα της πλάκας μετακινήθηκε προς τα μέσα εξαιτίας της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης. Η απότομη αύξηση αυτής της παραμόρφωσης περίπου στα 105 λεπτά μπορεί να εξηγηθεί από τη σημαντική αστοχία του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης στο κεντρικό τμήμα της πλάκας (για περισσότερες λεπτομέρειες, βλ. παράγραφο 7.4.3).



Σχήμα 7.16 Καταγεγραμμένη παραμόρφωση της πλάκας σε όλη τη διάρκεια του πειράματος



Σχήμα 7.17 Καταγεγραμμένη παραμόρφωση της πλάκας κατά τη θέρμανση στη διάρκεια του πειράματος



Σχήμα 7.18 Πλευρική μετατόπιση στο άκρο της πλάκας που καταγράφηκε κατά τη θέρμανση στη διάρκεια του πειράματος

7.2.3.3 Συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας κατά τη διάρκεια του πειράματος

Βασικές παρατηρήσεις σχετικά με τον σχηματισμό ρωγμών στην πλάκα σκυροδέματος:

- Μικρές ρωγμές σημειώθηκαν στο σκυρόδεμα, ειδικότερα γύρω από τους μεταλλικούς στύλους και τα συνεχόμενα άκρα της πλάκας, σε αρχικά στάδια του πειράματος πυρκαγιάς, όπως φαίνεται στο Σχήμα (α).
- Οι ρωγμές αυτές διευρύνθηκαν κατά τη φάση θέρμανσης στη διάρκεια του πειράματος, χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά η αέρεια συμπεριφορά της πλάκας (βλ. Σχήμα 7.19 (β)).
- Στο κεντρικό τμήμα της πλάκας σχηματίστηκε μεγαλύτερη ρωγή μετά από 105 λεπτά έκθεσης στην πυρκαγιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.20.

Η εξέταση της κεντρικής ρωγμής μετά από το πείραμα έδειξε ότι η ρωγή προκλήθηκε εξαιτίας της αστοχίας της συγκολλητής σύνδεσης μεταξύ δύο μεταλλικών πλεγμάτων ενίσχυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.21. Καθώς η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού θεωρεί ότι το μεταλλικό πλέγμα μπορεί να φορτιστεί μέχρι το οριακό του φορτίο αστοχίας κατά μήκος του κέντρου της πλάκας, όλες οι συνδέσεις μεταξύ των φύλλων πλέγματος ενίσχυσης θα πρέπει να είναι επαρκώς αγκυρωμένες. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι δυνατό να αποφευχθεί, εφόσον υιοθετούνται οι λεπτομέρειες της κατασκευής κατά EN 1992-1-1⁽³⁶⁾.

Εφόσον το δοκίμιο δεν έφτασε σε σημείο κατάρρευσης κατά τη διάρκεια του πειράματος, η δημιουργία της μεγάλης αυτής ρωγμής και η αστοχία του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης στη διαμήκη πλευρά στο κεντρικό τμήμα της πλάκας δεν επηρέασε τη φέρουσα ικανότητα της πλάκας.



(a) Στην αρχή του πειράματος

(b) Στο τέλος του πειράματος

Σχήμα 7.19 Η κατάσταση της πλάκας γύρω από τον μεταλλικό στύλο



(a) Η ρωγμή στο κεντρικό τμήμα της πλάκας

(b) Η ρωγμή μετά από την ψύξη

Σχήμα 7.20 Κατάσταση της πλάκας στο κεντρικό τμήμα κατά τη διάρκεια του πειράματος και μετά από το πείραμα



(a) Συγκολλημένη σύνδεση οπλισμού πριν από τη (b) Η σύνδεση οπλισμού στην τοποθεσία της σκυροδέτηση ρωγμής μετά από την ψύξη

Σχήμα 7.21 Η σύνδεση των μεταλλικών πλεγμάτων ενίσχυσης πριν και μετά από το πείραμα

7.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του πειράματος

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι η σύμμικτη πλάκα συμπεριφέρεται επαρκώς στην πυρκαγιά, σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού. Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν σχετικά με τη συμπεριφορά της πλάκας απέναντι στην πυρκαγιά είναι οι εξής:

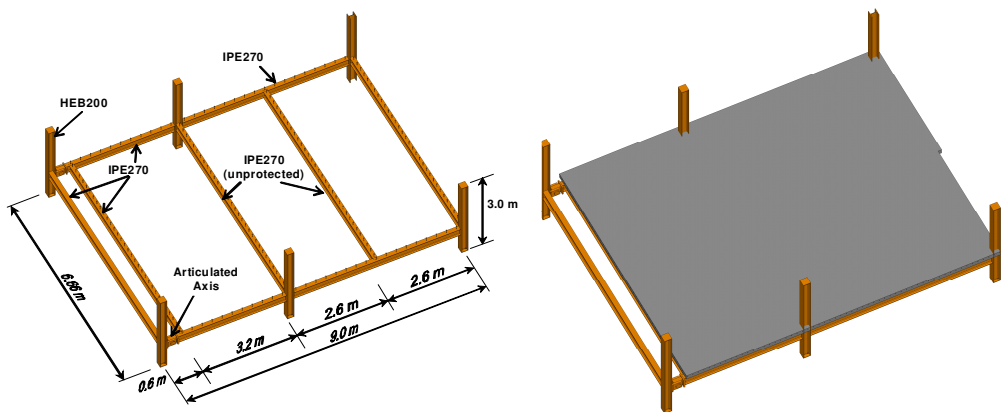
- ακόμα και με μη μονωμένες δευτερεύουσες μεταλλικές δοκούς με άνοιγμα 8,735 m, το κριτήριο φέρουσας ικανότητας (R) εκπληρώνεται για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 120 λεπτών,
- το κριτήριο ακεραιότητας (E) και τα κριτήρια μόνωσης (I) εκπληρώνονται για χρονικό διάστημα 105 λεπτών. Η αστοχία προκλήθηκε εξαιτίας του σχηματισμού ρωγμής κατά μήκος της σύμμικτης πλάκας μετά από την πρώιμη αστοχία του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης, βλ. Κεφάλαιο 7.2.3.3.
- η πλάκα στο σύνολό της διατήρησε τη δομική ανθεκτικότητά της σε πυρκαγιά μεγάλης διάρκειας, παρά την αστοχία του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης στη σύμμικτη πλάκα,
- πρέπει να διασφαλίζεται ότι το πλέγμα ενίσχυσης διαθέτει κατάλληλη αλληλεπικάλυψη ώστε να ενεργοποιείται η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης και ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή μεταφορά φορτίου, ειδικότερα στην περιοχή των μη μονωμένων δοκών και γύρω από τους στύλους
- ο σχηματισμός ρωγμών στο άκρο της πλάκας ήταν πολύ περιορισμένος και δεν επηρέασε καθόλου την ακεραιότητα και τη μόνωση της πλάκας,
- η συμπεριφορά της πλάκας ήταν ικανοποιητική κατά τη φάση ψύξης της πυρκαγιάς.
- όλες οι μεταλλικές συνδέσεις ήταν κατάλληλα μονωμένες και η μέγιστη θερμοκρασία τους περιορίστηκε περίπου στους 500°C. Όλες οι συνδέσεις μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων επέδειξαν θετική συμπεριφορά τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά την ψύξη.

7.3 Πρόγραμμα πειράματος πυρκαγιάς COSSFIRE

7.3.1 Δοκίμιο του πειράματος

Στο πλαίσιο του έργου COSSFIRE, πραγματοποιήθηκε ένα ακόμα πείραμα ειδικής σύμμικτης πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.22. Σε αυτή την πλάκα, οι διατομές των μεταλλικών δοκών και οι μεταλλικοί στύλοι ήταν κατασκευασμένα αντίστοιχα με IPE270 και HEB200. Η ονομαστική ποιότητα όλων των παραπάνω δομικών στοιχείων ήταν S235. Ο σχεδιασμός αυτού του συστήματος πλάκας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN1994-1-1⁽³⁴⁾ σε θερμοκρασία δωματίου με μόνιμο φορτίο 1,25 kN/m², επιπρόσθετα του ίδιου βάρους της κατασκευής, και κινητό φορτίο 5 kN/m². Το πείραμα πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε με φορτίο 3,93 kN/m², το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο 100% των διάφορων μόνιμων δράσεων και στο 50% των μεταβλητών δράσεων, σύμφωνα με τον συνδυασμό φορτίων του Ευρωκώδικα σε συνθήκες πυρκαγιάς σε κτίρια γραφείων. Όσον αφορά τις μεταλλικές συνδέσεις, αυτές σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN1993-1-8⁽³⁵⁾.

Η σύμμικτη πλάκα κατασκευάστηκε από επί τόπου κανονικού βάρους σκυρόδεμα με ποιότητα σκυροδέματος C30/37. Το συνολικό ύψος της πλάκας ήταν 135 mm και το προφίλ του μεταλλικού υποστρώματος ήταν COFRAPLUS60 (τραπεζοειδές). Όσον αφορά τους συνδέσμους διάτμησης, όλοι ήταν ήλοι διάτμησης διαμέτρου 19 mm και ύψους 125 mm και η κατανομή τους στις μεταλλικές δοκούς ήταν ένας ήλος διάτμησης ανά 207 mm για τις δευτερεύουσες δοκούς και ένας ήλος διάτμησης ανά 300 mm για τις κύριες δοκούς. Το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης τοποθετήθηκε σε απόσταση 35 mm από την άνω επιφάνεια της πλάκας και ήταν ποιότητας S500 με διάμετρο 7 mm. Το μέγεθος του πλέγματος ήταν 150 mm x 150 mm.



a- Όψη πάνω από το μεταλλικό πλαίσιο

b- Όψη πάνω από τη σύμμικτη πλάκα

Σχήμα 7.22 Διάταξη του πειράματος πυρκαγιάς

Οι πραγματικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα συνοψίζονται παρακάτω στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2 Ιδιότητες υλικών για τα στοιχεία του πειράματος COSSFIRE

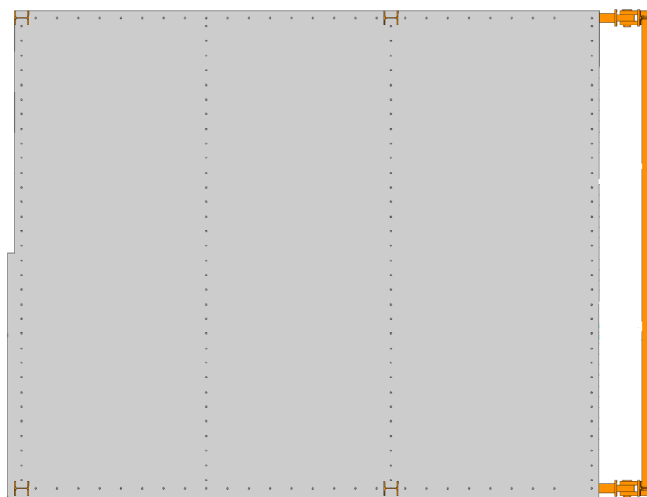
Στοιχείο	Τιμή
Ποιότητα χάλυβα κύριων δοκών	320 MPa
Ποιότητα χάλυβα δευτερευουσών δοκών	320 MPa

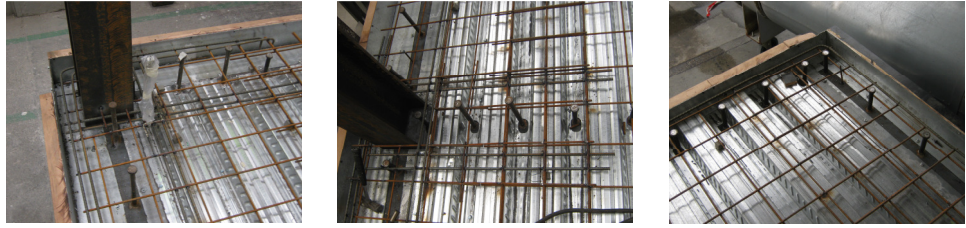
Ποιότητα χάλυβα πλέγματος ενίσχυσης	590 MPa
Αντοχή θλίψης σκυροδέματος	38.0 MPa

Σύμφωνα με την ισχύουσα απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού αυτού του τύπου πλάκας υπό την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης, οι δύο ενδιάμεσες δευτερεύουσες δοκοί και η σύμμικτη πλάκα είναι μη μονωμένες. Ωστόσο, όλες οι οριακές δοκοί της πλάκας είναι μονωμένες για πυρκαγιά διάρκειας 120 λεπτών. Ομοίως, οι μεταλλικοί στύλοι είναι μονωμένοι, εκτός από τη μόνωση γύρω από τις συνδέσεις, η οποία ελαττώθηκε εσκεμμένα, ώστε να θερμανθούν αρκετά οι συνδέσεις για να μελετηθεί η συμπεριφορά τους κατά τη φάση ψύξης.

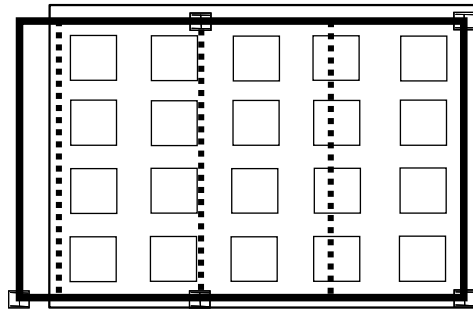
Για την εξέταση της συμπεριφοράς των συνδέσεων μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και των μεταλλικών στοιχείων στα ακραία τμήματα της σύμμικτης πλάκας, υιοθετήθηκαν έξι διατάξεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.23.

Το μηχανικό φορτίο κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς ασκήθηκε με τη χρήση είκοσι σάκων άμμου, ομοιόμορφα κατανεμημένων πάνω στην πλάκα. Κάθε σάκος άμμου έφερε φορτίο ακριβώς 11 kN, δημιουργώντας μαζί με την ξύλινη παλέτα και τους κυβόλιθους από ελαφρύ σκυρόδεμα ένα ισοδύναμο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 3,93 kN/m². Όσον αφορά το θερμικό φορτίο, τηρήθηκε η πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO μέχρι τη χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησε η κατάρρευση της πλάκας. Ωστόσο, η καταγραφή των αποτελεσμάτων του πειράματος συνεχίστηκε κατά τη φάση ψύξης, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της πλάκας σε όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς.





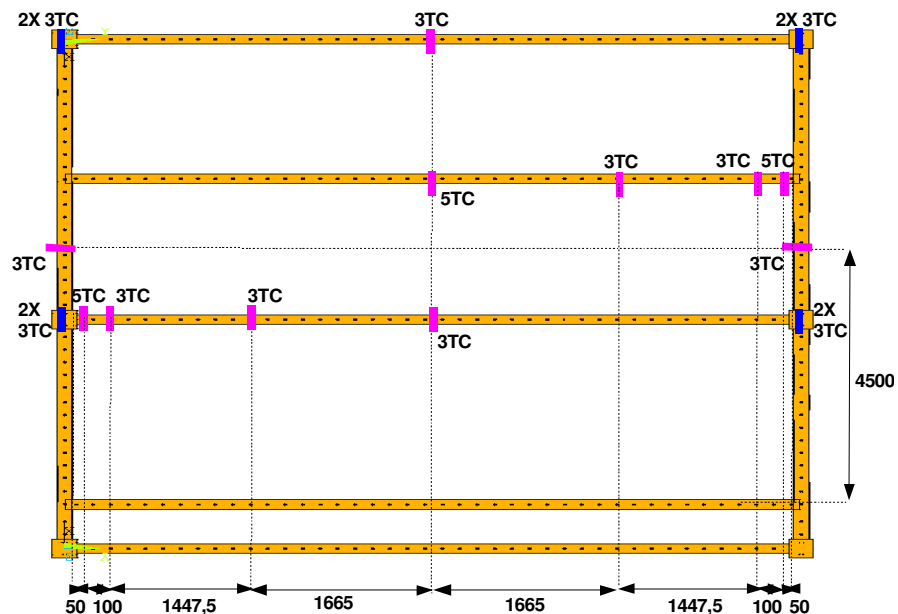
Σχήμα 7.23 Διάφορες διατάξεις σύμμικτων συνδέσεων χάλυβα-σκυροδέματος



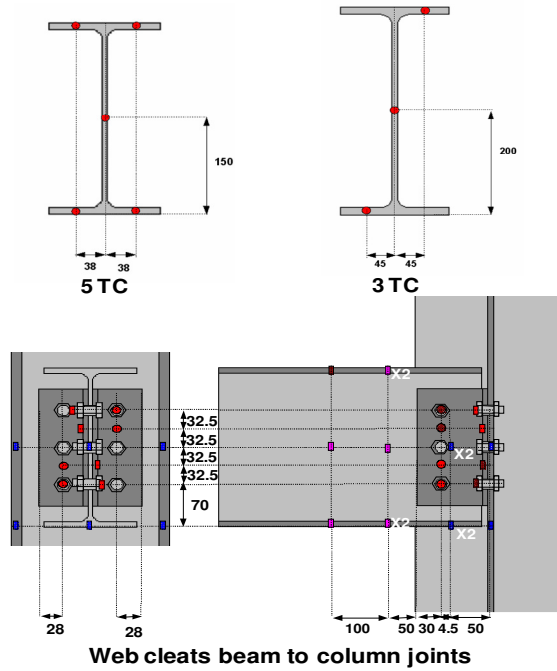
Σχήμα 7.24 Συνθήκες φορτίου σύμμικτης πλάκας χάλυβα-σκυροδέματος εκτεθειμένης σε πυρκαγιά

7.3.2 Μετρήσεις των αποτελεσμάτων του πειράματος

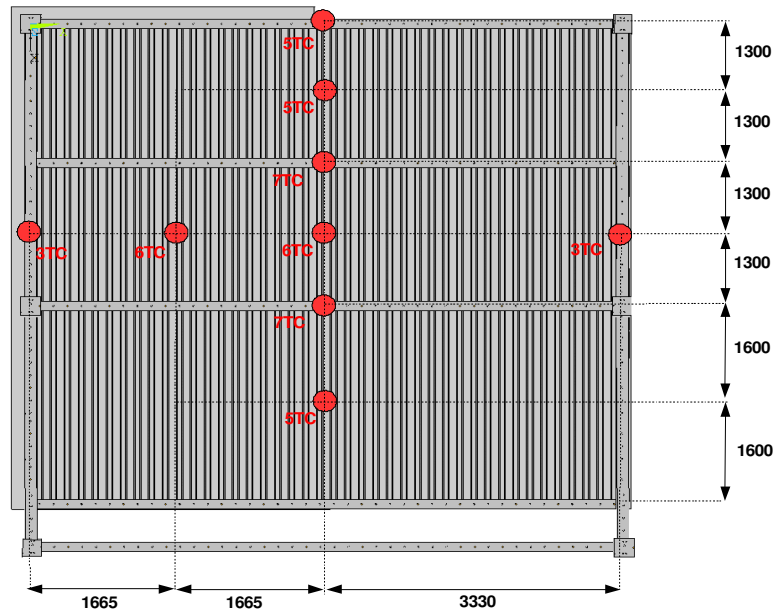
Οι βασικές μετρήσεις του πειράματος σχετίζονται με τη θερμοκρασία και την παραμόρφωση της πλάκας. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 203 θερμοζεύγη, εκ των οποίων 66 θερμοζεύγη στα μεταλλικά στοιχεία (Σχήμα 7.25), 80 θερμοζεύγη στις συνδέσεις (Σχήμα 7.26) και 57 θερμοζεύγη στη σύμμικτη πλάκα (βλ. Σχήματα 7.27 & 7.28) για την καταγραφή της θερμοκρασίας του αερίου και των δοκιμίων. Επιπλέον, 20 μετρητές μετατόπισης εγκαταστάθηκαν, εκ των οποίων οι 16 για να μετρηθεί η παραμόρφωση της πλάκας (Σχήμα 7.29). Οι υπόλοιποι τέσσερις μετρητές χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί η οριζόντια μετακίνηση της πλάκας. Επιπλέον, μια ειδική βιντεοκάμερα τοποθετήθηκε εντός του κλιβάνου για την οπτική καταγραφή των παραμορφώσεων της πλάκας στην πάροδο του χρόνου.



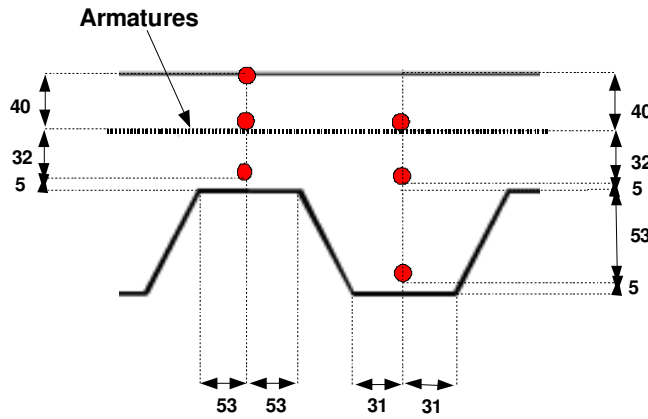
Σχήμα 7.25 Θέσεις των θερμοζευγών στο μεταλλικό πλαίσιο



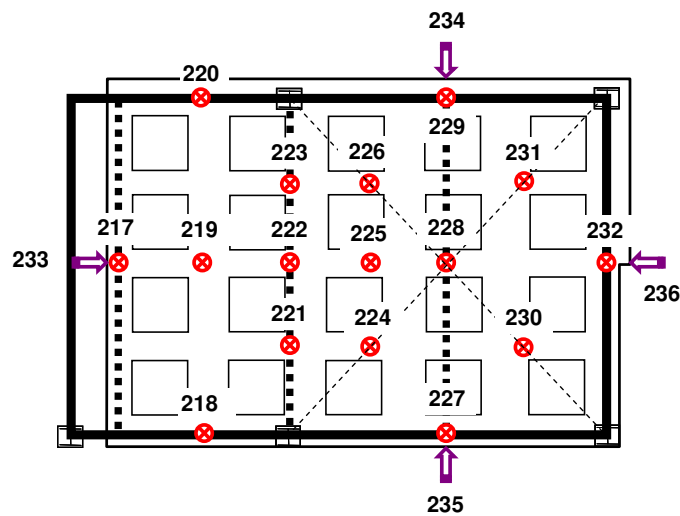
Σχήμα 7.26 Θέσεις των θερμοζευγών σε κάθε μετρηθείσα μεταλλική διατομή



Σχήμα 7.27 Θέσεις και πλήθος θερμοζευγών στη σύμμικτη πλάκα



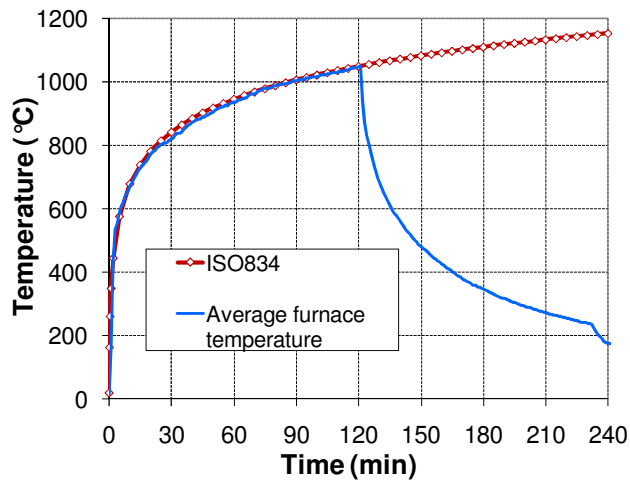
Σχήμα 7.28 Τυπική διατομή σύμμικτης πλάκας όπου εμφανίζονται οι τοποθεσίες των θερμοζευγών



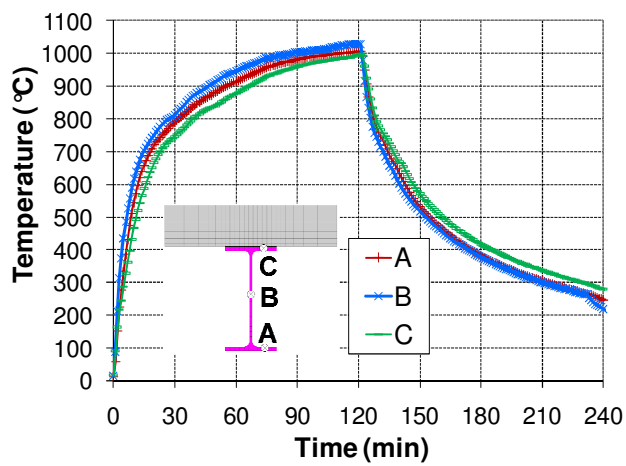
Σχήμα 7.29 Θέσεις των μετρητών μετατόπισης

7.3.3 Τα βασικά αποτελέσματα του πειράματος

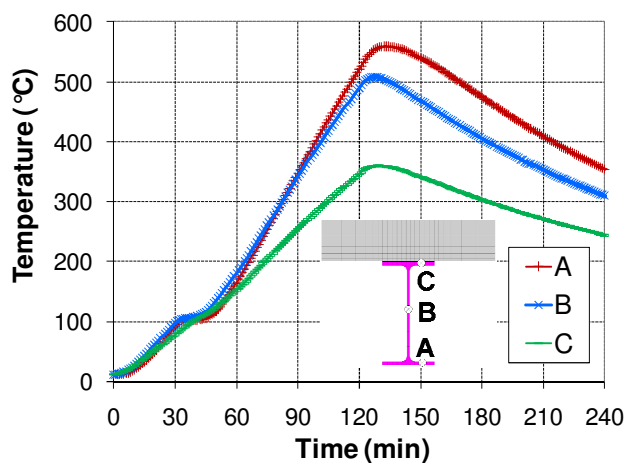
Κατά τη φάση θέρμανσης του πειράματος, τηρήθηκε η πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO-834 (Σχήμα 7.30) η οποία διήρκησε για περισσότερο από 120 λεπτά, μέχρι την εμφανή κατάρρευση μιας ακραίας δευτερεύουσας δοκού που ήταν συνδεδεμένη με τις κύριες δοκούς (βλ. D6 στο Σχήμα 7.36). Στη συνέχεια, όλα τα φλόγιστρα τέθηκαν εκτός λειτουργίας και ο κλίβανος ψυχράθηκε φυσικά. Όσον αφορά τη θέρμανση των μεταλλικών δοκών, αυτή ήταν ανάλογη με την εκάστοτε μόνωση. Στην πράξη, οι μη μονωμένες μεταλλικές δοκοί που ήταν τοποθετημένες στο μέσο της πλάκας ξεπέρασαν 1000 °C (Σχήμα 7.31). Αντίθετα, οι μονωμένες μεταλλικές δοκοί άγγιξαν τους 550 °C (Σχήμα 7.32), εκτός από μία από τις ακραίες μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς, η οποία ανέπτυξε σημαντικά μεγαλύτερη θερμοκρασία από τις άλλες μονωμένες δοκούς, προφανώς εξαιτίας της αναποτελεσματικής μόνωσης που είχε τοποθετηθεί (Σχήμα 7.33).



