



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ
ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ**



ΠΟΥΛΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής:

Ζέρης Χρήστος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ
ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

DIPLOMA THESIS

ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE COUPLED RESPONSE OF
FIRE - EXPOSED REINFORCED CONCRETE COLUMN

ΠΟΥΛΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Επιβλέπων: Ζέρης Χρήστος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Copyright ©ΕΜΠ, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα και των επιβλεπόντων καθηγητών. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεών του

(Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright ©NTUA, 2023

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission either from the author or the supervisor(s). Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization

(L. 5343/1932, art. 202)

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

*“Η ευτυχία του ανθρώπου εξαρτάται
από την ποιότητα των σκέψεων του.”*

Μάρκος Αυρήλιος

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του πενταετούς προγράμματος σπουδών μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι γνώσεις, οι πνευματικές δοκιμασίες και οι εμπειρίες των οποίων είμαι αποδέκτης τα τελευταία πέντε χρόνια αποτελούν τις αιτίες της εξέλιξης της προσωπικότητάς μου αλλά και του τρόπου με τον οποίο αντιμετωπίζω τα προβλήματα της καθημερινότητας.

Επομένως θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ζέρη Χρήστο, για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος. Επιπλέον, με έφερε σε επαφή με πολλά ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα δίνοντάς μου τα εφόδια για να βελτιώσω το θεωρητικό υπόβαθρο και τις δεξιότητές μου πάνω στη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τομέα Δομοστατικής για τις εμπνευσμένες διαλέξεις τους και την εκπαιδευτική τους στάση, μέσω των οποίων μου μετάδωσαν πληθώρα γνώσεων και ερεθισμάτων για συστηματική ενασχόληση με τα αντίστοιχα αντικείμενα.

Σε προσωπικό επίπεδο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τους συμφοιτητές μου που ήταν συνοδοιπόροι καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Οι όμορφες στιγμές που ζήσαμε και οι εμπειρίες που δημιουργήσαμε θα με συντροφεύουν και στα επόμενα κεφάλαια της ζωής μου

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στους γονείς μου, Ανδριάνα και Γιώργο, στη μητριά μου Λίνα, καθώς και στις αδερφές μου, Φωτεινή, Μαίρη και Ραφαέλα. Σε αυτούς οφείλω τον άνθρωπο που έχω γίνει μέσα στα χρόνια. Τους ευχαριστώ για τη συνεχή στήριξη τους σε όλα τα βήματά μου και για την ανοχή τους στις ιδιοτροπίες μου.

Πουλής Ανδρέας

Αθήνα, 2023

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παγκοσμίως κάθε χρόνο ξεσπούν αστικές πυρκαγιές. Το μέγεθος των καταστρεπτικών συνεπειών τους ποικίλει και στη χειρότερη περίπτωση είναι υπεύθυνες για πολυάριθμα ανθρώπινα θύματα και σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Αντικειμενικοί στόχοι του σχεδιασμού φορέων έναντι πυρκαγιάς είναι πρωτίστως η προστασία της ανθρώπινης ζωής, η προστασία της περιουσίας και η διασφάλιση ενός ορισμένου επιπέδου δομικής ακεραιότητας. Για την επίτευξη του τελευταίου στόχου η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην υιοθέτηση του σχεδιασμού με βάση την επιτελεσματικότητα ως εναλλακτική προσέγγιση του ευρέως διαδεδομένου “prescriptive based” σχεδιασμού.

Αφού επιλεγθούν τα κατάλληλα σενάρια πυρκαγιάς και παραχθούν οι αντίστοιχες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου, ο σχεδιασμός με βάση την επιτελεσματικότητα υλοποιείται με τη σύζευξη μεταξύ του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας και του μηχανικού προβλήματος. Το πρώτο πρόβλημα, έχοντας ως δεδομένο εισαγωγής την καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου, κυβερνάται από τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Για τη λύση του δεύτερου προβλήματος το οποίο έχει ως δεδομένο εισαγωγής τη λύση του πρώτου, δηλαδή το χρονοεξαρτώμενο θερμοκρασιακό πεδίο και τις χρονοεξαρτώμενες θερμικές δράσεις, πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση ισορροπίας που θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των χρονικά μεταβαλλόμενων πεδίων των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Ωστόσο, η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες επιβάλλει στο σκυρόδεμα και στον χάλυβα οπλισμού μη – αναστρέψιμες φυσικοχημικές αλλαγές στη μικροδομή τους. Άμεσο αποτέλεσμα των παραπάνω αποτελεί η μεταβολή των τιμών των θερμικών ιδιοτήτων τους και η υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, όπως η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, με την άνοδο της θερμοκρασίας. Οι ισχύοντες τεχνικοί κανονισμοί παρέχουν πληροφορίες για τις εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Επιπρόσθετα, το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοιώσης δύναται να εμφανισθεί στα φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, επηρεάζοντας δυσμενώς τη φέρουσα ικανότητά τους. Συμπερασματικά, τόσο το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας όσο και το μηχανικό πρόβλημα έχουν μη – γραμμική συμπεριφορά.

Στο τέλος της εργασίας μελετάται ένα κεντρικά φορτισμένο υποστύλωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα εκτεθειμένο στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων - χρόνου ASTM E 119. Το υποστύλωμα αποτελεί μέρος μιας σειράς πειραμάτων των T. T. Lie και J. L. Woollerton που διεξήχθησαν στον Καναδά. Με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων DIANA FEA εκτελούνται δύο συζευγμένες θερμοκρασιακές και μηχανικές αναλύσεις. Στην πρώτη τα υλικά προσομοιώνονται με ελαστοπλαστικά μοντέλα, ενώ στη δεύτερη προσομοιώνονται με ελαστικά μοντέλα. Ακολούθως τα προκύπτοντα αποτελέσματα συγκρίνονται αναλυτικά με τα πειραματικά δεδομένα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις αναλύσεις.

Λέξεις κλειδιά: συζευγμένη ανάλυση, αποφλοίωση σκυροδέματος, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μη – γραμμική ανάλυση μεταφοράς θερμότητας μη – μόνιμης κατάστασης, δυναμική μη – γραμμική μηχανική ανάλυση

ABSTRACT

Annually, urban fires erupt worldwide. The magnitude of their destructive consequences varies, and in the worst - case scenario, they are responsible for numerous human casualties and significant economic repercussions. The objective of designing fire - resistant structures is primarily to protect human life, safeguard property, and ensure a certain level of structural integrity. To achieve the latter goal, this study focuses on adopting performance - based design as an alternative approach to the widely prevalent prescriptive-based design.

After selecting the relevant fire scenarios and generating the corresponding temperature-time fire curves, the implementation of performance - based design involves the coupling of the heat transfer problem and the mechanical problem. The heat transfer problem, driven by conduction, convection, and radiation mechanisms, is governed by the temperature - time fire curve input. Solving the second problem relies on resolving the first problem, namely in calculating the time - dependent temperature field and time - dependent thermal actions. By solving the equilibrium equation, the time - varying fields of stresses and deformations can be determined.

However, exposure to high temperatures imposes irreversible physico - chemical changes on both concrete's and steel's reinforcement microstructure. As a direct result, there is a modification in their thermal properties and a degradation of their mechanical characteristics, such as compressive strength, tensile strength, and elasticity, with increasing temperature. Existing technical regulations provide information on the temperature - dependent thermal and mechanical properties. Additionally, the phenomenon of explosive spalling can occur in reinforced concrete structural elements, adversely affecting their load - bearing capacity. In conclusion, both the heat transfer problem and the mechanical problem exhibit nonlinear behavior.

At the end of this thesis, a centrally loaded reinforced concrete column exposed to the nominal temperature - time fire curve ASTM E 119 is examined. The column is part of a series of experiments conducted by T. T. Lie and J. L. Woollerton in Canada. Using the finite element software DIANA FEA, two coupled thermal and mechanical analyses are performed. In the first analysis, the materials are simulated using elasto - plastic models, while in the second analysis, they are simulated using elastic models. Subsequently, the resulting data is thoroughly compared with experimental data, and useful conclusions are drawn for the analyses.

Keywords: coupled analysis, spalling, finite element method (FEM), non - linear transient heat transfer analysis, structural non - linear analysis

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	10
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	12
ABSTRACT.....	13
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	14
Κατάλογος Σχημάτων.....	17
Κατάλογος Πινάκων.....	19
Κατάλογος Εικόνων	20
1. Εισαγωγή	22
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	22
1.2 Διάρθρωση της εργασίας	22
2. Ανάλυση φορέων εκτεθειμένων σε πυρκαγιά.....	24
2.1. Λεπτομερής μελέτη της πυρκαγιάς.....	24
2.1.1 Η φυσική και η χημεία της πυρκαγιάς.....	24
2.1.2 Η έννοια του πυροδιαμερίσματος.....	25
2.1.3 Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς.....	25
2.2 Αναλυτική μέθοδος δομοστατικού σχεδιασμού φορέων έναντι πυρκαγιάς.....	28
2.2.1 Εξάπλωση της πυρκαγιάς (Fire modelling).....	29
2.2.2 Θερμοκρασιακή διάχυση (Thermal analysis)	30
2.2.2.β Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (convection)	32
2.2.2.γ Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (radiation).....	33
2.2.2.δ Αδιάστατος αριθμός Biot.....	35
2.2.3 Δυναμική μη – γραμμική επίλυση (Nonlinear Dynamic analysis)	36
2.2.3.α Εξίσωση ισορροπίας.....	37
2.3 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	37

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

2.4 Σύζευξη θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης	40
3. Συμπεριφορά οπλισμένου σκυροδέματος υπό την επίδραση πυρκαγιάς.....	42
3.1 Φυσικοχημική απόκριση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.....	42
3.2 Το φαινόμενο της αποφλοΐωσης (spalling)	43
3.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στα δομικά μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	47
4. Αντιμετώπιση της πυρκαγιάς ως φόρτισης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες.....	49
4.1 Μέθοδοι αξιολόγησης πυραντίστασης	49
4.2 Πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων - χρόνου	52
5. Μεταβαλλόμενες ιδιότητες των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με ισχύοντες τεχνικούς κανονισμούς και ερευνητικές δημοσιεύσεις.....	56
5.1: Ιδιότητες των υλικών από τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-2 (2004))	56
5.1.1: Διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού	56
5.1.2: Θερμική διαστολή και συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού	61
5.1.3: Διακύμανση της πυκνότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού	65
5.1.4: Ειδική θερμότητα σκυροδέματος.....	66
5.1.5: Θερμική αγωγιμότητα σκυροδέματος.....	68
5.2: Ιδιότητες των υλικών από τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-2 (2005))	70
5.2.1: Ειδική θερμότητα χάλυβα οπλισμού.....	70
5.2.2: Θερμική αγωγιμότητα χάλυβα οπλισμού	71
5.3: Ιδιότητες των υλικών από τους κανονισμούς ASCE 78 (1992) & BS 8110 (1985).....	73
5.3.1: Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	73
5.4: Ιδιότητες των υλικών από ερευνητικές δημοσιεύσεις	74
5.4.1: Λόγος Poisson του σκυροδέματος.....	74
6. Επαλήθευση της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης μέσω προσομοίωσης πειράματος φέροντος στοιχείου εκτεθειμένου σε πυρκαγιά	75
6.1: Παρουσίαση του λογισμικού DIANA FEA	75
6.2: Υποστύλωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα	76
6.3: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες	77
6.4: Υλικά	81

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

6.4.1: Σκυρόδεμα	81
6.4.1.α: Total Strain Based Crack Model.....	81
6.4.1.β: Linear Elastic Isotropic	86
6.4.2: Χάλυβας οπλισμού	88
6.5: Θερμοκρασιακή και μηχανική φόρτιση	88
6.6: Συζευγμένη θερμοκρασιακή και μηχανική ανάλυση	90
6.6.1: Θερμοκρασιακή ανάλυση.....	91
6.6.2: Μηχανική ανάλυση.....	93
7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	95
7.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμοκρασιακής ανάλυσης	95
7.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μηχανικής ανάλυσης	99
7.3: Συμπεράσματα και προτάσεις για επέκταση της μελέτης.....	102
8. Βιβλιογραφία.....	104
8.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	104
8.2 Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία.....	106

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Γραφική παράσταση των πρότυπων καμπύλων θερμοκρασίας αερίων – χρόνου που αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 1.....	53
Σχήμα 2: Γραφική παράσταση πρότυπων καμπύλων θερμοκρασίας αερίων – χρόνου.....	55
Σχήμα 3: Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή και γραμμικό φθιτό κλάδο για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	57
Σχήμα 4: Μεταβολή του λόγου $f_{c\theta,t} / f_{ck,t}$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.	58
Σχήμα 5: Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.	59
Σχήμα 6: Λεπτομέρεια διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.	60
Σχήμα 7: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.	61
Σχήμα 8: Μεταβολή της θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	62
Σχήμα 9: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	63
Σχήμα 10: Μεταβολή της θερμικής διαστολής του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	63
Σχήμα 11: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	64
Σχήμα 12: Η πυκνότητα του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	65
Σχήμα 13: Η πυκνότητα του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	66
Σχήμα 14: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.	67
Σχήμα 15: Μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του σκυροδέματος ανά μονάδα όγκου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	68
Σχήμα 16: Διακύμανση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.....	69
Σχήμα 17: Διακύμανση της ειδικής θερμότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.	70

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Σχήμα 18: Μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του χάλυβα ανά μονάδα όγκου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & τον Ευρωκώδικα 3.	71
Σχήμα 19: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.....	72
Σχήμα 20: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τους κανονισμούς ASCE 78 & BS 8110.....	73
Σχήμα 21: Συνάρτηση του λόγου Poisson του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες,	74
Σχήμα 22: Θερμοκρασιακή φόρτιση: η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 για διάρκεια 218 λεπτά.	88
Σχήμα 23: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 31.	96
Σχήμα 24: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 9.	96
Σχήμα 25: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 29.	97
Σχήμα 26: Συναρτήσεις των θερμοκρασιών ως προς τη διάρκεια έκθεσης των τριών θερμοστοιχείων θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	97
Σχήμα 27: Θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του άξονα μεταξύ των σημείων [0.0,0.1525,1.9] & [0.305,0.1525,1.9] για διάφορα χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια της έκθεσης θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	99
Σχήμα 28: Χρονοεξαρτώμενη αξονική παραμόρφωση του υποστυλώματος.	100
Σχήμα 29: Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα μεταξύ των σημείων [0.0,0.1525,3.8] & [0.305,0.1525,3.8] για διάφορα χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια της έκθεσης θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	102

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εφαρμοσιμότητα των διαθέσιμων μεθόδων για την αξιολόγηση της δομικής πυραντίστασης.	51
Πίνακας 2: Εξέλιξη της θερμοκρασίας σύμφωνα με την πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RWS (Rijkswaterstaat).....	54
Πίνακας 3: Εξέλιξη της θερμοκρασίας σύμφωνα με τις πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RABT/ZTV.	55
Πίνακας 4: Επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της θλιπτικής τάσης και των παραμορφώσεων $\epsilon_{c1,\theta}$ & $\epsilon_{cu1,\theta}$ σκυροδέματος με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή (Table 3.1, EN 1992-1-2 (2004)).	57
Πίνακας 5: Επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της τάσης διαρροής ($f_{sy,\theta}$), της τάσης αναλογίας ($f_{sp,\theta}$) και του μέτρου ελαστικότητας ($E_{s\theta}$) για χάλυβα ψυχρής κατεργασίας και χάλυβα θερμής έλασης (Table 3.2.a, EN 1992-1-2 (2004)).	60
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά του υποστυλώματος Column I3.....	76
Πίνακας 7: Ελαστοπλαστικό υλικό σκυροδέματος στο DIANA FEA.....	85
Πίνακας 8: Γραμμικά ελαστικό υλικό σκυροδέματος στο DIANA FEA.	87
Πίνακας 9: ΠΣ μηχανικής ανάλυσης και τα αντίστοιχα ΠΣ ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας, στα οποία μετατρέπονται (DIANA FEA User’s Manual – Release 10.6, 2022 [9]).....	90

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Το τρίγωνο της καύσης.	24
Εικόνα 2: Τα στάδια κατά την ανάπτυξη της πυρκαγιάς (Denoël J.F., 2007 [8]).	26
Εικόνα 3: Στάδιο ωρίμανσης της πυρκαγιάς (BUCHANAN A.H., 2017 [5]).	27
Εικόνα 4: : Στάδιο πλήρους αναπτύξεως της πυρκαγιάς (Τάσιος Θ.Π., Δεοδάτης Γ., 1984 [28]).	27
Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς.	28
Εικόνα 6: Ο μηχανισμός της συναγωγής (John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, 2003 [20]).	32
Εικόνα 7: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016 [16]).	33
Εικόνα 8: Μέλαν Σώμα (John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, 2003 [20]).	34
Εικόνα 9: Ισοπαραμετρικό εξαεδρικό πεπερασμένο στοιχείο 8 κόμβων (Bakalagos S., 2022 [3]).	38
Εικόνα 10: : Μηχανισμός της εκρηκτικής αποφλοίωσης ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της θερμικής διαβάθμισης και των υπερπιέσεων των πόρων (Khoury G. A., 2008 [18]).	45
Εικόνα 11: Βαριές βλάβες λόγω έντονης αποφλοίωσης σε στύλο (1), τοίχωμα (2) και πλάκα (3) (Χρονόπουλος Μ., 2007 [28]).	46
Εικόνα 12: Δοκός με άκαμπτες στηρίξεις και ζεύγος αξονικών δυνάμεων παρεμπόδισης (BUCHANAN A.H., 2017 [5]).	48
Εικόνα 13: Τα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία CHX60 & HX8HT (DIANA FEA User’s Manual – Release 10.6, 2022 [9]).	77
Εικόνα 14: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης του υποστυλώματος στο DIANA FEA.	78
Εικόνα 15: Εισαγωγή μοντελικού υλικού θερμικής ροής στο DIANA FEA.	79
Εικόνα 16: Το ισοπαραμετρικό πεπερασμένο στοιχείο συνοριακών συνθηκών BQ4HT (DIANA FEA User’s Manual – Release 10.6, 2022 [9]).	79
Εικόνα 17: Προσομοίωση του υποστυλώματος (1), των οπλισμών του (2) και των συνοριακών συνθηκών (3) στο DIANA FEA.	81
Εικόνα 18: Μοντέλο διακριτής ρηγμάτωσης (Chai Shun, 2020 [6]).	82
Εικόνα 19: Μοντέλο κατανεμημένης ρηγμάτωσης (σταθερής και περιστρεφόμενης).	83
Εικόνα 20: Εισαγωγή ελαστοπλαστικού υλικού σκυροδέματος στο DIANA FEA.	84
Εικόνα 21: Εισαγωγή γραμμικά ελαστικού υλικού σκυροδέματος στο DIANA FEA.	86
Εικόνα 22: Εισαγωγή υλικού χάλυβα στο DIANA FEA.	88
Εικόνα 23: Εισαγωγή του θλιπτικού φορτίου των 800 kN στο DIANA FEA ως πίεση.	89

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Εικόνα 24: Εισαγωγή παραμέτρων της μη – γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη -μόνιμης κατάστασης στο DIANA FEA.....	92
Εικόνα 25: Εξέλιξη σύγκλισης της επίλυσης της μη – γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη -μόνιμης κατάστασης στο DIANA FEA.	92
Εικόνα 26: Παράθυρο Load – Step ανάλυσης.	93
Εικόνα 27: Παράθυρο Time – Step ανάλυσης.	93
Εικόνα 28: Εισαγωγή της μεθόδου και των κριτηρίων σύγκλισης στο DIANA FEA.....	94
Εικόνα 29: Εξέλιξη σύγκλισης της επίλυσης της μη – γραμμικής μηχανικής ανάλυσης.....	94

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η φωτιά είναι ένα φυσικό φαινόμενο με το οποίο η ανθρωπότητα αλληλεπιδρά αέναα. Το πρόσημο της αλληλεπίδρασης αυτής καθορίζεται από το αν είναι ελεγχόμενη. Η ελεγχόμενη φωτιά έχει, από την προϊστορία μέχρι και σήμερα πολλαπλά οφέλη για τον άνθρωπο και η συμβολή της στην ανάπτυξη του πολιτισμού είναι μεγάλη. Αντίθετα, αν η φωτιά είναι ανεξέλεγκτη, έτσι ορίζεται η πυρκαγιά, πιθανότατα θα προκαλέσει σοβαρές καταστροφές. Σύμφωνα με την Πυροσβεστική Διοίκηση (U.S. Fire Administration) της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Διαχείρισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης (Federal Emergency Management Agency) των Η.Π.Α., το 2021 μόνο στις Η.Π.Α. υπολογίζεται ότι ξέσπασαν 353.500 αστικές πυρκαγιές που οδήγησαν στον θάνατο 2.840 ανθρώπων, στον τραυματισμό 11.400 ανθρώπων και σε ζημιές 8.855.900.000 δολαρίων [24]. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των κατασκευών έναντι πυρκαγιάς είναι σημαντικός. Σήμερα η πυρκαγιά αντιμετωπίζεται από του ισχύοντες ευρωπαϊκούς τεχνικούς κανονισμούς ως τυχηματική δράση [10].

Τα τελευταία χρόνια σημειώνεται αυξημένο ενδιαφέρον στην υιοθέτηση του σχεδιασμού με βάση την επιτελεσματικότητα έναντι πυρκαγιάς σε σχέση με τον τρέχων “prescriptive based” σχεδιασμό. Η τάση αυτή οφείλεται κυρίως στη διευκόλυνση εύρεσης ορθολογικών, καινοτόμων και οικονομικών λύσεων μέσω του πρώτου. Επιπλέον, η ανάλυση ενός φέροντα οργανισμού ή ενός φέροντος στοιχείου έναντι πυρκαγιάς προϋποθέτει τη συνδυασμένη ανάλυση δύο φυσικών φαινομένων: του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας και του φαινομένου της μηχανικής απόκρισης.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων και εν συνεχεία η εκτέλεση συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης ενός υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα εκτεθειμένου σε πυρκαγιά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέγεται το υποστύλωμα να αποτελεί μέρος των πειραμάτων που διενεργήθηκαν στον Καναδά από τους T. T. Lie και J. L. Woollerton [19], ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, προαπαιτούμενο για την εκτέλεση της συζευγμένης ανάλυσης είναι η λεπτομερής μελέτη του φαινομένου της πυρκαγιάς και η καταγραφή της επίδρασής του στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος, δίνοντας έμφαση στο φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης του σκυροδέματος. Επίσης, γίνεται εκτενής περιγραφή των μηχανισμών αλλά και των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας και το φαινόμενο της μηχανικής απόκρισης.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Πέραν του παρόντος εισαγωγικού Κεφαλαίου (Κεφάλαιο 1), η εργασία περιλαμβάνει επτά (7) ακόμα Κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στο φαινόμενο της πυρκαγιάς και στα στάδια ανάπτυξής του, εντός ενός πυροδιαμερίσματος. Επιπλέον, παρουσιάζονται εκτενώς τα τρία βήματα δομοστατικού σχεδιασμού φορέων έναντι πυρκαγιάς, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η διαδικασία σύζευξης ανάμεσα στην ανάλυση μεταφοράς θερμότητας και στη μηχανική ανάλυση.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η φυσικοχημική απόκριση του σκυροδέματος υπό αυξημένες θερμοκρασίες, ενώ παρουσιάζεται το φαινόμενο της αποφλοίωσης του δίνοντας έμφαση στην επεξήγηση του μηχανισμού που διέπει την εκρηκτική αποφλοίωση.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι μέθοδοι αξιολόγησης της πυραντίστασης κατασκευών και φερόντων στοιχείων που προτείνουν οι Ευρωκώδικες και γίνεται περιγραφή μερικών από τις πιο διαδεδομένες πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου.

Στο **Κεφάλαιο 5** συγκεντρώνονται οι μεταβαλλόμενες ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού, συναρτήσει της θερμοκρασίας, έπειτα από ανασκόπηση τεχνικών κανονισμών και ερευνητικών δημοσιεύσεων.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται το πείραμα του υποστυλώματος και το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DIANA FEA, όπου γίνεται και η μοντελοποίησή του. Επίσης, περιγράφονται λεπτομερώς τα στάδια προσομοίωσης του υποστυλώματος στο λογισμικό και η ακολουθούμενη διαδικασία για την εκτέλεση της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσής του.

Στο **Κεφάλαιο 7** συγκαταλέγονται τα βασικά αποτελέσματα της θερμοκρασιακής και της μηχανικής ανάλυσης και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται και ένας σύντομος σχολιασμός των προκύπτων συμπερασμάτων και κάποιες προτάσεις για περισσότερη εμβάθυνση στο αντικείμενο.

Στο **Κεφάλαιο 8** παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

Τα Κεφάλαια (#.) χωρίζονται σε ενότητες (##.) οι οποίες με τη σειρά τους χωρίζονται σε υποενότητες (###.)

2. Ανάλυση φορέων εκτεθειμένων σε πυρκαγιά

2.1. Λεπτομερής μελέτη της πυρκαγιάς

Το φαινόμενο της καύσης απαιτεί ενδεδειγμένη μελέτη λόγω της σημαντικής πολυπλοκότητάς του. Οι φυσικοχημικές διεργασίες της καύσης διέπουν την ανάπτυξη της πυρκαγιάς και συνθέτουν το θεωρητικό υπόβαθρο της Πυρομηχανικής, παρουσιάζονται στις παρακάτω παραγράφους.

2.1.1 Η φυσική και η χημεία της πυρκαγιάς

Η καύση είναι μια ταχεία εξώθερμη οξειδοαναγωγική αντίδραση συνοδευόμενη από έκλυση μεγάλου ποσού θερμότητας ίσως και φωτός. Προϋπόθεση για την ύπαρξη καύσης είναι η ταυτόχρονη παρουσία τριών παραγόντων με καθοριστικό ρόλο στην έναρξη, στη συνέχιση και στη διάδοση της [8]:

- **Οξειδωτικό:** κύριο οξειδωτικό είναι το οξυγόνο (O_2) βασική πηγή του οποίου αποτελεί η ατμόσφαιρα, συνιστώμενη κατά 21% κατά όγκο από οξυγόνο. Άλλα οξειδωτικά είναι το όζον (O_3) και το φθόριο (F_2).
- **Καύσιμο:** φυσικά ή τεχνητά υλικά σε στερεή, υγρή ή αέρια κατάσταση που καίγονται παρουσία οξυγόνου και ικανής θερμότητας.
- **Εισαγόμενη θερμότητα:** για την έναρξη της καύσης τα στερεά και τα υγρά καύσιμα θερμαίνονται στο βαθμό που παράγονται επαρκείς ατμοί. Έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές υπό γνωστές συνθήκες πίεσης και αρχικής θερμοκρασίας καθορίζεται για κάθε υλικό η χαμηλότερη θερμοκρασία που επαρκεί για την παραγωγή ατμών ικανών να πυροδοτήσουν την καύση. Η θερμοκρασία αυτή αναφέρεται ως θερμοκρασία αναφλέξεως.



Εικόνα 1: Το τρίγωνο της καύσης.

Καίριας σημασίας είναι η ταχύτητα που συντελείται η καύση, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και επηρεάζει την ταχύτητα αποσύνθεσης των καυσίμων, την αναλογία και τη σύνθεση των

παραγόμενων καυσαερίων και την εκλυόμενη θερμότητα, της οποίας η μέγιστη τιμή λαμβάνεται με τη στοιχειομετρική καύση:

- **Στοιχειομετρική καύση άνθρακα:** $C_{(graphite)} + O_2 \rightarrow CO_2 + 393,5kJ \cdot mol^{-1}$
- **Στοιχειομετρική καύση υδρογόνου:** $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + 241,8kJ \cdot mol^{-1}$
- **Στοιχειομετρική καύση θείου:** $S + O_2 \rightarrow SO_2 + 290,1kJ \cdot mol^{-1}$

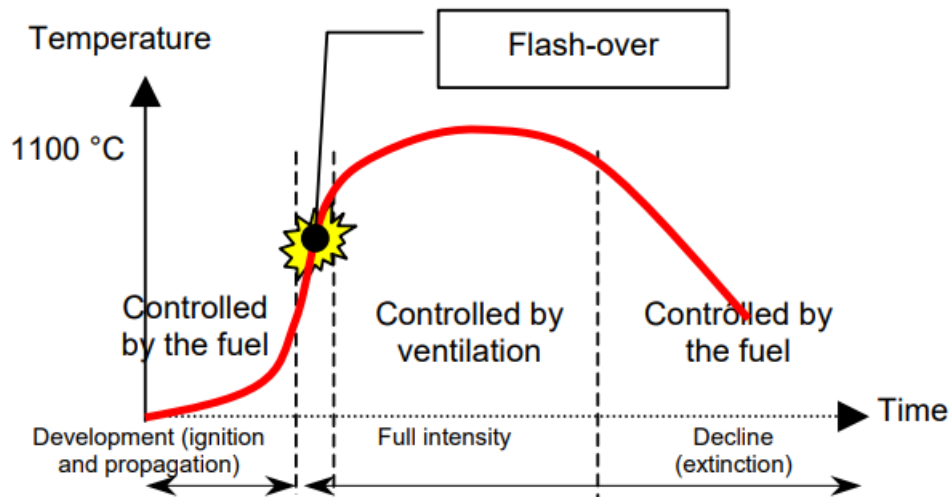
2.1.2 Η έννοια του πυροδιαμερίσματος

Βασικοί στόχοι κατά τον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς είναι η προστασία της ζωής και η προστασία της ιδιοκτησίας. Η πυροδιαμερισματοποίηση μεγάλων κατασκευών είναι υποχρεωτική και βοηθάει τα μέγιστα στην επίτευξη τους. Κανόνες για την πυροδιαμερισματοποίηση κτιρίων δίνονται στον Κανονισμό Πυροπροστασίας Κτιρίων του Π.Δ. 41/2018 (ΦΕΚ 80/Α/07-05-2018). Ως πυροδιαμέρισμα ορίζεται σύμφωνα με τον Κανονισμό Πυροπροστασίας Κτιρίων τμήμα κτιρίου ή και ολόκληρο κτίριο που περικλείεται ερμητικά (σε περίπτωση πυρκαγιάς) από δομικά στοιχεία με προκαθοριζόμενο, κατά περίπτωση, δείκτη πυραντίστασης [30]. Ο περιορισμός της πυρκαγιάς σε συγκεκριμένους χώρους και η αποτροπή ανεξέλεγκτης διάδοσής της, επιτρέπουν σε ανθρώπους μέσα σε μη επηρεαζόμενα από την πυρκαγιά πυροδιαμερίσματα να εκκενώσουν την κατασκευή ή να καταφύγουν σε χώρους που δεν εκτίθενται άμεσα σε φωτιά και καπνό. Η στρατηγική αυτή, διευκολύνει την πυροσβεστική επέμβαση για λόγους κατάσβεσης και εκκένωσης διατηρώντας τις οδούς διαφυγής ασφαλείς για περισσότερο χρόνο.

2.1.3 Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφονται συνοπτικά τα στάδια μιας τυπικής πυρκαγιάς εντός ενός πυροδιαμερίσματος. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα μη ελεγχόμενης καύσης και οδηγεί σε μεταβολή της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου. Το γράφημα της συνάρτησης ανάμεσα στη θερμοκρασία (κάθετος άξονας) και τον χρόνο (οριζόντιος άξονας) καλείται καμπύλη θερμοκρασίας αερίων - χρόνου (fire curve). Ανάλογα με την τιμή και τη διακύμανση της θερμοκρασίας διαιρείται η ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε διάφορα στάδια [5, 8]:

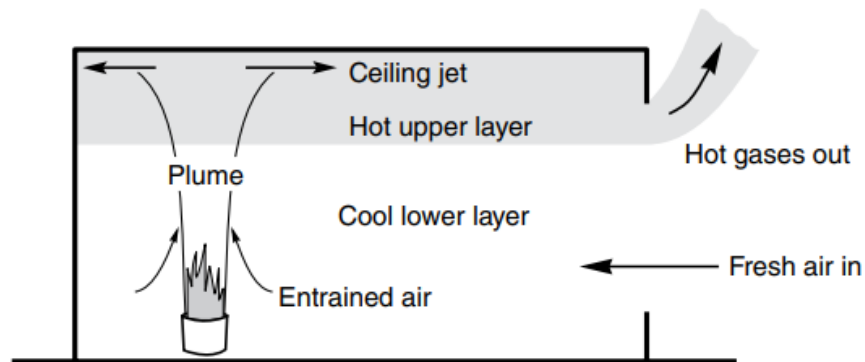
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Εικόνα 2: Τα στάδια κατά την ανάπτυξη της πυρκαγιάς (Denoël J.F., 2007 [8]).

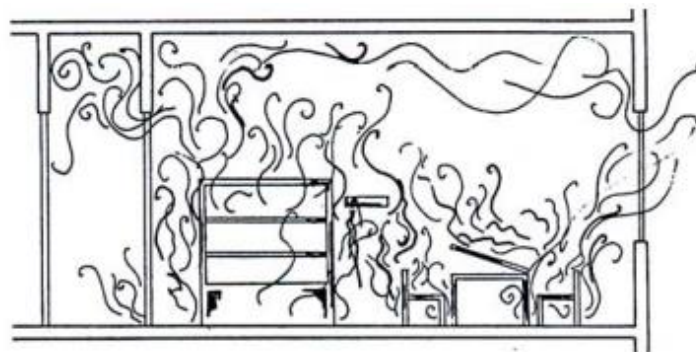
- **Ανάφλεξη (Ignition):** η συνύπαρξη οξυγόνου, τουλάχιστον ενός καυσίμου και αρκετής θερμότητας ώστε να αναπτυχθεί η θερμοκρασία αναφλέξεως του συνεπάγεται την έναρξη του φαινομένου. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα πυρόσβεσης στοχεύουν στην αφαίρεση κάποιου από τους τρεις παράγοντες προκαλώντας ύφεση της καύσης.
- **Ωρίμανση (Growth):** κατά την ανάφλεξη ένα μικρό ποσοστό του καυσίμου καίγεται και παράγονται καπνοί. Το οξυγόνο του αέρα εφοδιάζει τη φωτιά και στο χώρο του πυροδιαμερίσματος αναπτύσσονται δύο στρώματα αέρα: το χαμηλότερο στρώμα, με χαμηλότερες θερμοκρασίες στο οποίο αντλείται ο ψυχρότερος αέρας και το υψηλότερο στρώμα με θερμότερο καπνό. Όταν η στήλη καπνού φτάνει στην οροφή υπάρχει μια ροή θερμών αερίων ακτινικά προς τους τοίχους του πυροδιαμερίσματος αναφερόμενη στη βιβλιογραφία ως ceiling jet gasses. Καθώς η πυρκαγιά εξελίσσεται, το ψυχρότερο χαμηλότερο στρώμα προσφέρει ασφαλή δίοδο διαφυγής στους ένοικους, ωστόσο σταδιακά συρρικνώνεται λόγω κορεσμού του αέρα από καπνό και φλόγες. Σε αυτό το στάδιο η θερμοκρασία αυξάνεται περίπου εκθετικά ή δευτεροβάθμια. Οι υποθέσεις αυτές έγιναν με βάση την παραδοχή ότι ένα αντικείμενο καίγεται, αλλά η παρουσία εύφλεκτων υλικών στο πυροδιαμέρισμα αυξάνει ουσιαστικά το ρυθμό ωρίμανσης της πυρκαγιάς.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Εικόνα 3: Στάδιο ωρίμανσης της πυρκαγιάς (BUCHANAN A.H., 2017 [5]).

- **Φούντωμα (Flashover):** όσο η πυρκαγιά ωριμάζει το υψηλότερο στρώμα συνεχώς θερμαίνεται αυξάνοντας την ακτινοβολούμενη θερμική ροή έως την κρίσιμη τιμή της. Συνήθως το φούντωμα συμβαίνει σε θερμοκρασίες 500-600 °C και προκαλεί ξαφνική εξάπλωση της πυρκαγιάς στο σύνολο των καύσιμων υλικών του πυροδιαμερίσματος. Στο στάδιο αυτό παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Πλήρης ανάπτυξη (Full intensity):** αφού πραγματοποιηθεί το φούντωμα η συμπεριφορά της πυρκαγιάς αλλάζει. Ο αέρας του πυροδιαμερίσματος σχημάτιζει πλέον ένα στρώμα οι ροές του οποίου είναι εξαιρετικά τυρβώδεις, καθιστώντας τη διστρωματική προσομοίωση του αέρα ανεπαρκής. Στην πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά οι θερμοκρασίες πιθανότατα θα ξεπεράσουν τους 1000 °C και συνδυαστικά με την πυρόλυση των καυσίμων απελευθερώνεται ευμεγέθους ποσότητα καυσαερίων. Επιπρόσθετα, σε αυτό το στάδιο ανάλογα με τον βαθμό αερισμού του πυροδιαμερίσματος οι πυρκαγιές διακρίνονται σε αερο - ελεγχόμενες και καυσιμο - ελεγχόμενες.



Εικόνα 4: : Στάδιο πλήρους ανάπτυξεως της πυρκαγιάς (Τάσιος Θ.Π., Δεοδάτης Γ., 1984 [28]).

- **Απόσβεση (Decline):** μόλις γίνει ανεπαρκές το οξυγόνο ή τα καύσιμα μέσα στο πυροδιαμέρισμα, η απόσβεση και η μείωση της θερμοκρασίας ξεκινά.

2.2 Αναλυτική μέθοδος δομοστατικού σχεδιασμού φορέων έναντι πυρκαγιάς

Η πλήρως αναλυτική διαδικασία σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς εξετάζει: την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στη συμπεριφορά του φορέα, τη δυνητική ένταση και διάρκεια της πυρκαγιάς, την ευεργετική συνεισφορά ενεργών και παθητικών μέτρων πυροπροστασίας, τις αβεβαιότητες των παραπάνω παραγόντων και τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Για τη συστηματική μελέτη της διαιρείται σε τρία διακριτά αλλά αλληλοεξαρτώμενα βήματα: την εξάπλωση της πυρκαγιάς (fire modeling) στο πυροδιαμέρισμα ή γενικά στη κατασκευή, τη θερμοκρασιακή διάχυση (thermal analysis) στα δομικά μέλη και τη δυναμική μη - γραμμική επίλυση (nonlinear dynamic analysis) του συνόλου του φορέα ή μεμονωμένων στοιχείων. Η ανάλυση των βημάτων γίνεται στις ακόλουθες παραγράφους. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία σύζευξης των βημάτων της θερμοκρασιακής ανάλυσης (διάχυσης) και της μηχανικής ανάλυσης (δυναμικής μη - γραμμικής).



Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς.

2.2.1 Εξάπλωση της πυρκαγιάς (Fire modelling)

Αρχικά, επιλέγονται τα σενάρια της πυρκαγιάς για τα οποία θα σχεδιαστεί ο φορέας και καθορίζεται η καμπύλη θερμοκρασίας αερίων - χρόνου για κάθε ένα από αυτά. Γενικά στη βιβλιογραφία και στους τεχνικούς κανονισμούς (π.χ. EN 1991-1-2 (2002)) καθορίζονται δύο κατηγορίες καμπυλών θερμοκρασίας αερίων – χρόνου:

- **Πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων - χρόνου (Nominal fire curves):** αποτελούν αντιπροσωπευτικές καμπύλες, που συνήθως εκφράζονται μέσω μιας μαθηματικής συνάρτησης. Πειράματα δομικών μελών εκτεθειμένων σε πρότυπες καμπύλες συνθέτουν τη βάση πινακοποιημένων “prescriptive based” μεθόδων (π.χ. κεφάλαιο 5 “Tabulated data” του EN 1992-1-2 (2004)). Χρησιμοποιούνται ακόμη, εκτενώς για την πειραματική διερεύνηση της πυραντίστασης υλικών παθητικής πυροπροστασίας όπως ο πετροβάμβακας και για την ταξινόμηση διάφορων προϊόντων. Η τυποποίησή τους σε πολλούς τεχνικούς κανονισμούς παγκοσμίως διευκολύνει τη σύγκριση των σχεδιασμών μεταξύ διαφορετικών έργων και η απλότητα στη χρήση τους τις καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς. Ωστόσο, οι πρότυπες καμπύλες είναι εντελώς ανεξάρτητες από τα χαρακτηριστικά του πυροδιαμερίσματος που επηρεάζουν το φαινόμενο της πυρκαγιάς, όπως το μέγεθός του, οι συνθήκες αερισμού του και η πυκνότητα του καύσιμου φορτίου [22]. Επομένως η άκριτη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβές σενάριο πυρκαγιάς και ελαττωματικό σχεδιασμό.
- **Φυσικές καμπύλες θερμοκρασίας αερίων - χρόνου (Natural fire curves):** είναι το αποτέλεσμα μοντελοποίησης του σεναρίου της πυρκαγιάς. Για την παραγωγή τους λαμβάνονται υπόψη η σύνθεση, η πυκνότητα και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (heat release rate – HRR) του καύσιμου φορτίου, ο αερισμός, η γεωμετρία και το μέγεθος του πυροδιαμερίσματος. Επίσης, ανάλογα με το σενάριο της πυρκαγιάς δύναται να συμπεριληφθεί η επίδραση ενεργών μέτρων πυροπροστασίας (π.χ. αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος) και η επέμβαση της πυροσβεστικής. Τα σενάρια της πυρκαγιάς μπορούν να προσομοιωθούν με μια πληθώρα μοντέλων, καθένα από τα οποία έχει συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Γενικά στη βιβλιογραφία και στους τεχνικούς κανονισμούς (π.χ. EN 1991-1-2 (2002)) καθορίζονται δύο βασικές κατηγορίες μοντέλων: τα απλοποιημένα μοντέλα πυρκαγιάς και τα προηγμένα μοντέλα πυρκαγιάς. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση κάποιων από τους παραπάνω παράγοντες με απλοποιημένες μαθηματικές σχέσεις ή εμπειρικές σχέσεις. Συγχρόνως η ισχύ τους περιορίζεται από τις βασικές υποθέσεις που επέτρεψαν την απλοποίηση του προβλήματος της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Στο πρώτο (Annex A: Parametric temperature – time curves) και στο τρίτο (Annex C: Localised fires) παράρτημα του EN 1991-1-2 (2002) αναγράφονται απλοποιημένα μοντέλα για την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε ένα τυπικό πυροδιαμέρισμα και για την εξάπλωση πυρκαγιάς, στην οποία εμπλέκεται περιορισμένο ποσοστό του καύσιμου φορτίου του πυροδιαμερίσματος και συνεπώς είναι απίθανη η εμφάνιση φουντώματος, αντίστοιχα. Τα προηγμένα μοντέλα αναφέρονται κυρίως σε κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, που υπολογίζουν τα μεγέθη της ροής ρευστού που οφείλονται στην ύπαρξη φωτιάς. Στα εργαλεία αυτά επιλύονται αριθμητικά οι εξισώσεις Navier-Stokes,

δίνοντας έμφαση στις θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων, στη παραγωγή καπνού και την μεταφορά θερμότητας και μάζας. Η χρήση κωδίκων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την εξάπλωση της πυρκαγιάς έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας ως προς τη συμπεριφορά και την εξέλιξη του φαινομένου [5, 8]. Εντούτοις, η αυξημένη πολυπλοκότητά τους και η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος καθιστούν χρονοβόρα και ακριβή την χρήση τους.