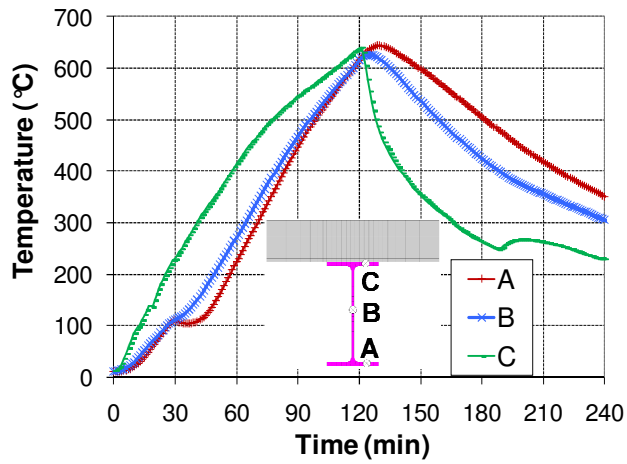
Σχήμα 7.30 Θερμοκρασία κλιβάνου και πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO



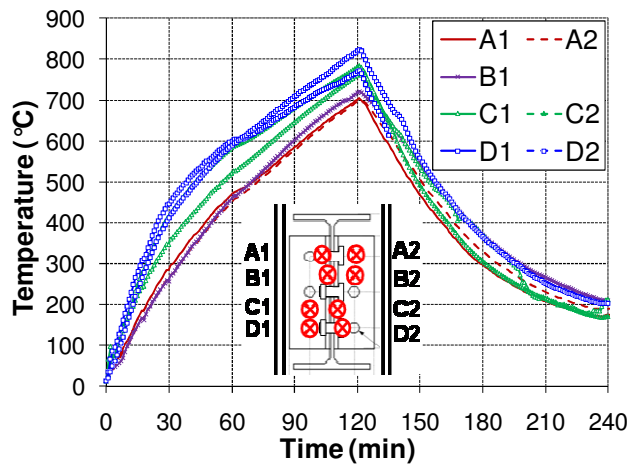
Σχήμα 7.31 Θέρμανση των μη μονωμένων δευτερευουσών δοκών



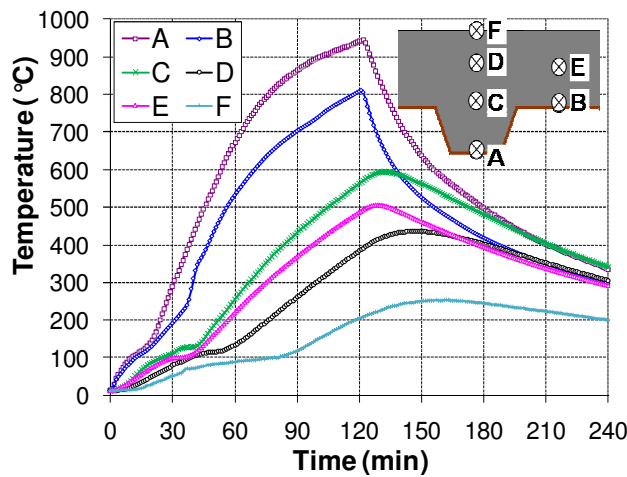
Σχήμα 7.32 Θέρμανση μίας μονωμένης κύριας δοκού



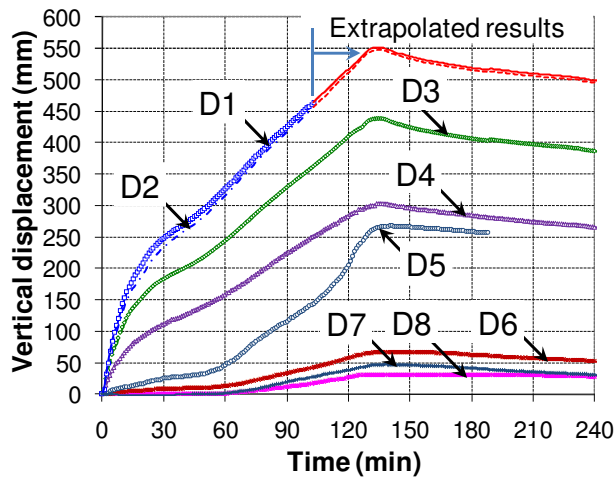
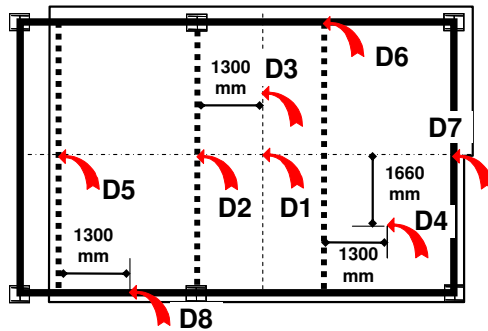
Σχήμα 7.33 Θέρμανση της ακραίας δοκού που κατέρρευσε



Σχήμα 7.34 Θέρμανση της ακραίας δοκού που κατέρρευσε



Σχήμα 7.35 Θέρμανση της ακραίας δοκού που κατέρρευσε



Σχήμα 7.36 Μετρηθείσες κατακόρυφες μετατοπίσεις της πλάκας κατά τη διάρκεια του πειράματος

Καθώς οι μεταλλικές συνδέσεις δεν ήταν πλήρως μονωμένες, ορισμένοι κοχλίες των συνδέσεων θερμάνθηκαν σε θερμοκρασία ανώτερη των 800 °C (Σχήμα 7.34). Από τη μέτρηση της θερμοκρασίας στη σύμμικτη πλάκα κατά τη διάρκεια του πειράματος, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία σε απόσταση 5 mm από την εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας ήταν περίπου 950 °C (Σχήμα 7.35) και ότι το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης ανέπτυξε θερμοκρασία περίπου 500 °C. Επιπλέον, η μετρηθείσα θερμοκρασία στη μη εκτεθειμένη πλευρά της σύμμικτης πλάκας υπερέβη τους 200 °C μετά από χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 120 λεπτών έκθεσης στην πυρκαγιά, δηλαδή κάτω από το όριο των κριτηρίων μόνωσης.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η πυρκαγιά κατασβέστηκε όταν παρατηρήθηκε ότι μία ακραία δοκός κατέρρευσε περίπου σε χρονικό διάστημα 120 λεπτών (βλ. D6 στο Σχήμα 7.36). Όσον αφορά τη συνολική παραμόρφωση της πλάκας, αυτή αυξήθηκε σημαντικά στο αρχικό χρονικό διάστημα των 30 λεπτών πυρκαγιάς και άρχισε να μειώνεται στη συνέχεια. Σε διάστημα 120 λεπτών πρότυπης πυρκαγιάς ISO, η συνολική παραμόρφωση της πλάκας θα μπορούσε να υπερβαίνει τα 500 mm. Όταν η θέρμανση σταμάτησε, η παραμόρφωση της πλάκας συνέχισε να αυξάνεται για σύντομο χρονικό διάστημα (περίπου 15 λεπτά), πριν τελικά να μειωθεί σταδιακά. Στο τέλος, η αποκατάσταση της βύθισης της πλάκας ήταν περίπου 100 mm.

7.3.4 Παρατηρήσεις των πειραμάτων

Η μετρηθείσα συνολική βύθιση της πλάκας έδειξε ότι είναι πολύ πιθανό η βύθιση να σημειώνει αύξηση μεγαλύτερη των 500 mm μετά από 120 λεπτά πυρκαγιάς. Ωστόσο, η συμπεριφορά της πλάκας ήταν πολύ θετική και δεν υπήρξε ένδειξη αστοχίας στο κεντρικό τμήμα της πλάκας. Στην πραγματικότητα, η πυρκαγιά

κατασβέστηκε, λόγω υπερβολικής παραμόρφωσης της δευτερεύουσας ακραίας δοκού που θερμάνθηκε περισσότερο (Σχήμα 7.37). Μία προσεκτικότερη παρατήρηση αυτής της ακραίας δοκού αποκάλυψε ότι στο μέσο του ανοίγματος της πλάκας σημειώθηκε σημαντική σύνθλιψη του σκυροδέματος, που σημαίνει ότι αυτή η δοκός πραγματικά είχε αρχίσει να καταρρέει. Παρόλ' αυτά, η αστοχία αυτή δεν προκάλεσε κατάρρευση στο σύνολο της πλάκας, εξαιτίας της ανακατανομής του φορτίου υπό την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης (βλ. Σχήμα 7.38).

Παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός της μη μονωμένης δευτερεύουσας δοκού που ήταν συνδεδεμένη με τις κεντρικές μεταλλικές δοκούς, κοντά στις συνδέσεις, στο κάτω πέλμα της και στον κορμό της (βλ. Σχήμα 7.39). Ωστόσο, το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτού του πειράματος σε ό,τι αφορά τις μεταλλικές συνδέσεις είναι ότι όλες τους επέδειξαν πολύ θετική συμπεριφορά τόσο κατά τη φάση θέρμανσης όσο και κατά την φάση της ψύξης. Επίσης, δεν παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός στις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς που ήταν συνδεδεμένες με τις κύριες δοκούς, κοντά στις συνδέσεις (Σχήμα 7.40). Ομοίως, δεν παρατηρήθηκε αστοχία των ακραίων συνδέσεων μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και των μεταλλικών στοιχείων.



Σχήμα 7.37 Κατάρρευση της ακραίας δοκού



Σχήμα 7.38 Η πλάκα του πειράματος πριν και μετά από την πυρκαγιά



Σχήμα 7.39 Τοπικός λυγισμός των μη μονωμένων δευτερευουσών δοκών που ήταν συνδεδεμένες σε στύλο



Σχήμα 7.40 Κανένας τοπικός λυγισμός των μη μονωμένων δευτερευουσών δοκών που ήταν συνδεδεμένες στις κύριες δοκούς

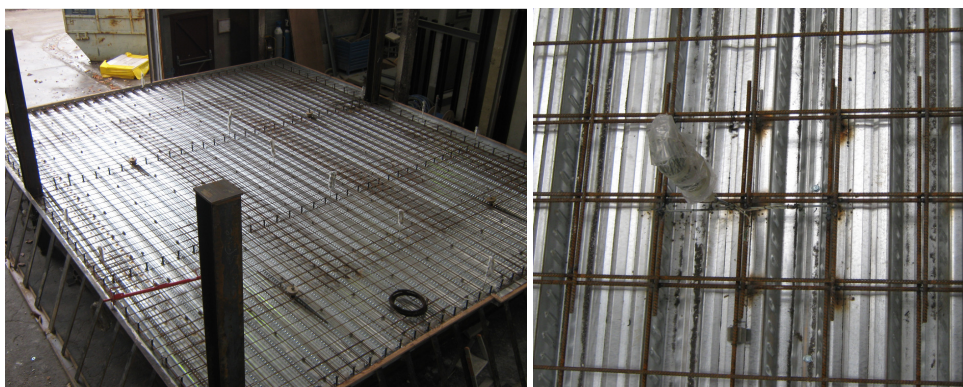


Σχήμα 7.41 Σχηματισμός ρωγμών στα γωνιακά τμήματα της πλάκας



Σχήμα 7.42 Σχηματισμός ρωγμών στο σκυρόδεμα γύρω από τους

μεσαίους στύλους



Σχήμα 7.43 Αλληλεπικάλυψη του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης στη σύμμικτη πλάκα

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό που αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο είναι ο σχηματισμός ρωγμών στη σύμμικτη πλάκα, γύρω από τους στύλους, που είναι πιθανό να επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά της πλάκας απέναντι στην πυρκαγιά. Τα βασικά αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν σχετικά είναι τα εξής:

- Όσον αφορά το σχηματισμό ρωγμών στα γωνιακά τμήματα της πλάκας, αυτές παρέμειναν μικρές και δεν επηρέασαν αρνητικά τα κριτήρια ακεραιότητας (βλ. Σχήμα 7.41).
- Όσον αφορά το σχηματισμό ρωγμών γύρω από τους μεσαίους στύλους, η σημαντική βύθιση της μη μονωμένης δοκού κάτω από τους στύλους προκάλεσε μεγάλη μετακίνηση της πλάκας προς τα μέσα, πιθανόν επηρεάζοντας αρνητικά τα κριτήρια ακεραιότητας εξαιτίας της ανοιχτής ρωγμής μπροστά από τον στύλο (βλ. Σχήμα 7.42).
- Δεν προκλήθηκαν σημαντικές ρωγμές στην πλάκα σκυροδέματος στο κεντρικό τμήμα της πλάκας, καθώς το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης επέδειξε κατάλληλη συμπεριφορά υπό την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης, ακόμα και όταν η θερμοκρασία ανήλθε στους 500 °C. Αυτή η πολύ θετική συμπεριφορά στην πυρκαγιά οφείλεται δίχως άλλο στην κατάλληλη αλληλεπικάλυψη των μεταλλικών πλεγμάτων ενίσχυσης (βλ. Σχήμα 7.43).
- Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες σύμφωνα με τις οποίες το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης τοποθετείται πίσω από τους ήλους των ακραίων δοκών αποδεικνύονται εξαιρετικά αποτελεσματικές στην περίπτωση της δράσης της μεμβράνης σταθεροποίησης στη σύμμικτη πλάκα, με αποτέλεσμα να παρέχονται ωφέλιμες πλευρικές δεσμεύσεις στην πλάκα.
- Η εναπομένουσα φέρουσα ικανότητα της πλάκας παραμένει επαρκής και είναι αρκετή παρά τη σημαντική βύθιση της πλάκας.

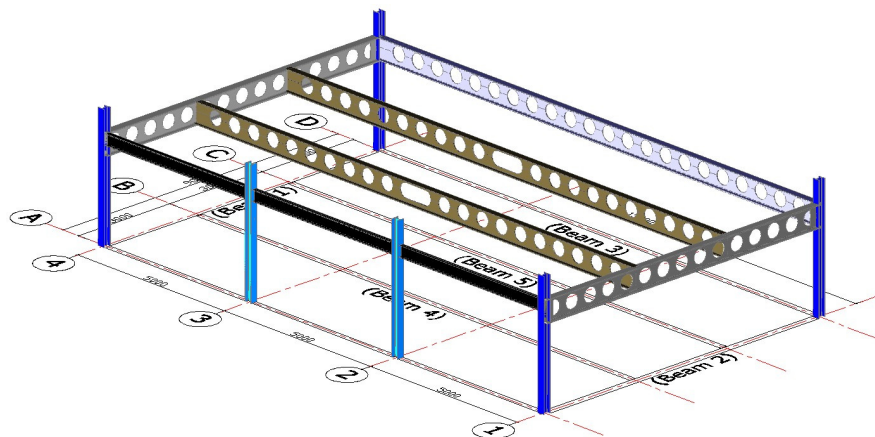
7.4 Πείραμα πραγματικής κλίμακας σε σύμμικτη πλάκα με κυψελωτές δοκούς μεγάλου ανοίγματος

7.4.1 Πειραματικό δοκίμιο

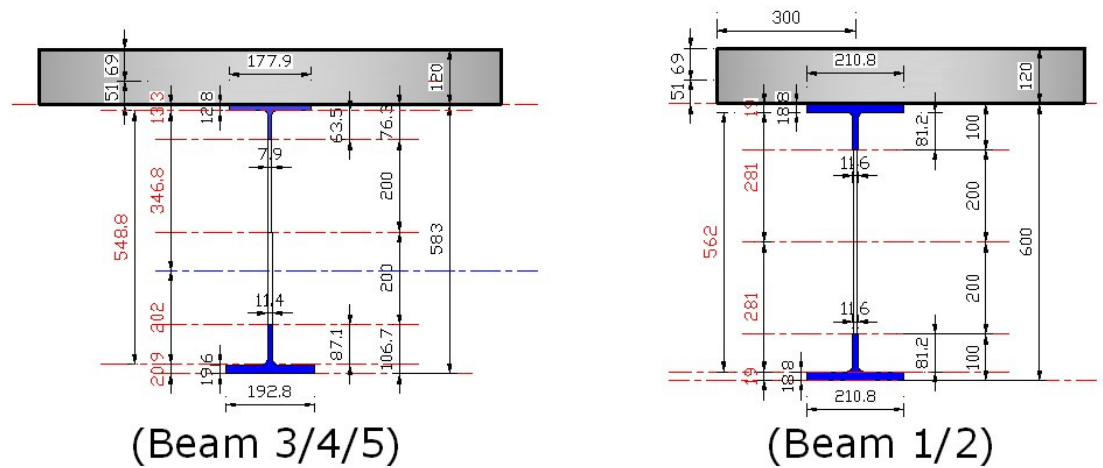
Η πλάκα έδρασης του πειράματος είχε διαστάσεις 9,6m επί 15,6m και ήταν στηριζόμενη σε μεταλλικό πλαίσιο με άνοιγμα 9m επί 15m, ανάμεσα σε τέσσερις γωνιακούς στύλους (Σχήμα 7.44). Οι κυψελωτές δοκοί ήταν τοποθετημένες στις κεντροβαρικές γραμμές 1, 4, B, C και D ως κύριες και δευτερεύουσες δοκοί της κατασκευής (Σχήμα 7.45). Οι διαστάσεις των δοκών φαίνονται στο Σχήμα 7.45 και στο Σχήμα 7.46. Οι μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκοί 4 και 5 διέθεταν επίσης επίμηκες άνοιγμα κορμού στο κέντρο του ανοίγματός τους.



Σχήμα 7.44 : Διαμέρισμα του πειράματος με μη μονωμένες κυψελωτές δοκούς μεγάλου ανοίγματος



Σχήμα 7.45 : Διάταξη



Σχήμα 7.46 : Λεπτομέρειες των μεταλλικών διατομών.

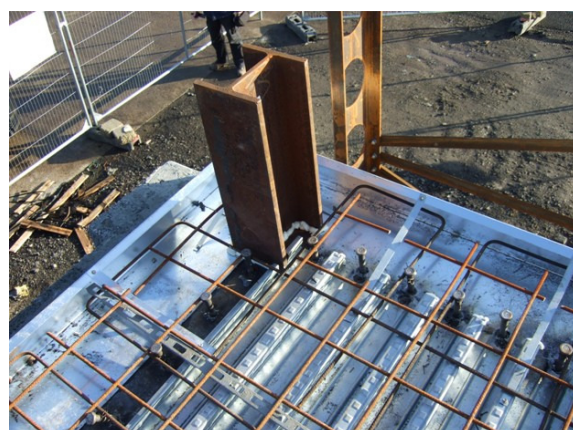
Το περικλείον διαμέρισμα είχε διαστάσεις 9,2m επί 15,6m, με εσωτερικό ύψος από το δάπεδο έως το εσφωράχιο 2,88m. Οι περιμετρικοί τοίχοι κατασκευάστηκαν από στρώσεις λίθων $7N/mm^2$, με τρία ανοίγματα διαστάσεων 1,5m επί 3m το καθένα. Οι περιμετρικοί τοίχοι του διαμερίσματος κατά μήκος των κεντροβαρικών γραμμών 1, 4 και D δεν ήταν πακτωμένοι στη σύμμικτη πλάκα στη κορυφή, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται ελεύθερα η κατακόρυφη μετακίνηση της πλάκας κατά μήκος αυτών των ορίων. Η εμπρόσθια πρόσοψη, μαζί με τα ανοίγματα, κατασκευάστηκε έτσι ώστε ο τοίχος να εκτείνεται έως την κάτω πλευρά της συμπαγούς δοκού κατά μήκος της κεντροβαρικής γραμμής A, εμποδίζοντας την κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού κατά μήκος αυτής της κεντροβαρικής γραμμής. Το πλαίσιο αντιστηριζόταν πλευρικά στις παρακάτω θέσεις. Ο στύλος A1 ήταν πλευρικός αντιστηριζόμενος και στις δύο διευθύνσεις, ο στύλος A4 ήταν πλευρικός αντιστηριζόμενος παράλληλα προς την κεντροβαρική γραμμή 4 και ο στύλος D1 ήταν πλευρικός αντιστηριζόμενος παράλληλα προς την κεντροβαρική γραμμή D. Την πλευρική αντιστήριξη παρείχε ένα διαγώνιο CHS.

Όλοι οι στύλοι και η συμπαγής δοκός κατά μήκος της κεντροβαρικής γραμμής A ήταν μονωμένοι με τη διαθέσιμη στο εμπόριο πυράντοχη σανίδα πάχους 20mm, με πρότυπη πυραντίσταση 2 ωρών. Οι περιμετρικές δοκοί στις κεντροβαρικές γραμμές 1, 4, και D ήταν μονωμένες με κεραμική ίνα (βλ. Σχήμα 7.47), επίσης με πρότυπη πυραντίσταση 2 ωρών. Η πυροπροστασία τοποθετήθηκε από εγκεκριμένο ανάδοχο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Χρησιμοποιήθηκε επίσης γυψοσανίδα πάχους 15mm για την κάλυψη της εσωτερικής πλευράς των περιμετρικών τοίχων, ώστε να μειώνεται η απώλεια θερμότητας μέσω του τοίχου. (Σχήμα 7.47).



Σχήμα 7.47 : Ινοπροστασία και προστασία γυψοσανίδας εντός του διαμερίσματος

Η σύμμικτη πλάκα σκυροδέματος είχε πάχος 120mm και αποτελούταν από μεταλλικό υπόστρωμα Holorib (HR51/150) ύψους 51mm και πάχους 1mm, κανονικό σκυρόδεμα και μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης. Το μεταλλικό υπόστρωμα διέθετε μετρηθείσα εφελκυστική αντοχή 327N/mm^2 . Το συγκολλημένο πλέγμα ενίσχυσης A393 (Σχήμα 7.48) αποτελούταν από ράβδους με νευρώσεις διαμέτρου 10mm σε απόσταση 200mm από κέντρο σε κέντρο, με ονομαστικό όριο διαρροής 500N/mm^2 , το οποίο προσδιορίστηκε με βάση τη Μέθοδο Bailey [3], σύμφωνα με την παραμετρική καμπύλη σχεδιασμού πυρκαγιάς. Το πλέγμα ενίσχυσης διέθετε μήκος αλληλοεπικάλυψης 400mm και ήταν καλυμμένο με σκυρόδεμα πάχους 40mm. Το μίγμα σχεδιασμού του σκυροδέματος (ανά 1m^3) αποτελούταν από: 320kg OPC, 918kg 10mm ασβεστόλιθο, 691kg άμμο διοξειδίου πυριτίου, 380kg 6mm ασβεστόλιθο, 30kg οικιακά (ανακυκλωμένα) λύματα και 142kg ψυχρό (πόσιμο) νερό. Στο μίγμα σκυροδέματος δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα ή άλλο αερακτικό υλικό. Η μετρηθείσα μέση θλιπτική κυβική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 50N/mm^2 την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος.



Σχήμα 7.48 : Το πλέγμα ενίσχυσης και το μεταλλικό υπόστρωμα πριν από τη σκυροδέτηση

Η πλήρης αλληλεπίδραση μεταξύ της πλάκας και των δοκών επετεύχθη με τη χρήση συνδέσμων διάτμησης, διαμέτρου 19mm και ύψους 95mm, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε απόσταση 200mm από κέντρο σε κέντρο κατά μήκος των δοκών. Η απαίτηση ενίσχυσης με ράβδους σχήματος U γύρω από την περίμετρο της πλάκας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.48) δεν αποτελεί ειδική απαίτηση για τη

σχεδίαση της πυρασφάλειας, αλλά ήταν απαραίτητη στο πείραμα ώστε να διασφαλιστεί η κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση σε θερμοκρασία δωματίου. Οι ράβδοι σχήματος U με διάμετρο 10mm τοποθετήθηκαν με επικάλυψη 30mm στο άκρο της πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.48.

7.4.2 Φορτία σχεδιασμού

Το φορτίο σχεδιασμού βασίστηκε στο χαρακτηριστικό κινητό φορτίο $3,5\text{kN/m}^2$ σε συνδυασμό με το φορτίο διαχωριστικών $1,0\text{kN/m}^2$ και το φορτίο λειτουργίας (μηχανολογικό φορτίο) $0,5\text{kN/m}^2$. Οι μερικοί συντελεστές φορτίου που χρησιμοποιούνται στην Οριακή Κατάσταση Πυρκαγιάς (FLS) αντιστοιχούν στις τιμές που ορίζονται στο EN1990 για κτίρια γραφείων. Το φορτίο σχεδιασμού που προέκυψε ήταν $3,25\text{kN/m}^2$, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3 : Φορτία σχεδιασμού

Περιγραφή	Χαρακτηριστικό φορτίο (kN/m^2)	Συντελεστής φορτίου σε Ο.Κ.Π.	Φορτία σχεδιασμού σε Ο.Κ.Π. (kN/m^2)
Διαχωριστικό	1.0	1.0	1.0
Λειτουργία	0.5	1.0	0.5
Κινητό φορτίο	3.5	0.5	1.75
Σύνολο			3.25

Το φορτίο που ασκήθηκε επιτεύχθηκε με τη χρήση 44 σάκων άμμου (βάρους 1 τόνου ο κάθε ένας), ομοιόμορφα τοποθετημένων πάνω στην πλάκα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.49α, παρέχοντας φορτίο $3,25\text{kN/m}^2$. Το ίδιο βάρος της πλάκας, πάχους 120mm, υπολογίστηκε στα $2,90\text{kN/m}^2$, με αποτέλεσμα το συνολικό φορτίο να είναι $6,15\text{kN/m}^2$.



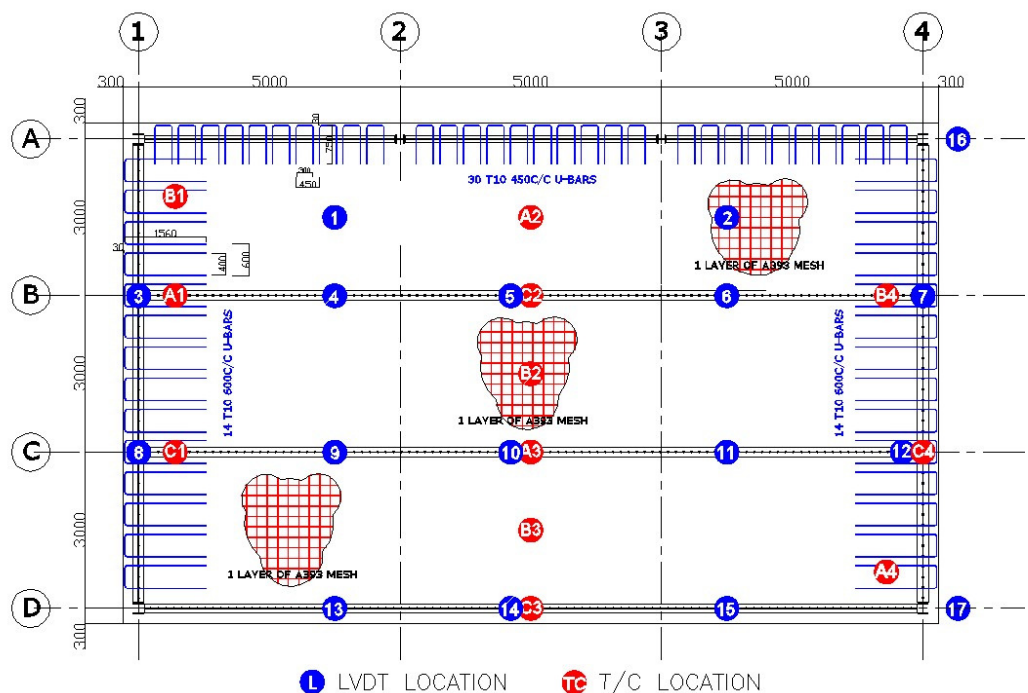
Σχήμα 7.49 : (α)Κατακόρυφο στατικό φορτίο (β)Ξύλινα σανίδια ως πυροθερμικό φορτίο

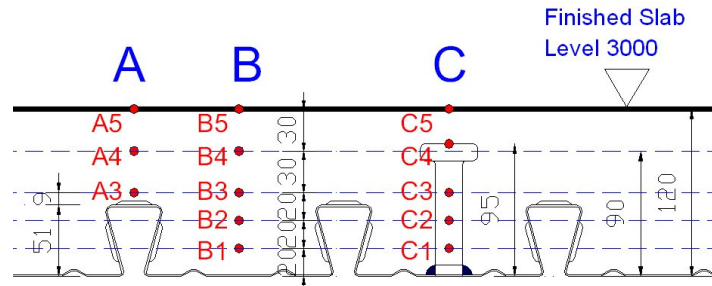
7.4.3 Σχεδιασμός της πυρκαγιάς

Η φυσική πυρκαγιά σχεδιάστηκε με βάση τις παραμετρικές καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου του Παραρτήματος Α του EN1991-1-2 και του λογισμικού OZone. Το πυροθερμικό φορτίο αποτελούταν από 45 πρότυπα (διαστάσεων 1m x 1m x 0,5m ύψος) ξύλινα σανίδια, που κατασκευάστηκαν από ξύλινα δοκάρια διαστάσεων 50mm x 50mm x 1000mm, τα οποία τοποθετήθηκαν ομοιόμορφα σε όλο το διαμέρισμα (Σχήμα 7.49β). Το πυροθερμικό φορτίο ήταν ισοδύναμο με 40kg ξύλου ανά τετραγωνικό μέτρο. Για υποθετική τιμή θερμοαντικειμενικού ισχύος του ξύλου 17.5MJ/kg, η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου στο διαμέρισμα του πειράματος είναι 700MJ/m². Το πυροθερμικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σχετικά υψηλότερο από το πυροθερμικό φορτίο σχεδιασμού γραφείου 511MJ/m² (80% πολλαπλασιασμού), όπως ορίζεται στο EN1991-1-2. Κάθε ξύλινο σανίδι ήταν συνδεδεμένο με το γειτονικό του με ελαφριά μεταλλική διατομή U (channel section) μαλακού χάλυβα με πορώδη ινóπλακα. Σε χρονικό διάστημα περίπου 30 λεπτά πριν από την ανάφλεξη, διαχύθηκαν στα κανάλια 20 λίτρα παραφίνη, ώστε να διασφαλιστεί η ταχεία ανάπτυξη της πυρκαγιάς εντός του διαμερίσματος.

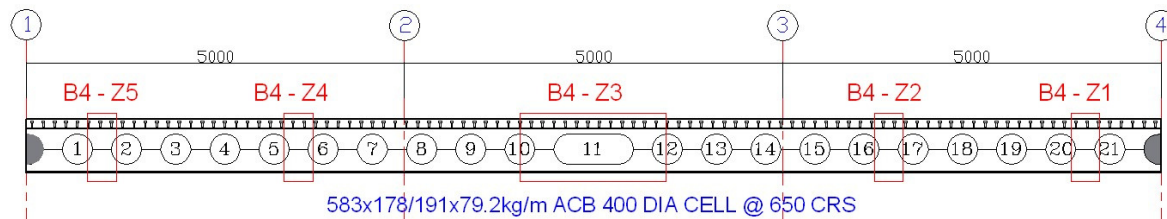
7.4.4 Εγκατάσταση οργάνων μέτρησης

Ένας μεγάλος αριθμός συσκευών μέτρησης τοποθετήθηκαν σε όλο το διαμέρισμα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της κατανομής της θερμοκρασίας στη σύμμικτη πλάκα, της θερμοκρασίας των μονωμένων και μη μονωμένων κυψελωτών δοκών, και την κατακόρυφη και οριζόντια μετατόπιση. Οι τοποθεσίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 7.50 και στο Σχήμα 7.51. Μία ελεύθερη μεταλλική κατασκευή χτίστηκε γύρω από το διαμέρισμα ώστε να δημιουργηθεί ένα εξωτερικό πλαίσιο αναφοράς για να πραγματοποιηθούν σωστά οι μετρήσεις της κατακόρυφης και οριζόντιας μετατόπισης. 350 θερμοζεύγη χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των διαφόρων θερμοκρασιών και 17 μετρητές μετακινήσεων για την καταγραφή των διαφόρων μετακινήσεων. Οι μετρητές συγκολλήθηκαν στο ελεύθερο εξωτερικό πλαίσιο αναφοράς και μονώθηκαν, όπου ήταν απαραίτητο, ώστε να διασφαλιστεί ότι περιορίζονται οι επιδράσεις της θερμότητας.