2.2.2 Θερμοκρασιακή διάχυση (Thermal analysis)

Στο βήμα της θερμοκρασιακής διάχυσης έχοντας ως δεδομένο εισαγωγής την καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου, από το βήμα της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο της διατομής των δομικών μελών συναρτήσει του χρόνου. Η αύξηση της θερμοκρασίας στον φέρων οργανισμό συνιστά την αιτία αστοχίας των κατασκευών που εκτίθενται σε πυρκαγιά. Το μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας που εκλύεται κατά την καύση των καυσίμων, προκαλεί τεράστια διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην άμεση περιοχή της φωτιάς και στον περιβάλλοντα χώρο. Ως εκ τούτου, παρατηρείται, μια χρονικά μεταβαλλόμενη, μεταφορά θερμότητας από τη θερμότερη προς την ψυχρότερη περιοχή με στόχο την επίτευξη θερμικής ισορροπίας, δηλαδή οι θερμοκρασίες των δύο περιοχών εξισώνονται και η μεταφορά θερμότητας σταματάει. Παρακάτω, αναλύονται οι τρεις φυσικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμικής ενέργειας.

2.2.2.α Μεταφορά θερμότητας με αγωγή (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα σε στερεά εν επαφή και η διάχυση θερμότητας μέσα στον όγκο ενός στερεού ή ενός ακίνητου ρευστού κυβερνάται από τον μηχανισμό της αγωγής. Στα στερεά η μεταφορά οφείλεται στις ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος και στη ροή ηλεκτρονίων ενώ στα μη κινούμενα ρευστά οφείλεται κυρίως στη μοριακή διάχυση των σωματιδίων, χωρίς να παρατηρείται μετακίνηση υλικού μακροσκοπικά και στις δύο περιπτώσεις. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς όταν οι φλόγες έρχονται σε επαφή με γειτονικά καύσιμα (π.χ. έπιπλα) θερμική ενέργεια άγεται μέσω αυτών, ανεβάζοντας την θερμοκρασία τους. Η αγωγή είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός της θερμοκρασιακής διάχυσης μέσα στη διατομή των δομικών μελών.

Έστω ένα τρισδιάστατο σώμα που υπόκειται σε εισροή θερμότητας. Η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία του σώματος είναι εξαρτώμενη από τον χρόνο [20]:

$$T = T(x, y, z, t) = T(\vec{r}, t)$$

Το μέγεθος και η κατεύθυνση της μέγιστης αύξησης θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο του σώματος δίνεται από το διάνυσμα:

$$\nabla T \equiv \vec{i} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Ο ρυθμός θερμικής ροής λόγω αγωγής είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας και ακολουθεί τον νόμο του Fourier:

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \rightarrow q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

όπου:

$\vec{q} (W/m^2)$ η θερμική ροή προς το σώμα και $\lambda (W/m \cdot ^\circ C)$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σώματος.

Γενικά η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη θέση και τη θερμοκρασία:

$$\lambda = \lambda(\vec{r}, T(\vec{r}, t))$$

Ωστόσο τα περισσότερα υλικά, όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας είναι ισότροπα ως προς το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας: $\lambda = \lambda(T(\vec{r}, t))$.

Συνδυάζοντας τον νόμο αγωγής του Fourier με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο (αρχή διατήρησης της ενέργειας) προκύπτει ότι για κάθε χρονική στιγμή το άθροισμα του ποσού θερμότητας που απορροφά το σώμα και του ποσού θερμότητας που παράγει θα πρέπει να ισούται με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας. Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας διατυπώνεται ως εξής [20]:

$$\nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) + \dot{q} = \rho(T) \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ με } \frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$$

όπου:

$\dot{q} (W/m^3)$ η θερμική ροή κατά όγκο που παράγει το σώμα. Στη περίπτωση του προβλήματος της πυρκαγιάς σε φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα μηδενίζεται η τιμή της, αφού το υλικό δεν παράγει θερμότητα,

$\rho(T) (kg/m^3)$ η πυκνότητα του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας,

$c(T) (J/kg \cdot ^\circ C)$ η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική θερμότητα του υλικού.

Για τη λύση της παραπάνω μερικής διαφορικής εξίσωσης πρέπει να οριστούν επιπλέον:

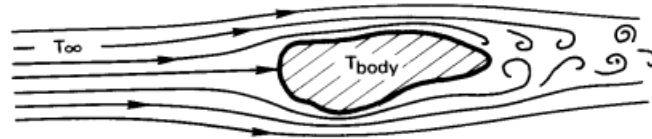
- **Αρχική συνθήκη:** $T = T_i(x, y, z)$, για $t = 0$
- **Συνοριακή συνθήκη:** η θερμική ροή στο σώμα μέσω των συνόρων της διατομής του, στην περίπτωση που εκτίθεται σε πυρκαγιά, ισούται με τη θερμική ροή λόγω συναγωγής $h_{net,c}$ και με τη θερμική ροή λόγω ακτινοβολίας $h_{net,r}$:

$$\left(-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{boundary} = q = h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} (W/m^2)$$

$$\left(-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{boundary} = q = \dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, (W/m^2)$$

2.2.2.β Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (convection)

Η συναγωγή διαδραματίζει καίριο ρόλο στη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα σε ένα στερεό και σε ένα ρευστό, ειδικότερα όταν το ρευστό ρέει στην επιφάνεια του στερεού. Η κίνηση του ρευστού στον χώρο συνεπάγεται μεταφορά της μάζας, της ορμής και της περιεχόμενης ενέργειάς του, επιδρώντας στη θερμοκρασία του χώρου κίνησης. Όταν η ροή ρευστού προκύπτει από επιβολή εξωτερικών αιτιών η συναγωγή είναι εξαναγκασμένη. Αντιθέτως, όταν η ροή προκύπτει από τη διακύμανση της θερμοκρασίας και κατά επέκταση διακύμανση της πυκνότητας που δημιουργεί ανωστικές ροές, μέσα στον όγκο του ρευστού η συναγωγή είναι ελεύθερη. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς η συναγωγή συνεισφέρει σημαντικά στη μεταφορά θερμικής ενέργειας, σε μεγαλύτερες αποστάσεις συγκριτικά με την αγωγή, μέσω της κίνησης του πλουμίου θερμών και υπέρθερμων αερίων που παράγονται από την καύση [20, 27].



Εικόνα 6: Ο μηχανισμός της συναγωγής (John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, 2003 [20]).

Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά και τον τύπο της ροής του ρευστού, δηλαδή από το εάν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης, σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη, φυσική ή εξαναγκασμένη κλπ.. Ανεξάρτητα όμως της πολυπλοκότητας του μηχανισμού ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή είναι ανάλογος της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στην επιφάνεια του στερεού και στο ρευστό που ρέει επάνω της. Ο νόμος ψύξης του Newton περιγράφει τη μόνιμη και μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής:

$$q = \dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (T_\infty - T_b), (W/m^2)$$

όπου:

$q = \dot{h}_{net,c} (W/m^2)$ η θερμική ροή λόγω συναγωγής,

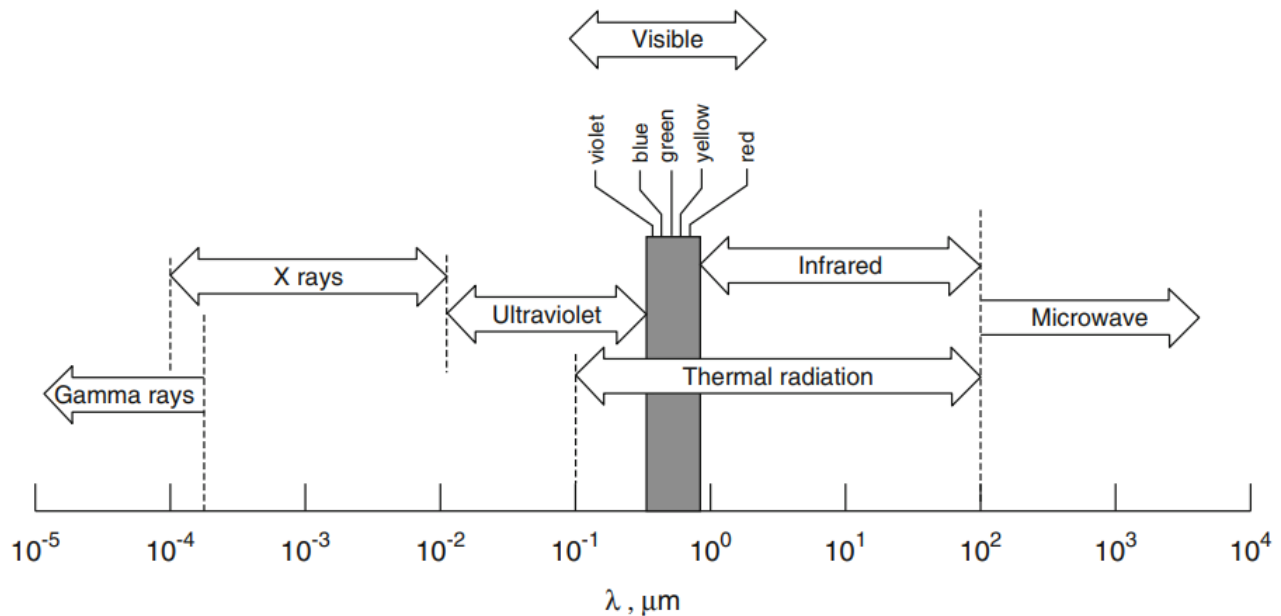
$\alpha_c (W/m^2 \cdot ^\circ C)$ ο συντελεστής συναγωγής,

T_∞ ή T_g ($^\circ C$) η θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια και συγκεκριμένα στο πρόβλημα της πυρκαγιάς η θερμοκρασία αερίων όπως υπολογίζεται στο βήμα της εξάπλωσης της πυρκαγιάς μέσω της μοντελοποίησης του σεναρίου πυρκαγιάς,

T_b ή T_s ($^\circ C$) η θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος και συγκεκριμένα στο πρόβλημα της πυρκαγιάς η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υπό εξέταση δομικού στοιχείου.

2.2.2.γ Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (radiation)

Όλα τα σώματα απορροφούν, ανακλούν και εκπέμπουν θερμική ενέργεια μέσω θερμικής ακτινοβολίας (ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων). Η θερμοκρασία του σώματος, η φύση της επιφάνειάς του και το μήκος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθορίζουν την ένταση των θερμικών ροών [27]. Στο πρόβλημα της πυρκαγιάς η ακτινοβολία θεωρείται ως ο σημαντικότερος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας και επηρεάζει την ξαφνική εξάπλωση της πυρκαγιάς (φούντωμα), διότι μεταφέρει ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη επαφής (αγωγή) ή ύπαρξη μέσου μεταφοράς της ενέργειας (συναγωγή – πλουμίο θερμών και υπέρθερμων αερίων).



Εικόνα 7: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016 [16]).

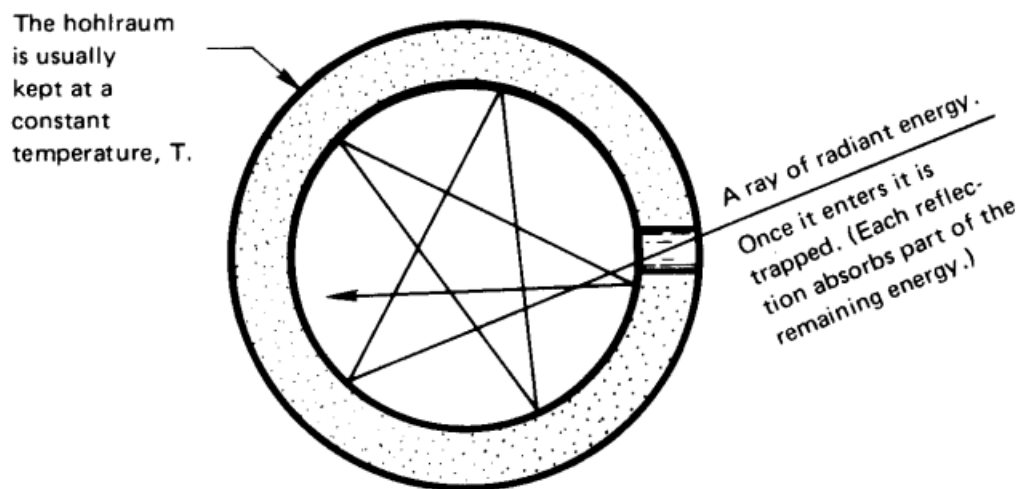
Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος (λ (m)) και τη συχνότητά τους (ν (Hz = 1/sec)), τα οποία συνδέονται με τη σχέση: $\lambda = c/\nu$, όπου c (m/sec) η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας στο υλικό μέσο. Στο κενό η ταχύτητα διάδοσης ισούται με την ταχύτητα του φωτός $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$ (m/sec). Ηλεκτρομαγνητικά κύματα που το μήκος κύματός τους ανήκει σε ένα συγκεκριμένο εύρος απαρτίζουν ζώνες (bands). Το σύνολο των ζωνών, που περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος από 0 έως ∞ , συνθέτει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η θερμική ακτινοβολία ανήκει στο τμήμα του φάσματος με μήκη κύματος $\lambda = 0,1 - 100 \mu m$ και περιέχει μέρος της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας ($\lambda = 0,01 - 0,4 \mu m$), την ορατή ακτινοβολία ($\lambda = 0,4 - 0,76 \mu m$) και την υπέρυθη (IR) ακτινοβολία ($\lambda = 0,76 - 100 \mu m$) [20].

Όλα τα πραγματικά σώματα, ανάλογα με τη θερμοκρασία τους και τη φύση της επιφάνειάς τους, εκπέμπουν ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου, με διαφορετική ένταση σε κάθε κατεύθυνση. Επιπρόσθετα, όταν ακτινοβολία προσπίπτει σε μια επιφάνειά

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

τους, κατά ένα ποσοστό της την απορροφούν, ένα ποσοστό της το ανακλούν και το υπόλοιπο ποσοστό της διέρχεται διαμέσου αυτών και διαφεύγει. Για τη μείωση της συνθετότητας του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, έχουν επινοηθεί διάφορα ιδανικά σώματα ως υποκατάστατα του πραγματικού σώματος [27]. Άρα, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία ανάμεσα στη φωτιά και το υπό μελέτη δομικό στοιχείο, προσομοιώνεται ως μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ ενός μέλανος σώματος και ενός φαιού σώματος αντίστοιχα.

Το μέλαν σώμα (black body) είναι ένα εξιδανικευμένο μοντέλο της ύλης. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η απορρόφηση του συνόλου της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που δέχεται ανεξαρτήτως του μήκους κύματος και της κατεύθυνσης της. Ως εκ τούτου, η ανακλώμενη και η διερχόμενη ακτινοβολία είναι μηδενικές. Επίσης, εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου το μέγιστο ποσό θερμικής ενέργειας συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο σώμα, σε δεδομένη θερμοκρασία και μήκος κύματος. Το μέλαν σώμα προσεγγίζεται ως μια κοιλότητα, με ομοιόμορφη εσωτερική θερμοκρασία, που έχει μια μικρή οπή. Η εισερχόμενη από την οπή ακτινοβολία παγιδεύεται και οι συνεχείς ανακλάσεις στα τοιχώματα της κοιλότητας οδηγούν στην πλήρης απορρόφησης της. Η φωτιά προσεγγίζει ικανοποιητικά τις ιδιότητες του μέλανος σώματος [20, 27].



Εικόνα 8: Μέλαν Σώμα (John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, 2003 [20]).

Η μέγιστη ανηγμένη ροή θερμότητας που εκπέμπεται από το μέλαν σώμα δίνεται από το νόμο των Stefan – Boltzmann:

$$q = \sigma \cdot T_s^4, (W/m^2)$$

όπου:

q (W/m^2) θερμική ροή λόγω ακτινοβολίας,

$\sigma = 5,66697 \cdot 10^{-8}$, ($W/(m^2 \cdot K^4)$) η σταθερά των Stefan – Boltzmann,

T_s (K) η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η ροή θερμότητας που εκπέμπεται από ένα πραγματικό σώμα ισούται με:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4, (W/m^2)$$

όπου:

$0 \leq \varepsilon \leq 1$ ο αδιάστατος συντελεστής εκπομπής.

Στα πραγματικά σώματα ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος, το μήκος κύματος και την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Στο πρόβλημα της πυρκαγιάς τα δομικά μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα συχνά προσομοιώνονται ως φαιά σώματα και για αυτό ο συντελεστής εκπομπής έχει σταθερή τιμή. Το φαιό σώμα (gray body) αποτελεί απλοποίηση του πραγματικού σώματος και λειτουργεί ως τροποποιημένο μέλαν σώμα. Δηλαδή, απορροφά σταθερό ποσοστό προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ανεξαρτήτως του μήκους κύματος και της κατεύθυνσης της. Ακόμα, εκπέμπει ομοιόμορφα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση του χώρου και για όλα τα μήκη κύματος σταθερό ποσοστό της ακτινοβολίας μέλανος σώματος [27].

Συνοψίζοντας, η ανηγμένη ροή θερμότητας μεταξύ της φωτιάς και της επιφάνειας του δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα, ορίζεται ως η διαφορά της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας της φωτιάς από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία της επιφάνειας του στοιχείου και ισούται:

$$q = h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4], (W/m^2)$$

όπου:

Φ ο συντελεστής σχήματος ίσος με τη μονάδα στις περισσότερες περιπτώσεις,

$\varepsilon_f = 1$ ο συντελεστής εκπομπής της φωτιάς,

$\varepsilon_m = 0,80$ ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του δομικού μέλους φωτιάς,

$T_r(^{\circ}C)$ η θερμοκρασία αερίων όπως υπολογίζεται στο βήμα της εξάπλωσης της πυρκαγιάς μέσω της μοντελοποίησης του σεναρίου πυρκαγιάς,

$T_b(^{\circ}C)$ η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υπό εξέταση δομικού στοιχείου.

2.2.2.δ Αδιάστατος αριθμός Biot

Ο λόγος της αντίστασης αγωγής θερμικής ενέργειας μέσα στο στερεό σώμα προς την αντίσταση συναγωγής από την επιφάνεια του σώματος στο περιβάλλον εκφράζεται από τον αριθμό Biot [27].

$$Bi = \frac{\frac{A(m^2)}{\lambda(W/m \cdot ^{\circ}C)}}{\frac{P_{exp}(m)}{\alpha_c(W/m^2 \cdot ^{\circ}C)}} = \frac{\alpha_c \cdot L_{eff}}{\lambda}$$

Όπου: $\lambda(W/m \cdot ^{\circ}C)$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $\alpha_c(W/m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ο συντελεστής συναγωγής και $L_{eff}(m^2/m)$ το χαρακτηριστικό μήκος που ισούται με το λόγο του εμβαδού της διατομής $A(m^2)$ του σώματος προς την εκτιθέμενη στο μηχανισμό της συναγωγής περίμετρο $P_{exp}(m)$.

Στο ενδεχόμενο όπου η αντίσταση αγωγής στο στερεό είναι μικρότερη εν συγκρίσει με την αντίσταση συναγωγής ($Bi \ll 1$), η διαφορά θερμοκρασίας παρατηρείται πρωτίστως μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του περιβάλλοντος, ενώ στο εσωτερικό του στερεού οι διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων του είναι μηδενική. Αντίθετα, στο ενδεχόμενο όπου η αντίσταση αγωγής είναι σχετικά μεγάλη ($Bi \geq 1$), υπάρχει έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση ανάμεσα στην επιφάνεια του στερεού σώματος και του εσωτερικού του. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, όταν πληρείται το κριτήριο ότι η αντίσταση αγωγής είναι τουλάχιστον δέκα φορές μικρότερη από την αντίσταση συναγωγής ($Bi < 0,10$), μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το στερεό έχει την ίδια θερμοκρασία στο σύνολο της διατομής του. Ένα τέτοιο σύστημα λέγεται σώμα αμελητέας αντίστασης αγωγής ή σώμα ομοιόμορφης θερμοκρασίας (lumped – capacitance model).

Ο αδιάστατος αριθμός Biot καταδεικνύει μια θεμελιώδη διαφορά μεταξύ των δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα, στα οποία ο αριθμός Biot παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα ή και μεγαλύτερες και των δομικών μελών από δομικό χάλυβα, στα οποία οι τιμές του αριθμού Biot είναι κατά πολύ μικρότερες της μονάδας. Η μοντελοποίηση δομικών μελών ως σώματα ομοιόμορφης θερμοκρασίας είναι δυνατή μόνο για δομικά μέλη από χάλυβα, απλοποιώντας σημαντικά το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, η ταύτιση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της χαλύβδινης διατομής με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της, σημαίνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο σύνολο της διατομής είναι ταχύτερη σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας σε μία διατομή από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου τα εσώτερα τμήματα της είναι σημαντικά ψυχρότερα συγκριτικά με την επιφάνειά της.

2.2.3 Δυναμική μη – γραμμική επίλυση (Nonlinear Dynamic analysis)

Στο τελευταίο βήμα της πλήρως αναλυτικής διαδικασίας σχεδιασμού φορέων έναντι πυρκαγιάς έχοντας ως δεδομένο εισαγωγής τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο της διατομής των δομικών μελών για κάθε χρονική στιγμή, από το βήμα της θερμοκρασιακής διάχυσης, παράγονται οι αντίστοιχες θερμικές δράσεις που δρουν στα δομικά μέλη για την ίδια χρονική στιγμή λόγω της διαστολής τους. Οι δράσεις αυτές συνδυάζονται με τα υπόλοιπα φορτία, συνήθως στατικά (π.χ. μόνιμα, μη – μόνιμα, φορτία ανέμου, φορτία χιονιού) και σπανιότερα δυναμικά (π.χ. σεισμική επιτάχυνση, έκρηξη) που δρουν ταυτόχρονα στα δομικά μέλη. Πολλαπλασιασμένα με κατάλληλους συντελεστές, ανάλογα με το αν εξετάζεται οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) ή οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS), συνθέτουν τον συνδυασμό δράσεων για τον οποίο επιλύονται τα δομικά μέλη. Συγχρόνως, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας και δεν έχουν την ίδια τιμή σε όλη τη διατομή του μέλους. Τελικά, τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που εμφανίζονται στα μέλη συναρτήσει του χρόνου. Ολοκληρώνοντας τις παραμορφώσεις στο μήκος αναφοράς προκύπτουν οι μετατοπίσεις του μέλους και ολοκληρώνοντας τις τάσεις στις κρίσιμες διατομές προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη τους.

Η επιλογή δυναμικής μη – γραμμικής επίλυσης των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα που εκτίθενται σε πυρκαγιά στηρίζεται σε δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι η εξάρτηση των θερμικών δράσεων και των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και του σκυροδέματος από την αλλαγή της θερμοκρασίας, που καθιστά το πρόβλημα δυναμικό (χρονικά μεταβαλλόμενο). Ο δεύτερος λόγος είναι η μη γραμμικότητα του διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των υλικών που οξύνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.

2.2.3.α Εξίσωση ισορροπίας

Η εξίσωση ισορροπίας οποιουδήποτε φορέα με πλήθος βαθμών ελευθερίας N έναντι πυρκαγιάς, χωρίς τη συμμετοχή άλλου δυναμικού φορτίου, μπορεί να διατυπωθεί μέσω της αρχής των δυνατών έργων και η μητρική μορφή της είναι η ακόλουθη:

$$[K(T(t))] \cdot \{D(t)\} = \{P(T(t))\} + \{P\}$$

όπου:

$[K(T(t))]$ είναι το εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία μητρώο στιβαρότητας του φορέα διαστάσεων $N \times N$, $\{D(t)\}$ είναι το διάνυσμα των επικόμβιων μετατοπίσεων διάστασης N όπου κάποιες από αυτές είναι δεσμευμένες αποτελώντας τις συνοριακές συνθήκες (διάνυσμα μετατοπίσεων των ελεύθερων και των δεσμευμένων βαθμών ελευθερίας του φορέα),

$\{P(T(t))\}$ είναι το διάνυσμα των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία θερμικών δράσεων, όπως αντιστοιχίζονται σε κάθε βαθμό ελευθερίας, διάστασης N ,

$\{P\}$ είναι το διάνυσμα των επικόμβιων δράσεων που δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, διάστασης N .

Η εξίσωση ισορροπίας πρέπει να ικανοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Η επίλυση τόσο της εξίσωσης ισορροπίας όσο και της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο (2.2.2.α), γίνεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

2.3 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) είναι μια μέθοδος για την αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αποτελεί εξέλιξη των μεθόδων των μεταβολών και των μεθόδων των σταθμικών υπολοίπων. Ο χειρισμός σύνθετων γεωμετριών και εκλεπτυσμένων μοντέλων για τα υλικά, η ευελιξία στην προσομοίωση διαφόρων φυσικών φαινομένων και η ικανότητα σύγκλισης την καθιστούν εξαιρετικά ανταγωνιστική. Για αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων και προβλημάτων μηχανικής [29].

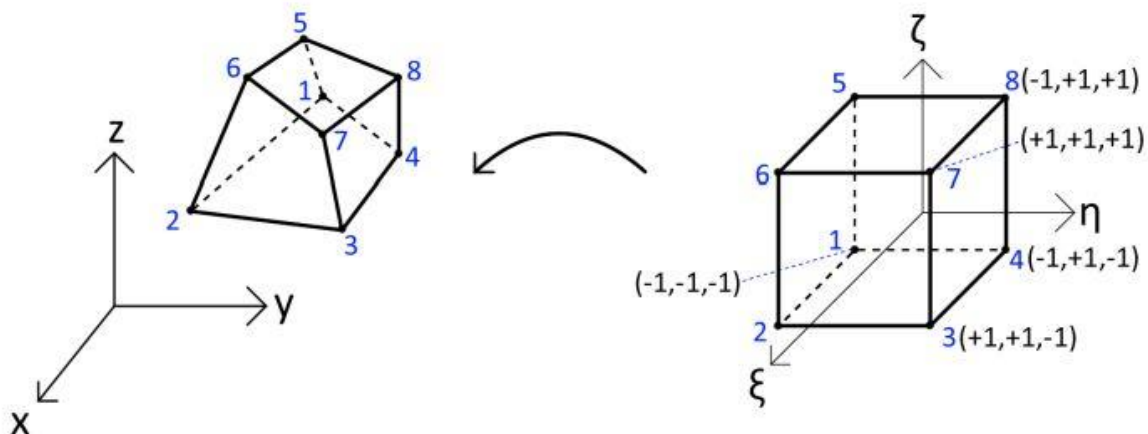
Η κεντρική αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση της μονοδιάστατης, δισδιάστατης ή τρισδιάστατης γεωμετρίας του προβλήματος με ένα διακριτό πεπερασμένο σύνολο καλά ορισμένων και μικρών σχετικά σε μέγεθος στοιχείων. Η σύνδεση τους γίνεται στους κόμβους που βρίσκονται στις άκρες ή κατά μήκος των πλευρών τους. Το σύνολο αυτό των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα. Στον ορισμό των στοιχείων θεμελιώδης σημασία έχουν οι κόμβοι, διότι στα σημεία αυτά εκτός του ότι συνδέονται τα στοιχεία μεταξύ τους, επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις παντός τύπου. Επίσης, στους κόμβους ορίζονται κάθε είδους βαθμοί ελευθερίας (π.χ. μετατόπιση, στροφή, θερμοκρασία) [6].

Κυρίαρχο ρόλο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν οι συναρτήσεις παρεμβολής (interpolation function). Επιλέγονται για όλα τα στοιχεία του δικτύου και ορίζουν ένα προσεγγιστικό πεδίο τιμών στο εσωτερικό τους για τις άγνωστες μεταβλητές, όπως η μετατόπιση, η πίεση και η

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

θερμοκρασία. Ο υπολογισμός του προσεγγιστικού πεδίου των μετατοπίσεων ή των θερμοκρασιών εντός του στοιχείου γίνεται παρεμβάλλοντας τις επικόμβιες τιμές της άγνωστης μεταβλητής. Οι συναρτήσεις παρεμβολής είναι πολυωνυμικής μορφής. Κριτήριο για την επιλογή του βαθμού τους είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση του πραγματικού πεδίου τιμών των άγνωστων μεταβλητών εντός του στοιχείου. Η μορφή του πραγματικού πεδίου, δηλαδή αν οι άγνωστες μεταβλητές μεταβάλλονται από τον ένα κόμβο στον άλλο γραμμικά, δευτεροβάθμια ή εκθετικά, ενδέχεται να είναι γνωστή από τη φύση του προβλήματος. Στην περίπτωση που η μορφή του πεδίου είναι άγνωστη πρέπει να γίνει μία επαναληπτική διαδικασία, όπου σταδιακά θα αυξάνεται ο βαθμός της συνάρτησης παρεμβολής έως ότου η μέθοδος να συγκλίνει και η λύση να εμφανίζει κύρια χαρακτηριστικά του προβλήματος όπως η ομαλότητα και η συνέχεια.

Για να εξασφαλιστεί γεωμετρική ακρίβεια και συνέπεια στην προσομοίωση φορέων τυχαίου σχήματος, με καμπύλα σύνορα επινοήθηκαν τα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία. Η ισοπαραμετρική θεώρηση εδράζεται στη χρήση του Καρτεσιανού συστήματος (x,y,z) και ενός δεύτερου συστήματος συντεταγμένων (ξ,η,ζ) , που ονομάζεται φυσικό σύστημα. Στο Καρτεσιανό σύστημα ένα τρισδιάστατο στοιχείο για παράδειγμα, δύναται να έχει καμπύλα σύνορα, διαφορετικό μήκος πλευρών μεταξύ των κορυφών (κόμβων) του και μη ορθές γωνίες. Αντίθετα, στο φυσικό σύστημα όλα τα τρισδιάστατα στοιχεία του δικτύου του φορέα έχουν μία μοναδική μορφή κύβου με μήκος ακμής ίσο με δύο. Η ταυτόχρονη χρήση των δύο συστημάτων συντεταγμένων στην ίδια θεώρηση και για το ίδιο στοιχείο γίνεται μέσω μίας αμφιμονοσήμαντης απεικόνισης (mapping) του στοιχείου από το ένα σύστημα στο άλλο που βασίζεται στο Ιακωβιανό μητρώο μετασχηματισμού. Άρα, οι Καρτεσιανές συντεταγμένες εντός του στοιχείου (x,y,z) υπολογίζονται παρεμβάλλοντας τις αντίστοιχες επικόμβιες ποσότητες (x_i,y_i,z_i) . Ο όρος ισοπαραμετρικός αναφέρεται στο γεγονός ότι τόσο το προσεγγιστικό πεδίο των άγνωστων μεταβλητών όσο και οι Καρτεσιανές συντεταγμένες εκφράζονται, ως προς τις αντίστοιχες επικόμβιες ποσότητες χρησιμοποιώντας κοινές συναρτήσεις παρεμβολής [29].



Εικόνα 9: Ισοπαραμετρικό εξαεδρικό πεπερασμένο στοιχείο 8 κόμβων (Bakalagos S., 2022 [3]).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Το ολικό μητρώο στιβαρότητας του φορέα που εμφανίζεται στη μητρική μορφή της εξίσωσης ισορροπίας προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους μητρώων στιβαρότητας των στοιχείων του [29]:

$$[K] = \sum_{e=1}^{n_e} [T_e]^T \cdot [K_e] \cdot [T_e]$$

όπου:

$[K_e]$ είναι το μητρώο στιβαρότητας κάθε ισοπαραμετρικού πεπερασμένου στοιχείου του φορέα υπολογισμένο στους τοπικούς βαθμούς ελευθερίας,

$[T_e]$ είναι ένα μητρώο Boolean με όρους 0 ή 1 που συνδέει τους τοπικούς βαθμούς ελευθερίας του στοιχείου με τους αντίστοιχους καθολικούς βαθμούς ελευθερίας του φορέα,

n_e είναι το πλήθος των στοιχείων που συνθέτουν το πλέγμα του φορέα.

Η γενική έκφραση του μητρώου στιβαρότητας οποιουδήποτε τρισδιάστατου ισοπαραμετρικού πεπερασμένου στοιχείου δίνεται από την έκφραση [29]:

$$[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_e(\xi, \eta, \zeta)]^T \cdot [E_e] \cdot [B_e(\xi, \eta, \zeta)] \cdot \det[J] \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta$$

όπου:

$[B_e(\xi, \eta, \zeta)]$ είναι το μητρώο παραμόρφωσης του στοιχείου που περιέχει τις μερικές παραγώγους των συναρτήσεων παρεμβολής,

$[E_e]$ είναι το καταστατικό μητρώο του υλικού του στοιχείου,

$\det[J]$ είναι η ορίζουσα του Ιακωβιανού μητρώου του μετασχηματισμού και ισχύει:

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz = \det[J] \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta.$$

Ο υπολογισμός του μητρώου στιβαρότητας του στοιχείου γίνεται μέσω αριθμητικής επίλυσης του ολοκληρώματός του. Μία ευρέως διαδεδομένη τεχνική αριθμητικής ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται είναι η ολοκλήρωση Gauss – Legendre (Gauss – Legendre quadrature), όπου το ολοκλήρωμα αντικαθίσταται από ένα άθροισμα. Επειδή, η αριθμητική ολοκλήρωση ενός μητρώου επαναλαμβάνεται χωριστά για όλους τους όρους του διατυπώνεται η αριθμητική ολοκλήρωση Gauss – Legendre ενός όρου [29]:

$$[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta, \zeta) \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_i \cdot \alpha_j \cdot \alpha_k \cdot f(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) + e_n$$

όπου:

n το πλήθος των σημείων ολοκλήρωσης ανά κατεύθυνση (τάξη ολοκλήρωσης),

$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$ οι συντελεστές βάρους για τις κατευθύνσεις ξ, η, ζ , αντίστοιχα,

ξ_i, η_j, ζ_k τα δειγματοληπτικά σημεία ανά κατεύθυνση που αποτελούν ρίζες πολωνύμων Legendre,

e_n το σφάλμα της προσέγγισης.

Το σφάλμα πρακτικά δεν προσδιορίζεται, επομένως η διατύπωση μεταβάλλεται ως εξής:

$$[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta, \zeta) \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_i \cdot \alpha_j \cdot \alpha_k \cdot f(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)$$

Η μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης και η τάξη ολοκλήρωσης επιλέγονται με βάση το είδος του προβλήματος που εξετάζεται, τις ιδιαιτερότητες του μητρώου στιβαρότητας και το είδος του στοιχείου. Επηρεάζουν καθοριστικά την ακρίβεια της μεθόδου και η τάξη ολοκλήρωσης το υπολογιστικό κόστος της.

Τη μόρφωση του καθολικού μητρώου στιβαρότητας και του διανύσματος των ισοδύναμων δράσεων του φορέα ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και έπειτα ο υπολογισμός των τάσεων, των θερμοκρασιών κλπ., προκειμένου να γίνει έλεγχος και αξιολόγηση της αριθμητικής λύσης.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει ο κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων διακριτοποίησης και αριθμητικών σφαλμάτων στο στάδιο διακριτοποίησης του φορέα και στο στάδιο του αριθμητικού υπολογισμού του μητρώου στιβαρότητας και των εξισώσεων ισορροπίας αντίστοιχα. Τα πρώτα οφείλονται στη συνδεσμολογία του πλέγματος των στοιχείων και στην πυκνότητά του, ενώ τα δεύτερα οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια της μεθόδου. Ο ενδελεχής έλεγχος της ποιότητας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και η εξασφάλιση σύγκλισης με την ικανοποίηση του ελέγχου συρραφής (patch test) είναι απαραίτητοι.

2.4 Σύζευξη θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης

Η ανάλυση συζευγμένων φυσικών φαινομένων είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση καταστάσεων για τις οποίες οι εργαστηριακές προσομοιώσεις είναι δύσκολες και ακριβές. Εκτός από τη σύζευξη θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης (coupled thermal – mechanical analysis), που είναι απαραίτητη για την εξέταση της συμπεριφοράς φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες, άλλα παραδείγματα ανάλυσης συζευγμένων φυσικών φαινομένων αποτελούν: η αλληλεπίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός φορέα με εσωτερική ή περιβάλλουσα ροή ρευστού (fluid – structure interaction) που συναντάται στις ιδιοσταλαντώσεις φορέα γέφυρας λόγω ανεμοπίεσης και στη ροή ρευστού εντός αγωγού, καθώς και η αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας (electromagnetic – thermal coupling) που συναντάται στους ηλεκτρικούς μετασχηματιστές. Για την επίτευξη συζευγμένων αναλύσεων στο μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος πρέπει να εμφανίζονται οι συνοριακές συνθήκες όλων των εξεταζόμενων φυσικών φαινομένων.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης στην περίπτωση πυρκαγιάς σε φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται ως μονόδρομη (one – directional coupling), δηλαδή η θερμοκρασιακή διάχυση στον όγκο του φορέα επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του και όχι το αντίστροφο. Αυτό σημαίνει ότι η άνοδος της θερμοκρασίας επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητές του φορέα, όπως το μέτρο ελαστικότητας και το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων και επιβάλλει θερμικές δράσεις λόγω διαστολής του όγκου, οδηγώντας σε μεταβολή της μηχανικής απόκρισης του. Ωστόσο, οι προκύπτουσες παραμορφώσεις δεν επηρεάζουν τη θερμική κατανομή εντός του φορέα [9].

Η σύζευξη της θερμοκρασιακής και της μηχανικής ανάλυσης μπορεί να γίνει εν σειρά. Στη διαδικασία αυτή πρώτα εκτελείται η θερμοκρασιακή ανάλυση για όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Έχοντας ως δεδομένο τη θερμοκρασία αερίων για κάθε χρονική στιγμή από την καμπύλη θερμοκρασία αερίων –

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

χρόνος και επιλέγοντας τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες των υλικών για κάθε πεπερασμένο στοιχείο του πλέγματος υπολογίζεται η θερμοκρασιακή διάχυση στον όγκο του φορέα επιλύοντας την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Έπειτα, διαδοχικά (εν σειρά) με δεδομένο τη θερμοκρασιακή διάχυση στον φορέα για όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς εκτελείται η μηχανική ανάλυση του φορέα. Χρησιμοποιώντας τη γνωστή θερμοκρασιακή διάχυση παράγονται οι θερμικές δράσεις και επιλέγονται οι κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες των στοιχείων. Αφού, συντεθεί το μητρώο δυσκαμψίας του φορέα, το διάλυμα των θερμικών δράσεων και το διάλυμα των δράσεων που δεν επηρεάζονται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, επιλύεται η εξίσωση ισορροπίας και προκύπτουν οι τάσεις και τα εντατικά μεγέθη του φορέα για όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς [9].

3. Συμπεριφορά οπλισμένου σκυροδέματος υπό την επίδραση πυρκαγιάς

Τα τελευταία εκατό χρόνια η χρήση οπλισμένου σκυροδέματος έφερε μια επανάσταση στις κατασκευές και στις υποδομές παγκοσμίως. Η ευπλαστότητα, η ταχύτητα κατασκευής, η άμεση διαθεσιμότητα των υλικών του σκυροδέματος, η προσιτή τιμή και φυσικά οι μηχανικές ιδιότητές του το καθιστούν πολύ ανταγωνιστικό. Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση για τα ορυκτά εμπορεύματα που δημοσιεύει η αμερικάνικη γεωλογική υπηρεσία (USGS) το έτος 2021 η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου ανήλθε σε 4,4 δισεκατομμύρια τόνους, ενώ το 2022 ανήλθε σε 4,1 δισεκατομμύρια τόνους [23], η συντριπτική πλειοψηφία των οποίων προοριζόταν για την κατασκευή σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα δεν καίγεται συνεπώς δεν συμμετέχει στη διάδοση της φωτιάς, ούτε απελευθερώνει καπνό ή τοξικά αέρια. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του τα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα πιθανών διατηρούν τη φέρουσα ικανότητά τους κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Για να συμβεί αυτό πρέπει ο εσώτερος κορμός να παραμείνει σχετικά ψυχρός και οι οπλισμοί να παραμείνουν προστατευμένοι σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου [28]. Παρόλα τα πλεονεκτήματά του το σκυρόδεμα αποτελεί ένα υλικό με σύνθετη εσωτερική δομή και οι ιδιότητές του δύναται να μεταβληθούν δραματικά κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Η αύξηση της θερμοκρασίας του συνοδεύεται από μείωση της θλιπτικής αντοχής του και μπορεί να προκαλέσει εκτίναξη επιφανειακών στιβάδων του. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί απομείωση της διατομής του μέλους και αποκάλυψη των οπλισμών [18]. Επιπρόσθετα, λόγω των παραπάνω αναπτύσσονται στη διατομή ζώνες με διαφορετική μέση θερμοκρασία και ως εκ τούτου διαφορετικά μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά. Επομένως είναι αδύνατη η σημειακή (στο Κ.Β.) προσομοίωση της διατομής με μοναδικές τιμές μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων.

3.1 Φυσικοχημική απόκριση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες

Η έκθεση του σκυροδέματος σε πυρκαγιά προξενεί μηχανικές και θερμικές αλλαγές στη μικροδομή του. Εσωτερικές ρωγμές και αλλοίωση της τσιμεντόπαστας ευθύνονται για την απώλεια της θλιπτικής αντοχής του [5]. Οι αλλαγές που συντελούνται, φυσικές και χημικές, μπορεί να είναι μόνιμες ή παροδικές, αν με την επάνοδο της θερμοκρασίας σε φυσιολογικά επίπεδα αίρονται.