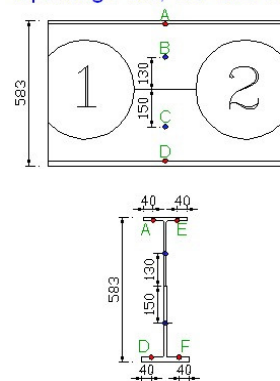




Σχήμα 7.50 : Θέσεις μέτρησης της μετατόπισης και της θερμοκρασίας σε όλη την πλάκα.

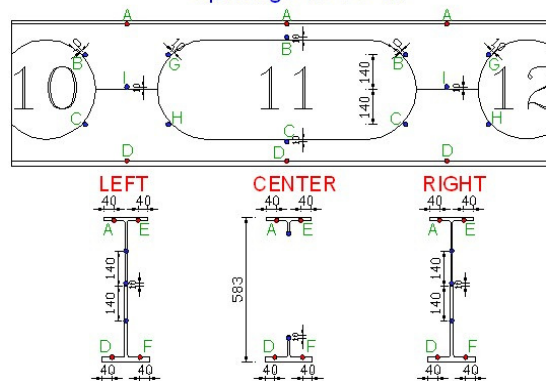


Openings 1/2, 5/6 and 16/17



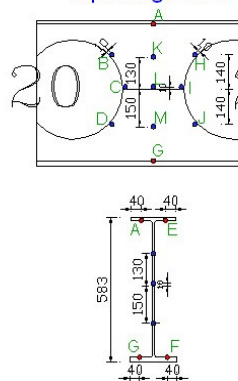
(B4 - Z2, Z4 & Z5) 6x3=18TC

Openings 10 TO 12



(B4 - Z3) 24TC

Opening 20/21



(B4 - Z1) 13TC

Σχήμα 7.51 : Τοποθεσίες των θερμοζευγών στη μη μονωμένη δοκό 4 (κεντροβαρική γραμμή B)

7.4.5 Μετατόπιση δοκού / πλάκας

Σε συνθήκες πυρκαγιάς, η μετατόπιση των μη μονωμένων, μη δεσμευμένων αξονικά, σύμμικτων μεταλλικών δοκών (Σχήμα 7.52) αποτελείται κατά κύριο λόγο από δύο τμήματα, τη θερμική καμπύλωση και τη μηχανική παραμόρφωση. Η μετατόπιση εξαιτίας της θερμικής καμπύλωσης προκαλείται από τη μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε όλη τη μεταλλική δοκό και τη συνδεδεμένη σε αυτή σύμμικτη πλάκα. Η μηχανική παραμόρφωση οφείλεται στη μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής του δομικού υλικού καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Σε χαμηλές θερμοκρασίες (χαμηλότερες των 400°C), η μετατόπιση της δοκού οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θερμική καμπύλωση. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η μηχανική παραμόρφωση κυριαρχεί και η μετατόπιση αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό.



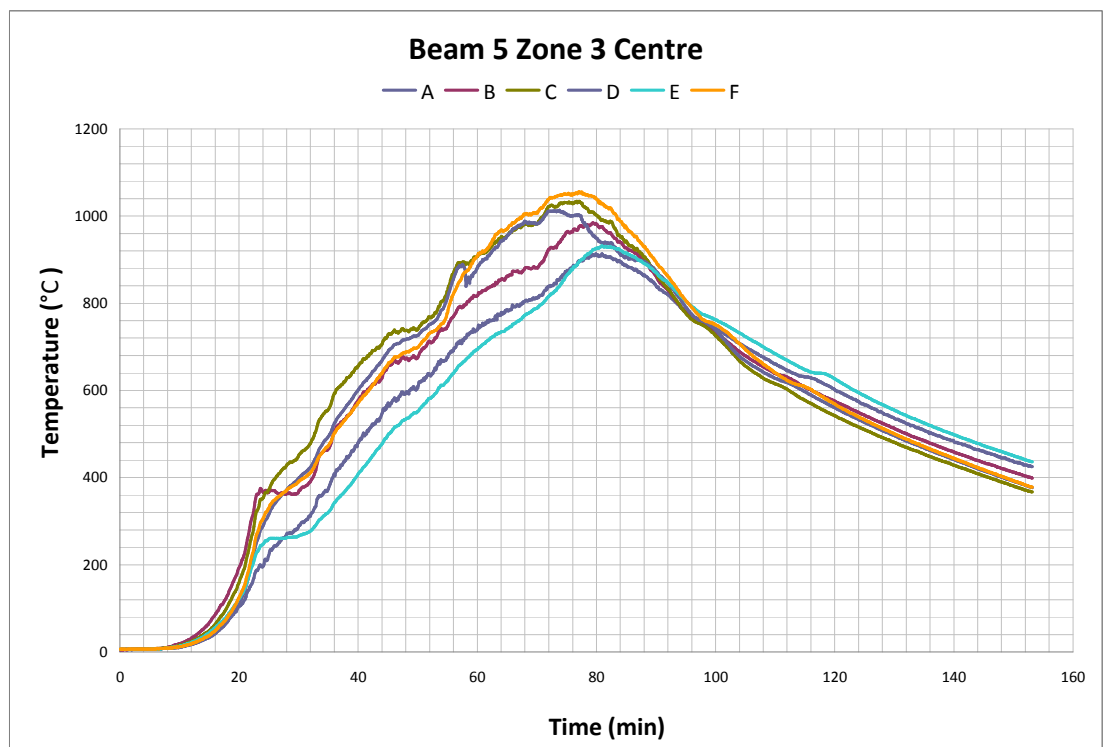
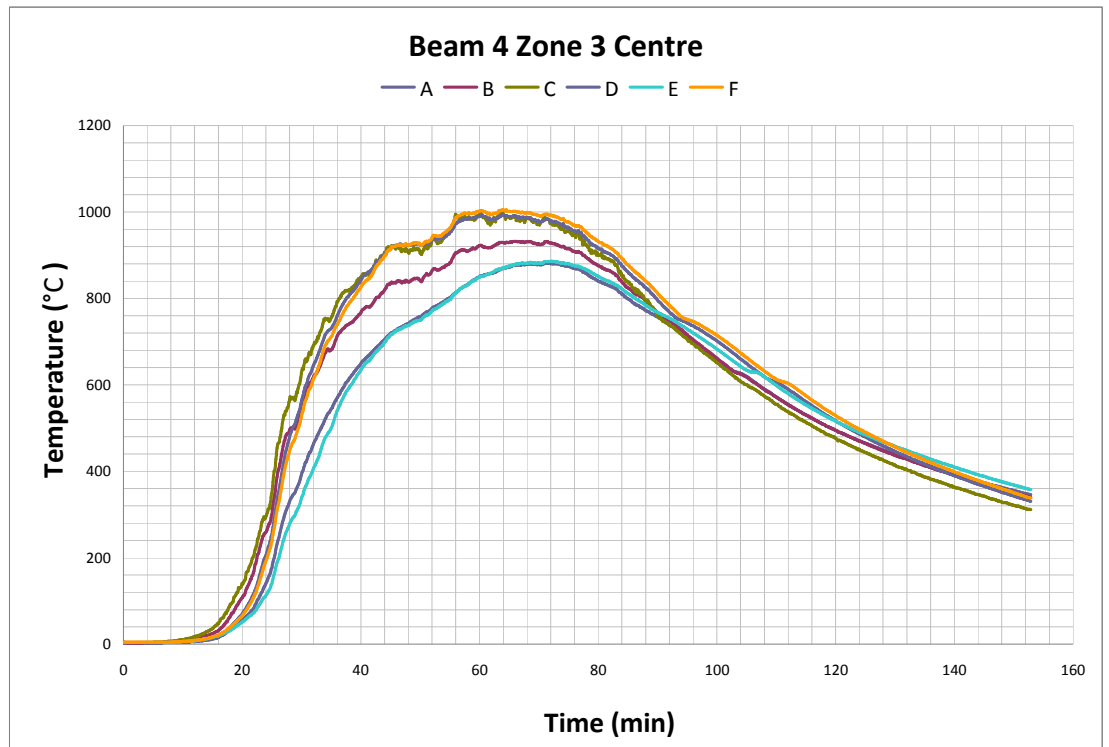
Σχήμα 7.52 : Αναπτυγμένη πυρκαγιά διαμερίσματος



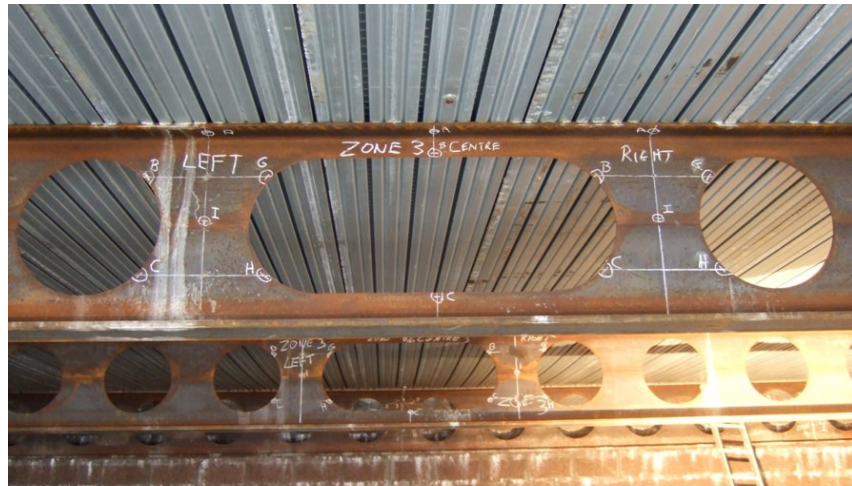
Σχήμα 7.53 : Μετατόπιση της πλάκας και της μη μονωμένης δοκού μετά από την πυρκαγιά.

Η μέγιστη θερμοκρασία μετάλλου που καταγράφηκε ήταν 1053°C και σημειώθηκε μετά από 77 λεπτά στο μεσαίο άνοιγμα των δοκών 4 και 5 (Σχήμα 7.54). Η μέγιστη θερμοκρασία σημειώθηκε στο κάτω πέλμα κάτω από το επίμηκες άνοιγμα. Το Σχήμα 7.55 απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο κρίσιμο τμήμα των μη μονωμένων δοκών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες καθ' ύψος του κορμού, παρόλο που οι δοκοί είναι μη μονωμένες και η πυρκαγιά είχε μεγάλη διάρκεια. Οι θερμοκρασίες στο άνω πέλμα είναι χαμηλότερες, όπως προβλέπεται, εξαιτίας της επίδρασης της ψυχρής πηγής της σύμμικτης πλάκας στήριξης. Στη μέγιστη θερμοκρασία 1053°C το μέταλλο

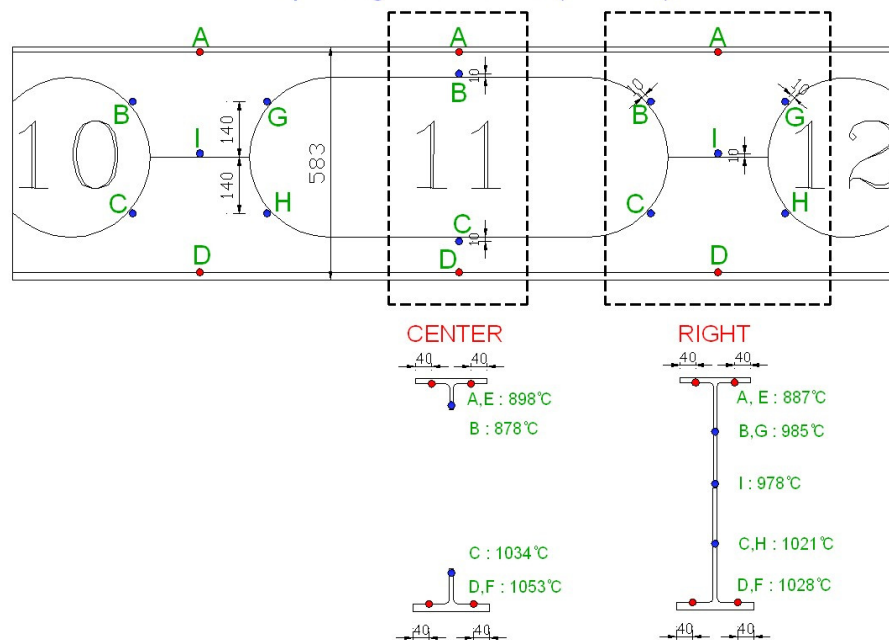
είχε απολέσει το 97% της αντοχής και της δυσκαμψίας του και συνεισφέρει πλέον ελάχιστα στη φέρουσα ικανότητα του συστήματος της πλάκας.



Σχήμα 7.54 : Θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο μέσο του ανοίγματος μη μονωμένων δοκών



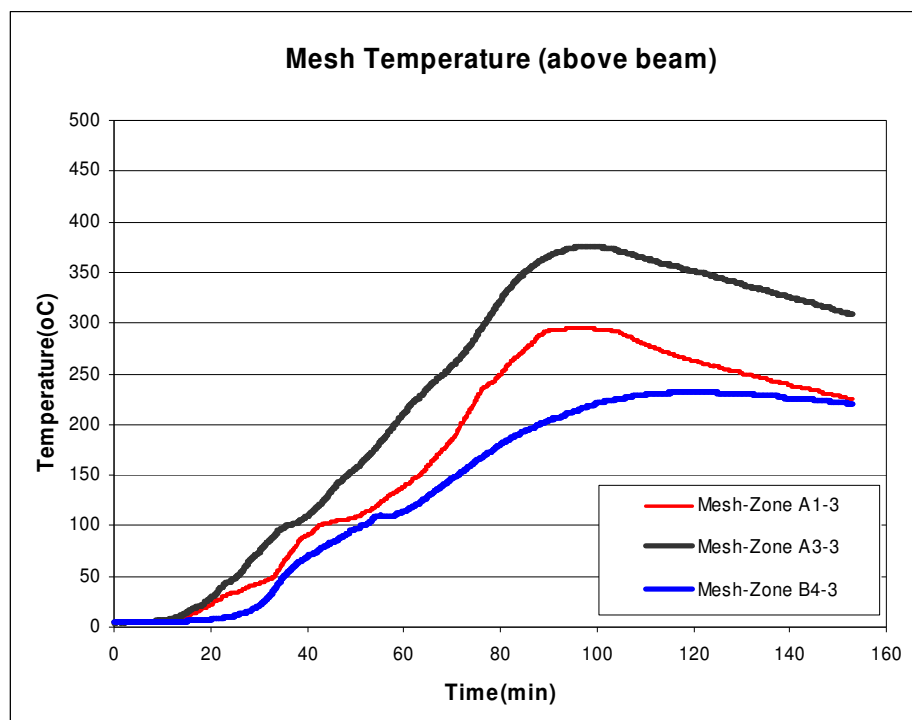
Openings 10 TO 12 (B5 -Z3)



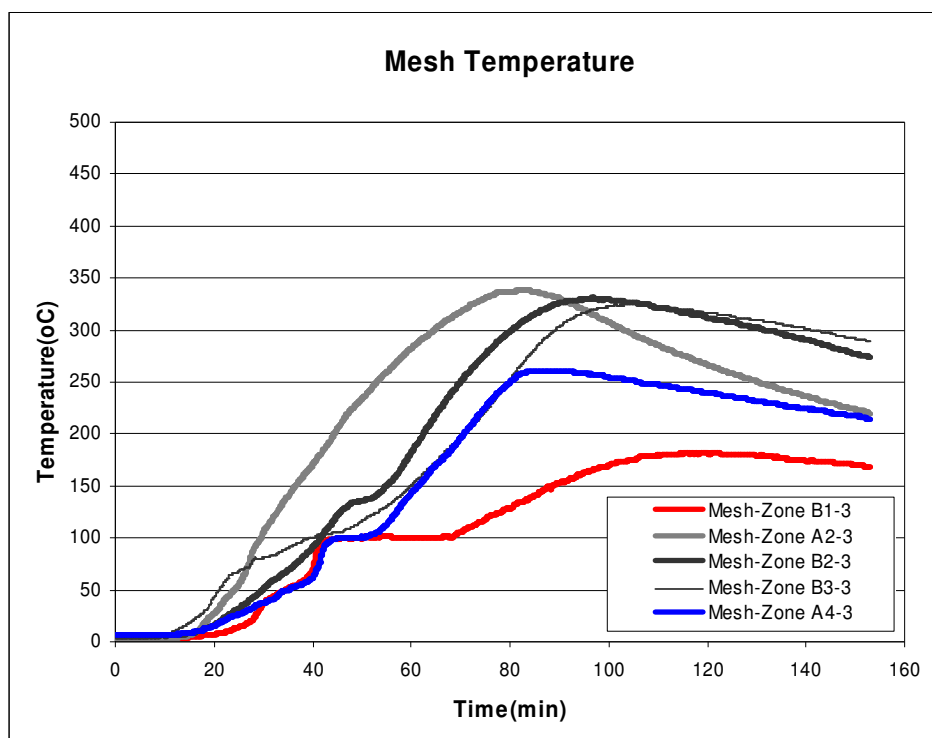
Σχήμα 7.55 : Μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στις μη μονωμένες δοκούς.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας στις μη μονωμένες δοκούς (Σχήμα 7.53), αρχικά παρατηρήθηκε λυγισμός του κορμού. Η σύμμικτη δράση μεταξύ των δοκών και της πλάκας εμπόδισε τη στρέψη της δοκού συνολικά. Η τάση του κάτω πέλματος να μετατοπιστεί πλευρικά προκάλεσε κάμψη του κορμού της δοκού, που με τη σειρά του οδήγησε σε συνολικό λυγισμό της διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.53. Σε αυτό το στάδιο, η θερμοκρασία στα μη μονωμένα μεταλλικά στοιχεία ήταν περίπου 800°C, ενώ τη στήριξη στην πλάκα θεωρείται ότι παρείχε μόνο το άνω πέλμα, αναπτύσσοντας αλυσιδωτή δράση (Σχήμα 7.53). Η θερμοκρασία του πλέγματος ενίσχυσης πάνω από τις δοκούς ανήλθε στη μέγιστη τιμή 375°C σε χρονικό διάστημα 95 λεπτών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.56 κατά τη φάση πτώσης της πυρκαγιάς. Το Σχήμα 7.57 απεικονίζει τη μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στο πλέγμα ενίσχυσης ανάμεσα στις δοκούς, όπου και πάλι η μέγιστη θερμοκρασία σημειώθηκε κατά τη φάση της πτώσης της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία στην πλάκα σκυροδέματος συνέχισε να αυξάνεται πλέον της μέγιστης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, που σημειώθηκε σε χρονικό διάστημα 75 λεπτών. Η θερμοκρασία που καταγράφηκε στους ήλους διάτμησης εμφανίζεται

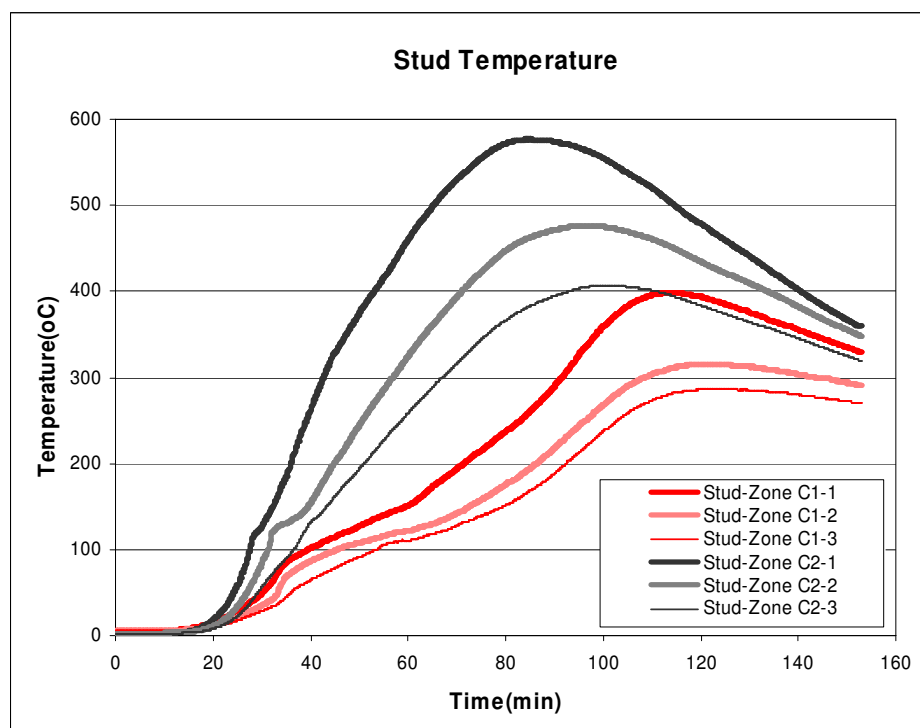
στο Σχήμα 7.57, όπου η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώνεται είναι 585°C. Παρόλο που η θερμοκρασία στους ήλους διάτμησης είναι υψηλή, η τιμή οριζόντιας διάτμησης που απαιτείται μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στις μη μονωμένες δοκούς, και συνεπώς μειώνεται η αντοχή και η δυσκαμψία τους. Δεν υπήρξε ένδειξη απώλειας της σύμμικτης δράσης των δοκών, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι ήλοι διάτμησης επέδειξαν κατάλληλη συμπεριφορά στην πυρκαγιά και διατήρησαν τη σύμμικτη δράση μεταξύ της πλάκας και των δοκών σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 7.56 : Θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο πλέγμα πάνω από τις δοκούς



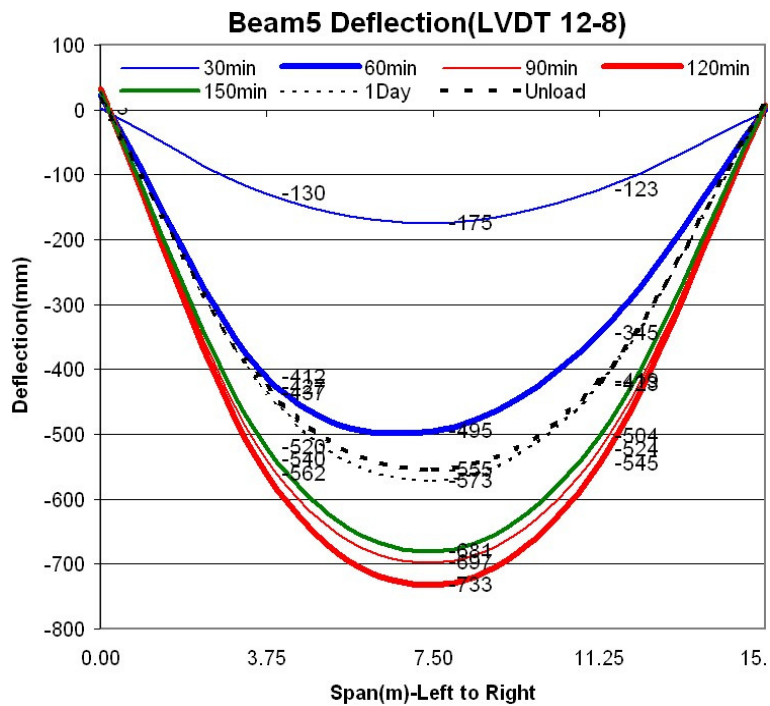
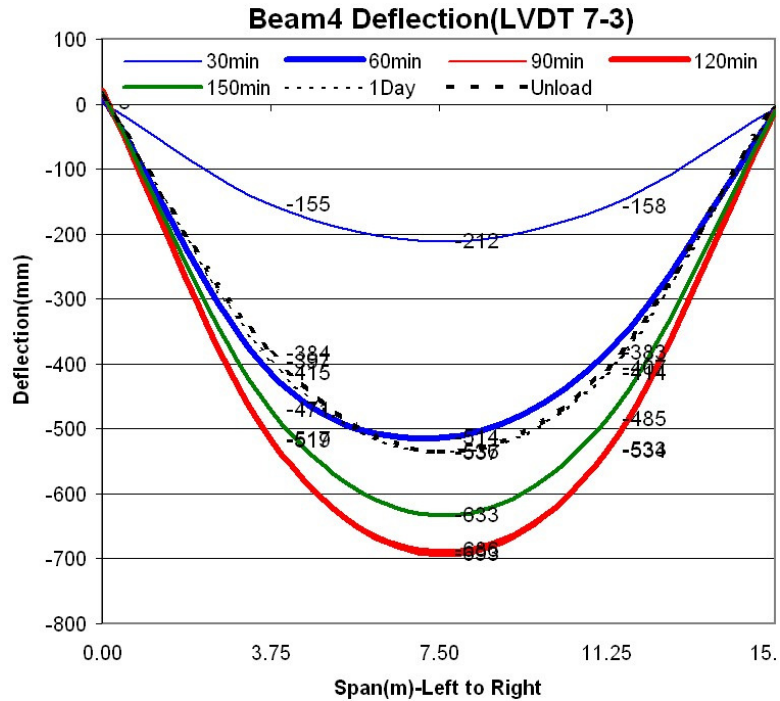
Σχήμα 7.57 : Θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο πλέγμα μεταξύ των δοκών



Σχήμα 7.58 : Θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στους ήλους διάτμησης

Η μέγιστη μετατόπιση που καταγράφηκε στην πλάκα ήταν 783mm και σημειώθηκε μετά από χρονικό διάστημα 112 λεπτών (Σχήμα 7.59), στη φάση πτώσης της

πυρκαγιάς. Το Σχήμα 7.59 απεικονίζει την καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου για τις δοκούς 4 και 5, κατά τη διάρκεια του πειράματος και μετά από μία ημέρα από την ολοκλήρωση του πειράματος. Το Σχήμα 7.59 απεικονίζει, επίσης, τη μετατόπιση μετά από χρονικό διάστημα ενός μήνα μετά από την απομάκρυνση των σάκων άμμου.



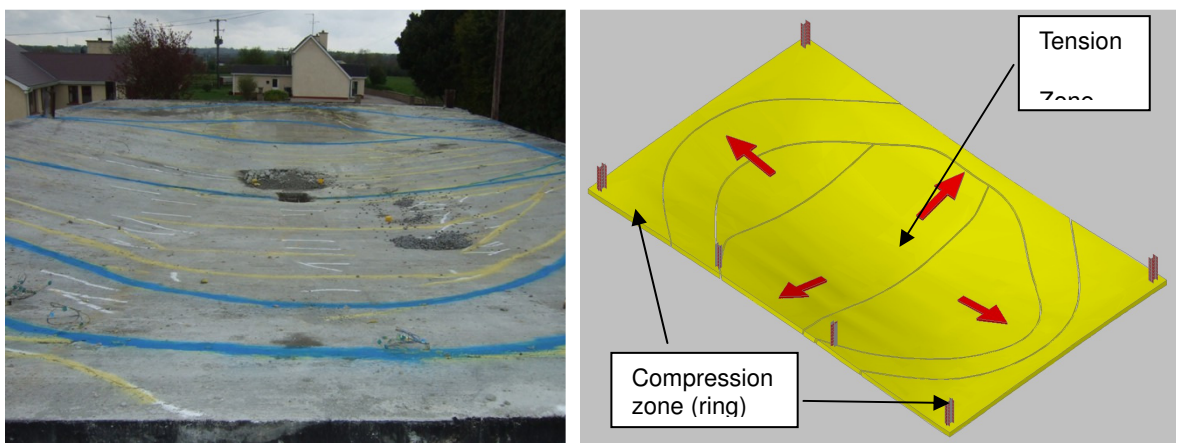
Σχήμα 7.59 : Μετατόπιση που καταγράφηκε στην πλάκα / στη δοκό

Η μετατόπιση της πλάκας, σε συνδυασμό με τη σύμμικτη δράση ανάμεσα στις δοκούς και την πλάκα, προκάλεσε στροφή του άνω πέλματος της μεταλλικής δοκού. Αυτό προκάλεσε την εμφάνιση δευτερεύουσας ροπής στη δοκό, μαζί με την κατακόρυφη διατμητική δύναμη, που οδήγησαν σε λυγισμό της διατομής των δοκών, καθώς το κάτω-Τ μετατοπίστηκε πλευρικά εκτός του αρχικού του επιπέδου. Σε αυτό το στάδιο, το φορτίο στηρίζεται κατά κύριο λόγο από τη μεμβράνη σταθεροποίησης της πλάκας, αντιστοιχώντας στις βασικές αρχές που συνοψίζει η μέθοδος σχεδιασμού Bailey.

Είναι εμφανές ότι οι μη μονωμένες κυψελωτές δοκοί ανέπτυξαν αποτελεσματική αλυσιδωτή δράση, ενώ μόνο ένα άνω-Τ συνεισφερε στη στήριξη του φορτίου. Ο λυγισμός του κορμού, ο οποίος παρατηρείται συνήθως σε μεμονωμένα πειράματα πυρκαγιάς μικρής κλίμακας, σημειώθηκε γύρω από το πρώτο άνοιγμα στη δοκό, όπου οι συνολικές μετατοπίσεις ήταν περιορισμένες.