Αυξάνοντας τη θερμοκρασία, η εξάτμιση του ελεύθερου νερού είναι η πρώτη αλλαγή που συμβαίνει στο σκυρόδεμα. Το σημείο βρασμού κυμαίνεται από 100 έως 140 °C ανάλογα με τη σχετική πίεση. Η διαστολή των αδρανών ξεκινά στους 300 °C, ενώ ταυτόχρονα η τσιμεντόπαστα συρρικνώνεται. Αν το υλικό θερμανθεί για αρκετό χρόνο χάνει την εφελκυστική του αντοχή, επειδή το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) αποβάλλει το μόριο του νερού (H_2O) μεταπίπτοντας σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO). Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν και τα αδρανή. Τα ασβεστολιθικά αδρανή, που συναντώνται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στον ελλαδικό χώρο, υπόκεινται στις εξής αλλαγές: στους 832 °C ο δολομίτης ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) αποσυντίθεται σε ασβεστίτη (CaCO_3), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και περικλάση (MgO), ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 900 °C ο ασβεστίτης απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και οξείδιο του ασβεστίου. Η περικλάση παράγεται από ενυδάτωση μπρουσίτη ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Ο δολομίτης και ο ασβεστίτης αποτελούν χαρακτηριστικά συστατικά του ασβεστόλιθου. Τα πυριτικά

αδρανή υποβάλλονται σε σημαντική διαστολή γύρω στους 575 °C. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς και ανάλογα με τις μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν το σκυρόδεμα αλλάζει χρώμα. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το φυσικό χρώμα του σκυροδέματος είναι ανοιχτό γκρι. Όταν εκτίθεται σε θερμοκρασίες 300-600 °C η επιφάνειά του παίρνει μία ροζ ή κόκκινη απόχρωση, σε θερμοκρασίες 600-900 °C το χρώμα μεταβάλλεται σε σκούρο γκρι, σε θερμοκρασίες 900-1200 °C το χρώμα παίρνει καφέ απόχρωση και για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 1200 °C γίνεται κιτρινωπό. Στην πράξη αυτή η χρωματική διαβάθμιση χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν αδρομερώς οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στα δομικά μέλη κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς [7].

Ο ερπυσμός είναι ένα χρόνιο φαινόμενο που συναντάται στο σκυρόδεμα. Ορίζεται ως η συνεχής αύξηση των παραμορφώσεων υπό σταθερό φορτίο. Μία θεωρία ερμηνείας του είναι εκείνη του Freyssinet, που αποδίδει την ερπυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος στην ιξώδη ροή του νερού των πόρων του τσιμεντοπολτού. Αναλυτικότερα, αρχικά το νερό αναλαμβάνει τμήμα του επιβαλλόμενου φορτίου. Ταυτόχρονα, λόγω των αναπτυσσόμενων πιέσεων μετακινείται, με χαμηλή ταχύτητα λόγω τριβής, προς περιοχές με μικρότερες τάσεις. Η απομάκρυνση του νερού έχει ως αποτέλεσμα η στερεά φάση να αναλαμβάνει συνεχώς μεγαλύτερο φορτίο και να αυξάνεται περαιτέρω η παραμόρφωση του υλικού. Ο ερπυσμός επηρεάζεται κυρίως από την περιεχόμενη υγρασία και από τις τάσεις που αναπτύσσονται. Με την άνοδο τη θερμοκρασίας η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται ραγδαία και οι τάσεις που ασκούνται αυξάνονται λόγω της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Επομένως, το μέγεθος των ερπυστικών παραμορφώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις ερπυστικές παραμορφώσεις σε κανονικές θερμοκρασίες [28].

Η φάση ψύξης του σκυροδέματος μετά το πέρας της πυρκαγιάς ίσως φέρει νέες φυσικές και χημικές αλλαγές, όπως ανάπτυξη ρωγμών κατά μήκος του δομικού στοιχείου, αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας του ή μερική επανυδάτωση του οξειδίου του ασβεστίου. Ωστόσο κατά τον σχεδιασμό οι αλλαγές της φάσης ψύξης συντηρητικά αγνοούνται..

3.2 Το φαινόμενο της αποφλοίωσης (spalling)

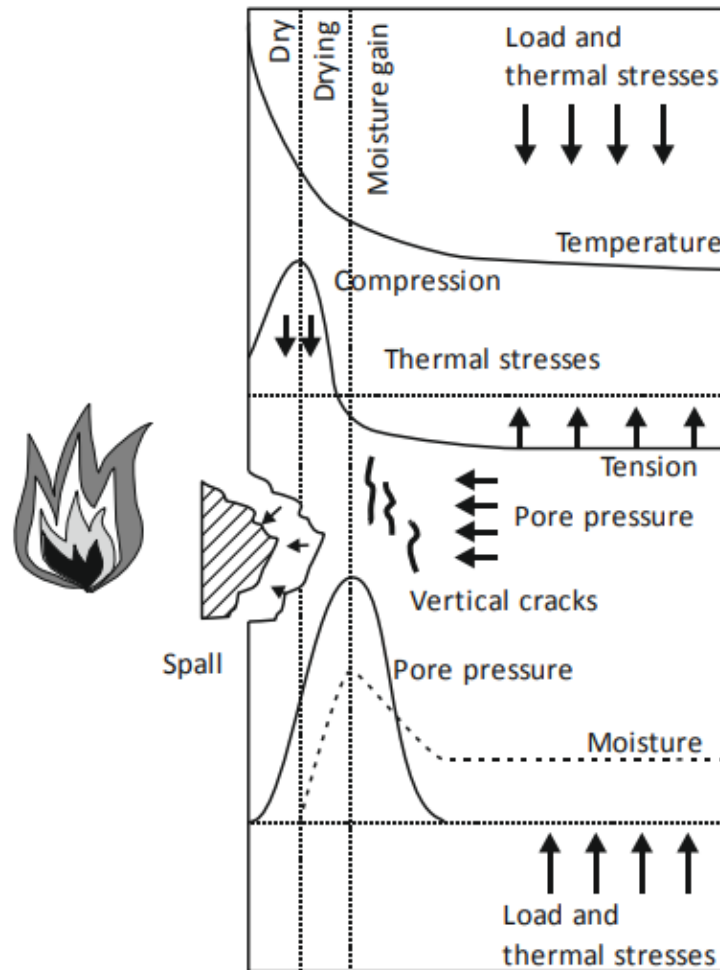
Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες οφείλεται τόσο σε χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού όπως, ο τύπος των αδρανών, οι ουσίες που περιέχονται στο τσιμέντο και ο λόγος νερού προς τσιμέντο, όσο και σε χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς όπως, ο ρυθμός θέρμανσης, οι μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και ο ρυθμός ψύξης. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το φαινόμενο της αποφλοίωσης, το οποίο αποτελεί τη σημαντικότερη επίπτωση που έχει στο υλικό η έκθεση του σε πυρκαγιά. Σύμφωνα με τον R. Jansson [17] η πρώτη καταγεγραμμένη παρατήρηση του φαινομένου της αποφλοίωσης στο σκυρόδεμα γίνεται το 1854 στη δημοσίευση του Barrett με τίτλο "On the French and other methods of constructing iron floors". Γενικά η αποφλοίωση ορίζεται ως το φαινόμενο της αποκόλλησης στιβάδων ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνειά του δομικού στοιχείου που εκτίθεται σε πυρκαγιά. Η αποφλοίωση είναι εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο του οποίου οι ακριβείς φυσικοί,χημικοί και μηχανικοί μηχανισμοί του εξακολουθούν να είναι ελάχιστα κατανοητοί [21].

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τα είδη αποφλοίωσης είναι [15]:

- **Αποφλοίωση αδρανούς (Aggregate spalling):** μεμονωμένα αδρανή αποκολλούν υπό τη συνοδεία κρότου δημιουργώντας μικρούς κρατήρες. Το αποτέλεσμα είναι τοπικό και άνευ δομικής σημασίας.
- **Αποφλοίωση επιφάνειας (Surface spalling):** συχνά βίαιη αποκόλληση επιφανειακής στιβάδας σκυροδέματος σε σχήμα δίσκου. Παρατηρείται κυρίως σε πλάκες και τοιχώματα υπό έντονο φορτίο.
- **Αποφλοίωση γωνίας (Corner spalling):** τμήματα στις ακμές δοκών και στύλων αποκολλούνται έπειτα από αρκετά μεγάλο χρόνο έκθεσης, μεγαλύτερο από μισή ώρα.
- **Αποφλοίωση μετά την ψύξη (Post – cooling spalling):** συμβαίνει κατά τη διάρκεια ή με το πέρας της φάσης ψύξης.
- **Εκρηκτική αποφλοίωση (Explosive spalling):** για τα συνήθως χρησιμοποιούμενα σκυροδέματα εκρηκτική αποφλοίωση συμβαίνει τα πρώτα είκοσι λεπτά της πυρκαγιάς, συνοδευόμενη από δυνατό κρότο.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

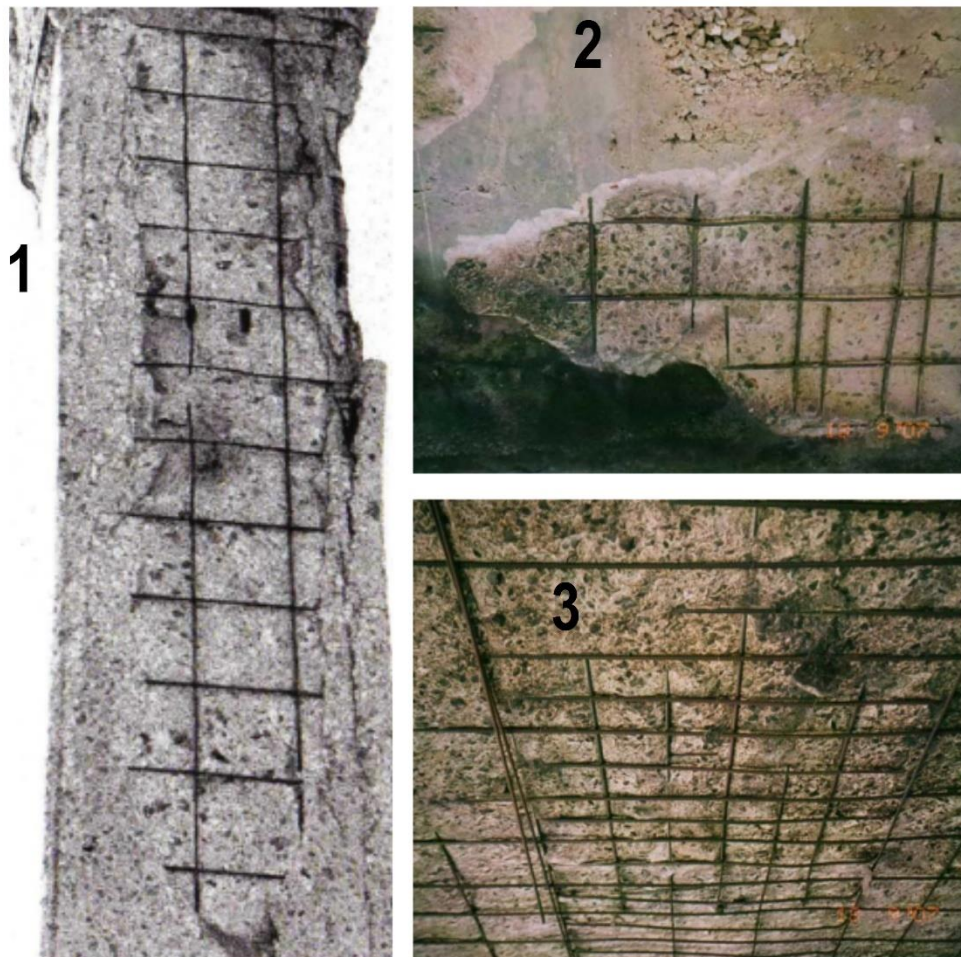


Εικόνα 10: : Μηχανισμός της εκρηκτικής αποφλοίωσης ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της θερμικής διαβάθμισης και των υπερπιέσεων των πόρων (Khoury G. A., 2008 [18]).

Ο μηχανισμός που διέπει την εκρηκτική αποφλοίωση βασίζεται στις αλλαγές της μικροδομής του σκυροδέματος, όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικές από αυτές είναι η απελευθέρωση και η εξάτμιση του δεσμευμένου νερού (τριχοειδές, προσροφώμενο και ενδοστρωσιακό), που δημιουργούν υπερπιέσεις στους πόρους του υλικού και η θερμική διαβάθμιση, η μη ύπαρξη ενιαίας θερμοκρασίας. Οι δύο αλλαγές που αναφέρθηκαν ουσιαστικά αποτελούν τους δύο υπομηχανισμούς της εκρηκτικής αποφλοίωσης και καθένας τους θέτει ένα κριτήριο για την πυροδότηση του φαινομένου. Η θερμική διαβάθμιση παράγει εσωτερικές θερμικές τάσεις γιατί η διαστολή των θερμότερων τμημάτων εμποδίζεται από τα ψυχρότερα τμήματα. Η θερμότερη εξωτερική στρώση θα διασταλεί περισσότερο από το ψυχρότερο εσωτερικό. Ως αυτοισορροπούμενη κατάσταση η εξωτερική στρώση θλίβεται ενώ το εσωτερικό εφελκύεται. Όταν οι εσωτερικές θλιπτικές θερμικές τάσεις ξεπεράσουν την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος το πρώτο κριτήριο καλύπτεται (thermal stress

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

spalling). Οι πόροι του υλικού αδρομερώς θεωρούνται είτε ανοικτοί είτε κλειστοί. Η εξάτμιση του νερού ξεκινά από την επιφάνεια και προχωρά μετωπικά προς το εσωτερικό. Οι πόροι που βρίσκονται σε τμήματα τα οποία προσεγγίζει το μέτωπο εξάτμισης περιέχουν ταυτόχρονα νερό και ατμό και συνεχώς θερμαίνονται. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση της πίεσης στα τοιχώματα ανάμεσα σε κλειστούς και ανοικτούς πόρους προκαλώντας την κατάρρευση μερικών. Η ξαφνική απελευθέρωση πεπιεσμένου υπέρθερμου νερού δημιουργεί εκρηκτικές τάσεις στο σκυρόδεμα. Όταν οι εσωτερικές εφελκυστικές εκρηκτικές τάσεις ξεπεράσουν την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος το δεύτερο κριτήριο καλύπτεται (pore pressure spalling). Διαταύτα, η πλήρωση των δύο κριτηρίων έχει ως αποτέλεσμα την έναρξη μιας προσδευτικής κατάλυσης της μικροδομής του σκυροδέματος που εκδηλώνεται με το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης [18, 21].



Εικόνα 11: Βαριές βλάβες λόγω έντονης αποφλοίωσης σε στύλο (1), τοίχωμα (2) και πλάκα (3)
(Χρονόπουλος Μ., 2007 [28]).

Τα αίτια που προκαλούν και επηρεάζουν την εμφάνιση και την ένταση της εκρηκτικής αποφλοίωσης είναι πολλά. Μπορούν να διακριθούν σε αίτια που προέρχονται: από τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς, τα

χαρακτηριστικά των αδρανών και της σύνθεσης του σκυροδέματος και τα χαρακτηριστικά και τη θέση του υπό μελέτη δομικού μέλους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει ο ρυθμός θέρμανσης. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες και η ένταση του φαινομένου. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς επηρεάζει την εκρηκτική αποφλοίωση, αυξάνοντας την πιθανότητα εμφάνισης όσο μεγαλύτερη είναι. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα αίτια που επιδρούν στο φαινόμενο. Αυτή η κατηγορία είναι η πιο σημαντική γιατί είναι πολύ δύσκολο η πραγματική κατάσταση να ταυτίζεται με την κατάσταση που είχε θεωρηθεί στο στάδιο σχεδιασμού. Ξεκινώντας από τα αδρανή όσο μικρότερη είναι η θερμική διαστολή τους και το μέγεθος των κόκκων τόσο μικραίνει η πιθανότητα εκρηκτικής αποφλοίωσης. Ύψιστης σημασίας αιτία είναι το ποσοστό κατά βάρος της περιεχόμενης υγρασίας του σκυροδέματος. Για ποσοστό μικρότερο ή ίσο του 3% είναι σχεδόν απίθανη η εμφάνιση του φαινομένου. Επίσης, τα σκυροδέματα υψηλής (HPC) και εξαιρετικά υψηλής απόδοσης (UHPC) που στην μικροδομή τους συμμετέχει και πυριτική παιπάλη (silica fume-microsilica) είναι εξαιρετικά πιο ευάλωτα. Ανάμεσα στην δεύτερη και την τρίτη κατηγορία διότι επηρεάζεται και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και από το μέγεθος της διατομής βρίσκεται το αίτιο της θερμοπερατότητας. Χαμηλή θερμοπερατότητα αυξάνει την πίεση πόρων και άρα την πιθανότητα εκρηκτικής αποφλοίωσης. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν λεπτές διατομές ή λεπτά τμήματα διατομών όπου αναπτύσσονται γρήγορα υψηλές θερμοκρασίες, άρα αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης. Ακόμα, ο πυκνός οπλισμός (γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού στη διατομή > 4%) συντελεί στη γρηγορότερη αύξηση της θερμοκρασίας και λόγω της θερμικής διαστολής του αυξάνει τις εφελκυστικές τάσεις στην τσιμεντόπαστα, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην εκρηκτική αποφλοίωση. Τέλος, η αύξηση της θλιπτικής τάσης στο στοιχείο λόγω ανακατανομής της έντασης στη γειτονιά του στοιχείου ή λόγω μείωσης της διατομής που φέρει ένταση με αύξησης της θερμοκρασίας στις εξωτερικές στιβάδες της, μεγαλώνει την πιθανότητα εμφάνισης [15, 17].

Συμπερασματικά το φαινόμενο της αποφλοίωσης είναι πολυσύνθετο και υπάρχει αρκετή έρευνα που πρέπει ακόμα να διεξαχθεί για την πλήρη κατανόηση και εξήγηση του. Ο ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-2 2004) [12] για κατά βάρος ποσοστό υγρασίας μικρότερο του 3% επιτρέπει στη φάση σχεδιασμού την αγνόηση του φαινομένου.

3.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στα δομικά μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται οι θερμικές και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και του σκυροδέματος μεταβάλλονται. Η αντοχή τους τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό και η ακαμψία τους μειώνονται. Τα διαγράμματα τάσεων, ανηγμένων παραμορφώσεων αλλάζουν, αφού η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η τάση διαρροής του χάλυβα ελαττώνονται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Επίσης, και τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης μπορεί να αλλάξουν [25]. Στο κεφάλαιο 5 “Μεταβαλλόμενες ιδιότητες των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με ισχύοντες τεχνικούς κανονισμούς και ερευνητικές δημοσιεύσεις” γίνεται εκτενής αναφορά στις μεταβαλλόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών λαμβάνοντας υπόψη τους εν ενεργεία κανονισμούς και ερευνητικές δημοσιεύσεις. Πέραν της εκρηκτικής αποφλοίωσης, σημαντική επίπτωση στα δομικά μέλη λόγω πυρκαγιάς αποτελεί, η έντονη κύρτωση τους λόγω ταχείας αύξησης της θερμοκρασίας σε μία από τις παρειές τους. Η διεργασία αυτή εξαρτάται από τις εκτεθειμένες στη πυρκαγιά πλευρές του δομικού μέλους. Άρα, αν ένας στύλος θερμαίνεται από όλες του τις πλευρές είναι

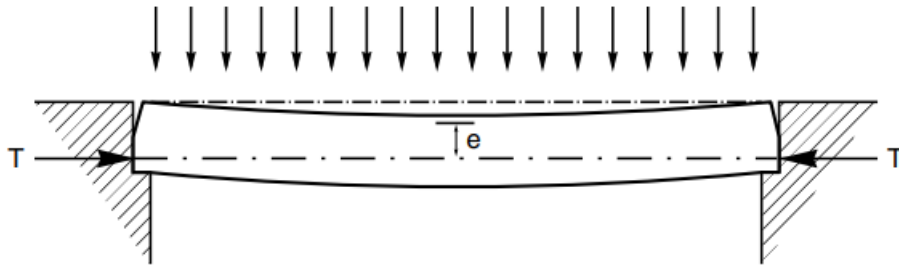
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

δύσκολο να εμφανίσει έντονη κύρτωση, σε αντίθεση με μια δοκό που θερμαίνεται μόνο η κάτω παρειά της και εμφανίζει έντονη θερμική διαβάθμιση μεταξύ των παρειών της και έντονη μείωση δυσκαμψίας στη θερμαινόμενη παρειά [28].

Βαρυσήμαντη θετική ή αρνητική επιρροή στη συμπεριφορά του δομικού μέλους κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς έχει ο μηχανισμός της αξονικής παρεμπόδισης. Σε αυτόν επιδρούν πολλοί παράγοντες όπως η επικάλυψη του σκυροδέματος, η μορφή και το μέγεθος του μέλους, ο οπλισμός, ο τύπος των αδρανών και το μέγεθος του φορτίου. Η ύπαρξη του φαινομένου αυτού έγκειται στη σύνδεση του μέλους στα άκρα του με άκαμπτα στοιχεία, που μπορούν να αναπτύξουν μη αμελητέες δράσεις παρεμπόδισης. Καθώς θερμαίνεται, το μέλος τείνει να αυξήσει τον όγκο του, λόγω της θερμικής διαστολής. Τα άκαμπτα στοιχεία ωστόσο που συνδέονται με το μέλος, αποτρέπουν τη διαστολή με την άσκηση στο μέλος μίας δύναμης (F_a) σε κάθε άκρο του. Η εκκεντρότητα (κ) ανάμεσα στο σημείο εισαγωγής της δύναμης και στον ουδέτερο άξονα του μέλους παράγει ροπή ($F_a \cdot \kappa$), η οποία πρέπει να συμπεριληφθεί στη συνολική ροπή που ασκείται στο μέλος:

$$M_{(R,total)} = M_{(R,fire)} \pm (F_a \cdot \kappa)$$

Η ροπή ($F_a \cdot \kappa$) ανάλογα το πρόσημο της επιβαρύνει (+) ή ανακουφίζει (-) τη συνολική ροπή που ασκείται στο μέλος [5].



Εικόνα 12: Δοκός με άκαμπτες στηρίξεις και ζεύγος αξονικών δυνάμεων παρεμπόδισης (BUCHANAN A.H., 2017 [5]).

4. Αντιμετώπιση της πυρκαγιάς ως φόρτισης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες

Οι κατασκευές που μελετώνται έναντι πυρκαγιάς συνήθως σχεδιάζονται με στόχο την εξασφάλιση της ακεραιότητας, της ευστάθειας και της θερμομονωτικής τους ικανότητας για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπό την έκθεση σε πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων - χρόνου (ISO 834, καμπύλη καύσης υδρογονανθράκων ή εξωτερική καμπύλη πυρκαγιάς). Η σπουδαιότητα και η αναμενόμενη συνάθροιση κοινού καθορίζουν το παραπάνω χρονικό διάστημα, δηλαδή την κλάση πυραντίστασης της κατασκευής. Στηριζόμενος σε αυτή τη λογική ο ευρωπαϊκός κανονισμός EN 1991-1-2 (2002) [10] ορίζει την γενική ανίσωση ασφαλείας (απαίτηση \leq αντοχή) εκφρασμένη σε όρους χρόνου, έντασης και θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα για το οπλισμένο σκυρόδεμα οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί EN 1992-1-2 (2004) [12] & EN 1993-1-2 (2005) [13] ορίζουν τις μηχανικές και τις θερμικές ιδιότητές του καθώς και τη μεταβολή αυτών συναρτήσει της αυξανόμενης θερμοκρασίας. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι που προτείνουν οι ευρωκώδικες από σκοπιά τόσο δομοστατική όσο και πρόληψης της πυρκαγιάς, οι οποίες στοχεύουν στην αξιολόγηση της ικανότητας πυραντίστασης των κατασκευών. Όπως φαίνεται στις επόμενες ενότητες η πλειοψηφία των μεθόδων ακολουθεί μια “prescriptive based” λογική, ενώ μέθοδοι που ακολουθούν το σχεδιασμό με βάση την επιτελεσματικότητα αναφέρονται ονομαστικά ή περιληπτικά. Δεδομένου ότι ένας από τους κύριους στόχους της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των υπάρχουσών μεθόδων για την οργάνωση και την εκτέλεση δομοστατικής ανάλυσης υπό την επίδραση πυρκαγιάς, η παρουσίαση αυτή είναι χρήσιμη ώστε να υπάρχει ευρεία γνώση των διαθέσιμων προσεγγίσεων.

4.1 Μέθοδοι αξιολόγησης πυραντίστασης

Το δεύτερο μέρος των ευρωκωδίκων 1,2 & 3 [10, 12, 13] αναφέρεται στην επίδραση της πυρκαγιάς στις κατασκευές. Ο κανονισμός αντιμετωπίζει την πυρκαγιά ως τυχηματική δράση σύμφωνα με τον κανονισμό EN 1990 (2002), η οποία απαιτείται να ελεγχθεί μόνο στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ). Συγκεκριμένα στον ευρωκώδικα 1 υπάρχει μια εισαγωγή για το πως αντιμετωπίζεται δομοστατικά η πυρκαγιά και ποιες θερμικές και μηχανικές δράσεις αναπτύσσονται ταυτόχρονα στην κατασκευή. Στον ευρωκώδικα 2 αναφέρεται η μεταβολή λόγω υψηλών θερμοκρασιών όλων των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και κάποιες από τις ιδιότητες του χάλυβα. Ακόμα, αναλύονται και οι μέθοδοι υπολογισμού της πυραντίστασης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος, στον ευρωκώδικα 3 αναφέρεται η μεταβολή λόγω υψηλών θερμοκρασιών όλων των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του χάλυβα και οι μέθοδοι υπολογισμού της πυραντίστασης των μεταλλικών κατασκευών. Οι τρεις κανονισμοί εισάγουν τις ίδιες τρεις κατηγορίες μεθόδων για την αξιολόγηση της πυραντίστασης:

- **Χρήση πινακοποιημένων δεδομένων:** προερχόμενα από πειράματα δομικών στοιχείων (στύλων, τοιχίων, δοκών και πλακών) εκτεθειμένων στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ISO

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

834. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται σε καλά καθορισμένα βήματα και χρησιμοποιείται για τη μελέτη μεμονωμένων δομικών στοιχείων. Πλεονεκτήματά της αποτελούν η σαφή δομή της και συνεπώς η ταχύτητα εφαρμογής της. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία της να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε αλλαγή στα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς, όπως η ύπαρξη κλάδου απόσβεσης λόγω επέμβασης της πυροσβεστικής και η αλλαγή του ρυθμού θέρμανσης.

- **Απλοποιημένες αναλυτικές μέθοδοι:** θεμελιώνονται σε απλοποιητικές υποθέσεις και παραδοχές. Τόσο για τη μετάδοση θερμότητας στα μέλη όσο και για την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στη δομοστατική συμπεριφορά τους γίνονται παραδοχές που απλοποιούν σημαντικά το πρόβλημα. Οι μέθοδοι αυτοί επιτρέπουν την παραμετροποίηση του προβλήματος όσο όμως δεν επηρεάζονται οι κεντρικές υποθέσεις και παραδοχές. Μερικά από τα παραρτήματα των κανονισμών αναλύουν τέτοιες μεθόδους οι οποίες είναι εφαρμόσιμες για μεμονωμένα δομικά μέλη και υποφορείς της κατασκευής.
- **Προηγμένες αναλυτικές μέθοδοι:** ακολουθούν το σχεδιασμό με βάση την επιτελεσματικότητα για τους ελέγχους ασφαλείας των δομικών μελών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεμονωμένα δομικά στοιχεία, υποφορείς της κατασκευής και για το σύνολο του φέροντα οργανισμού. Συνιστούν τις ακριβέστερες μεθόδους που οδηγούν σε καθολική αλλά και τοπική δομοστατική ανάλυση. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αλλά και ταυτόχρονα το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους, είναι η χρήση ενός λεπτομερέστατου υπολογιστικού προσομοιώματος. Αυτό λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στις ιδιότητες των υλικών καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Επιπλέον, παρέχουν την δυνατότητα στο μελετητή να χρησιμοποιήσει προηγμένα μοντέλα πυρκαγιάς που εξετάζουν τις ιδιότητες των αερίων και την ανταλλαγή μάζας και ενέργειας ανάμεσα στο πυροδιαμέρισμα και τον περιβάλλοντα χώρο. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) παρέχουν την εξέλιξη της θερμοκρασίας μέσα στο πυροδιαμέρισμα συναρτήσει του χρόνου και του χώρου. Το πιο διαδεδομένο λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που ειδικεύεται στη μοντελοποίηση πυρκαγιάς είναι το Fire Dynamic Simulator (FDS) που αναπτύσσεται από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ (NIST) σε συνεργασία με το τεχνολογικό ερευνητικό κέντρο VTT της Φινλανδίας και είναι ανοικτού κώδικα [5]. Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση υπολογίζονται οι επιμέρους έλεγχοι ασφαλείας των μελών με βάση τον ακόλουθο συνδυασμό φορτίσεων:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Όπου, G_1 : ίδιο βάρος του φέροντα οργανισμού, G_2 : μόνιμο φορτίο του φορέα, P : φορτίο προέντασης, A_d : τυχηματική φόρτιση π.χ. πυρκαγιά ή έκρηξη, Q : μεταβλητά φορτία π.χ. κινητά φορτία, φορτίο ανέμου ή φορτίο χιονιού.

Οι έλεγχοι ασφάλειας γίνονται με τη χρήση τριών διαφορετικών κριτηρίων:

- Χρόνου: $t_{(fi,d)} \geq t_{(fi,requ)}$

Τιμή σχεδιασμού του χρόνου πυραντίστασης \geq απαιτούμενος χρόνος πυραντίστασης από το σενάριο πυρκαγιάς.

- Έντασης: $R_{(fi,d,t)} \geq E_{(fi,d,t)}$

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τιμή του εντατικού μεγέθους σύμφωνα με τον σχεδιασμό σε χρόνο t κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς \geq τιμή του εντατικού μεγέθους που αναπτύσσεται στην ανάλυση σε χρόνο t κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

- Θερμοκρασίας: $\theta_{(d)} \leq \theta_{(cr,d)}$

Τιμή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς \leq τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας που έχει οριστεί κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Πίνακας 1: Εφαρμοσιμότητα των διαθέσιμων μεθόδων για την αξιολόγηση της δομικής πυραντίστασης.

Μέλη του φέροντα οργανισμού για έλεγχο	Διαθέσιμες μέθοδοι ελέγχου	Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ISO 834	Καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου φυσικής πυρκαγιάς
Μεμονωμένα δομικά στοιχεία	Πινακοποιημένα δεδομένα	Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται
	Απλοποιημένες αναλυτικές μέθοδοι	Επιτρέπεται	Επιτρέπεται (αν υπάρχει)
	Προηγμένες αναλυτικές μέθοδοι	Επιτρέπεται	Επιτρέπεται
Υποφορείς του φέροντα οργανισμού	Πινακοποιημένα δεδομένα	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται
	Απλοποιημένες αναλυτικές μέθοδοι	Επιτρέπεται (αν υπάρχει)	Δεν Επιτρέπεται
	Προηγμένες αναλυτικές μέθοδοι	Επιτρέπεται	Επιτρέπεται
Σύνολο του φέροντα οργανισμού	Πινακοποιημένα δεδομένα	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται
	Απλοποιημένες αναλυτικές μέθοδοι	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται
	Προηγμένες αναλυτικές μέθοδοι	Επιτρέπεται	Επιτρέπεται

Συμπληρωματικά με τις παραπάνω μεθόδους στην παράγραφο 5.2 του κανονισμού EN 1990 (2002) αναφέρεται η χρήση πειραματικών μεθόδων που συμβάλλουν στον σχεδιασμό. Όσον αφορά τον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς συνήθως προσομοιώματα υπό κλίμακα του δομικού στοιχείου που μελετάται εξετάζονται σε ειδικούς φούρνους, σύμφωνα με τα πρότυπα EN 13501 & EN 13381.

4.2 Πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων - χρόνου

Ο ευρωκώδικας 1 [12] στην παράγραφο 3.2 παρουσιάζει τις πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου:

- **Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ISO 834:** για τη χρήση της οποίας προτείνεται συντελεστής συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. Η ανάπτυξη της καμπύλης έχει βασιστεί στον ρυθμό καύσης δομικών και μη υλικών που συναντώνται συχνά στις κατασκευές. Η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας λογαριθμικά, χωρίς την ύπαρξη πλατό ή φθιτού κλάδου, εξασφαλίζει την αστοχία των υπό εξέταση δομικών μελών επιτρέποντας την ταξινόμησή τους με βάση τον χρόνο πυραντίστασής τους. Επιπλέον, η μορφή της καμπύλης καθιστά εύκολο και ακριβή τον έλεγχο των θερμοκρασιών στο περιβάλλον των εργαστηριακών φούρνων. Για αυτό χρησιμοποιείται ευρύτητα σε πειράματα και προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα κρίνονται επαρκή για τη διαστασιολόγηση δομικών μελών τυπικών κατασκευών. Ωστόσο προσομοιώνει ανεπαρκώς την καυσή υλικών με υψηλό ρυθμό καύσης. Η θερμοκρασία αερίων στο πυροδιαμέρισμα δίνεται από τη σχέση:

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

- **Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου εξωτερικής πυρκαγιάς:** για τη χρήση της οποίας προτείνεται συντελεστής συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. Η θερμοκρασία αερίων κοντά στο υπό μελέτη μέλος δίνεται από τη σχέση:

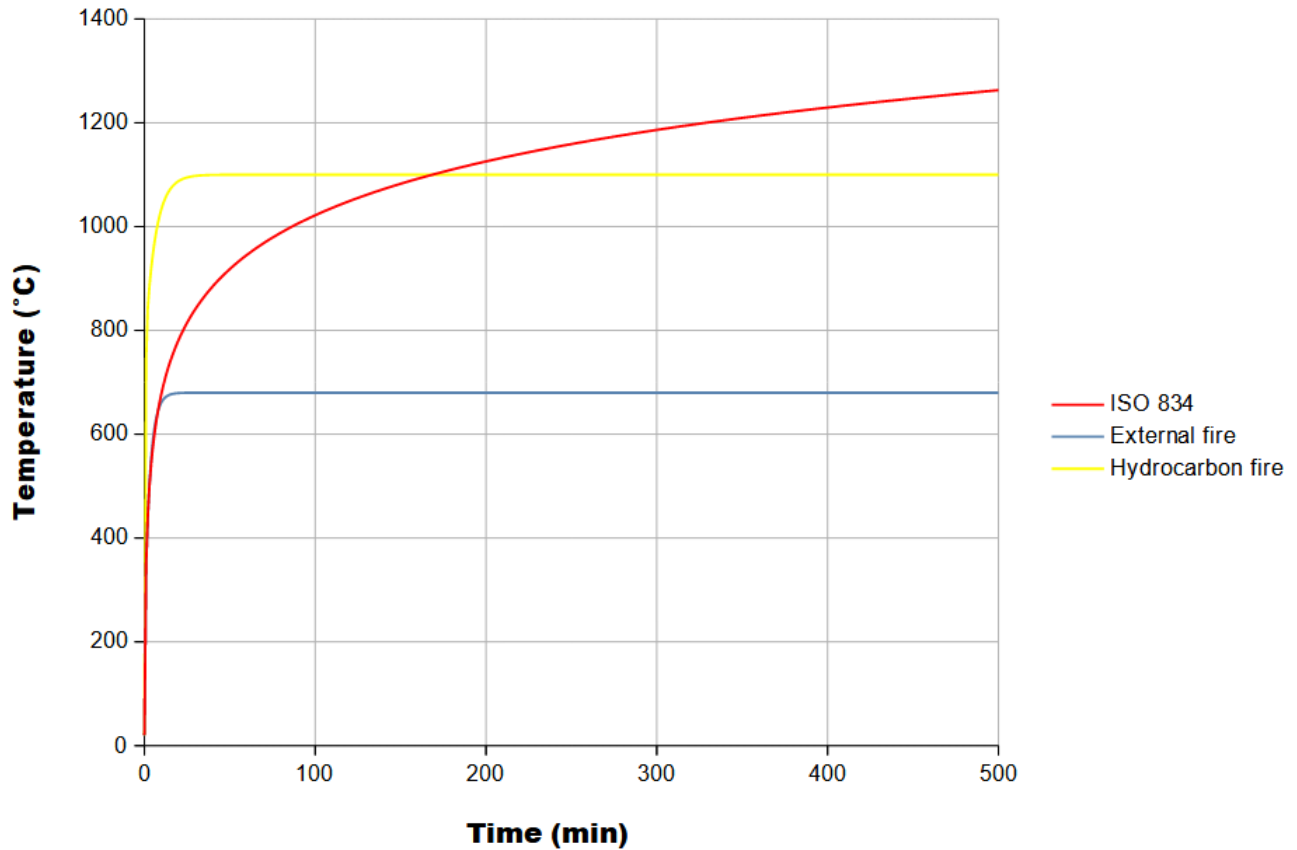
$$\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,80 \cdot t})$$

- **Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου πυρκαγιάς υδρογονανθράκων:** για τη χρήση της οποίας προτείνεται συντελεστής συναγωγής $\alpha_c = 50 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. Η ανάπτυξη της καμπύλης έχει βασιστεί στον πολύ υψηλό ρυθμό καύσης της βενζίνης και άλλων χημικών υλικών για αυτό και η θερμοκρασία μεγιστοποιείται με το πέρας τριάντα λεπτών. Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που είναι πιθανό το ξέσπασμα μικρής σε έκταση πυρκαγιάς πετρελαιοειδών, π.χ. στο ντεπόζιτο ενός αυτοκινήτου ή σε βυτίο μεταφοράς βενζίνης ή χημικών ουσιών. Η θερμοκρασία αερίων στο πυροδιαμέρισμα δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,50 \cdot t})$$

Όπου και στις τρεις παραπάνω σχέσεις το γράμμα t συμβολίζει το χρόνο μετρούμενο σε λεπτά (min).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Σχήμα 1: Γραφική παράσταση των πρότυπων καμπύλων θερμοκρασίας αερίων – χρόνου που αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 1.

Παγκοσμίως έχουν προταθεί πολλές ακόμη πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Μερικές από τις πιο διαδεδομένες είναι:

- Αμερικάνικη πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119:** καμπύλη όμοια με την ISO 834, που έχει συνεχώς αυξανόμενη, με φθίνων ρυθμό, θερμοκρασία και εμφανίζει την ίδια αδυναμία προσομοίωσης καύσης υλικών με ταχύ ρυθμό καύσης. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας δίνεται από πίνακα X1.1 του ASTM Designation E119: Standard methods of fire test of building construction and materials (Table X1.1 “STANDARD TIME – TEMPERATURE CURVE FOR CONTROL OF FIRE TESTS”) [2]. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες εξισώσεις για την προσέγγιση της θερμοκρασιακής εξέλιξης σύμφωνα με την ASTM E 119. Η απλούστερη έχει προταθεί από τον T.T. Lie (1995) ως [5]:

$$\theta_g = 20 + 750 \cdot \left(1 - e^{-3,79553 \cdot \sqrt{t_h}}\right) + 170,41 \cdot \sqrt{t_h}$$

Όπου στην παραπάνω σχέση ως t_h ορίζεται ο χρόνος μετρούμενος σε ώρες (hours).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- **Πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RWS (Rijkswaterstaat):** καμπύλη που αναπτύχθηκε στην Ολλανδία ειδικά για το σχεδιασμό σήραγγων, έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές. Η δημιουργία της καμπύλης θεμελιώθηκε στην παραδοχή πως στο χείριστο σενάριο ένα γεμάτο βυτίο μεταφοράς βενζίνης χωρητικότητας 50 m³ και συνολικής θερμογόνου δύναμης 300 MW καίγεται για δύο ώρες (120 min). Η καμπύλη αυτή όπως και οι προηγούμενες που παρουσιάστηκαν δεν εμφανίζουν φθιτό κλάδο, δηλαδή κλάδο ψύξης που προσομοιώνει την επέμβαση της πυροσβεστικής και την κατάσβεση της πυρκαγιάς [22]. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας δίνεται από τον πίνακα:

Πίνακας 2: Εξέλιξη της θερμοκρασίας σύμφωνα με την πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RWS (Rijkswaterstaat).

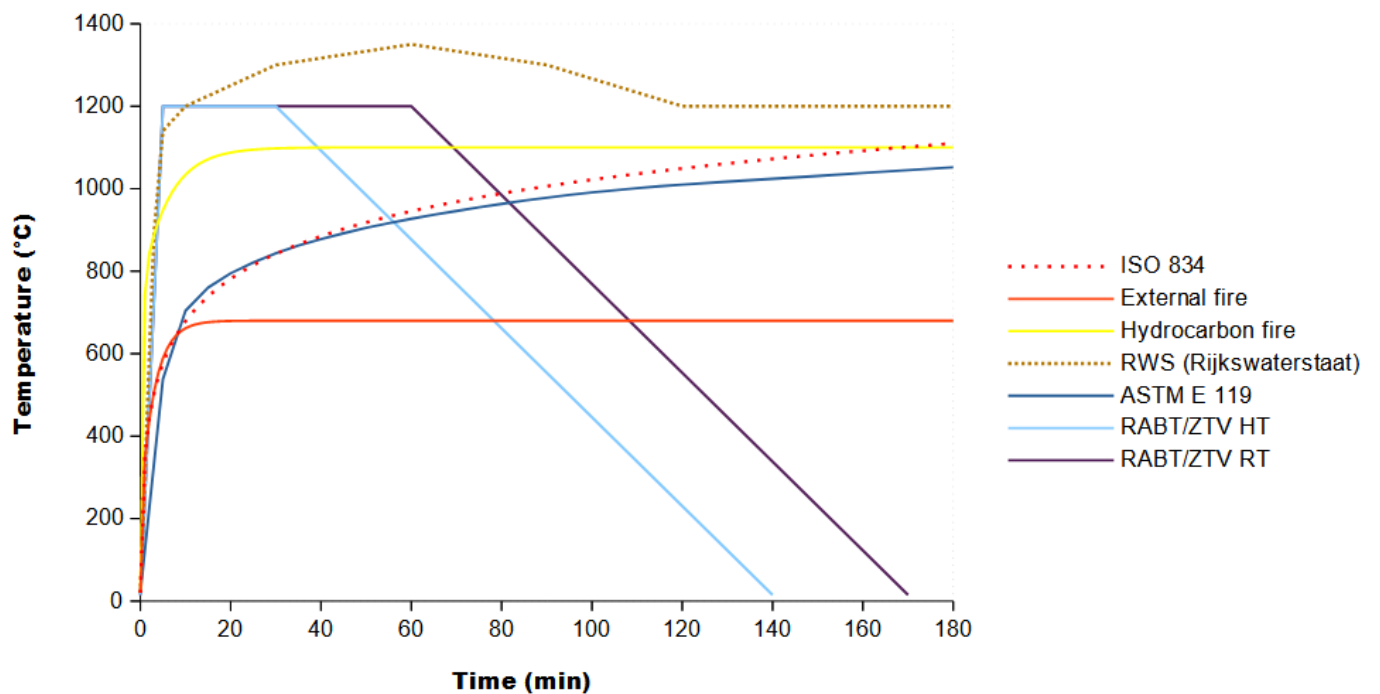
RWS (Rijkswaterstaat)	
Time (min)	Temperature (°C)
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200
180	1200

- **Πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RABT/ZTV:** καμπύλες που αποτελούν προϊόν εργαστηριακών δοκιμών στη Γερμανία και προσομοιώνουν το φαινόμενο πυρκαγιάς σε σήραγγες αυτοκινητοδρόμων και σε σιδηροδρομικές σήραγγες. Στην πρώτη περίπτωση η μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας ξεκινά σε 30 λεπτά ενώ στη δεύτερη περίπτωση ξεκινά σε 60 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς. Οι δύο καμπύλες εμφανίζουν γραμμικά φθιτό κλάδο ψύξης διάρκειας 110 λεπτών [22]. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας δίνεται από τον πίνακα:

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Πίνακας 3: Εξέλιξη της θερμοκρασίας σύμφωνα με τις πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας αερίων – χρόνου RABT/ZTV.