7.4.6 Δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης σε πλάκες

Το μεταλλικό υπόστρωμα ανέπτυξε θερμοκρασία άνω των 900°C και παρατηρήθηκε ότι αποκολλήθηκε από το σκυρόδεμα στις περισσότερες περιοχές. Σε θερμοκρασία 900°C το μεταλλικό υπόστρωμα είχε χάσει ποσοστό 94% της αντοχής του και κατά συνέπεια, σε συνδυασμό με την αποκόλληση, δεν συνεισέφερε σημαντικά στη συνολική αντοχή της πλάκας κατά τη χρονική στιγμή της μέγιστης θερμικής επικινδυνότητας. Το παραπάνω αντιστοιχεί στην παραδοχή σχεδιασμού του Bailey, σύμφωνα με την οποία η συνεισφορά του μεταλλικού υποστρώματος δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της πλάκας. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το μεταλλικό υπόστρωμα επιφέρει θετική επίδραση στη μείωση των συνεπειών της αποσάθρωσης, καθώς διασφαλίζει ότι το αποσαθρωμένο/ρηγματωμένο σκυρόδεμα παραμένει στη θέση του, εφόσον το υπόστρωμα δεν αποκολλάται σε μεγάλο βαθμό και δημιουργείται ένα μεγάλο κενό μεταξύ του υποστρώματος και του σκυροδέματος. Στο πείραμα, ένα μεγάλο ρήγμα εμφανίστηκε κατά μήκος του μικρού ανοίγματος της πλάκας (Σχήμα 7.60), αντιστοιχώντας στις παρατηρήσεις προηγούμενων πειραμάτων σχετικά με την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης.



Σχήμα 7.60 . Διάταξη ρωγμών που υποδεικνύει τη συμπεριφορά της πλάκας

Η στηριζόμενη πλάκα σκυροδέματος δεν ήταν οριζόντια δεσμευμένη γύρω από την περίμετρό της και οι μονωμένες περιμετρικές δοκοί στήριξης διατήρησαν τη

φέρουσα ικανότητα και υπέστησαν μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις. Με τον τρόπο αυτό αναπτύχθηκε η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης, με τις δυνάμεις εντός επιπέδου στην κεντρική περιοχή της πλάκας να αναπτύσσουν εφελκυσμό, ενώ στην πλάκα γύρω από την περίμετρό της εμφανίστηκαν θλιπτικές δυνάμεις ισορροπίας εντός επιπέδου (Σχήμα 7.60). Η παραπάνω συμπεριφορά είναι ανάλογη μίας ρόδας ποδηλάτου: οι ακτίνες αναπαριστούν τη δράση εφελκυσμού της μεμβράνης, ενώ ο δακτύλιος αναπαριστά τη θλιπτική δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης.

7.4.7 Συμπεράσματα

Η πλάκα επέδειξε πολύ θετική συμπεριφορά στη στήριξη του φορτίου που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος και απόδειξε την εγγενή αντοχή του συστήματος χάρη στην επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης της πλάκας. Με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων αποδείχθηκε ότι η ενίσχυση στην κεντρική περιοχή της πλάκας υφίσταται δύναμη εφελκυσμού, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ελλειπτικού παραβολικού πλέγματος εφελκυσμού, αγκυρωμένου σε θλιπτική δακτύλιο του σκυροδέματος, που σχηματίζεται στην περίμετρο της πλάκας. Εξαιτίας της επίδρασης της μεμβράνης, η ύπαρξη δευτερευουσών δοκών αντιστήριξης της πλάκας δεν είναι αναγκαία σε συνθήκες πυρκαγιάς, και οι δοκοί αυτές είναι δυνατόν να είναι μη μονωμένες.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των μη μονωμένων κυψελωτών δοκών εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Εξαιτίας της συνδυαστικής σύμμικτης δράσης των κυψελωτών δοκών αντιστήριξης και της πλάκας, ο κύριος τρόπος αστοχίας ήταν ο λυγισμός της διατομής των κυψελωτών δοκών, αντί του λυγισμού του κορμού ή του μηχανισμού *Vierendeel*, που παρατηρήθηκαν ως κατεξοχήν στις κυψελωτές δοκούς σε πειράματα πυρκαγιάς μικρής κλίμακας.
- Από τη χρονική στιγμή κατά την οποία εμφανίστηκε ο λυγισμός της διατομής, μόνο το άνω-T των κυψελωτών δοκών συνεισέφερε στη φέρουσα ικανότητα της πλάκας χάρη στην ανάπτυξη της αλυσιδωτής δράσης.
- Οι κυψελωτές δοκοί δεν επηρέασαν τη συμπεριφορά της μεμβράνης στην πλάκα, η οποία ακολούθησε την τυπική συμπεριφορά που περιγράφει η μέθοδος σχεδιασμού Bailey, με αποτέλεσμα την αντιστήριξη του φορτίου σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Ο τοίχος πλήρωσης που έθετε τα όρια του διαμερίσματος διατήρησε την ακεραιότητά του παρά τη σημαντική θερμική ανομοιομορφία κατά μήκος του τοίχου και τη σημαντική πλευρική παραμόρφωση. Επιπλέον, όλες οι συνδέσεις (παρόλο που ήταν μονωμένες) επέδειξαν πολύ θετική συμπεριφορά χωρίς ενδείξεις αστοχίας.

8 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

8.1 Πεδίο εφαρμογής

Το πρότυπο πείραμα πυραντοχής πλήρους κλίμακας επιβεβαίωσε και πάλι την εξαιρετικά θετική συμπεριφορά του σύμμικτου συστήματος της πλάκας χάρη στην επίδραση της μεμβράνης στην πλάκα, όπως παρατηρήθηκε και περιγράφηκε από τους Bailey & Moore^(12,13). Ωστόσο, είναι ακόμα αναγκαίο η επαλήθευση της απλοποιημένης μεθόδου σχεδίασμου να επεκταθεί σε ολόκληρο το φάσμα εφαρμογής της. Η ισχύουσα γνώση της μηχανικής πυρασφάλειας επιτρέπει την επαλήθευση αυτή μέσα από την παραμετρική μελέτη με χρήση προηγμένων υπολογιστικών μοντέλων, στα οποία πολλά ειδικά χαρακτηριστικά, όπως το όριο βύθισης της πλάκας και η επιμήκυνση του χάλυβα οπλισμού μπορούν να ελεγχθούν με ευκολία. Ωστόσο, πριν από τη διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης του συγκεκριμένου έργου, τα προηγμένα αριθμητικά μοντέλα ήταν απαραίτητο να επαληθευτούν σε πειράματα πυρκαγιάς.

8.2 Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου ANSYS στο πείραμα FRACOF

8.2.1 Γενικά

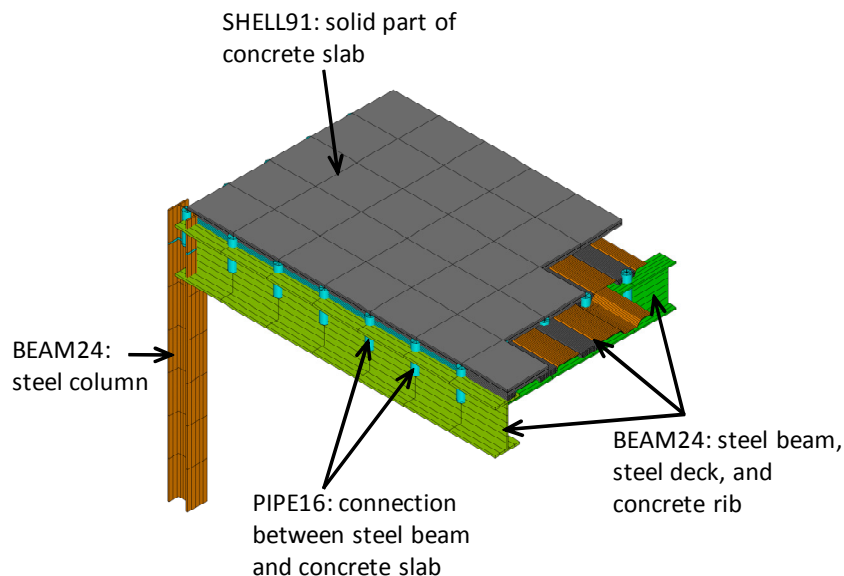
Για την επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των σύμμικτων πλακών σε πυρκαγιά πραγματοποιήθηκε μια αριθμητική διερεύνηση του πειράματος πυρκαγιάς πλήρους κλίμακας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7, με τη χρήση του πακέτου λογισμικού ANSYS. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελούταν από δύο τμήματα, ένα για την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας και ένα για τη δομική ανάλυση.

8.2.2 Δομική ανάλυση

Η δομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση ένα υβριδικό δομικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τις μεταλλικές δοκούς, το μεταλλικό φύλλο, την εσοχή του σκυροδέματος και το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης (βλ. Σχήμα 8.1). Σε αυτό το δομικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα τρία παρακάτω είδη πεπερασμένων στοιχείων:

- 3D Χωρικό μη-γραμμικό στοιχείο δοκού - BEAM24,
- 3D Χωρικό μη-γραμμικό πολυστρωματικό στοιχείο κελύφους - SHELL91
- 3D Χωρικό γραμμικό ραβδωτό στοιχείο - PIPE16.

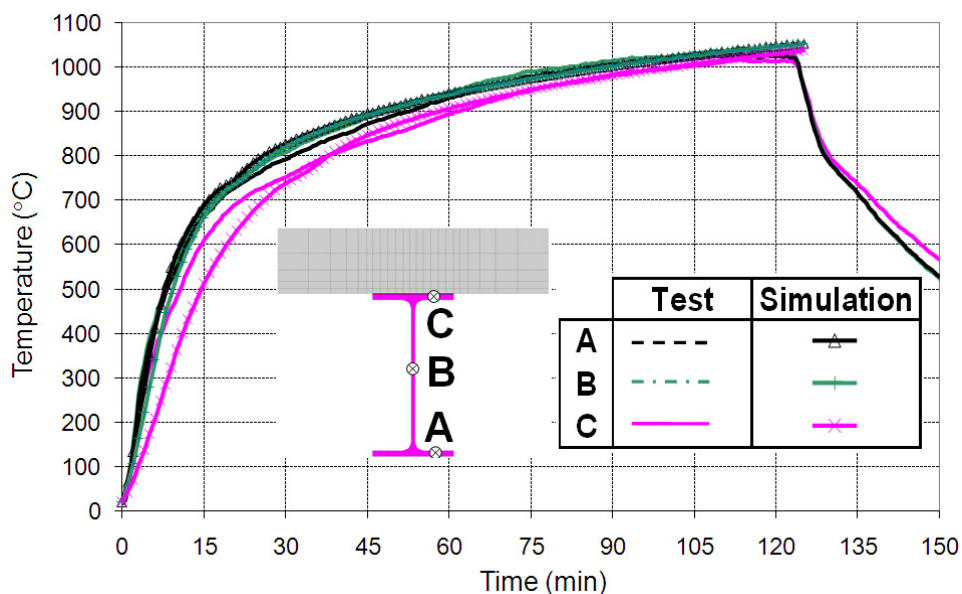
Η σύμμικτη πλάκα αναπαρίσταται από στοιχεία κελύφους για το συμπαγές τμήμα της σύμμικτης πλάκας και για το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης. Στοιχεία δοκού-στύλου χρησιμοποιήθηκαν για τα μεταλλικά μέλη, τα μεταλλικά φύλλα και τις εσοχές της σύμμικτης πλάκας. Στοιχεία σύνδεσης χρησιμοποιήθηκαν για τους συνδέσμους διάτμησης ανάμεσα στις μεταλλικές δοκούς και τη σύμμικτη πλάκα.



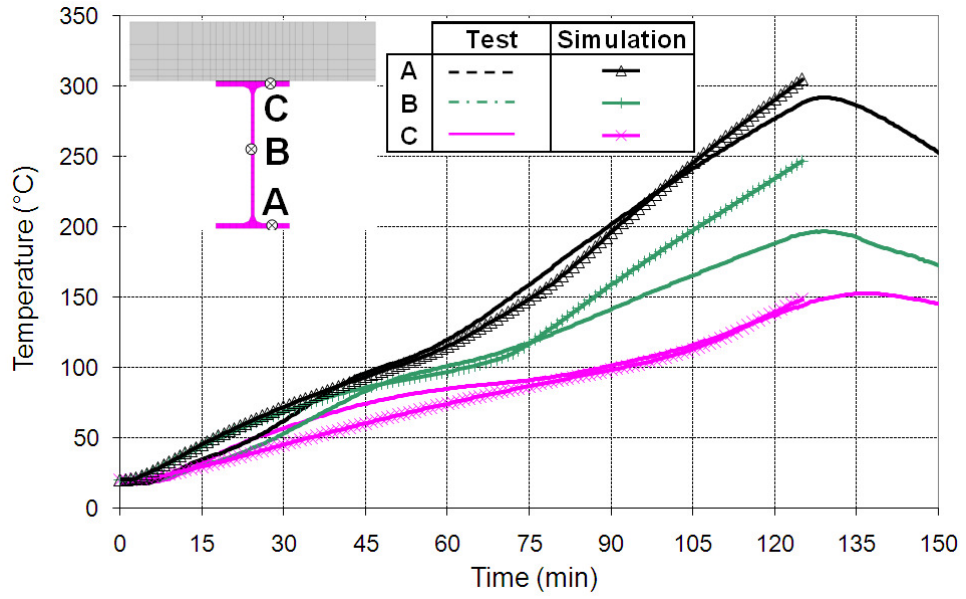
Σχήμα 8.1 Λεπτομέρεια δομικού μοντέλου

8.2.3 Ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας

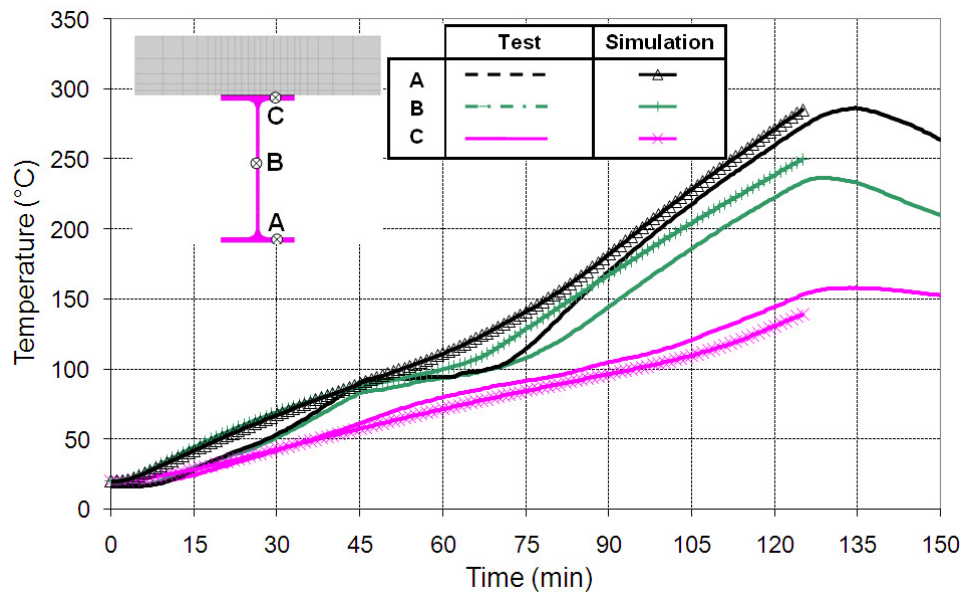
Στην ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη για τη θέρμανση όλων των δομικών στοιχείων με τη βοήθεια διδιάστατων μοντέλων και χρήση της τυπικής διατομής κάθε δομικού στοιχείου. Καθώς η επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου αφορά κατά κύριο λόγο τη δομική συμπεριφορά, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού μόνωσης προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να προσομοιώνουν τη θέρμανση που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια πειράματος πυρκαγιάς στα μεταλλικά μέλη. Στα μεταλλικά στοιχεία και τα στοιχεία σκυροδέματος, οι θερμικές ιδιότητες ορίζονται κατά EN1994-1-2⁽³³⁾. Η σύγκριση των θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν με τις θερμοκρασίες του πειράματος για διάφορα δομικά στοιχεία απεικονίζεται στα Σχήματα 8.2 έως και 8.5.



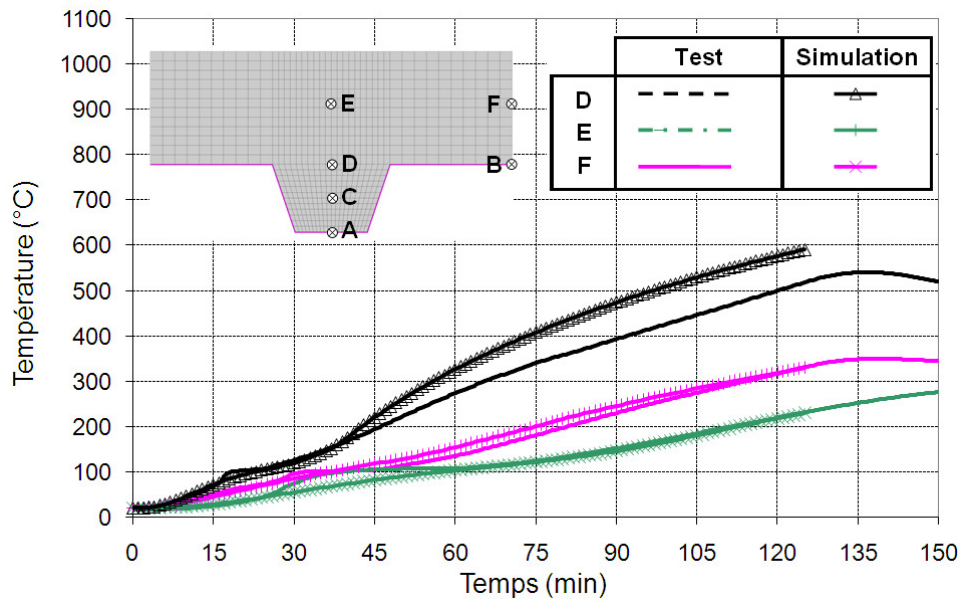
Σχήμα 8.2 Σύγκριση θερμοκρασιών του πειράματος και του αριθμητικού μοντέλου - μη μονωμένες μεταλλικές δοκοί



Σχήμα 8.3 Σύγκριση θερμοκρασιών του πειράματος και του αριθμητικού μοντέλου - μονωμένες δευτερεύουσες δοκοί



Σχήμα 8.4 Σύγκριση θερμοκρασιών του πειράματος και του αριθμητικού μοντέλου - μονωμένες κύριες δοκοί

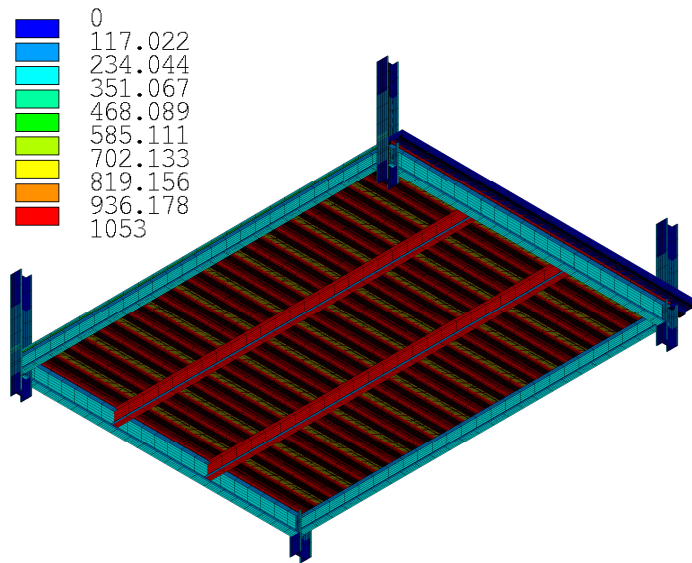


Σχήμα 8.5 Σύγκριση θερμοκρασιών του πειράματος και του αριθμητικού υπολογισμού - σύμμεκτη πλάκα

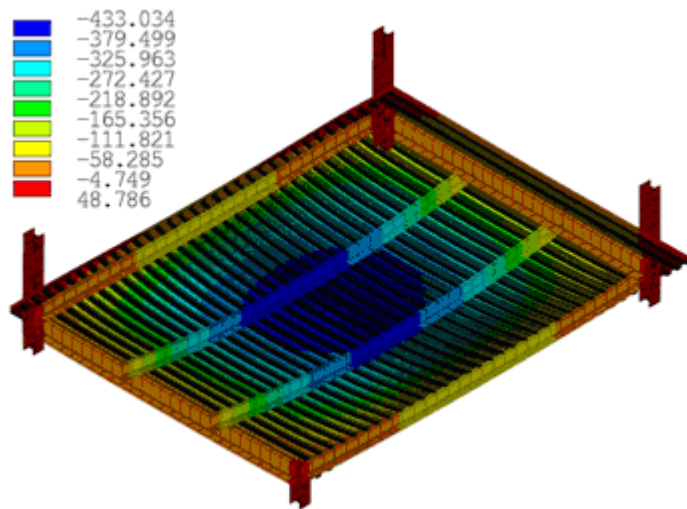
8.2.4 Μηχανική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων

Η δομική συμπεριφορά της πλάκας αναλύθηκε με βάση τις θερμοκρασίες που προσδιορίζονται από το μοντέλο μεταφοράς θερμοκρασίας και το δομικό μοντέλο που απεικονίζονται στο Σχήμα 8.1.

Σε αυτό το μοντέλο μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι το κεντρικό τμήμα της πλάκας θερμάνθηκε πολύ περισσότερο από τα οριακά δομικά στοιχεία. Η προσομοίωση της δομικής συμπεριφοράς της πλάκας απεικονίζεται στο Σχήμα 8.7, το οποίο δείχνει το παραμορφωμένο σχήμα που προβλέπει το αριθμητικό μοντέλο μετά από χρονικό διάστημα 120 λεπτών έκθεσης στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου.



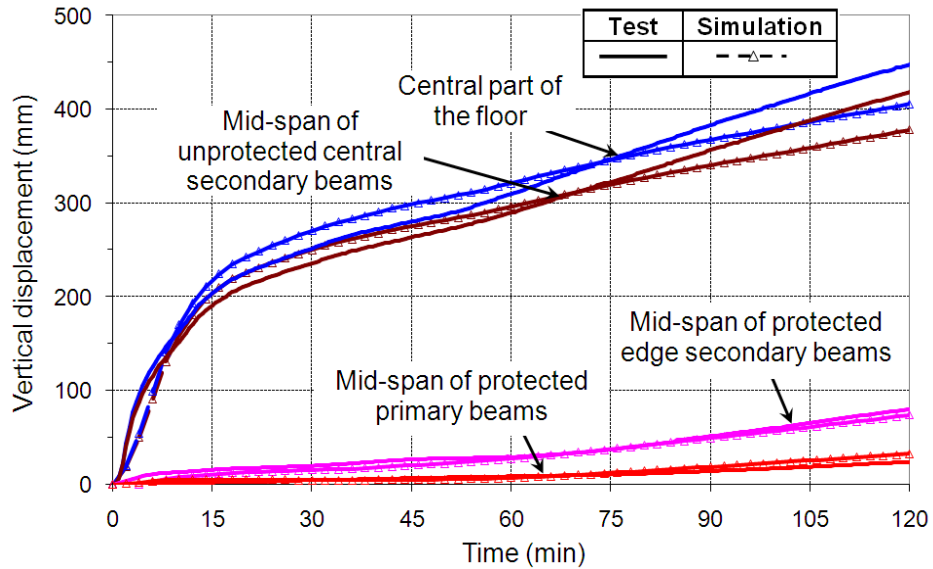
Σχήμα 8.6 Συνολικό δομικό μοντέλο και το σχετικό πεδίο θερμοκρασίας μετά από 120 λεπτά πρότυπης πυρκαγιάς ISO



Σχήμα 8.7 Προσομοίωση του παραμορφωμένου σχήματος της πλάκας

Η σύγκριση της κατακόρυφης μετατόπισης της πλάκας που υπολογίστηκε με το αριθμητικό μοντέλο με τις μετρηθείσες μετατοπίσεις του πειραματικού δοκιμίου απεικονίζεται στο Σχήμα 8.8. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι γενικά το αριθμητικό μοντέλο προβλέπει αποτελέσματα πολύ κοντινά με τα πειραματικά. Ωστόσο, μια σχετική ανακολουθία σημειώνεται στη βύθιση των μη μονωμένων μεταλλικών δοκών μετά από 50 λεπτά, με αποτέλεσμα να υπάρχει κάποια απόκλιση μεταξύ των μετρηθείσων βυθίσεων και των βυθίσεων που προβλέφθηκαν από την αριθμητική ανάλυση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην απώλεια της συνθήκης συνέχειας στο πλέγμα ενίσχυσης κατά τη διάρκεια του πειράματος, με αποτέλεσμα η τιμή της βύθισης για τις μη μονωμένες δοκούς να είναι υψηλότερη.

Παρά αυτή τη μικρή διαφορά, εξακριβώθηκε η εγκυρότητα του αριθμητικού μοντέλου και η ικανότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς στην πυρκαγιά.



Σχήμα 8.8 Σύγκριση της προβλεπόμενης βύθισης της πλάκας και της βύθισης που καταγράφηκε κατά τη θέρμανση στο πείραμα

8.3 Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου SAFIR σε πειράματα πυρκαγιάς

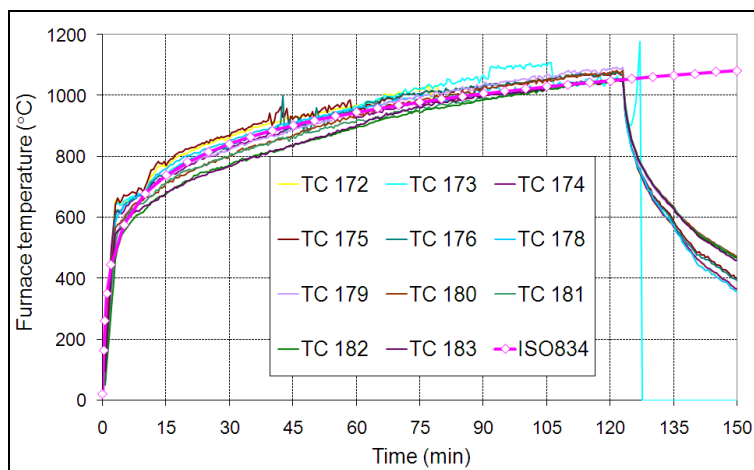
8.3.1 Γενικά

Για την επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των σύμμικτων πλακών σε πυρκαγιά πραγματοποιήθηκε μια αριθμητική διερεύνηση του πειράματος πυρκαγιάς πλήρους κλίμακας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7, με τη χρήση του πακέτου λογισμικού SAFIR. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελούνταν από δύο τμήματα, ένα για την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας και ένα για τη δομική ανάλυση.

8.3.2 Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα FRACOF

8.3.2.1 Πυροθερμικό φορτίο

Στο πείραμα Fracof η πλάκα ήταν εκτεθειμένη σε συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO με χρήση πρότυπου κλιβάνου πειραμάτων πυραντοχής. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν σε διαφορετικές θέσεις του κλιβάνου αποδεικνύουν ότι η ακολουθείται σε μεγάλο βαθμό η πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO, βλ. Σχήμα 8.9.

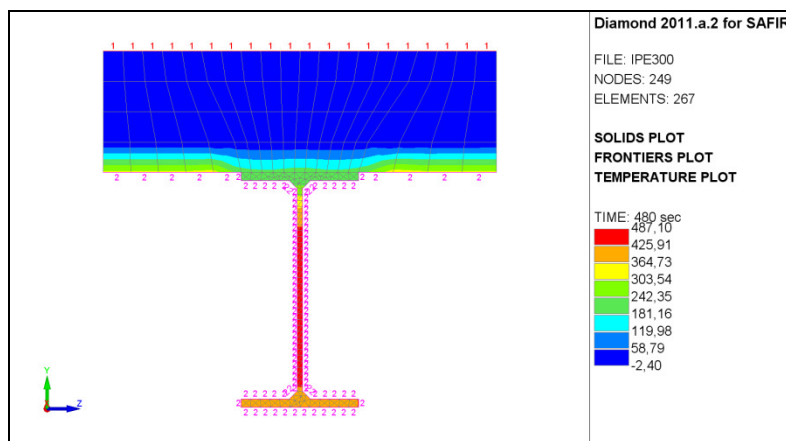


Σχήμα 8.9 : Σύγκριση των καμπυλών πυρκαγιάς που μετρήθηκαν στο διαμέρισμα με την πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO-834

8.3.2.2 Θερμικές αναλύσεις: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα

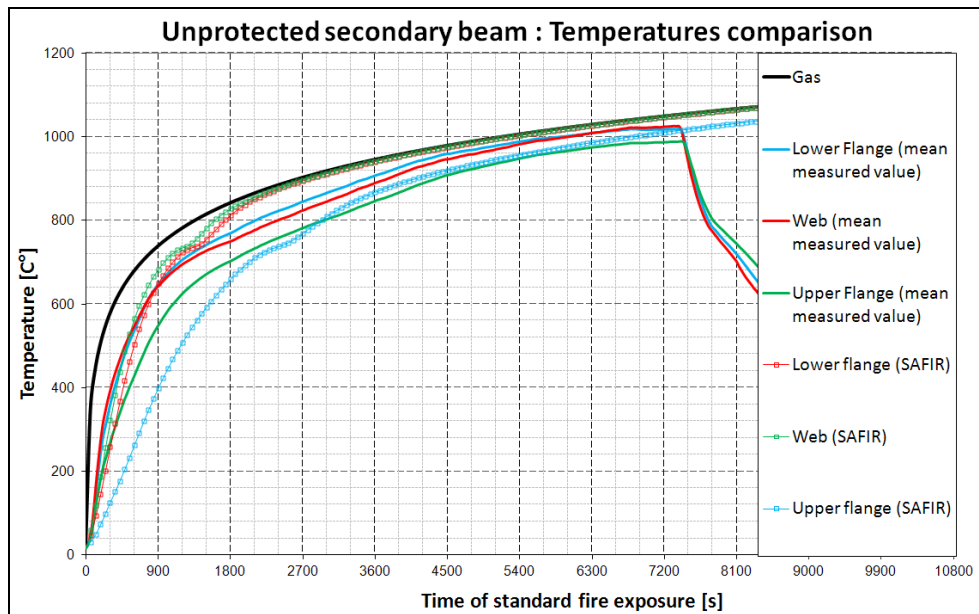
Το λογισμικό SAFIR έχει χρησιμοποιηθεί για τη θερμική ανάλυση των μεταλλικών προφίλ και της πλάκας. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στην κατασκευή, εφαρμόστηκε η πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO-834 στα όρια της πλάκας σκυροδέματος και των μη μονωμένων μεταλλικών προφίλ, ενώ για τα μονωμένα έναντι στη θερμότητα τμήματα χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο μεταλλικό τμήμα (έτσι ώστε να εξαλειφθεί κάθε αβεβαιότητα σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες του μονωτικού υλικού ή σχετικά με πιθανές κατασκευαστικές ατέλειες).

Όσον αφορά τις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς, η πλάκα σκυροδέματος μοντελοποιήθηκε έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη την ικανότητά τους να απορροφούν θερμότητα. Το σκυρόδεμα πάνω από το άνω πέλμα του μεταλλικού προφίλ λήφθηκε υπόψη μόνο για τη θερμική ανάλυση και δεν παρουσιάζει μηχανική αντοχή (καθώς το σκυρόδεμα ελέγχεται σε ξεχωριστό μοντέλο από τα στοιχεία κελύφους). Το κάτω πέλμα, οι δύο πλευρές των προφίλ και η κάτω πλευρά της πλάκας εκτέθηκαν σε πρότυπη πυρκαγιά ISO, ενώ η άνω πλευρά της πλάκας παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C σε όλη τη διάρκεια των υπολογισμών, βλ. Σχήμα 8.10.



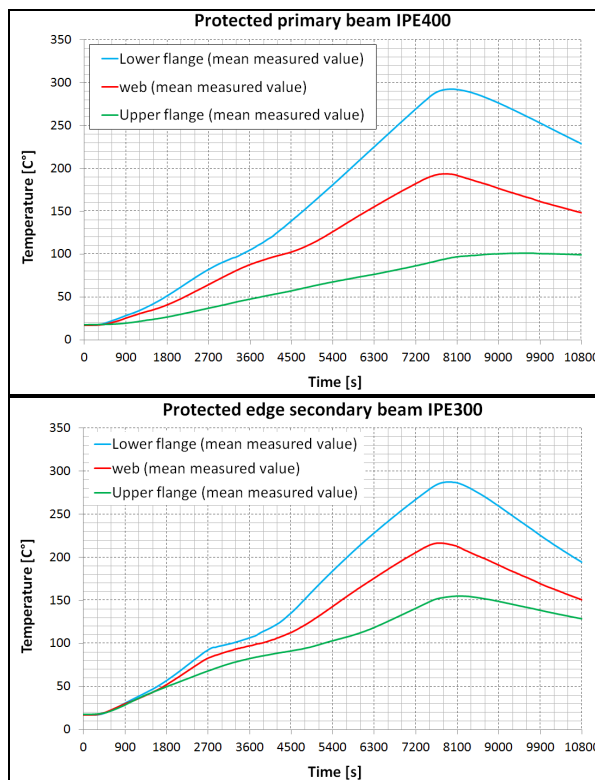
Σχήμα 8.10 : Έκθεση στην πυρκαγιά των μη μονωμένων δευτερευουσών πλακών

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις πειραματικές μετρήσεις στο Σχήμα 8.11, στο κάτω πέλμα, στον κορμό και στο άνω πέλμα των παραπάνω προφίλ. Οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μετρηθείσες θερμοκρασίες.



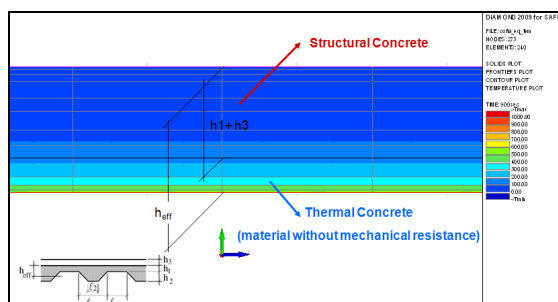
Σχήμα 8.11 : Σύγκριση των υπολογιζόμενων και των μετρηθείσων θερμοκρασιών στις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς

Το Σχήμα 8.12 απεικονίζει τις μετρηθείσες θερμοκρασίες στο κάτω πέλμα, στον κορμό και στο άνω πέλμα των μονωμένων προφίλ.



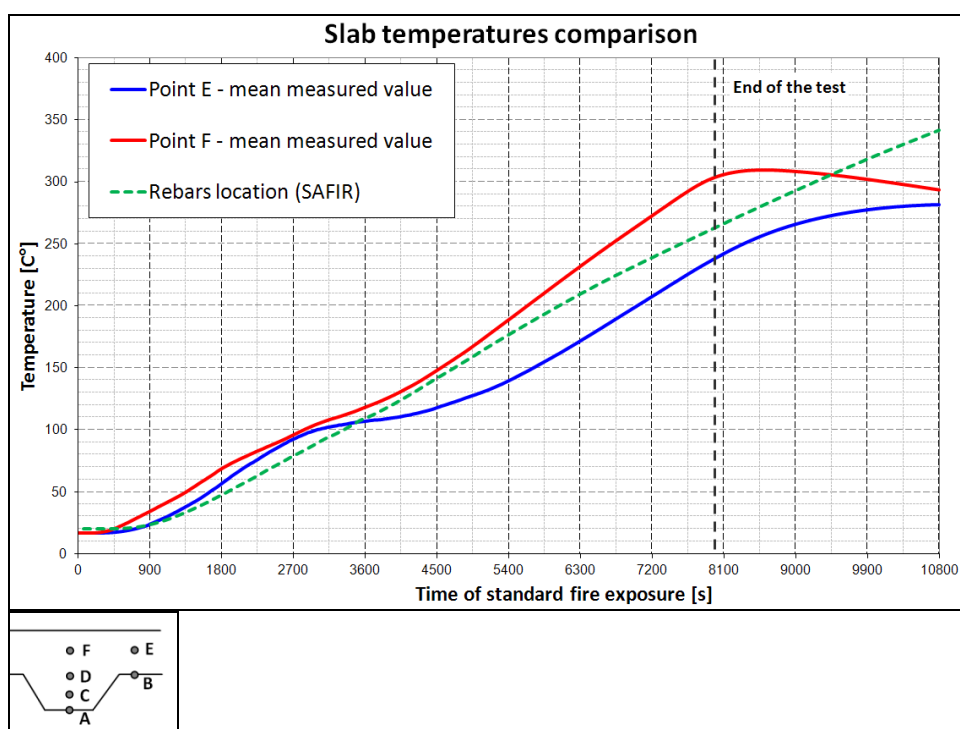
Σχήμα 8.12 : Μετρηθείσες θερμοκρασίες στη μονωμένη δοκό IPE400 (αριστερά) και στη μονωμένη δοκό IPE300 (δεξιά)

Για τη θερμική ανάλυση στην πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του ισοδύναμου πάχους της πλάκας όπως ορίζεται στον Ευρωκώδικα EN1994-1-2. Οι εσοχές 58 mm και το στρώμα σκυροδέματος 97 mm που καλύπτει τις εσοχές αντικαταστήθηκαν από επίπεδη πλάκα ισοδύναμου πάχους 120 mm, βλ. Σχήμα 8.13. Η πλάκα εκτέθηκε σε πυρκαγιά στην κάτω πλευρά της, ενώ η άνω πλευρά παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C. Το υποθετικό ύψος για όλους τους μηχανικούς υπολογισμούς ορίστηκε ως το ύψος του σκυροδέματος πάνω από το μεταλλικό υπόστρωμα.



Σχήμα 8.13 : Υπολογισμός του ισοδύναμου πάχους για τη θερμική ανάλυση της πλάκας

Στο Σχήμα 8.14α απεικονίζεται η σύγκριση των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών με τις μέσες μετρηθείσες θερμοκρασίες στην πλάκα πάνω από την εσοχή. Τα σημεία E και F αντιστοιχούν στην τοποθεσία των μεταλλικών ράβδων οπλισμού, βλ. Σχήμα 8.14β.

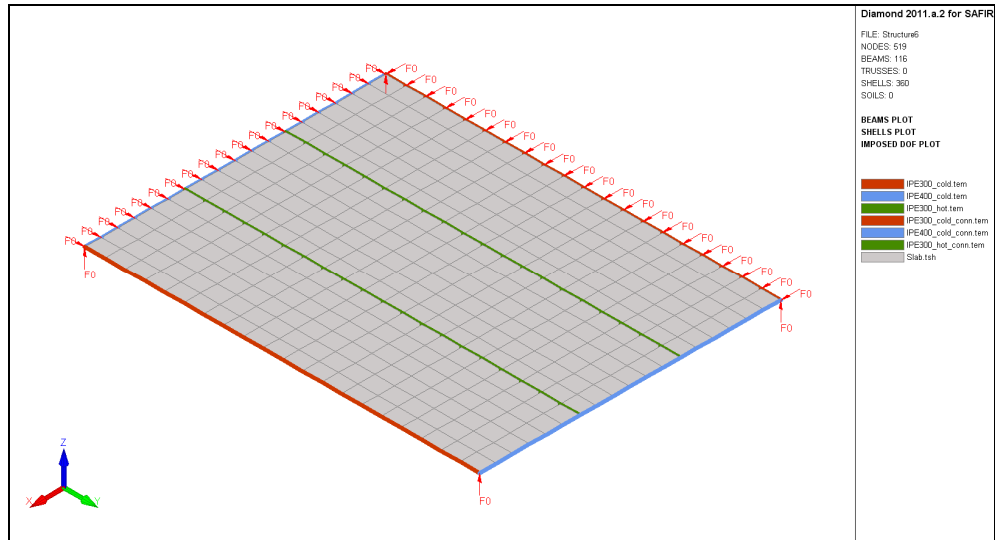


Σχήμα 8.14 : α) Σύγκριση των μετρηθείσων και των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών με πλάκα ισοδύναμου πάχους (αριστερά), β) Τοποθεσίες θερμοζευγών στην πλάκα (δεξιά)

Οι θερμοκρασίες στις μεταλλικές ράβδους οπλισμού και στην πλάκα προσεγγίζονται με μεγάλη ακρίβεια στα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου ομοιόμορφου πάχους.

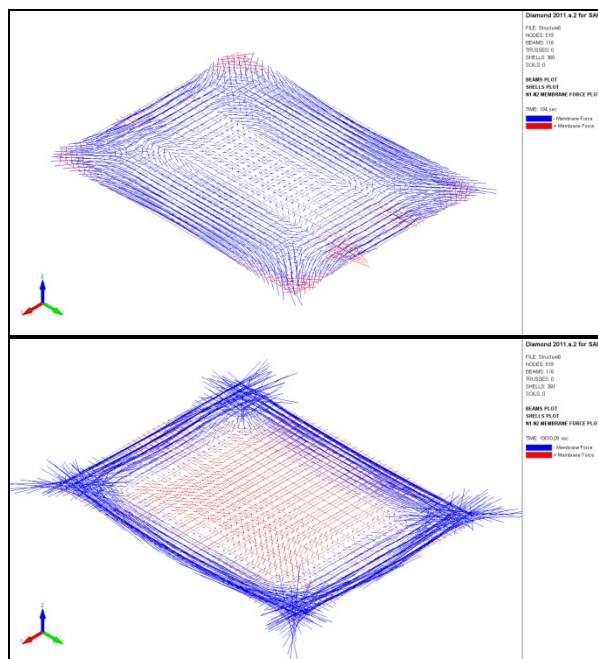
8.3.2.3 Δομική ανάλυση

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκε με το λογισμικό SAFIR. Η κατασκευή μοντελοποιήθηκε με τη χρήση στοιχείων δοκού για τις δοκούς και στοιχείων κελύφους για την πλάκα. Οι ακραίες δοκοί είναι απλά εδραζόμενες στους στύλους, όπως δείχνει το Σχήμα 8.15. Η πλάκα είναι αξονικά δεσμευμένη στις δύο πλευρές, ώστε να επιτυγχάνεται η προσομοίωση της συνθήκης συνέχειας της σύμμικτης πλάκας.



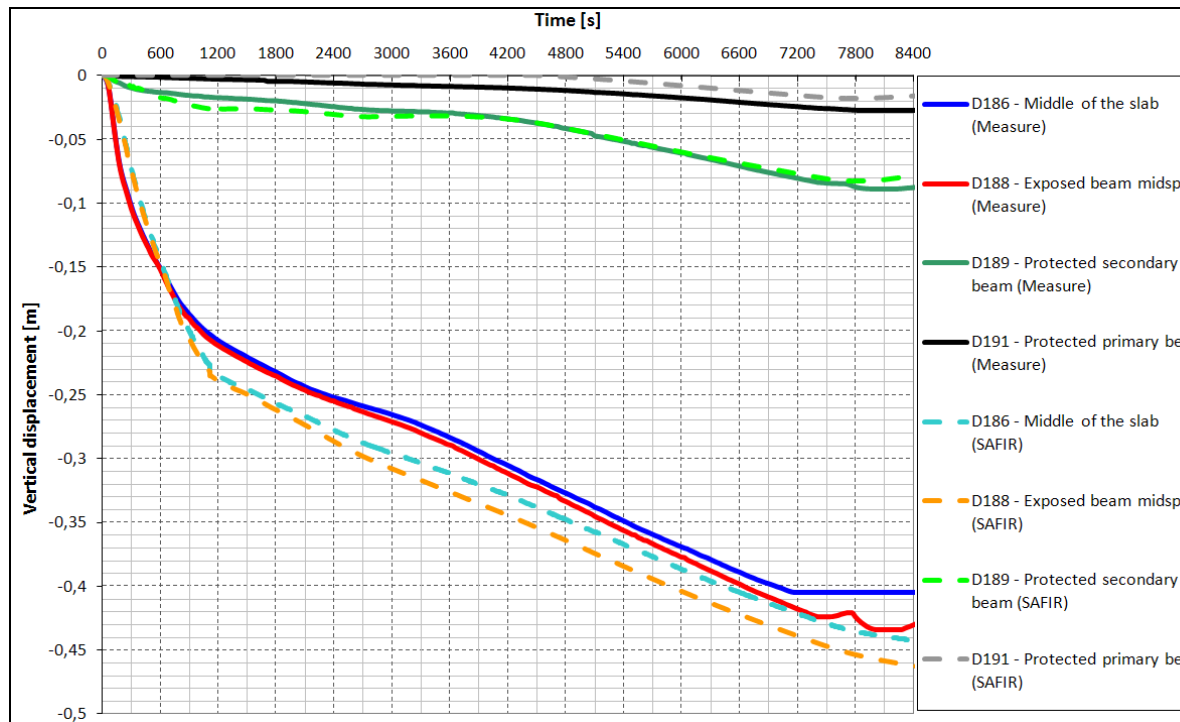
Σχήμα 8.15 : Μοντέλο δομικής ανάλυσης

Η δομική συμπεριφορά σε θερμοκρασία δωματίου είναι κυρίως καμπτική, ενώ κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αναπτύσσεται η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης. Οι δυνάμεις της μεμβράνης σε θερμοκρασία δωματίου και υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.16.



Σχήμα 8.16 : Σύγκριση της καμπτικής λειτουργίας (αριστερά) και της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης (δεξιά): οι δυνάμεις της μεμβράνης εντός της πλάκας

Τέλος, η σύγκριση των μετρηθείσων βυθίσεων με τις υπολογιζόμενες βυθίσεις με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων απεικονίζεται στο Σχήμα 8.17.



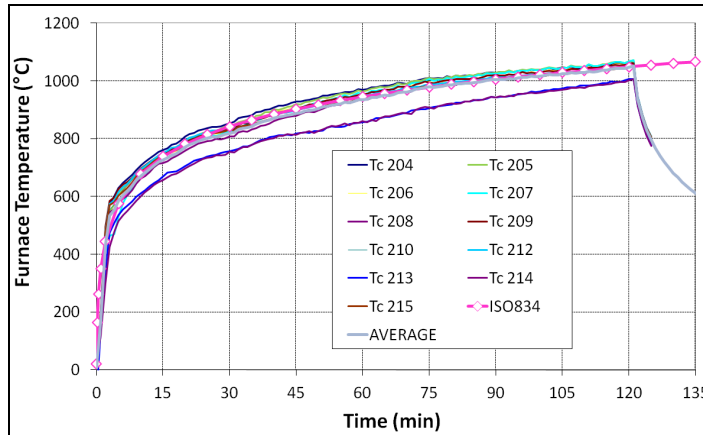
Σχήμα 8.17 : Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων της κατακόρυφης μετατόπισης

Παρατηρείται ένας καλός συσχετισμός των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και της πραγματικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επαληθεύει τις απλοποιήσεις που έγιναν, όπως π.χ. το γεγονός ότι η δυσκαμψία των στύλων κατά την κάμψη δεν λήφθηκε υπόψη και ότι για τη ραβδωτή πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοδύναμης επίπεδης πλάκας. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η δομική συμπεριφορά βασίστηκε στις μετρηθείσες τιμές των ιδιοτήτων των υλικών.

8.3.3 Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα COSSFIRE

8.3.3.1 Πυροθερμικό φορτίο

Στο πείραμα Cossfire η πλάκα ήταν εκτεθειμένη σε συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO με χρήση πρότυπου κλιβάνου πειραμάτων πυραντοχής. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν σε διαφορετικές θέσεις του κλιβάνου αποδεικνύουν ότι ακολουθείται σε μεγάλο βαθμό η πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO, βλ. Σχήμα 8.18.

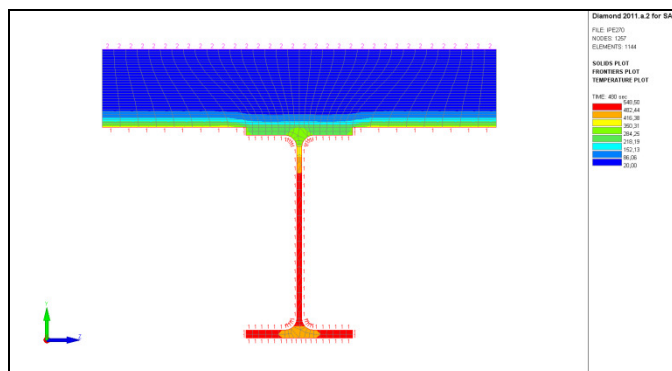


Σχήμα 8.18 : Σύγκριση των καμπυλών πυρκαγιάς που μετρήθηκαν στο διαμέρισμα με την πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO-834

8.3.3.2 Θερμική ανάλυση: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα

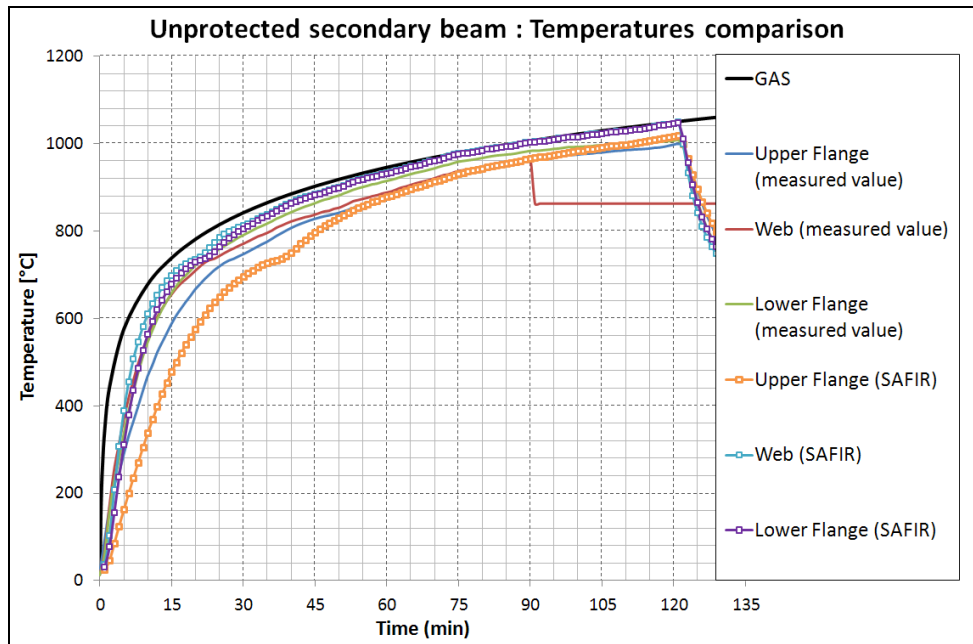
Το λογισμικό SAFIR έχει χρησιμοποιηθεί για τη θερμική ανάλυση των μεταλλικών προφίλ και της πλάκας. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στην κατασκευή, εφαρμόστηκε η μέση καμπύλη πυρκαγιάς στα όρια της πλάκας σκυροδέματος και των μη μονωμένων μεταλλικών προφίλ, ενώ για τα μονωμένα έναντι στη θερμότητα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στις μεταλλικές διατομές (έτσι ώστε να εξαλειφθεί κάθε αβεβαιότητα σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες του μονωτικού υλικού ή σχετικά με πιθανές κατασκευαστικές ατέλειες).

Όσον αφορά τις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς, η πλάκα σκυροδέματος μοντελοποιήθηκε έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη την ικανότητά τους να απορροφούν θερμότητα. Το σκυρόδεμα πάνω από το άνω πέλμα του μεταλλικού προφίλ λήφθηκε υπόψη μόνο για τη θερμική ανάλυση και δεν παρουσιάζει μηχανική αντοχή (καθώς το σκυρόδεμα ελέγχεται σε ξεχωριστό μοντέλο από τα στοιχεία κελύφους). Το κάτω πέλμα, οι δύο πλευρές των προφίλ και η κάτω πλευρά της πλάκας εκτέθηκαν σε μέση πυρκαγιά, ενώ η άνω πλευρά της πλάκας παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C σε όλη τη διάρκεια των υπολογισμών, βλ. Σχήμα 8.19.



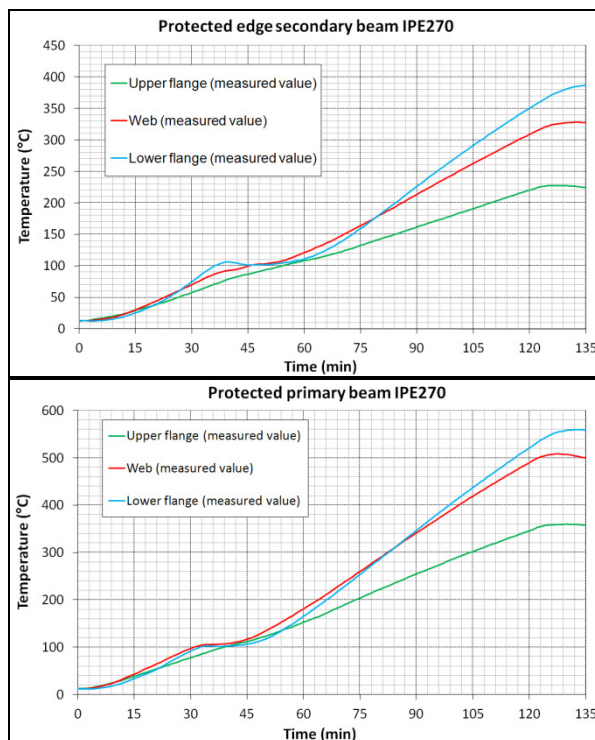
Σχήμα 8.19 : Έκθεση στην πυρκαγιά των μη μονωμένων δευτερευουσών πλακών

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις πειραματικές μετρήσεις στο Σχήμα 8.20, στο κάτω πέλμα, στον κορμό και στο άνω πέλμα των παραπάνω προφίλ.



Σχήμα 8.20 : Σύγκριση των υπολογιζόμενων και των μετρηθείσων θερμοκρασιών στις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς

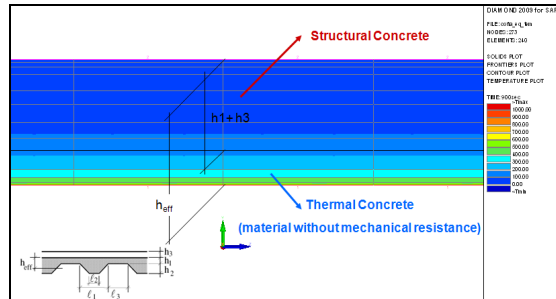
Το Σχήμα 8.21 απεικονίζει τις μετρηθείσες θερμοκρασίες στο κάτω πέλμα, στον κορμό και στο άνω πέλμα των μονωμένων προφίλ.



Σχήμα 8.21 : Μετρηθείσες θερμοκρασίες στη μονωμένη δευτερεύουσα δοκό IPE270 (αριστερά) και στη μονωμένη δοκό IPE270 (δεξιά)

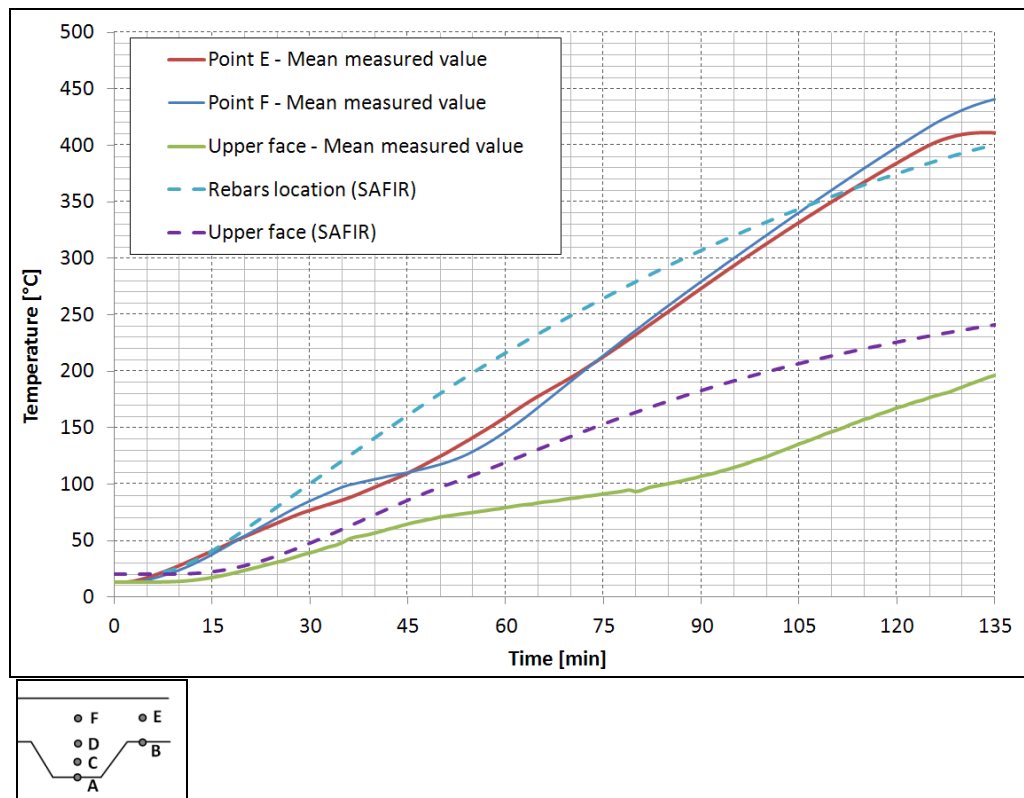
Για τη θερμική ανάλυση στην πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του ισοδύναμου πάχους της πλάκας όπως ορίζεται στον Ευρωκώδικα EN1994-1-2. Οι εσοχές 58 mm και το στρώμα σκυροδέματος 77 mm που καλύπτει τις εσοχές

αντικαταστήθηκαν από επίπεδη πλάκα ισοδύναμου πάχους 100 mm, βλ. Σχήμα 8.22. Η πλάκα εκτέθηκε σε μέση πυρκαγιά στην κάτω πλευρά της, ενώ η άνω πλευρά παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C. Το υποθετικό ύψος για όλους τους μηχανικούς υπολογισμούς ορίστηκε ως το ύψος του σκυροδέματος πάνω από το μεταλλικό υπόστρωμα.



Σχήμα 8.22 : Υπολογισμός του ισοδύναμου πάχους για τη θερμική ανάλυση της πλάκας

Στο Σχήμα 8.23α απεικονίζεται η σύγκριση των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών με τις μετρηθείσες θερμοκρασίες στην πλάκα πάνω από την εσοχή. Στις τρεις θεωρημένες θέσεις πάνω από τις εσοχές (Σημείο E, Σημείο F και άνω πλευρά της πλάκας, βλ. Σχήμα 8.23β) δίνονται οι μέσες μετρηθείσες θερμοκρασίες. Τα σημεία E και F αντιστοιχούν στην τοποθεσία των μεταλλικών ράβδων οπλισμού.