RABT/ZTV Highway Tunnel	
Time (min)	Temperature (°C)
0	15
5	1200
30	1200
140	15
RABT/ZTV Railroad Tunnel	
Time (min)	Temperature (°C)
0	15
5	1200
60	1200
170	15



Σχήμα 2: Γραφική παράσταση πρότυπων καμπύλων θερμοκρασίας αερίων – χρόνου.

5. Μεταβαλλόμενες ιδιότητες των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με ισχύοντες τεχνικούς κανονισμούς και ερευνητικές δημοσιεύσεις

Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται όλες οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των υλικών που αλλάζουν με την άνοδο της θερμοκρασίας. Προκειμένου η παρουσίαση να είναι όσο το δυνατόν πιο πλήρεις εκτός από τους ευρωκώδικες 2 [12] και 3 [13] ελήφθησαν πληροφορίες από τον αμερικάνικο κανονισμό ASCE 78 [1] και τον βρετανικό κανονισμό BS 8110 [4]. Για τις ιδιότητες των υλικών που οι κανονισμοί δεν παρέχουν στοιχεία ενσωματώθηκαν πληροφορίες από ερευνητικές δημοσιεύσεις [14]. Τέλος από την ακόλουθη παρουσίαση έχει παραληφθεί ο συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας (emissivity) διότι έχει σταθερή τιμή που λαμβάνεται ίση με 0,80 για το σκυρόδεμα και για τον χάλυβα οπλισμού [12].

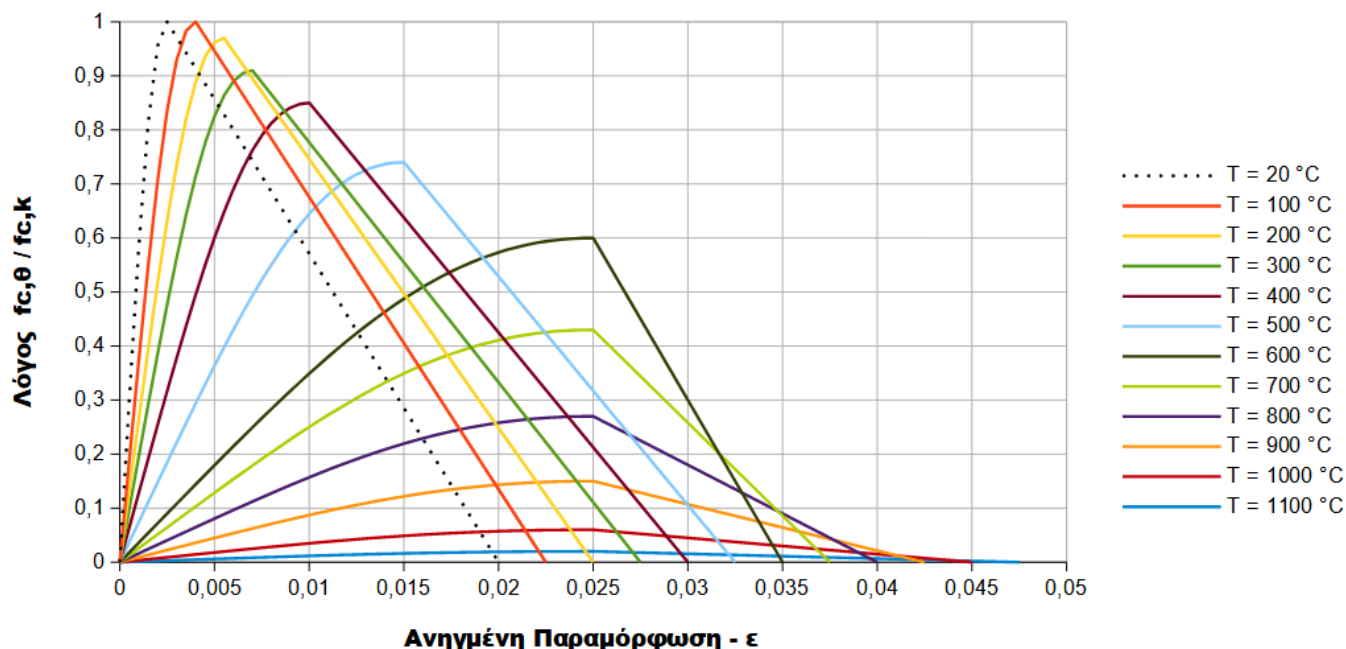
5.1: Ιδιότητες των υλικών από τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-2 (2004))

Ο κανονισμός EN 1992-1-2 (2004) [12] που μελετά τη συμπεριφορά κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα εκτεθειμένων σε πυρκαγιά περιέχει δεδομένα για πολλές ιδιότητες τόσο του σκυροδέματος όσο και του χάλυβα οπλισμού.

5.1.1: Διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού

Αρχικά, παρουσιάζεται το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος η τροποποίηση του οποίου εξαρτάται από το είδος των αδρανών του. Το προτεινόμενο διάγραμμα αφορά απερίσφικτο σκυρόδεμα και αποτελείται από δύο κλάδους. Τον ανοδικό κλάδο που ορίζεται εφόσον η ανηγμένη παραμόρφωση είναι μικρότερη της ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση ($\epsilon_{c1,\theta}$) και τον φθιτό κλάδο που ξεκινά από την ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση και σταματά στην παραμόρφωση αστοχίας ($\epsilon_{cu1,\theta}$) όπου αντιστοιχεί μηδενική θλιπτική τάση ($f_{c,\theta}$). Ο κανονισμός επιτρέπει είτε γραμμικό είτε μη γραμμικό φθιτό κλάδο. Επίσης, παρέχει πίνακα με την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της θλιπτικής τάσης και των παραμορφώσεων $\epsilon_{c1,\theta}$ & $\epsilon_{cu1,\theta}$ καθιστώντας δυνατό τον υπολογισμό του διαγράμματος σε μία πληθώρα θερμοκρασιών. Παρατηρείται ότι με την άνοδο της θερμοκρασίας για την ίδια στάθμη τάσης υπάρχει αύξηση της αντίστοιχης παραμόρφωσης καθώς και μείωση της μέγιστης θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Σχήμα 3: Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή και γραμμικό φθιτό κλάδο για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Πίνακας 4: Επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της θλιπτικής τάσης και των παραμορφώσεων $\epsilon_{c1,\theta}$ & $\epsilon_{cu1,\theta}$ σκυροδέματος με πυριτικά ή ασβεστολιθικά αδρανή (Table 3.1, EN 1992-1-2 (2004)).

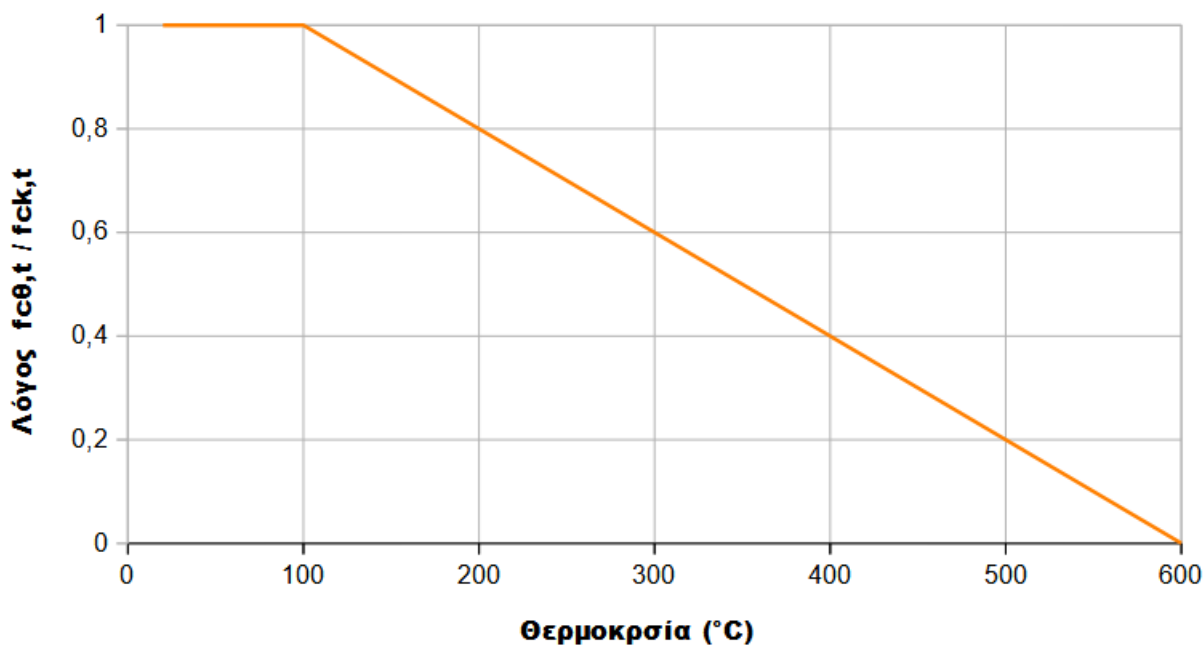
Θερμοκρασία Σκυροδέματος (°C)	Πυριτικά αδρανή			Ασβεστολιθικά αδρανή		
	$f_{c,\theta}/f_{c,k}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{c,k}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
20	1.00	0.0025	0.0200	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.0055	0.0250	0.97	0.0055	0.0250
300	0.85	0.0070	0.0275	0.91	0.0070	0.0275
400	0.75	0.0100	0.0300	0.85	0.0100	0.0300
500	0.60	0.0150	0.0325	0.74	0.0150	0.0325
600	0.45	0.0250	0.0350	0.60	0.0250	0.0350
700	0.30	0.0250	0.0375	0.43	0.0250	0.0375

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

800	0.15	0.0250	0.0400	0.27	0.0250	0.0400
900	0.08	0.0250	0.0425	0.15	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.0250	0.0450	0.06	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.0250	0.0475	0.02	0.0250	0.0475
1200	0.00	-	-	0.00	-	-

Όπου, $f_{c,\theta}$: χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος στη θερμοκρασία θ , $f_{c,k}$: χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, $\varepsilon_{c1,\theta}$: ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση, $\varepsilon_{cu1,\theta}$: ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας.

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται ταχύτερα από τη θλιπτική αντοχή. Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε εφελκυσμό, ελλείπει ακριβέστερων πληροφοριών, δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



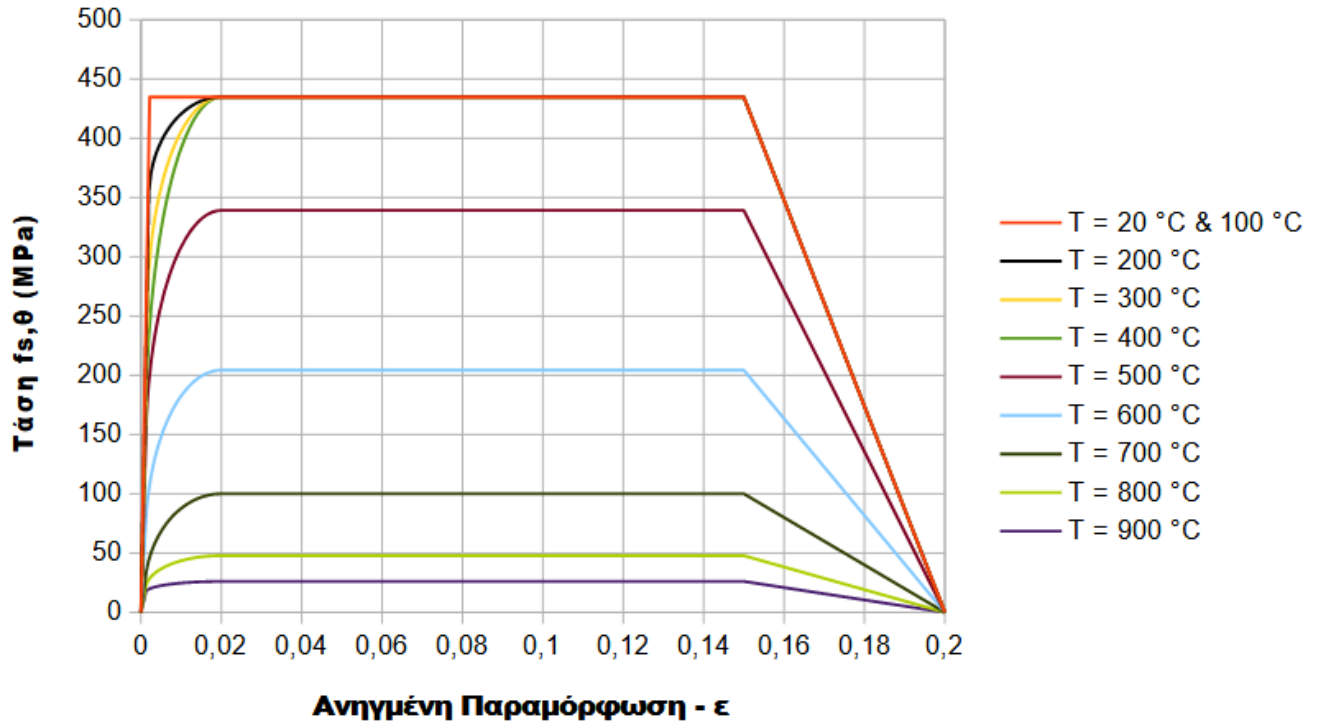
Σχήμα 4: Μεταβολή του λόγου $f_{ct,t} / f_{ct,t}$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Όπου, $f_{ct,t}$: χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος στη θερμοκρασία θ , $f_{ct,t}$: χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται κατά τους υπολογισμούς υπέρ της ασφαλείας.

Για τον χάλυβα οπλισμού έχει επιλεγεί ένα ελαστοπλαστικό διάγραμμα τάσεων -ανηγμένων παραμορφώσεων χωρίς κράτυνση, που εφαρμόζεται τόσο στον εφελκυσμό όσο και στη θλίψη του. Η

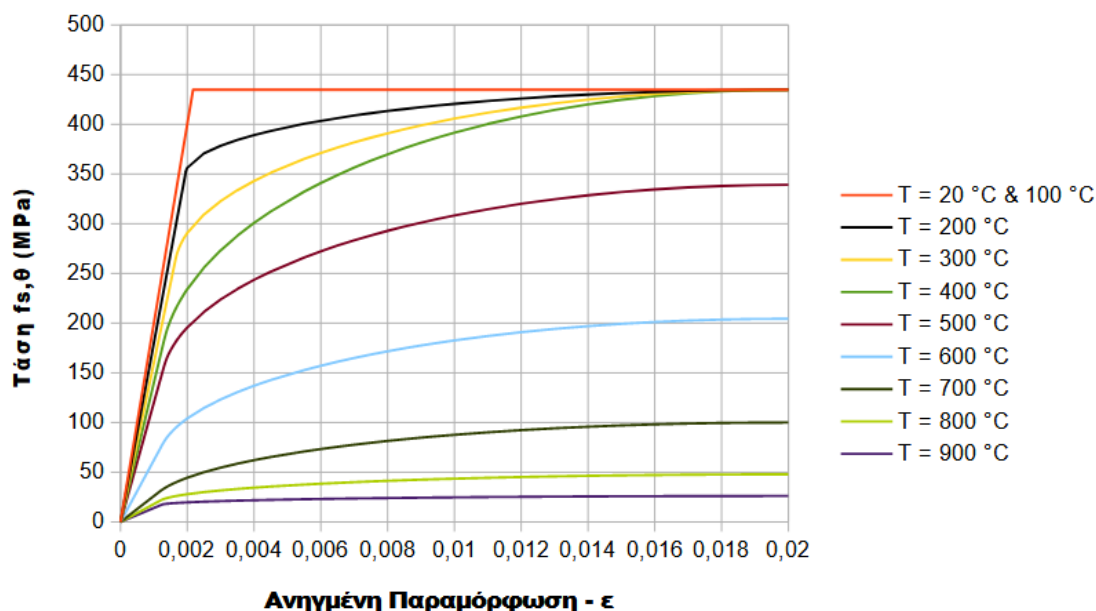
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

μορφή του προτεινόμενου διαγράμματος είναι γραμμική μέχρι την παραμόρφωση αναλογίας ($\epsilon_{sp,\theta}$), ακολουθεί μορφή δευτεροβάθμιας καμπύλης μέχρι τη σταθερή παραμόρφωση διαρροής ($\epsilon_{sy,\theta}$), έπειτα εμφανίζεται το πλαστικό πλατό μέχρι τη σταθερή παραμόρφωση 0,15 ($\epsilon_{st,\theta}$) και τέλος φθίνει γραμμικά μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας ($\epsilon_{su,\theta}$), η οποία είναι σταθερή και ίση με 0,20. Στον κανονισμό υπάρχει πίνακας με την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της τάσης διαρροής ($f_{sy,\theta}$), της τάσης αναλογίας ($f_{sp,\theta}$) και του μέτρου ελαστικότητας ($E_{s\theta}$) για χάλυβα ψυχρής κατεργασίας και χάλυβα θερμής έλασης, ώστε να σχεδιάζεται το διάγραμμα σε διάφορες τιμές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5: Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

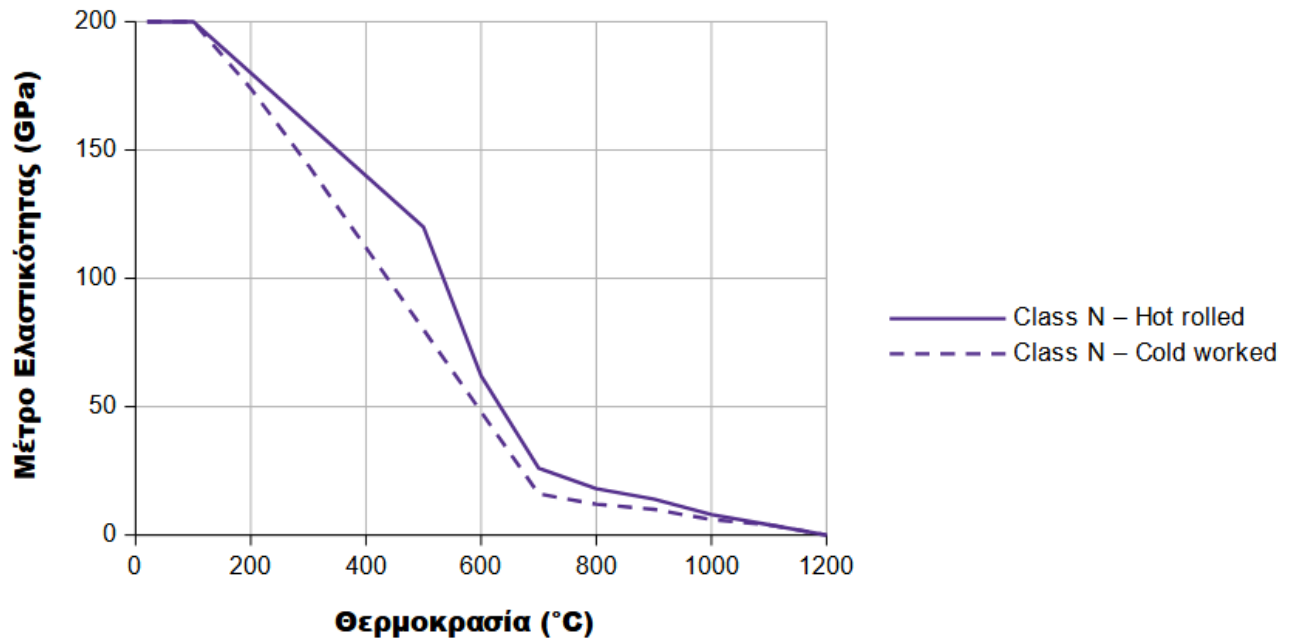


Σχήμα 6: Λεπτομέρεια διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Πίνακας 5: Επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις τιμές της τάσης διαρροής ($f_{sy,\theta}$), της τάσης αναλογίας ($f_{sp,\theta}$) και του μέτρου ελαστικότητας ($E_{s\theta}$) για χάλυβα ψυχρής κατεργασίας και χάλυβα θερμής έλασης (Table 3.2.a, EN 1992-1-2 (2004)).