Σχήμα 8.23 : α) Σύγκριση των μετρηθείσων και των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών στην πλάκα ισοδύναμου πάχους,, β) Τοποθεσίες θερμοζευγών στην πλάκα

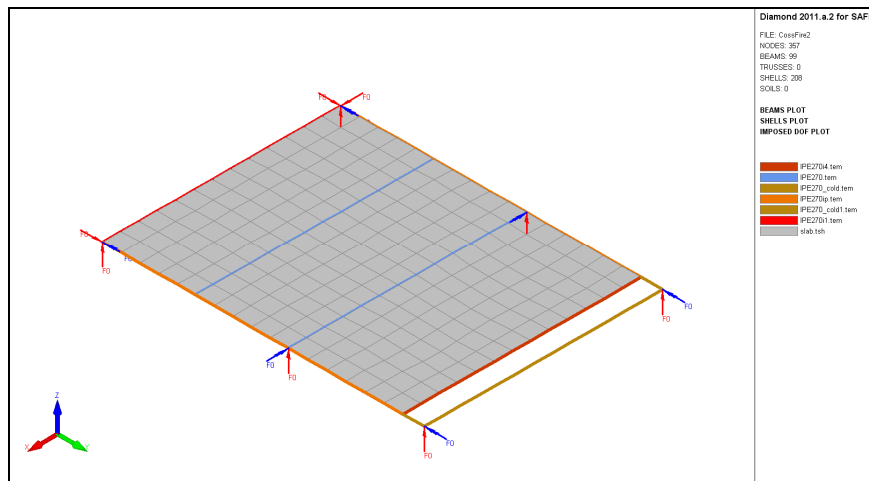
Οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μέσες μετρηθείσες θερμοκρασίες, εκτός από την άνω πλευρά της πλάκας, όπου οι

θερμοκρασίες είναι σχετικώς υπερεκτιμημένες. Καθώς το Σημείο F και το Σημείο E αντιστοιχούν στις τοποθεσίες των μεταλλικών ράβδων οπλισμού, οι θερμοκρασίες στις μεταλλικές ράβδους προσεγγίζονται με μεγάλη ακρίβεια στα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου ισοδύναμου πάχους.

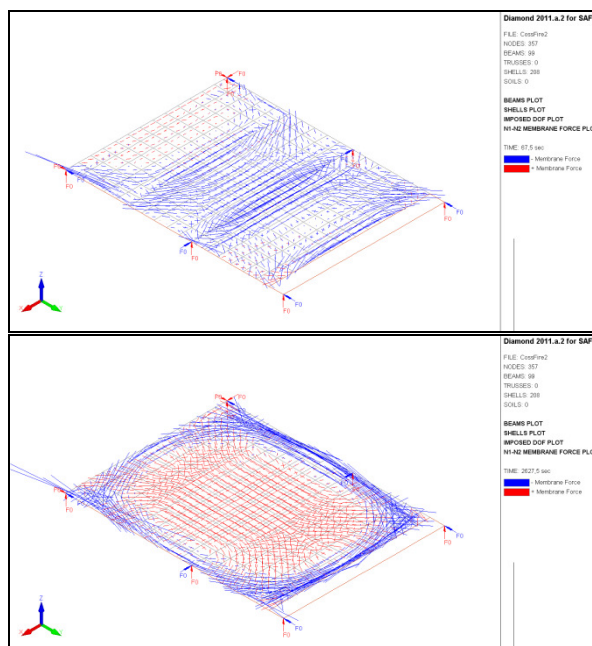
8.3.3.3 Δομική ανάλυση

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκε με το λογισμικό SAFIR. Η κατασκευή μοντελοποιήθηκε με τη χρήση στοιχείων δοκού για τις δοκούς και στοιχείων κελύφους για την πλάκα. Οι ακραίες δοκοί είναι απλά εδραζόμενες στους στύλους, όπως δείχνει το Σχήμα 8.24. Η πλάκα και οι δοκοί είναι αξονικά δεσμευμένες.

Η δομική συμπεριφορά σε θερμοκρασία δωματίου είναι κυρίως καμπτική, ενώ κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αναπτύσσεται η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης. Οι δυνάμεις της μεμβράνης σε θερμοκρασία δωματίου και υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.25.

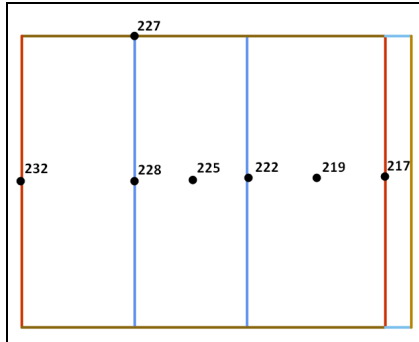


Σχήμα 8.24 : Μοντέλο δομικής ανάλυσης

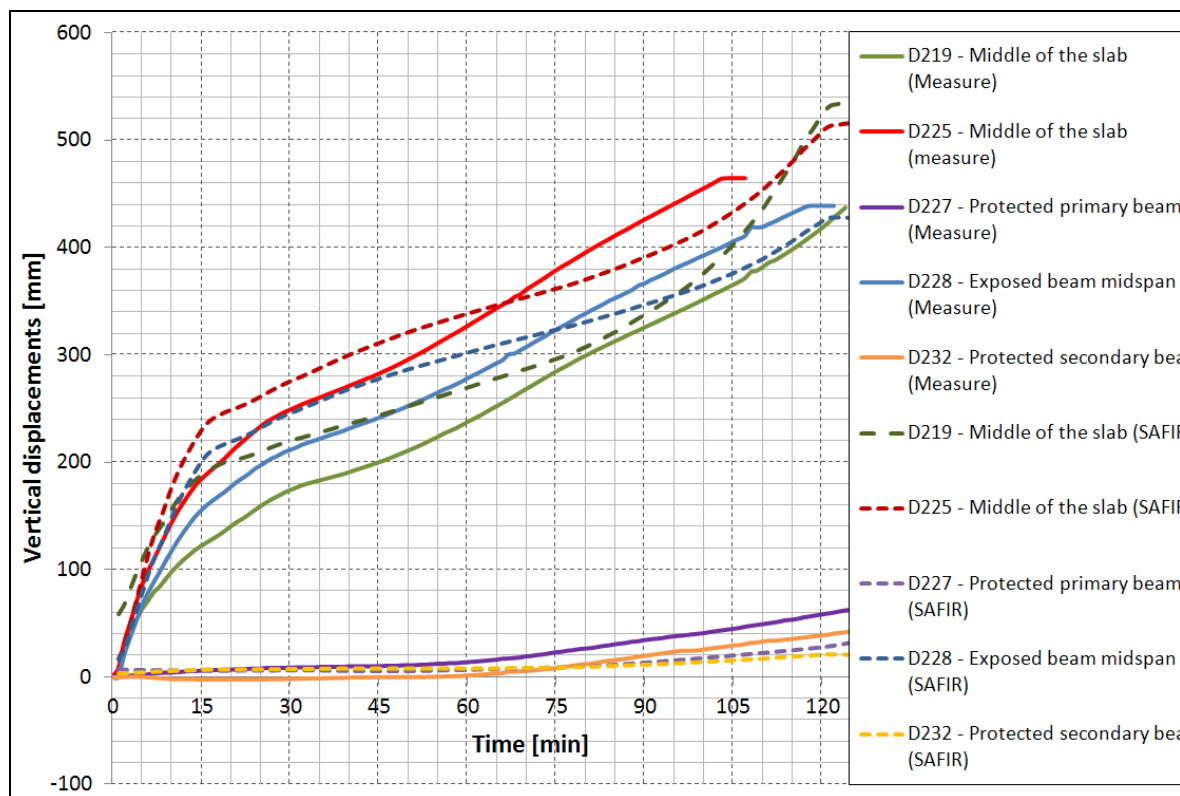


Σχήμα 8.25 : Σύγκριση της καμπτικής λειτουργίας (αριστερά) και της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης (δεξιά): οι δυνάμεις της μεμβράνης εντός της πλάκας

Τέλος, η σύγκριση των μετρηθείσων βυθίσεων με τις υπολογιζόμενες βυθίσεις με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες θέσεις της πλάκας (βλ. Σχήμα 8.26) απεικονίζεται στο Σχήμα 8.27.



Σχήμα 8.26 : Τοποθεσίες των μετρητών και των υπολογιζόμενων βυθίσεων



Σχήμα 8.27 : Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων της κατακόρυφης μετατόπισης

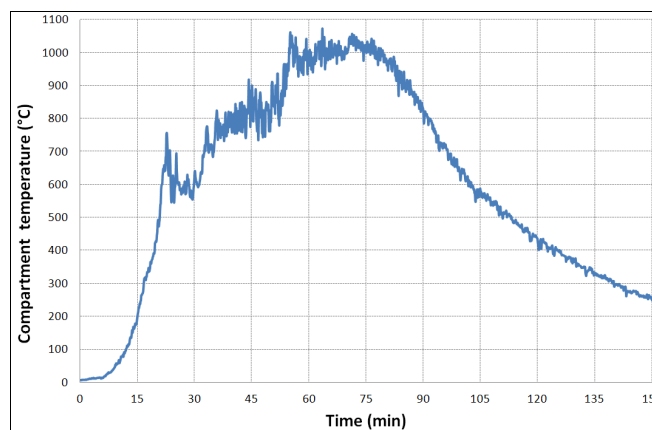
Παρατηρείται ένας καλός συσχετισμός των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και της πραγματικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επαληθεύει τις απλοποιήσεις που έγιναν, όπως π.χ. το γεγονός ότι η δυσκαμψία των στύλων κατά την κάμψη δεν λήφθηκε υπόψη και ότι για τη ραβδωτή πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοδύναμης επίπεδης πλάκας.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της δομικής συμπεριφοράς βασίστηκε στις μετρηθείσες τιμές των ιδιοτήτων των υλικών.

8.3.4 Το λογισμικό SAFIR στο πείραμα FIBER

8.3.4.1 Πυροθερμικό φορτίο

Στο πείραμα Ulster όλες οι θερμικές αναλύσεις έγιναν με χρήση της μετρηθείσας θερμοκρασίας στο μέσο του διαμερίσματος, βλ. Σχήμα 8.28, έτσι ώστε οι αναλύσεις να είναι επικεντρωμένες στην ικανότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της πλάκας του λογισμικού SAFIR με βάση την πραγματική καμπύλη θερμοκρασίας στο διαμέρισμα.



Σχήμα 8.28 : Καμπύλη μετρηθείσας θερμοκρασίας στο μέσο του διαμερίσματος

8.3.4.2 Θερμική ανάλυση: Αριθμητικά μοντέλα και κύρια αποτελέσματα

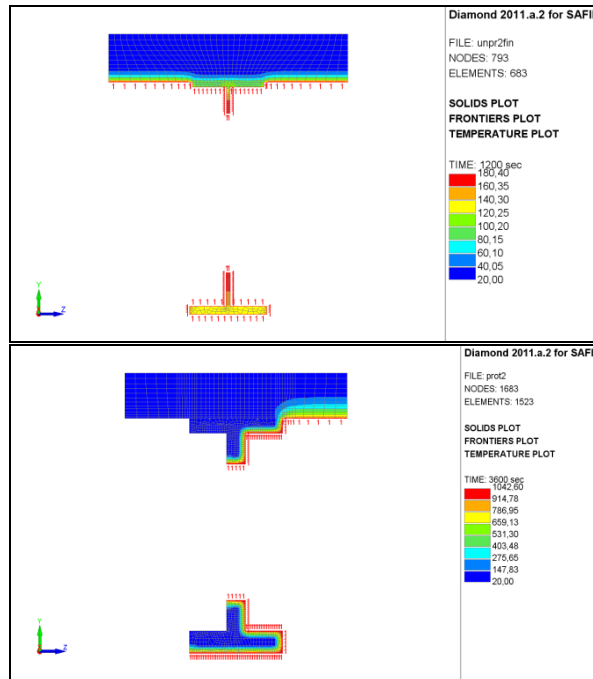
Το λογισμικό SAFIR έχει χρησιμοποιηθεί για τη θερμική ανάλυση των μεταλλικών προφίλ και της πλάκας. Τα μεταλλικά προφίλ είναι προφίλ κυψελωτών δοκών. Καθώς η διατομή που υπόκειται σε θερμική ανάλυση εδώ χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως η διατομή πεπερασμένου στοιχείου δοκού στις επόμενες δομικές αναλύσεις, λαμβάνεται υποθετικά η διατομή η οποία διέρχεται από το κέντρο κυκλικού ανοίγματος, βλ. Σχήμα 8.29α. Στην πράξη, οι ορθές τάσεις του μοντέλου της δοκού δεν είναι δυνατό να εισέλθουν στους κορμούς που διαχωρίζουν δύο ανοίγματα.

Σε αυτά τα θερμικά μοντέλα των μεταλλικών προφίλ, η πλάκα σκυροδέματος μοντελοποιήθηκε έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη την ικανότητά τους να απορροφούν θερμότητα. Το σκυρόδεμα πάνω από το άνω πέλμα του μεταλλικού προφίλ λήφθηκε υπόψη μόνο για τη θερμική ανάλυση και δεν παρουσιάζει μηχανική αντοχή (καθώς το σκυρόδεμα ελέγχεται σε ξεχωριστό μοντέλο από τα στοιχεία κελύφους). Τα μεταλλικά προφίλ και η κάτω πλευρά της πλάκας εκτέθηκαν στη μετρηθείσα θερμοκρασία της πυρκαγιάς στο μέσο του διαμερίσματος, ενώ η άνω πλευρά της πλάκας παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C σε όλη τη διάρκεια των υπολογισμών.

Οι ανώτερες θερμοκρασίες στις μη μονωμένες διατομές είναι πολύ υψηλότερες από την κρίσιμη θερμοκρασία για τις κυψελωτές δοκούς αυτού του τύπου. Στην πράξη, κατά τη δομική ανάλυση αυτών των δοκών με χρήση στοιχείων κελύφους, είναι πιθανό να παρατηρηθούν αστάθειες (κυρίως λυγισμός του κορμού ή λυγισμός της διατομής) σε θερμοκρασίες περίπου 600°C. Συνεπώς, το δομικό μοντέλο για

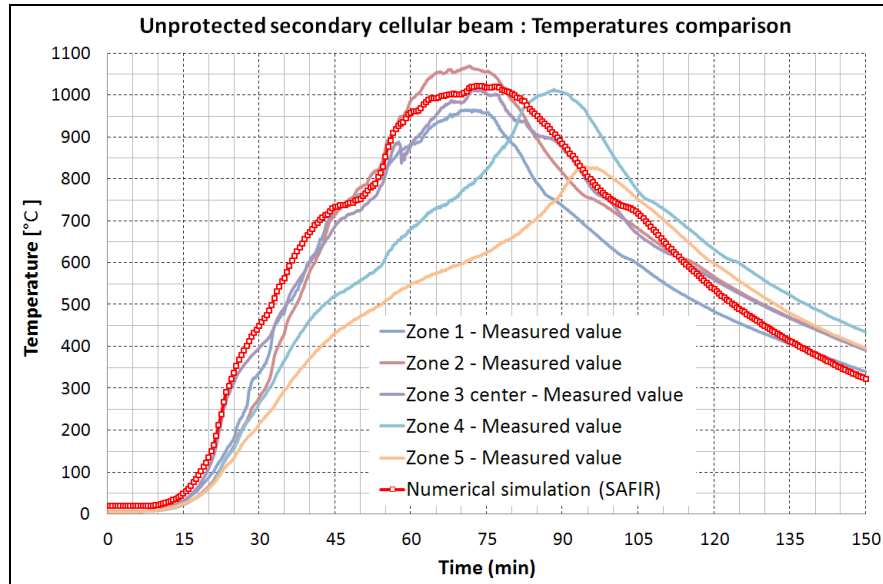
τις μη μονωμένες διατομές θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι η συμπεριφορά τους επηρεάζεται από τον λυγισμό του κορμού.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος ώστε να λαμβάνεται υπόψη η παραπάνω συμπεριφορά, ενώ διατηρούνται παράλληλα τα στοιχεία δοκού στο δομικό μοντέλο, είναι η προσομοίωση να πραγματοποιηθεί με τη χρήση τροποποιημένου μεταλλικού υλικού για το κάτω πέλμα των μη μονωμένων δοκών. Αυτό το τροποποιημένο μεταλλικό υλικό διαθέτει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τον χάλυβα κατά EN1993-1-2 σε θερμοκρασίες κάτω των 500°C, ενώ χάνει τις μηχανικές αυτές ιδιότητες μη αναστρέψιμα μεταξύ των 500°C και 600°C, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο αστάθειας.



Σχήμα 8.29 : Έκθεση στην πυρκαγιά : α) των μη μονωμένων δευτερευουσών δοκών με βάση το υβριδικό μοντέλο (δεξιά) και β) των μονωμένων δοκών (αριστερά)

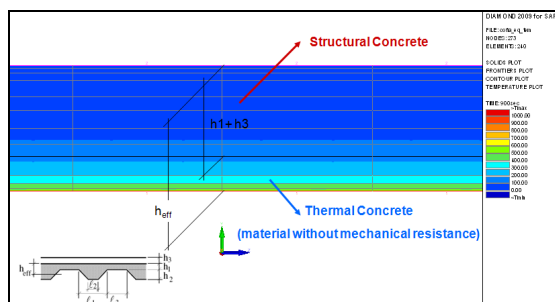
Η υπολογιζόμενη θερμοκρασία στις δευτερεύουσες μη μονωμένες δοκούς συγκρίνεται στο Σχήμα 8.30 με τη μετρηθείσα θερμοκρασία σε διάφορες επιμήκειες ζώνες της δοκού. Η σύγκριση καταδεικνύει χαμηλότερη θερμοκρασία στα άκρα της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 8.30 : Σύγκριση των υπολογιζόμενων και των μετρηθείσων θερμοκρασιών στις μη μονωμένες δευτερεύουσες δοκούς

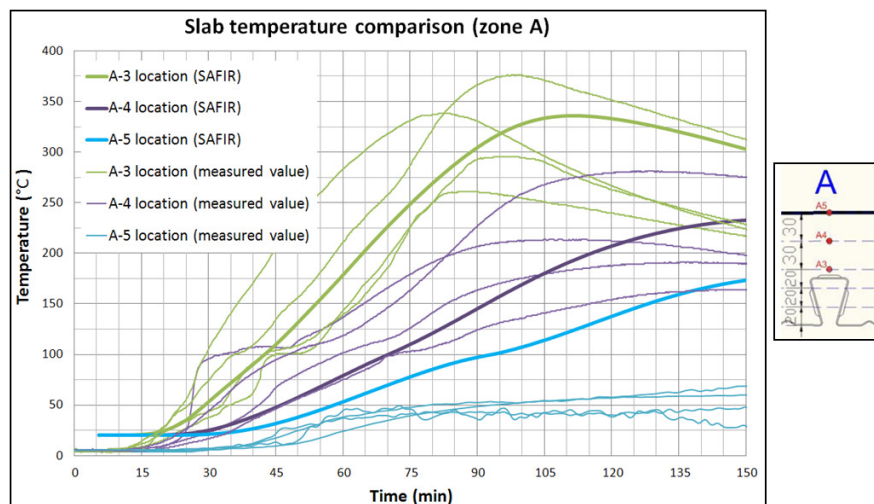
Όσον αφορά τα μονωμένα τμήματα, το μονωτικό υλικό που λήφθηκε υπόψη μόνο για τη θερμική ανάλυση, λήφθηκε επίσης υπόψη για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι μονωμένες μεταλλικές διατομές επηρεάζονται από την πυρκαγιά στη μία πλευρά και στο κάτω πέλμα, ενώ η άλλη πλευρά του προφίλ, μπροστά από τον τοίχο, θεωρείται ότι είναι αδιαπέρατο όριο, βλ. Σχήμα 8.29β. Οι θερμοκρασίες στα μονωμένα τμήματα παρέμειναν κάτω από την τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας για αυτές τις κυνελωτές δοκούς. Συνεπώς, σε όλη τη διάρκεια των υπολογισμών, το πρότυπο μεταλλικό υλικό με μηχανικές ιδιότητες χάλυβα κατά EN1993-1-2 λήφθηκε υπόψη για το κάτω πέλμα των μονωμένων μεταλλικών προφίλ. Η πυροπροστασία των κυνελωτών δοκών είναι βασική παράμετρος η οποία καθορίζει τη διασφάλιση της θετικής επίδρασης της μεμβράνης σταθεροποίησης της σύμμικτης πλάκας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Για τη θερμική ανάλυση στην πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοδύναμου πάχους της πλάκας όπως ορίζεται στον Ευρωκώδικα EN1994-1-2. Οι εσοχές 51 mm και το στρώμα σκυροδέματος 69 mm που καλύπτει τις εσοχές αντικαταστήθηκαν από επίπεδη πλάκα ισοδύναμου πάχους 110 mm, βλ. Σχήμα 8.31. Αυτό το ισοδύναμο πάχος αναπαριστά το ύψος της πλάκας που λαμβάνεται υπόψη για τη θερμική απόκριση. Η πλάκα εκτέθηκε σε πυρκαγιά στην κάτω πλευρά της, ενώ η άνω πλευρά παρέμεινε σε επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας 20°C. Το ύψος για όλους τους μηχανικούς υπολογισμούς ορίστηκε ως το ύψος του σκυροδέματος πάνω από το μεταλλικό υπόστρωμα.



Σχήμα 8.31 : Υπολογισμός του ισοδύναμου πάχους για τη θερμική ανάλυση της πλάκας

Στο Σχήμα 8.32α απεικονίζεται η σύγκριση των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών με τις μετρηθείσες θερμοκρασίες στην πλάκα πάνω από την εσοχή. Στις τρεις θεωρημένες θέσεις πάνω από την εσοχή (A-3, A-4 και A-5, βλ. Σχήμα 8.32β) δίνονται τέσσερις μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τέσσερις θέσεις. Η ζώνη A-4 αντιστοιχεί στην θέση των μεταλλικών ράβδων οπλισμού.



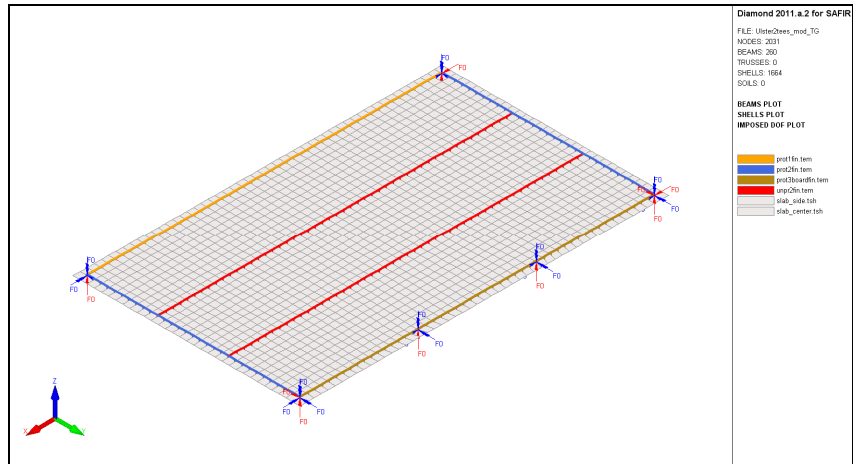
Σχήμα 8.32 : Ζώνες μεταφοράς θερμότητας A1, A2 A3 και A4 σε ύψος A-3, A-4 και A-5 στη διατομή. Σύγκριση των μετρηθείσων και των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών στην πλάκα ισοδύναμου πάχους

Οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μετρηθείσες θερμοκρασίες, εκτός από τη θέση της άνω πλευράς της πλάκας (A-5), όπου οι θερμοκρασίες είναι σχετικά υπερεκτιμημένες. Καθώς το Σημείο A-4 αντιστοιχεί στην τοποθεσία των μεταλλικών ράβδων οπλισμού, οι θερμοκρασίες στις μεταλλικές ράβδους προσεγγίζονται με μεγάλη ακρίβεια στα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου ομοιόμορφου πάχους.

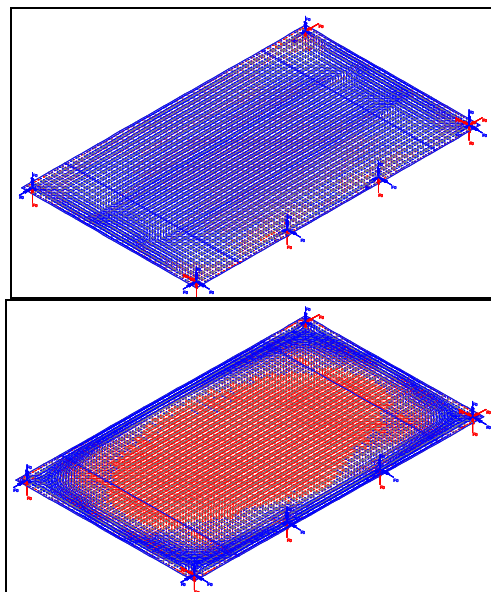
8.3.4.3 Δομική ανάλυση

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκε με το λογισμικό SAFIR. Η κατασκευή μοντελοποιήθηκε με τη χρήση στοιχείων δοκού για τις δοκούς και στοιχείων κελύφους για την πλάκα. Οι ακραίες δοκοί είναι απλά εδραζόμενες στους στύλους, όπως δείχνει το Σχήμα 8.33. Η πλάκα και οι δοκοί είναι αξονικά δεσμευμένες.

Η δομική συμπεριφορά σε θερμοκρασία δωματίου είναι κυρίως καμπτική, ενώ κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αναπτύσσεται η δράση της μεμβράνης σταθεροποίησης. Οι δυνάμεις της μεμβράνης σε θερμοκρασία δωματίου και υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.34.



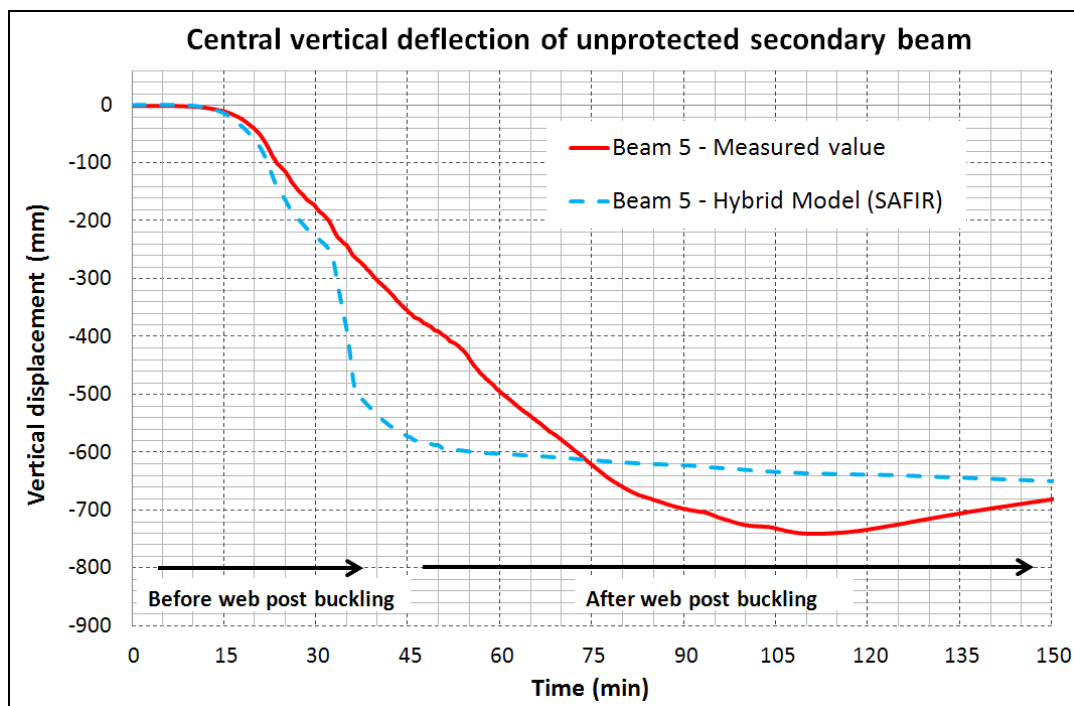
Σχήμα 8.33 : Μοντέλο δομικής ανάλυσης



Σχήμα 8.34 : Σύγκριση της καμπτικής λειτουργίας (αριστερά) και της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης (δεξιά): οι δυνάμεις της μεμβράνης εντός της πλάκας

Καθώς το πεπερασμένο στοιχείο δοκού δεν επιτρέπει να ληφθούν υπόψη οι αστάθειες λόγω του λυγισμού του κορμού, ο τρόπος για να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά της πλάκας είναι με τη χρήση ειδικού υλικού για το κάτω πέλμα των μη μονωμένων δοκών. Αυτό το τροποποιημένο μεταλλικό υλικό (STEELEC3_WPB) επιτρέπει τη μοντελοποίηση της δομικής συμπεριφοράς σε όλη τη διάρκεια του πειράματος με έναν μόνο αριθμητικό υπολογισμό.

Τέλος, η σύγκριση των μετρηθείσων βυθίσεων με τις υπολογιζόμενες βυθίσεις με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου στο μέσο των μη μονωμένων δευτερευουσών δοκών απεικονίζεται στο Σχήμα 8.35.



Σχήμα 8.35 : Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων της κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο της μη μονωμένης δοκού με βάση το υβριδικό μοντέλο

Μετά από χρονικό διάστημα 30 λεπτών, η θερμοκρασία στο κάτω πέλμα των μη μονωμένων προφίλ υπερβαίνει τους 500°C. Τη στιγμή αυτή πραγματοποιείται ο δομικός υπολογισμός με βάση το υβριδικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη το τροποποιημένο μεταλλικό υλικό, το κάτω πέλμα χάνει ταχύως όλες τις μηχανικές του ιδιότητες και η βύθιση αυξάνεται. Σε υψηλές θερμοκρασίες, μετά από τον λυγισμό του κορμού, το υβριδικό μοντέλο προσφέρει έναν καλό υπολογισμό κατά προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της πλάκας, η οποία δεν είναι δυνατό να ανακτήσει τη δυσκαμψία της, με αποτέλεσμα η βύθιση να παραμένει σημαντική μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.

Παρατηρείται ένας καλός συσχετισμός των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και της πραγματικής συμπεριφοράς. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επαληθεύει τις απλοποιήσεις που έγιναν, όπως π.χ. το γεγονός ότι η δυσκαμψία των στύλων κατά την κάμψη δεν λήφθηκε υπόψη και ότι για τη ραβδωτή πλάκα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ισοδύναμης επίπεδης πλάκας. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της δομικής συμπεριφοράς βασίστηκε στις μετρηθείσες τιμές των ιδιοτήτων των υλικών.

Το δομικό μοντέλο SAFIR αποδείχθηκε ικανό να προβλέψει σε αποδεκτό βαθμό ακριβείας τη σύνθετη συμπεριφορά των κυψελωτών δοκών κατά την επίδραση της μεμβράνης σταθεροποίησης. Η χρήση τροποποιημένου μεταλλικού υλικού για το κάτω πέλμα αποτελεί απλουστευτικό αλλά παράλληλα αποτελεσματικό τρόπο ώστε να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο αστάθειας που εμφανίζουν σύνθετα μοντέλα όπως αυτό, στο οποίο τα στοιχεία δοκού είναι αυτά που προτείνονται για τις δοκούς. Θα ήταν επίσης δυνατό ένα λεπτομερές μοντέλο των μεταλλικών κυψελωτών δοκών με χρήση στοιχείων κελύφους, αλλά το μοντέλο αυτό θα ήταν πολύ δύσκολο για να εφαρμοστεί πρακτικά.

8.4 Παραμετρική μελέτη με χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου

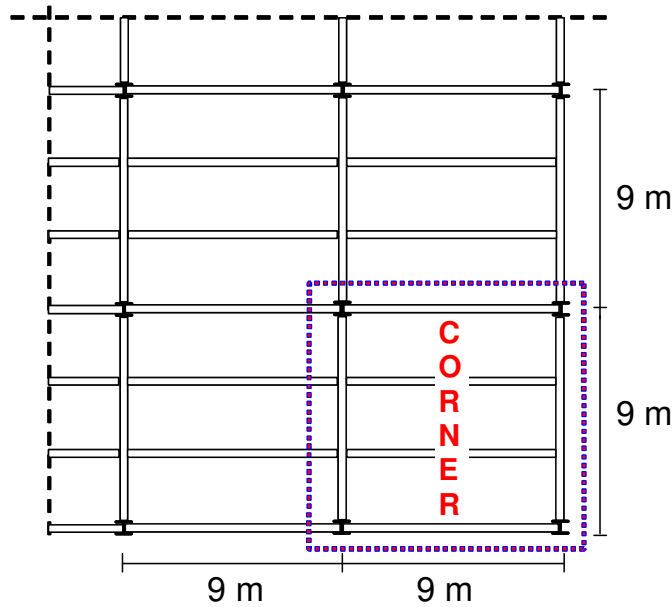
8.4.1 Εισαγωγή δεδομένων για την παραμετρική μελέτη

Μια παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω διερεύνηση της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού σε όλο το φάσμα εφαρμογής της. Ωστόσο, η πλήρης παραμετρική μελέτη προϋποθέτει μεγάλο αριθμό αριθμητικών προσομοιώσεων, το οποίο θα σήμαινε τεράστιο υπολογιστικό κόστος. Κατά συνέπεια, το πεδίο εφαρμογής της παραμετρικής μελέτης περιορίστηκε στις ακόλουθες βασικές παραμέτρους:

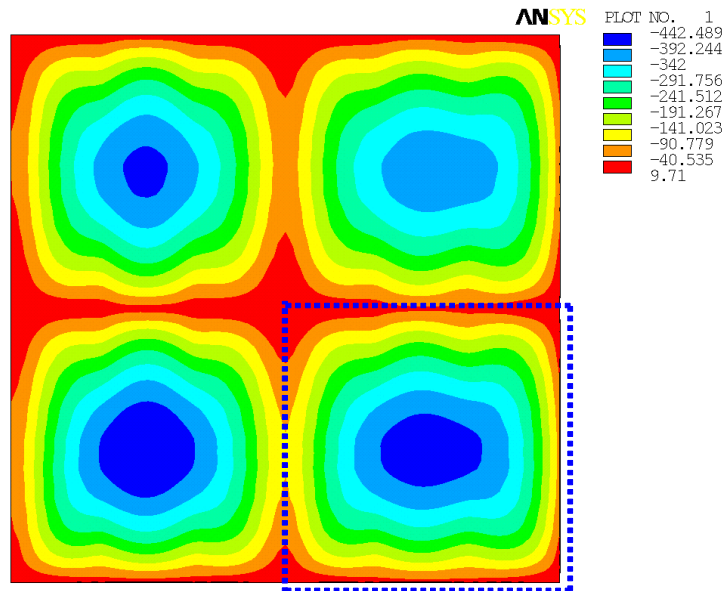
- Το μέγεθος της πλάκας,
- Το ποσοστό εξάντλησης
- Τη διάρκεια της πυρκαγιάς

Πρέπει να επισημανθεί ότι αυτή η παραμετρική μελέτη επικεντρώνεται μόνο στη συμπεριφορά των σύμμικτων πλακών χάλυβα-σκυροδέματος που εκτίθενται στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου.

Πραγματοποιήθηκε ένας προκαταρκτικός αριθμητικός υπολογισμός για σύμμικτη πλάκα επιφάνειας 18 m επί 18 m, που αποτελείται από δύο ανοίγματα 9 m στην κάθε διεύθυνση, (βλ. Σχήμα 8.36(α)). Ο βασικός στόχος αυτής της προκαταρκτικής ανάλυσης ήταν ο προσδιορισμός των κατάλληλων συννοριακών συνθηκών, ειδικότερα των συνθηκών δέσμευσης της πλάκας που θα πρέπει να υιοθετηθούν, όταν το μοντέλο περιορίζεται στο ένα άνοιγμα κατά την παραμετρική μελέτη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.36(β), η προβλεπόμενη βύθιση του γωνιακού φατώματος με δύο εσωτερικές πλευρές είναι το πιο σημαντικό μεταξύ των τεσσάρων φατωμάτων (τα υπόλοιπα τρία έχουν τρεις ή τέσσερις εσωτερικές πλευρές). Κατά συνέπεια, όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις κατά την παραμετρική μελέτη αντιστοιχούν στις συνθήκες δέσμευσης που είναι κατάλληλες για γωνιακό άνοιγμα με δύο πλευρικά δεσμευμένα άκρα, ώστε να επιτυγχάνεται η προσομοίωση της συνέχειας της πλάκας.



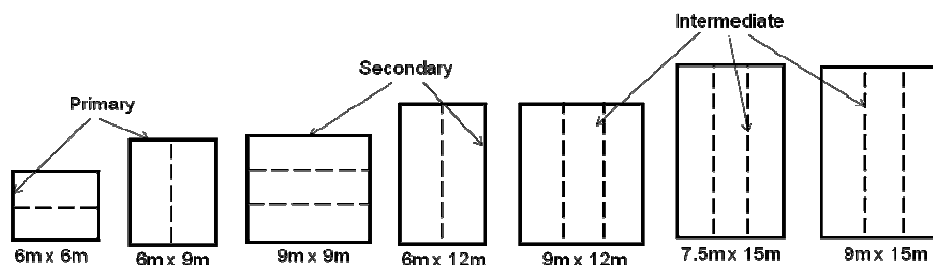
(α) Δομικό φάτνωμα πραγματικού κτιρίου



(β) Μοντέλο ANSYS

Σχήμα 8.36 Αριθμητικός υπολογισμός των τεσσάρων φατνωμάτων της πλάκας

Στην παραμετρική μελέτη εξετάστηκαν επτά μεγέθη ανοίγματος: 6×6 m, 6×9 m, 6×12 m, 9×9 m, 9×12 m, 9×15 m και 7.5×15 m (Σχήμα 8.37). Για όλες αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μοντέλο προσομοίωσης της συνέχειας της σύμμικτης πλάκας στις δύο πλευρές. Όλες οι περιμετρικές δοκοί θεωρήθηκαν μονωμένες, ενώ οι εσωτερικές δευτερεύουσες δοκοί θεωρήθηκαν μη μονωμένες.



Σχήμα 8.37 Πλάκες που εξετάστηκαν στην παραμετρική μελέτη

Στη μελέτη λήφθηκαν υπόψη τρεις διαφορετικοί βαθμοί μεταβλητής δράσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Αυτές οι τιμές της μεταβλητής δράσης αντιστοιχούν στις τιμές που χρησιμοποιούνται συνήθως στο σχεδιασμό σε θερμοκρασία δωματίου στην κατασκευαστική αγορά της Γαλλίας. Παρόλ' αυτά, εάν χρησιμοποιούνταν άλλες τιμές φορτίου, δεν θα επηρεαζόταν η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού, γιατί το φορτίο που εφαρμόζεται αποτελεί απλώς δεδομένο που εισάγεται και ορίζεται από τους μελετητές. Στην παραμετρική μελέτη εξετάστηκαν αριθμητικά μόνο ο συνδυασμός 1 και ο συνδυασμός 3. Ο συνδυασμός 2 λήφθηκε υπόψη ως μέση τιμή μεταξύ του συνδυασμού 1 και 3.

Πίνακας 8.1 Τιμή των μόνιμων και μεταβλητών δράσεων που εξετάστηκαν.

Υπόθεση	Μόνιμη δράση G	Μεταβλητή δράση Q
1	Ίδιο βάρος + 1.25 kN/m ²	2.5 kN/m ²
2	Ίδιο βάρος + 1.25 kN/m ²	3.5 kN/m ²
3	Ίδιο βάρος + 1.25 kN/m ²	5.0 kN/m ²

Εξετάστηκαν τέσσερις πρότυπης διάρκειας πυρκαγιές, δηλαδή 30, 60, 90 και 120 λεπτά. Το ύψος της σύμμικτης πλάκας σε κάθε περίπτωση βασίστηκε στο ελάχιστο αναγκαίο ύψος για την εκπλήρωση των κριτηρίων μόνωσης στις αντίστοιχες διάρκειες πυρκαγιές. Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας ως βάση τη χρήση τραπεζοειδούς προφίλ μεταλλικού υποστρώματος ύψους 60mm, τα αντίστοιχα ύψη που προέκυψαν για τη σύμμικτη πλάκα ήταν 120, 130, 140 και 150 mm. Η γεωμετρία του τραπεζοειδούς προφίλ βασίστηκε στο προϊόν COFRAPLUS 60, το περισσότερο σύνηθες προφίλ υποστρώματος στην αγορά της Γαλλίας. Αυτό το μεταλλικό υπόστρωμα διαθέτει στενές εσοχές σε σχέση με άλλα προφίλ, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο προφίλ να είναι περισσότερο δυσμενής και η μηχανική αντοχή να είναι μειωμένη. Κατά συνέπεια, αν η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού επαληθευτεί για αυτό το μεταλλικό υπόστρωμα, το συμπέρασμα θα είναι συντηρητικό για άλλα είδη μεταλλικών υποστρωμάτων.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 112 αριθμητικές προσομοιώσεις υπό τον συνδυασμό όλων των παραμέτρων που περιγράφηκαν παραπάνω.

Πριν από την ανάλυση της συμπεριφοράς στην πυρκαγιά των διάφορων φαινομένων της πλάκας, εφαρμόστηκαν προκαταρκτικές μελέτες σύμφωνα με το EN 1994-1-1⁽³⁴⁾, ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος των δομικών στοιχείων όλων των σύμμικτων πλακών. Κατά τις μελέτες αυτές, όλες οι μεταλλικές δοκοί θεωρήθηκαν ότι είναι συνδεδεμένες στη σύμμικτη πλάκα με ήλους διάτμησης. Όσον αφορά τις ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, η ποιότητα του σκυροδέματος ήταν C30/37 με αντοχή θλίψης 30 MPa. Το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης ήταν ποιότητας χάλυβα B500. Η ποιότητα χάλυβα των δοκών ήταν κυρίως S235.

Μια σημαντική παράμετρος για τη συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας στην πυρκαγιά, όταν εφαρμόζεται η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού, είναι οι διαστάσεις του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης που χρησιμοποιείται στη σύμμικτη πλάκα. Καθώς η παραμετρική μελέτη πραγματοποιήθηκε για την επαλήθευση της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού, οι διαστάσεις όλων των μεταλλικών πλεγμάτων ενίσχυσης προήλθαν απευθείας από αυτή τη μέθοδο. Επιπλέον, η απόσταση του άξονα (δηλαδή η απόσταση ανάμεσα στον άξονα της επιμήκους ενίσχυσης και της μη εκτεθειμένης πλευράς της πλάκας σκυροδέματος) λήφθηκε ως 45 mm σε όλες τις περιπτώσεις.

Η θέρμανση των μονωμένων περιμετρικών δοκών και στύλων αναμένεται επίσης να επηρεάσει τη συμπεριφορά της πλάκας. Στην παραμετρική μελέτη οι θερμικές ιδιότητες της μόνωσης χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο έτσι ώστε η θερμοκρασία των στοιχείων αυτών στην προβλεπόμενη διάρκεια της πυρκαγιάς να διατηρείται γενικά στους 550 °C. Ωστόσο, αν η θερμοκρασία αυτή σημειωθεί πριν από την ολοκλήρωση της προβλεπόμενης διάρκειας της πυρκαγιάς, η θέρμανση της αντίστοιχης μεταλλικής δοκού διατηρείται στους 550 °C σε κάθε χρονική στιγμή μετά από τη στιγμή κατά την οποία σημειώθηκε αυτή η θερμοκρασία.

Οι λεπτομέρειες σχετικά με τις διαστάσεις των μεταλλικών δοκών και του πλέγματος που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε περίπτωση δίνονται στους Πίνακες 8.2 έως 8.5. Οι πίνακες περιλαμβάνουν επίσης το ποσοστό διατμητικής σύνδεσης των σύμμικτων δοκών και την ποιότητα χάλυβα, όταν διαφοροποιείται από S235. Οι κύριες δοκοί, οι δευτερεύουσες δοκοί, η επιφάνεια του πλέγματος ενίσχυσης σε mm²/m και το ποσοστό διατμητικής σύνδεσης των σύμμικτων δοκών συμβολίζονται στους πίνακες ως B1, B2, S και DC, αντίστοιχα. Επιπλέον, το άνοιγμα 1 δείχνει το μήκος των δευτερευουσών δοκών και το άνοιγμα 2 των κύριων δοκών. Για κάθε περίπτωση, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μία με την ύπαρξη μηχανικής σύνδεσης μεταξύ της πλάκας και των στύλων (για παράδειγμα, με τη χρήση πρόσθετων ράβδων ενίσχυσης) και μία χωρίς αυτή τη μηχανική σύνδεση.

Πίνακας 8.2 Επιλεγμένες παράμετροι πλακών για σχεδιασμό πυραντίστασης 30 λεπτών

R 30 Ύψος = 120 mm		Ανοιγμα1 [m]							
Ανοιγμα2 [m]	Φορτίο [kN/m ²]	Ανοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]		Ανοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]	
6	2.5+1.25	B1	IPE300	B1	IPE360	B1	IPE450		
			DC: 0.9		DC: 1.0		DC: 1.0		
		B2	IPE240	B2	IPE360	B2	IPE450		
	DC: 0.8		DC: 0.7		DC: 0.7				
	S	84	S	99	S	142			
	5.0+1.25	B1	IPE360	B1	IPE450	B1	IPE500		
DC: 0.9			DC: 1.0		DC: 1.0				
B2		IPE270	B2	IPE400	B2	IPE500			
	DC: 0.7	DC: 0.6		DC: 0.6					
S	99	S	142	S	142				
7.5	2.5+1.25							B1	IPE600
									DC: 1.0
								B2	IPE550
	5.0+1.25								DC: 0.7
								S	142
								B1	IPE600
							-S355		
							DC: 1.0		
						B2	IPE600		
							DC: 0.7		
						S	142		
9	2.5+1.25	B1	IPE550	B1	IPE600	B1	IPE600		
			DC: 0.6		DC: 0.8		DC: 1.0		
		B2	IPE360	B2	IPE450	B2	IPE500		
	DC: 0.7		DC: 0.7		DC: 0.7				
	S	99	S	142	S	142			
	5.0+1.25	B1	IPE550	B1	IPE600	B1	IPE600		
-S355			-S355		-S355				
		DC: 0.6		DC: 0.8		DC: 1.0			
B2	IPE400	B2	IPE500	B2	IPE600				
	DC: 0.6		DC: 0.6		DC: 0.7				
S	142	S	142	S	142				

Πίνακας 8.3 Επιλεγμένες παράμετροι πλακών για σχεδιασμό πυραντίστασης 60 λεπτών

R 60 Υψος = 130 mm		Ανοίγμα1 [m]							
Ανοίγμα2 [m]	Φορτίο [kN/m ²]	Ανοίγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]		Ανοίγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]	
6	2.5+1.25	B1	IPE300	B1	IPE360	B1	IPE450		
			DC: 0.8		DC: 0.9		DC: 1.0		
		B2	IPE240	B2	IPE360	B2	IPE450		
	DC: 0.8		DC: 0.8		DC: 0.7				
	S	115	S	193	S	284			
	5.0+1.25	B1	IPE360	B1	IPE450	B1	IPE500		
			DC: 0.8		DC: 0.9		DC: 1.0		
		B2	IPE270	B2	IPE400	B2	IPE500		
	DC: 0.7		DC: 0.6		DC: 0.5				
S	151	S	227	S	347				
7.5	2.5+1.25						B1	IPE600	
							DC: 1.0		
							B2	IPE550	
	DC: 0.7								
	S	347							
	5.0+1.25							B1	IPE600-S355
DC: 1.0									
B2								IPE600	
DC: 0.6									
S	433								
9	2.5+1.25			B1	IPE550	B1	IPE600	B1	IPE600
					DC: 0.5		DC: 0.7		DC: 0.9
					B2		IPE360		B2
	DC: 0.8	DC: 0.7	DC: 0.7						
	S	166	S	245	S	311			
	5.0+1.25			B1	IPE550-S355	B1	IPE600-S355	B1	IPE750 x 173
					DC: 0.5		DC: 0.7		DC: 0.9
					B2		IPE400		B2
	DC: 0.6	DC: 0.5	DC: 0.6						
S	210	S	297	S	393				

Πίνακας 8.4 Επιλεγμένες παράμετροι πλακών για σχεδιασμό πυραντίστασης 90 λεπτών

R 90 Υψος = 140 mm		Άνοιγμα1 [m]							
Άνοιγμα2 [m]	Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]		Άνοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]	
6	2.5+1.25	B1	IPE300	B1	IPE360	B1	IPE450	B1	IPE450
			DC: 0.7		DC: 1.0		DC: 1.0		
		B2	IPE240	B2	IPE360	B2	IPE450	B2	IPE450
	DC: 0.7		DC: 0.8		DC: 0.7				
	S	119	S	187	S	291			
	5.0+1.25	B1	IPE360	B1	IPE450	B1	IPE500	B1	IPE500
			DC: 0.7		DC: 1.0		DC: 1.0		
		B2	IPE270	B2	IPE400	B2	IPE500	B2	IPE500
	DC: 0.7		DC: 0.6		DC: 0.6				
S	146	S	233	S	355				
7.5	2.5+1.25							B1	IPE600
									DC: 0.9
								B2	IPE550
								DC: 0.7	
							S	393	
	5.0+1.25								B1
								-S355	DC: 0.9
							B2	IPE600	
							DC: 0.6		
						S	473		
9	2.5+1.25		B1	IPE550	B1	IPE600	B1	IPE600	-S355
				DC: 0.5		DC: 0.6		DC: 0.7	
			B2	IPE360	B2	IPE450	B2	IPE550	DC: 0.7
			DC: 0.8		DC: 0.7		DC: 0.7		
		S	177	S	252	S	340		
	5.0+1.25		B1	IPE550-S355	B1	IPE600-S355	B1	IPE750	x 173
				DC: 0.5		DC: 0.6		DC: 0.7	
			B2	IPE400	B2	IPE500	B2	IPE600	
			DC: 0.6		DC: 0.6		DC: 0.6		
	S	215	S	311	S	433			

Πίνακας 8.5 Επιλεγμένες παράμετροι πλακών για σχεδιασμό πυραντίστασης 120 λεπτών

R 120 Υψος = 140 mm		Ανοιγμα 1 [m]								
Ανοιγμα α2 [m]	Φορτίο [kN/m ²]	Ανοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]		Ανοιγμα2 [m]		Φορτίο [kN/m ²]		
6	2.5+1.25	B1	IPE300	B1	IPE360	B1	IPE450			
			DC: 0.6		DC: 1.0		DC: 1.0			
		B2	IPE240	B2	IPE360	B2	IPE450			
			DC: 0.7		DC: 0.8		DC: 0.7			
		S	132	S	204	S	318			
		5.0+1.25	B1	IPE360	B1	IPE450	B1			IPE500
	DC: 0.6			DC: 1.0		DC: 1.0				
	B2		IPE270	B2	IPE400	B2	IPE500			
			DC: 0.7		DC: 0.6		DC: 0.6			
	S		161	S	252	S	393			
	7.5		2.5+1.25							B1
									DC: 0.8	
						B2	IPE550			
5.0+1.25									DC: 0.7	
								S	417	
								B1	IPE600	
9	2.5+1.25			B1	IPE550	B1	IPE550-S355	B1	IPE600	
					DC: 0.4		DC: 0.6		-S355	
				B2	IPE360	B2	IPE450	B2	IPE550	
	5.0+1.25				DC: 0.8		DC: 0.7		DC: 0.7	
				S	193	S	277	S	377	
				B1	IPE550-S355	B1	IPE600-S355	B1	IPE750	
			DC: 0.4		DC: 0.6		x 173			
		B2	IPE400	B2	IPE500	B2	IPE600			
			DC: 0.6		DC: 0.6		DC: 0.6			
		S	252	S	340	S	457			

8.4.2 Εισαγωγή δεδομένων για την παραμετρική μελέτη

Τα αποτελέσματα από την παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των δύο παρακάτω θεμάτων, που είναι σημαντικά για την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού

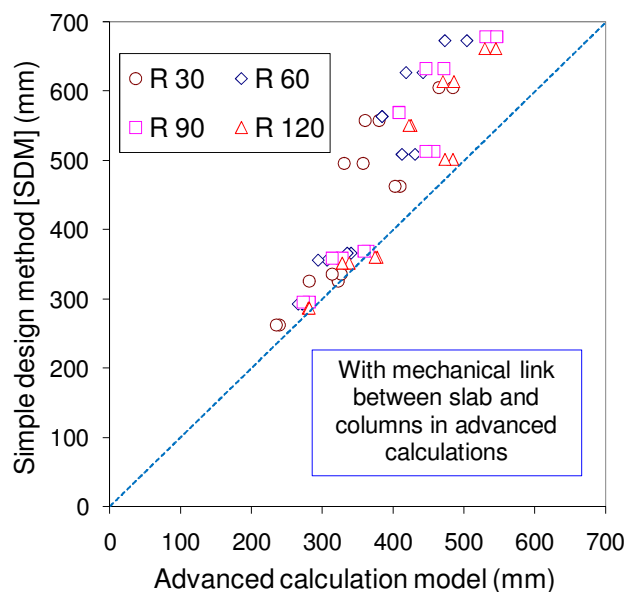
- Μέγιστη βύθιση της πλάκας
- Μέγιστη μηχανική επιμήκυνση του οπλισμού ενίσχυσης

8.4.2.1 Μέγιστη βύθιση της πλάκας

Όπως περιγράφεται στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού (Κεφάλαιο 5) και όπως αποδείχτηκε κατά τη διάρκεια πειράματος πυρκαγιάς (βλ. Κεφάλαιο 7), είναι πιθανό να εμφανιστεί μεγάλη βύθιση της πλάκας πριν από το σημείο κατάρρευσης. Καθώς η αντοχή της πλάκας εξαρτάται από τη δράση εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης, αυτή η μεγάλη βύθιση είναι αναγκαία για την ενεργοποίηση του φέροντα αυτού μηχανισμού. Ωστόσο, οι μεγάλες βυθίσεις της πλάκας ενδέχεται να προκαλέσουν απώλεια της ακεραιότητας εξαιτίας του σχηματισμού ρωγμών στο

σκυρόδεμα, μεγάλες παραμορφώσεις στον οπλισμό και πιθανή μεταβολή της συνθήκης φόρτισης εφόσον η πλάκα υποστεί μεγάλη κλίση. Οι Ρυθμιστικές Αρχές διατηρούν επίσης τις επιφυλάξεις τους σχετικά με μεθόδους σχεδιασμού στις οποίες οι βυθίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από παραδοσιακά πειράματα πυρκαγιάς, παρόλο που βυθίσεις αυτού του είδους δεν σχετίζονται στην πραγματικότητα με την εξεταζόμενη μέθοδο σχεδιασμού της παρούσας έκδοσης. Επίσης, η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού θεωρεί ότι η δοκός στην περίμετρο των ζωνών σχεδιασμού παραμένει άκαμπτη. Στην πραγματικότητα, οι περιβάλλουσες δοκοί υφίστανται βύθιση όταν εκτεθούν σε πυρκαγιά. Συνεπώς, η παραμετρική μελέτη προσδίδει ιδιαίτερη προσοχή στις βυθίσεις για να διερευνήσει αυτά τα θέματα.

Στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού, ορίστηκε η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της βύθισης (βλ. παράγραφο 6.2.1) ώστε να προβλεφθεί η οριακή φέρουσα ικανότητα της πλάκας. Κατά συνέπεια, το πρώτο βήμα της παρούσας εξέτασης είναι να ελεγχθεί εάν αυτή η μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση συμπίπτει με την προβλεπόμενη βύθιση της προηγμένης υπολογιστικής μεθόδου. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της βύθισης που υπολογίστηκε στην αριθμητική ανάλυση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση σύμφωνα με τη απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού και τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.38 (με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων) και στο Σχήμα 8.39 (χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων). Επειδή η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού υιοθετεί κατακόρυφα δεσμευμένες περιφερειακές στηρίξεις και οι προηγμένοι υπολογισμοί του μοντέλου λαμβάνουν υπόψη τις εύκαμπτες περιφερειακές μεταλλικές δοκούς, η σύγκριση μεταξύ τους πραγματοποιήθηκε με τη συνολική βύθιση της πλάκας σε συνθήκες πυρκαγιάς να αφαιρείται από τη βύθιση των περιφερειακών δοκών.



Σχήμα 8.38 Σύγκριση της προβλεπόμενης βύθισης με βάση το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο με τη μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού, με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων

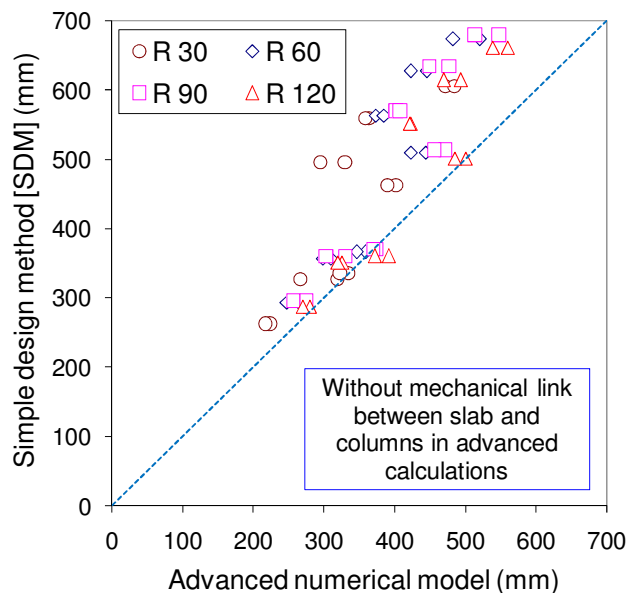
Από τη σύγκριση διαπιστώνεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση που χρησιμοποιείται στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού είναι συστηματικά μεγαλύτερη από τη μέγιστη προβλεπόμενη βύθιση της αριθμητικής ανάλυσης. Η διαφορά των δύο φαίνεται ότι αυξάνεται ως συνάρτηση των διαστάσεων της πλάκας. Στην πράξη, η φυσική σημασία της παραπάνω διαπίστωσης είναι ότι η

απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού προβλέπει χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα της πλάκας από το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο, για την ίδια τιμή βύθισης. Από αυτή την άποψη, η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να θεωρηθεί συντηρητική.

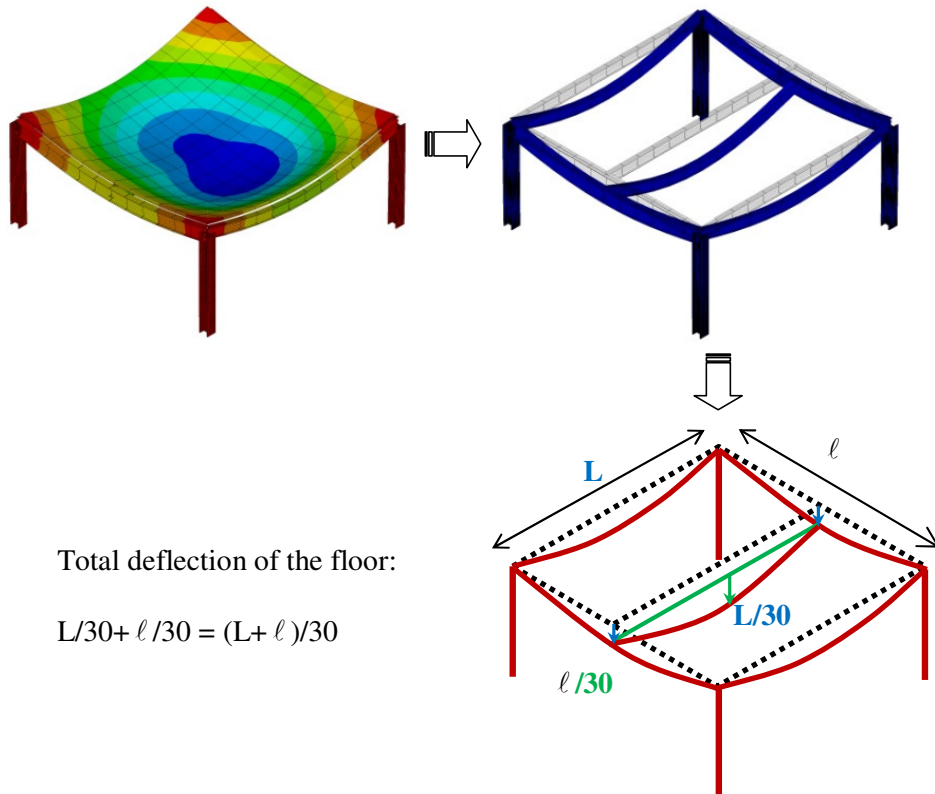
Κατά παράδοση, αρκετοί εθνικοί κανονισμοί πυρασφάλειας ορίζουν την τιμή της βύθισης σε $\text{άνοιγμα}/30$ ως κριτήριο αστοχίας ενός μεμονωμένου δομικού στοιχείου κατά τα πειράματα κάμψης (δοκού ή πλάκας) σε συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO⁽³⁸⁾. Στην περίπτωση των σύμμικτων πλακών που αποτελούνται από κύριες δοκούς, δευτερεύουσες δοκούς και πλάκες, η προτεινόμενη τιμή της συνολικής οριακής βύθισης μπορεί να προκύψει από το άθροισμα των επιτρεπόμενων τιμών βύθισης κάθε δομικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.40, αντί κάθε βύθιση υπολογίζεται ξεχωριστά, τη στιγμή που τα δομικά στοιχεία είναι τοποθετημένα μαζί και λειτουργούν ενιαία.

Συνεπώς, όποια και αν είναι η κατανομή, η οριακή βύθιση πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με $(\text{άνοιγμα}1 + \text{άνοιγμα}2)/30$, όπου το άνοιγμα 1 είναι το μήκος της δευτερεύουσας δοκού και το άνοιγμα 2 το μήκος της κύριας δοκού.

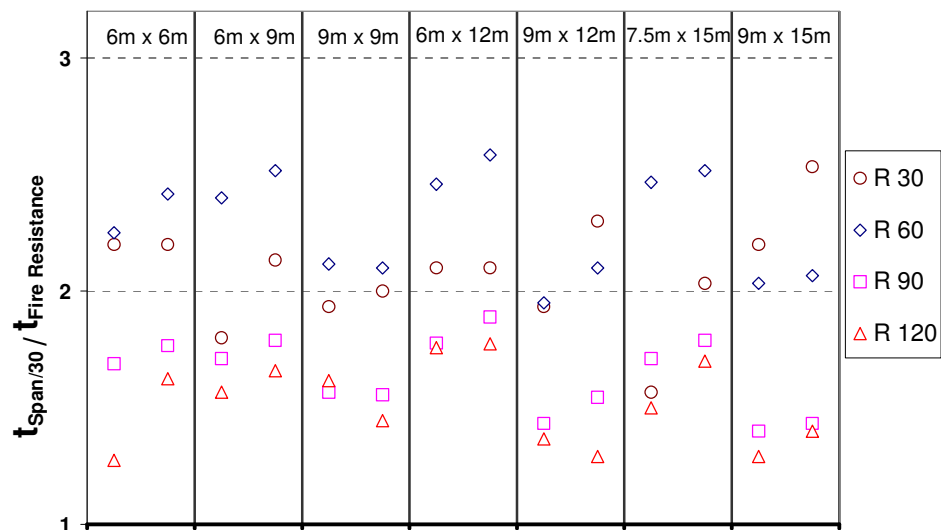
Για το παραπάνω κριτήριο αστοχίας έχει ενδιαφέρον να ελεγχθεί ο βαθμός πυραντίστασης της πλάκας. Η σύγκριση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.41 δίνει τον λόγο της διάρκειας της πυρκαγιάς για την επίτευξη του παραπάνω κριτηρίου βύθισης σύμφωνα με το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο προς το βαθμό πυραντίστασης με βάση την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος από 1,00, και συνεπώς αν η παραπάνω βύθιση υιοθετηθεί ως κριτήριο αστοχίας, ο βαθμός πυραντίστασης θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν που προκύπτει από την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού. Επομένως, η εφαρμογή του απλού υπολογισμού ικανοποιεί αυτόματα το παραπάνω κριτήριο της βύθισης.



Σχήμα 8.39 Σύγκριση της προβλεπόμενης βύθισης με βάση το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο με τη μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού, χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων



Σχήμα 8.40 Συνολική οριακή βύθιση σύμφωνα με το κριτήριο ανοίγματος/30



Σχήμα 8.41 Λόγος μεταξύ του χρόνου κατά τον οποίο η βύθιση ανέρχεται σε άνοιγμα/30 και της πυραντίστασης που προβλέπεται από τη απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο για τα πειράματα πυραντίστασης⁽³²⁾, καθορίζει το παρακάτω όριο βύθισης για την αξιολόγηση του κριτηρίου φέρουσας ικανότητας των στοιχείων σε κάμψη. Η αστοχία σε φέρουσα ικανότητα για τα δομικά στοιχεία αυτού του είδους είναι βέβαιο ότι θα προκύψει, αν η μετρηθείσα βύθιση υπερβεί την οριακή βύθιση ή τον ρυθμό βύθισης που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Οριακή βύθιση, } D = \frac{L^2}{400d} \text{ mm; και,}$$

$$\text{Οριακός ρυθμός μεταβολής της βύθισης, } \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \text{ mm/min}$$

όπου:

- L το ελεύθερο άνοιγμα του πειραματικού δοκιμίου, σε χιλιοστά
- d η απόσταση από την ακραία ίνα της θλιπτικής ζώνης ως την ακραία ίνα της εφελκυστικής ζώνης, σε χιλιοστά.

Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι το κριτήριο που σχετίζεται με τον ρυθμό μεταβολής της βύθισης δεν εφαρμόζεται μέχρι τη χρονική στιγμή κατά την οποία υπερβαίνεται η βύθιση σε άνοιγμα/30. Για τον παραπάνω λόγο το κριτήριο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς περιλαμβάνεται ήδη στο προηγούμενο κριτήριο της βύθισης, δηλαδή άνοιγμα /30. Η ίδια αρχή που θεωρείται για το κριτήριο άνοιγμα/30 μπορεί να εφαρμοστεί για την εύρεση της μέγιστης επιτρεπόμενης οριακής βύθισης της πλάκας.

8.4.2.2 Επιμήκυνση του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης

Μαζί με τη βύθιση της πλάκας, η επιμήκυνση του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης είναι το δεύτερο χαρακτηριστικό που εξετάζεται λεπτομερώς στο πλαίσιο της παρούσας παραμετρικής μελέτης. Η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού βασίζεται στην πλαστική ανάλυση για τη φέρουσα ικανότητα του συστήματος πλάκας, η οποία ενισχύεται λόγω της δράσης εφελκυσμού της μεμβράνης σταθεροποίησης. Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, η αστοχία της πλάκας επέρχεται εξαιτίας της θραύσης του πλέγματος κατά μήκος του μικρότερου ανοίγματος της πλάκας. Επιπλέον, η θραύση αυτή ενδέχεται εξίσου να προκληθεί στα ακραία τμήματα της πλάκας, όπου ισχύει η συνθήκη συνέχειας της πλάκας.

Η παρούσα παραμετρική μελέτη παρείχε την ευκαιρία να εξεταστεί η ανηγμένη παραμόρφωση του οπλισμού όπως υπολογίστηκε από το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο, όταν επιτεύχθηκε η επιθυμητή πυραντίσταση. Γνωρίζοντας την επιμήκυνση της ενίσχυσης στη θραύση, μπορεί να εξαχθεί ένα συμπέρασμα σχετικά με το περιθώριο ασφάλειας της θραύσης του πλέγματος, όπως σχεδιάζεται από την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού

Καθώς το μεταλλικό πλέγμα ενίσχυσης είναι τοποθετημένο σε όλη την επιφάνεια της πλάκας, και είναι συνεχές κατά μήκος όλων των δοκών, συμπεριλαμβανομένων των μονωμένων περιφερειακών δοκών, αναμένεται να προκληθεί σημαντική εφελκυστική παραμόρφωση πάνω από τις μονωμένες δοκούς και γύρω από τους στύλους.

Αν η επιμήκυνση είναι πολύ μεγάλη, ενδέχεται να προκληθεί θραύση στον οπλισμό, με αποτέλεσμα την απώλεια της ακεραιότητας και της μόνωσης της πλάκας πριν να σημειωθεί αστοχία της φέρουσας ικανότητας. Ωστόσο, το ερώτημα που προκύπτει σχετίζεται με το κριτήριο που θα πρέπει να εφαρμόζεται στην ικανότητα επιμήκυνσης της μεταλλικής ενίσχυσης. Ο EN 1992-1-2⁽³⁵⁾ ορίζει ότι

στην πλαστική ανάλυση η ελάχιστη ικανότητα επιμήκυνσης στην οριακή τάση για τη μεταλλική ενίσχυση πρέπει να είναι τουλάχιστον 5%. Επομένως, η παραπάνω τιμή λαμβάνεται ως το κριτήριο επιμήκυνσης του μεταλλικού πλέγματος ενίσχυσης στην παρούσα παραμετρική μελέτη.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που σχετίζονται με τη μέγιστη βύθιση των πλακών για όλες τις χρονικές περιόδους πυραντίστασης και με τη μέγιστη επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης κατά μήκος των ορθογωνικών διευθύνσεων (παράλληλες αντίστοιχα προς τις κύριες και τις δευτερεύουσες δοκούς) συνοψίζονται στους Πίνακες 8.10 έως 8.13. Στους ίδιους πίνακες η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού συμβολίζεται ως SDM και τα ανοίγματα συμβολίζονται ως (Ανοιγμα 1 και Ανοιγμα 2). Από τους πίνακες αυτούς, μπορεί να διαπιστωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας στην απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού είναι πάντα μεγαλύτερη από τις προβλεπόμενες τιμές βύθισης του προηγμένου υπολογιστικού μοντέλου. Όσον αφορά τη μέγιστη επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης, παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές του προηγμένου υπολογιστικού μοντέλου για οποιαδήποτε διάρκεια πυρκαγιάς είναι πάντα μικρότερες από 5%, το οποίο και πάλι αποτελεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 8.6 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R30 (με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Ανοιγμα1 L [m]	Ανοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Ανοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Ανοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	248	239	262	400	500	2.8%	3.0%
5.0+1.25	6	6	240	235	262	400	462	2.9%	2.7%
2.5+1.25	9	6	359	322	326	500	609	2.8%	2.4%
5.0+1.25	9	6	312	282	326	500	563	3.0%	2.3%
2.5+1.26	9	9	359	331	495	600	844	3.4%	2.6%
5.0+1.25	9	9	389	358	495	600	779	3.0%	2.4%
2.5+1.25	12	6	379	326	335	600	789	3.1%	2.3%
5.0+1.25	12	6	361	314	335	600	726	3.0%	2.5%
2.5+1.25	12	9	443	381	558	700	987	3.2%	2.3%
5.0+1.25	12	9	416	361	558	700	907	3.0%	2.6%
2.5+1.25	15	7.5	480	410	462	750	1049	3.1%	3.8%
5.0+1.25	15	7.5	461	403	462	750	977	3.0%	4.0%
2.5+1.25	15	9	539	465	605	800	1234	3.2%	3.1%
5.0+1.25	15	9	578	485	605	800	1063	3.5%	4.4%

Πίνακας 8.7 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R60 (με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	288	271	293	400	486	3.6%	3.1%
5.0+1.25	6	6	280	266	293	400	450	3.7%	2.9%
2.5+1.25	9	6	348	307	356	500	597	3.5%	2.8%
5.0+1.25	9	6	334	294	356	500	552	3.4%	2.6%
2.5+1.26	9	9	434	385	563	600	827	3.9%	2.9%
5.0+1.25	9	9	429	384	563	600	764	3.6%	2.8%
2.5+1.25	12	6	409	341	366	600	776	3.3%	2.4%
5.0+1.25	12	6	397	335	366	600	714	3.1%	2.5%
2.5+1.25	12	9	527	442	627	700	970	3.7%	2.7%
5.0+1.25	12	9	499	419	627	700	893	3.4%	2.7%
2.5+1.25	15	7.5	524	431	509	750	1034	3.1%	3.7%
5.0+1.25	15	7.5	492	413	509	750	963	2.8%	3.4%
2.5+1.25	15	9	607	505	673	800	1125	3.6%	3.4%
5.0+1.25	15	9	571	474	673	800	1048	3.3%	3.1%

Πίνακας 8.8 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R90 (με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	306	282	295	400	474	2.7%	2.6%
5.0+1.25	6	6	294	274	295	400	439	2.8%	2.3%
2.5+1.25	9	6	379	328	359	500	585	2.7%	2.5%
5.0+1.25	9	6	364	314	359	500	542	2.7%	2.2%
2.5+1.26	9	9	471	408	569	600	810	3.3%	2.2%
5.0+1.25	9	9	468	409	569	600	750	3.1%	2.2%
2.5+1.25	12	6	448	365	369	600	763	2.5%	2.6%
5.0+1.25	12	6	436	360	369	600	703	2.2%	2.4%
2.5+1.25	12	9	579	472	633	700	953	3.0%	2.4%
5.0+1.25	12	9	548	447	633	700	879	2.7%	2.3%
2.5+1.25	15	7.5	579	458	513	750	1019	2.6%	3.1%
5.0+1.25	15	7.5	550	446	513	750	950	1.9%	2.9%
2.5+1.25	15	9	670	532	679	800	1109	2.6%	3.1%
5.0+1.25	15	9	668	547	679	800	1034	2.3%	2.5%

Πίνακας 8.9 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R120 (με μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	360	281	287	400	462	3.1%	2.6%
5.0+1.25	6	6	305	281	287	400	429	3.2%	2.7%
2.5+1.25	9	6	398	339	351	500	574	3.0%	2.7%
5.0+1.25	9	6	386	328	351	500	532	3.0%	2.6%
2.5+1.26	9	9	500	426	551	600	794	3.9%	2.7%
5.0+1.25	9	9	492	422	551	600	736	3.6%	2.6%
2.5+1.25	12	6	476	377	360	600	750	2.8%	3.1%
5.0+1.25	12	6	464	374	360	600	692	2.4%	3.0%
2.5+1.25	12	9	616	487	614	700	938	3.6%	2.8%
5.0+1.25	12	9	626	470	614	700	865	3.4%	2.8%
2.5+1.25	15	7.5	625	485	501	750	1004	2.6%	3.6%
5.0+1.25	15	7.5	592	473	501	750	938	2.2%	3.4%
2.5+1.25	15	9	705	545	661	800	1093	3.2%	3.3%
5.0+1.25	15	9	676	530	661	800	1020	2.7%	3.2%

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής εξέτασης που παρουσιάζονται στους πίνακες όπως προέκυψαν από το προηγμένο υπολογιστικό μοντέλο ANSYS βασίζονται στην παραδοχή ότι η σύμμικτη πλάκα είναι συνδεδεμένη με όλους τους μεταλλικούς στύλους με πρόσθετες μεταλλικές ράβδους ενίσχυσης. Είναι βέβαιο ότι αυτή η κατασκευαστική λεπτομέρεια είναι δυνατό να ελαττώσει τη βύθιση της πλάκας, αλλά στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, ειδικά για τις ακραίες δοκούς. Είναι, επομένως, πολύ σημαντικό να εξετάζεται η επίδραση αυτής της κατασκευαστικής λεπτομέρειας στη συνολική συμπεριφορά της πλάκας. Μια δεύτερη σειρά μελετών πραγματοποιήθηκαν χωρίς να ισχύει η παραπάνω κατασκευαστική λεπτομέρεια και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τον ίδιο τρόπο στους Πίνακες 8.10 έως 8.13. Είναι βέβαιο ότι οι μέγιστες βυθίσεις είναι σχετικά υψηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες. Ωστόσο, παραμένουν πάντα χαμηλότερες των τιμών που υπολογίζονται σύμφωνα με διάφορα παραδοσιακά κριτήρια. Επίσης, η μέγιστη επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για όλες τις πλάκες είναι χαμηλότερη του 5% σε όλες τις περιπτώσεις της πυρκαγιάς.

Πίνακας 8.10 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R30 (χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	305	224	262	400	500	2.8%	2.4%
5.0+1.25	6	6	285	218	262	400	462	3.0%	2.2%
2.5+1.25	9	6	363	274	326	500	609	2.9%	2.2%
5.0+1.25	9	6	330	267	326	500	563	3.0%	2.1%
2.5+1.26	9	9	406	295	495	600	844	3.2%	2.2%
5.0+1.25	9	9	394	330	495	600	779	3.1%	2.4%
2.5+1.25	12	6	415	335	335	600	789	3.4%	2.1%
5.0+1.25	12	6	392	323	335	600	726	3.0%	2.2%
2.5+1.25	12	9	464	364	558	700	987	3.3%	2.2%
5.0+1.25	12	9	442	359	558	700	907	3.0%	2.5%
2.5+1.25	15	7.5	490	402	462	750	1049	3.2%	3.0%
5.0+1.25	15	7.5	463	390	462	750	977	2.8%	3.1%
2.5+1.25	15	9	569	472	605	800	1234	3.0%	3.6%
5.0+1.25	15	9	578	485	605	800	1063	3.1%	4.0%

Πίνακας 8.11 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R60 (χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	348	264	293	400	486	3.7%	2.6%
5.0+1.25	6	6	325	248	293	400	450	3.7%	2.6%
2.5+1.25	9	6	400	310	356	500	597	3.5%	2.5%
5.0+1.25	9	6	380	298	356	500	552	3.6%	2.5%
2.5+1.26	9	9	493	373	563	600	827	3.5%	2.5%
5.0+1.25	9	9	481	385	563	600	764	3.2%	2.5%
2.5+1.25	12	6	463	359	366	600	776	4.0%	2.6%
5.0+1.25	12	6	435	346	366	600	714	3.8%	2.8%
2.5+1.25	12	9	587	445	627	700	970	3.8%	2.6%
5.0+1.25	12	9	548	423	627	700	893	3.5%	2.8%
2.5+1.25	15	7.5	565	444	509	750	1034	3.6%	3.2%
5.0+1.25	15	7.5	520	423	509	750	963	3.3%	3.0%
2.5+1.25	15	9	660	520	673	800	1125	3.1%	3.6%
5.0+1.25	15	9	607	483	673	800	1048	2.8%	3.4%

Πίνακας 8.12 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R90 (χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	363	275	295	400	474	4.1%	3.0%
5.0+1.25	6	6	338	257	295	400	439	4.3%	3.1%
2.5+1.25	9	6	433	331	359	500	585	2.6%	2.3%
5.0+1.25	9	6	403	303	359	500	542	3.8%	3.0%
2.5+1.26	9	9	531	402	569	600	810	3.3%	2.0%
5.0+1.25	9	9	521	408	569	600	750	2.2%	2.2%
2.5+1.25	12	6	497	375	369	600	763	2.5%	2.4%
5.0+1.25	12	6	475	370	369	600	703	3.2%	2.2%
2.5+1.25	12	9	644	477	633	700	953	3.0%	2.4%
5.0+1.25	12	9	599	450	633	700	879	2.8%	2.2%
2.5+1.25	15	7.5	624	472	513	750	1019	2.2%	3.0%
5.0+1.25	15	7.5	582	457	513	750	950	1.9%	2.8%
2.5+1.25	15	9	726	548	679	800	1109	2.6%	2.8%
5.0+1.25	15	9	670	514	679	800	1034	2.3%	2.5%

Πίνακας 8.13 Βύθιση της πλάκας και επιμήκυνση της μεταλλικής ενίσχυσης για διάρκεια πυρκαγιάς R120 (χωρίς μηχανική σύνδεση μεταξύ της πλάκας και των στύλων)

Φορτίο [kN/m ²]	Άνοιγμα1 L [m]	Άνοιγμα 2 ℓ [m]	ANSYS [mm]		SDM [mm]	$\frac{L + \ell}{30}$ [mm]	$\frac{L^2}{400 d}$ [mm]	Επιμήκυνση Άνοιγμα1 [%]	Επιμήκυνση Άνοιγμα 2 [%]
			Σύνολο	Πλάκα					
2.5+1.25	6	6	393	280	287	400	462	4.9%	3.8%
5.0+1.25	6	6	353	270	287	400	429	5.2%	3.7%
2.5+1.25	9	6	466	326	351	500	574	4.6%	4.1%
5.0+1.25	9	6	434	320	351	500	532	4.5%	3.9%
2.5+1.26	9	9	567	423	551	600	794	2.8%	2.9%
5.0+1.25	9	9	548	421	551	600	736	3.6%	4.5%
2.5+1.25	12	6	537	392	360	600	750	4.1%	2.6%
5.0+1.25	12	6	509	372	360	600	692	3.8%	2.6%
2.5+1.25	12	9	686	493	614	700	938	3.7%	2.8%
5.0+1.25	12	9	663	469	614	700	865	3.5%	2.7%
2.5+1.25	15	7.5	677	501	501	750	1004	3.2%	3.2%
5.0+1.25	15	7.5	625	485	501	750	938	2.8%	3.1%
2.5+1.25	15	9	767	560	661	800	1093	2.7%	3.5%
5.0+1.25	15	9	717	539	661	800	1020	2.8%	3.1%

8.5 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παραμετρικής μελέτης ήταν η λεπτομερής εξέταση της απλοποιημένης μεθόδου σχεδιασμού με τη χρήση προηγμένων υπολογιστικών μοντέλων που επαληθεύονται έναντι πειράματος πρότυπης πυρκαγιάς ISO. Τα συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης είναι τα εξής:

- Όσον αφορά τη φέρουσα ικανότητα, η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού παρέχει συντηρητικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα προηγμένα υπολογιστικά μοντέλα,
- Όταν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά κριτήρια που βασίζονται στη συμπεριφορά μεμονωμένων εύκαμπτων δομικών στοιχείων, η πυραντίσταση των σύμμικτων συστημάτων πλάκας όπως προβλέπεται από την απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού παρέχει ασφαλή αποτελέσματα,
- Όσον αφορά την επιμήκυνση του πλέγματος μεταλλικής ενίσχυσης, παραμένει κάτω του 5%, τιμή η οποία αντιστοιχεί στην απαίτηση ελάχιστης επιμήκυνσης κατά EN 1992-1-2 για όλους τους τύπους μεταλλικής ενίσχυσης
- Οι μηχανικές συνδέσεις μεταξύ της πλάκας και των στύλων δεν είναι απαραίτητες. Παρόλ' αυτά, αυτή η κατασκευαστική λεπτομέρεια ενδέχεται να ελαττώσει τη βύθιση του σύμμικτου συστήματος πλάκας σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη δείχνουν με σαφήνεια ότι η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού είναι πλήρως ικανή να προβλέψει με ασφαλή τρόπο τη δομική συμπεριφορά σύμμικτων πλακών χάλυβα-σκυροδέματος που εκτίθενται σε συνθήκες πρότυπης πυρκαγιάς ISO, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι η απλοποιημένη μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δομικό σχεδιασμό μηχανικής πυρασφάλειας.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. 'Fire Safe Design: A new approach to multi-storey steel framed buildings' P288, The Steel Construction Institute, 2006.
2. 'The behaviour of Multi-storey steel framed buildings in fire', A European joint research programme, British Steel Swinden Technology Centre, 1999
3. Lennon, T., 'Cardington fire tests: instrumentation locations for large compartment fire test.', Building Research Establishment Report N100/98, June 1996.
4. Lennon, T., 'Cardington fire tests: instrumentation locations for corner fire test.', Building Research Establishment Report N152/95, June 1996
5. Wainman, W. and Kirby, B., Compendium of UK standard fire test data, No.1 - Unprotected structural steel, British Steel, Swinden Technology Centre, 1987
6. Investigation of Broadgate Phase 8 Fire, SCI, Ascot, 1991.
7. Thomas, I. R., Bennetts, I. D., Dayawansa, P., Proe, D. J. and Lewins, R. R., 'Fire Tests of the 140 William Street Office Building.', BHP/ENG/R/92/043/SG2C, BHP Research, Melbourne Australia, 1992

8. Proe, D. J. and Bennetts, I. D., 'Real Fire Tests in 380 Collins Street Office Enclosure.', BHP/PPA/R/94/051/SG021A, BHP Research Melbourne Australia, 1994.
9. Brand Verhalten Von Stahl und Stahlverbund Konstruktionen (Fire behaviour of steel and composite construction), Verlag TUV Rheinland, 1986.
10. Johansen, K.W., 'The Ultimate strength of Reinforced Concrete Slabs.', International Association for Bridge and Structural Engineering, Final Report, Third Congress, Liege, September 1948.
11. Ockleston A.J. Load tests on a 3-storey reinforced concrete building in Johannesburg. *Struct Eng* 1955;33(10):304-22
12. Bailey C.G. and Moore D.B., The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subjected to fire: Part 1: Theory
13. Bailey C.G. and Moore D.B., The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subjected to fire: Part 2: Design
14. Park, R, Ultimate strength of rectangular concrete slabs under short term uniform loading with edges restrained against lateral movement. *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 28, pp125-150.
15. Wood R. H. Plastic and elastic design of slabs and plates, with particular reference to reinforced concrete floor slabs Thames and Husdon, London. 1961.
16. Taylor R. A note on a possible basis for a new method of ultimate load design of reinforced concrete slabs. *Magazine of concrete research* VOL 17 NO. 53 Dec 1965 pp. 183-186
17. Kemp. K.O. Yield of a square reinforced concrete slab on simple supports allowing for membrane forces. *The structural Engineer* Vol 45, No.7 July 1967 pp. 235-240.
18. Sawczuk A. and Winniki L. Plastic behaviour of simply supported reinforced concrete plated are moderately large deflections. *Int J. Solids Structures* Vol 1 1965 pp. 97 to 111.
19. Hayes B. Allowing for membrane action in the plastic analysis of rectangular reinforced concrete slabs *Magazine of concrete research* Vol. 20 No. 81 Dec 1968. pp 205-212.
20. Bailey C. G., White D.S. and Moore D.B. The tensile membrane action of unrestrained composite slab under fire conditions, *Engineering Structures*, vol. 22, no12, pp. 1583-1595
21. Bailey C. G. & Toh, W.S. 'Behaviour of concrete floor slabs at ambient and elevated temperature', *Fire Safety Journal*, 42, oo425-436, 2007.
22. Hayes B. and Taylor R. Load-Testing RC slabs. *The Consulting Engineer*. Nov. 1969. pp 46-47
23. Taylor R., Maher D.R.H. and Hayes B. Effect of arrangement of reinforcement on the behaviour of the reinforce concrete slabs. *Magazine of concrete research* Vol 18 No. 55. June 1966. pp 85-94
24. Moy S.S.J. Load-deflection characteristics of rectangular reinforced concrete slabs. *Magazine of concrete research* Vol 24 No. 81 Dec. 1972. pp 209-218.
25. Bailey, C.G., Efficient arrangement of Reinforcement for membrane behaviour of composite slabs in fire conditions, *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 2003, pp931-949.

26. Bailey C.G., Membrane action of lightly reinforced concrete slabs at large displacements, *Engineering Structures*, 23, 2001, pp470-483.
27. Bailey, Colin G. and Toh, Wee Siang. Experimental behaviour of concrete floor slabs at ambient and elevated temperatures. SIF06
28. O'Conner MA, Kirby BR, Martin DM. Behaviour of a multi-storey composite steel framed building in fire. *Struct Eng* 2003;81(2):27–36.
29. Bailey CG, Lennon T, Moore DB. The behaviour of full-scale steel framed buildings subjected to compartment fires. *Struct Eng* 1999; 77(8):15–21.
30. Bailey CG, Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire. *Engineering Structures* 26 2004:1691-1703.
31. Wang YC. Tensile membrane action in slabs and its application to the Cardington fire tests. Fire, static and dynamic tests of building structures. Proceeding of the second Cardington conference, England, 12-14 March 1996: 55–67
32. EN 1992-1-2, Eurocode 2, Design of concrete structures. Part 1.2: General rules. Structural fire design, CEN
33. EN 1994-1-2, Eurocode 2, Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2: General rules. Structural fire design, CEN
34. EN 1994-1-1, Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN
35. EN 1993-1-8, Eurocode 3 Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, CEN
36. EN 1992-1-1, Eurocode 2 Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN
37. EN 1991-1-2 - Eurocode 1 " Actions on structures. General actions. " – Part 1-2: Actions on structures exposed to fire, CEN.
38. ARRETE DU 21 AVRIL 1983, Ministère de l'Intérieur Français Détermination des degrés de résistance au feu des éléments de construction.
39. EN 1363-1 - Fire resistance tests – Part 1: General requirements, CEN.(35)