Θερμοκρασία θ (°C)	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s\theta} / E_s$	
	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας	Θερμής έλασης	Ψυχρής κατεργασίας
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Σχήμα 7: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

5.1.2: Θερμική διαστολή και συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού

Η μεταβολή της θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

- Πυριτικά αδρανή:

$$\varepsilon_c(\theta) = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3, \text{για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

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

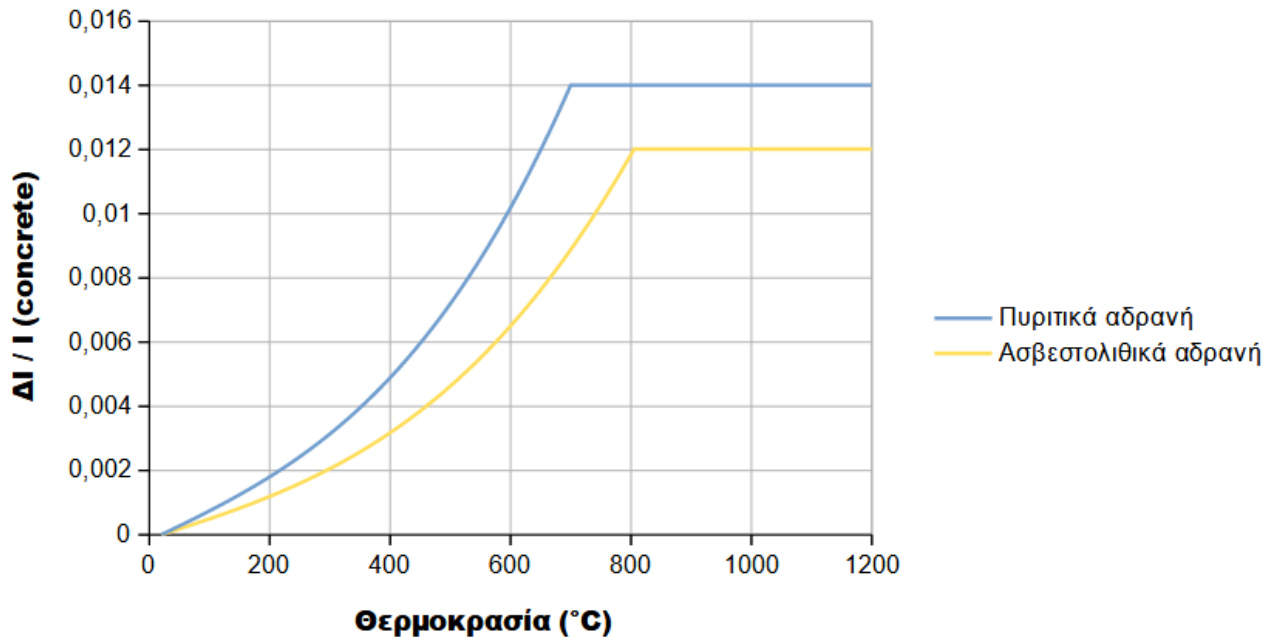
- Ασβεστολιθικά αδρανή:

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

$$\varepsilon_c(\theta) = 12 \cdot 10^{-3}, \text{για } 805^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Όπου, $\varepsilon_c(\theta)_t = \Delta l/l$: η ανηγμένη διαστολή του μήκους λόγω της θερμοκρασίας και θ : η θερμοκρασία του σκυροδέματος.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Σχήμα 8: Μεταβολή της θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Η θερμική διαστολή συνδέεται με τον συντελεστή θερμικής διαστολής ($\alpha_c(\theta)$) του σκυροδέματος ως εξής:

$$\varepsilon_c(\theta) = \alpha_c(\theta) \cdot \Delta\theta$$

Άρα, παραγωγίζοντας αυτή τη σχέση προκύπτει η μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$\varepsilon_c(\theta) = \alpha_c(\theta) \cdot \Delta\theta \rightarrow \frac{d\alpha_c(\theta) \cdot d\theta}{d\theta} = \frac{d\varepsilon_c(\theta)}{d\theta} \rightarrow \alpha_c(\theta) = \frac{d\varepsilon_c(\theta)}{d\theta} (^\circ\text{C}^{-1})$$

- Πυριτικά αδρανή:

$$\alpha_c(\theta) = 9 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^2, \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

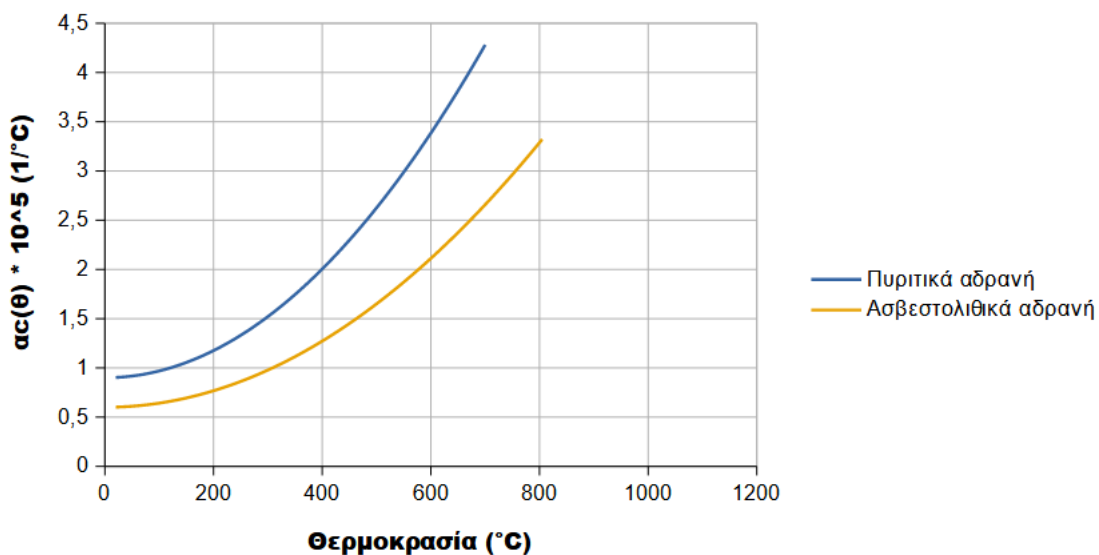
$$\alpha_c(\theta) = 0, \text{ για } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

- Ασβεστολιθικά αδρανή:

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

$$\alpha_c(\theta) = 0, \text{ για } 805^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



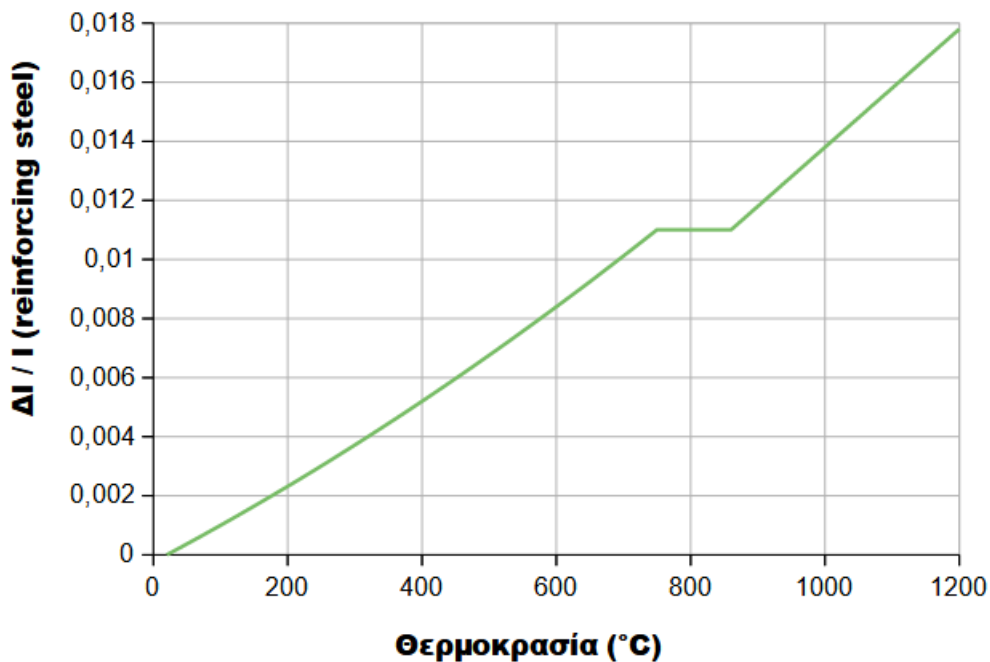
Σχήμα 9: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για τον χάλυβα οπλισμού η μεταβαλλόμενη θερμική διαστολή δίνεται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_s(\theta) = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2, \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_s(\theta) = 11 \cdot 10^{-3}, \text{ για } 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_s(\theta) = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta, \text{ για } 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$



Σχήμα 10: Μεταβολή της θερμικής διαστολής του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων της θερμικής διαστολής του χάλυβα και του σκυροδέματος, διαπιστώνεται ότι οι διαφορετικές τιμές θερμικής παραμόρφωσης που αναπτύσσουν τα δύο υλικά, π.χ. στους 600 °C ο χάλυβας επιμηκύνεται κατά 25% περισσότερο, εντείνουν τις βλάβες στη μικροδομή του οπλισμένου σκυροδέματος.

Η θερμική διαστολή του χάλυβα οπλισμού συνδέεται με τον συντελεστή θερμικής διαστολής ($\alpha_s(\theta)$) ως εξής:

$$\varepsilon_s(\theta) = \alpha_s(\theta) \cdot \Delta\theta$$

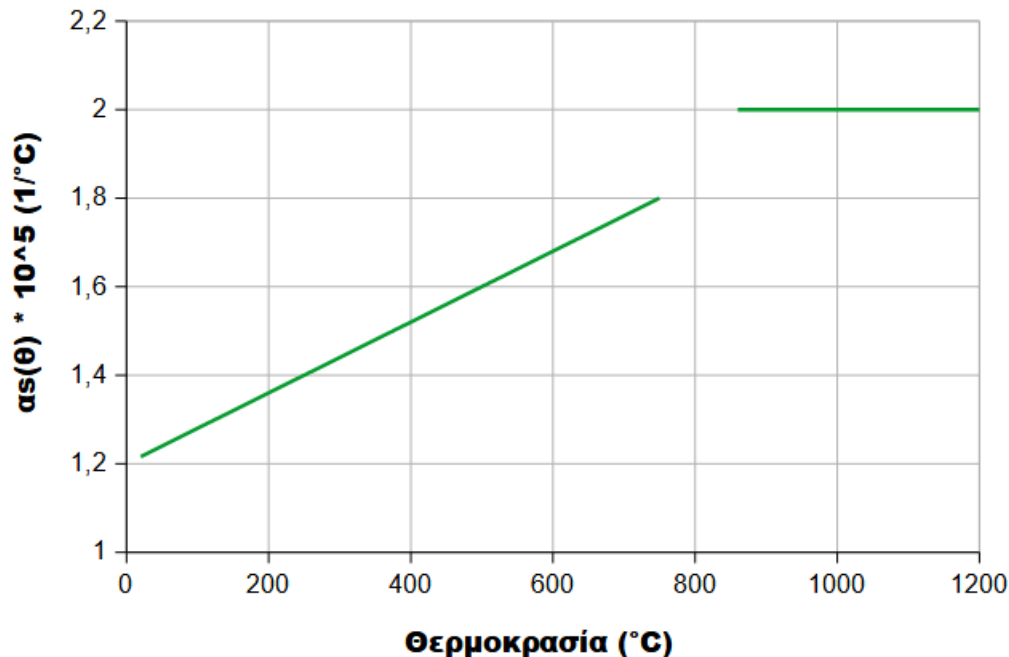
Παραγωγίζοντας αυτή τη σχέση προκύπτει η μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$\varepsilon_s(\theta) = \alpha_s(\theta) \cdot \Delta\theta \rightarrow \frac{d\alpha_s(\theta) \cdot d\theta}{d\theta} = \frac{d\varepsilon_s(\theta)}{d\theta} \rightarrow \alpha_s(\theta) = \frac{d\varepsilon_s(\theta)}{d\theta} (\text{°C}^{-1})$$

$$\alpha_s(\theta) = 1,2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta, \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\alpha_s(\theta) = 0, \text{ για } 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C}$$

$$\alpha_s(\theta) = 2 \cdot 10^{-5}, \text{ για } 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$



Σχήμα 11: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας.

5.1.3: Διακύμανση της πυκνότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού

Με την άνοδο της θερμοκρασίας η πυκνότητα του σκυροδέματος μειώνεται λόγω της εξάτμισης του νερού που υπάρχει στον τσιμεντοπολτό. Η μείωση αυτή εκφράζεται με τις εξισώσεις:

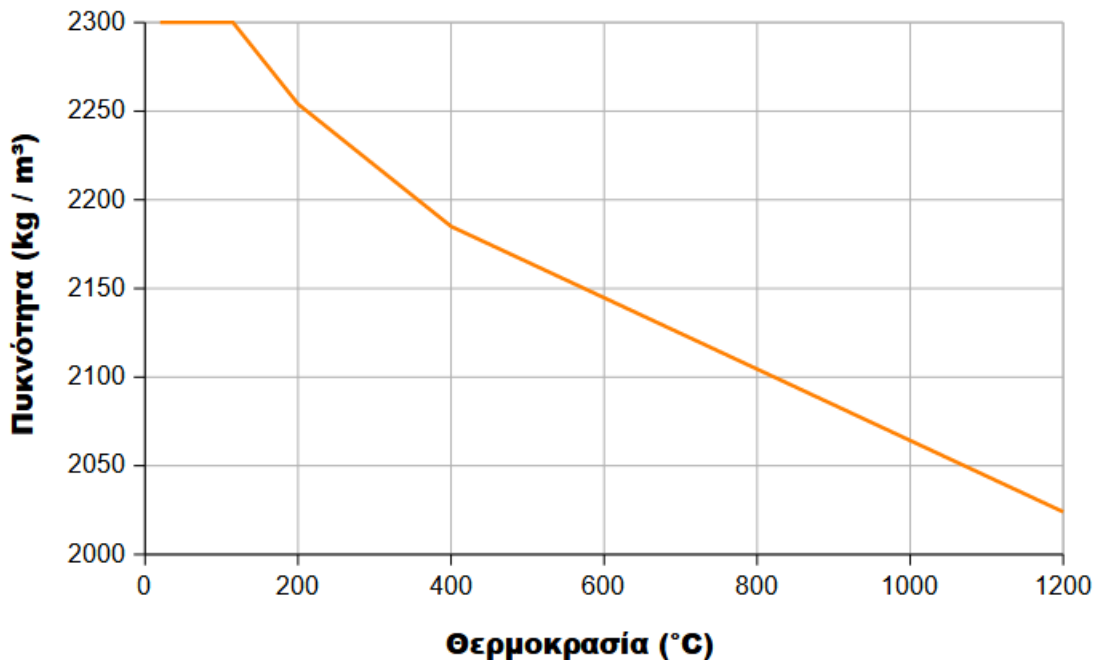
$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \text{για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left[1 - \frac{0,02 \cdot (\theta - 115)}{85} \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \text{για } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left[0,98 - \frac{0,03 \cdot (\theta - 200)}{200} \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \text{για } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left[0,95 - \frac{0,07 \cdot (\theta - 400)}{800} \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \text{για } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

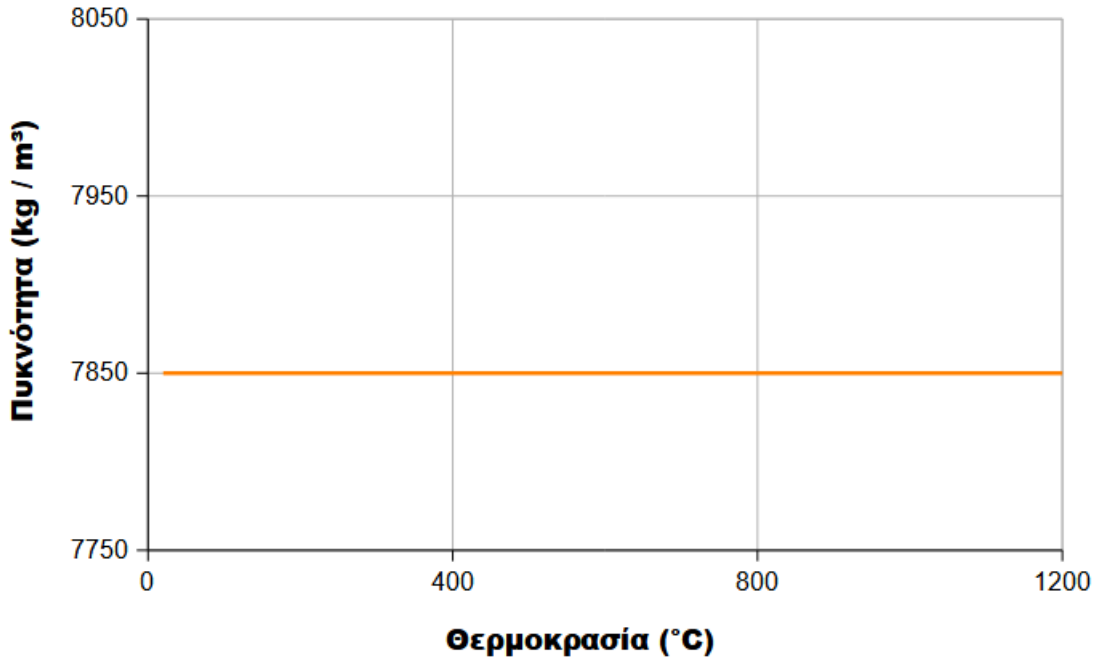
Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα η τιμή της πυκνότητας του σκυροδέματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C) μπορεί να ληφθεί ίση με 2300 kg/m³.



Σχήμα 12: Η πυκνότητα του σκυροδέματος συναρτήσεϊ της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Αντιθέτως η πυκνότητα του χάλυβα οπλισμού δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διακύμανση παραμένοντας σταθερή και ίση με 7850 kg/m^3 .



Σχήμα 13: Η πυκνότητα του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

5.1.4: Ειδική θερμότητα σκυροδέματος

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται μόνο η μεταβολή της ειδικής θερμότητας (θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας) του σκυροδέματος με την άνοδο της θερμοκρασίας, επειδή η διακύμανση της αντίστοιχης ιδιότητας του χάλυβα οπλισμού αναφέρεται στον ευρωκώδικα 3. Η περιεχόμενη υγρασία επηρεάζει την τιμή της ειδικής θερμότητας ιδιαίτερα στην περιοχή των θερμοκρασιών από 100°C έως 200°C . Η συνάρτηση της μεταβολής εκφράζεται με τις εξισώσεις:

$$c_p(\theta) = 900 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right], \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

◆ Για περιεχόμενη υγρασία 0%

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

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

◆ Για περιεχόμενη υγρασία 1,5% & 3%

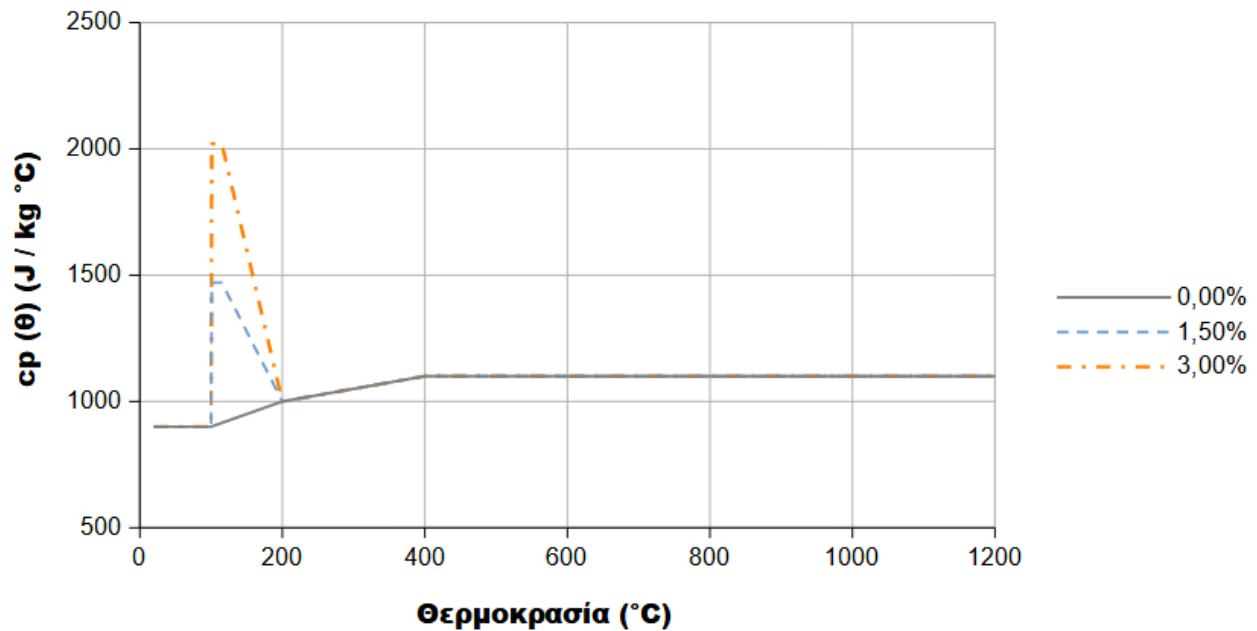
$$c_p(\theta) = c_{p,peak} \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 100^\circ C < \theta \leq 115^\circ C$$

$$c_p(\theta) = c_{p,peak} + \frac{(1000 - c_{p,peak}) \cdot (\theta - 115)}{85} \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 115^\circ C < \theta \leq 200^\circ C$$

$$c_p(\theta) = 1000 + \frac{\theta - 200}{2} \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 200^\circ C < \theta \leq 400^\circ C$$

$$c_p(\theta) = 1100 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 400^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C$$

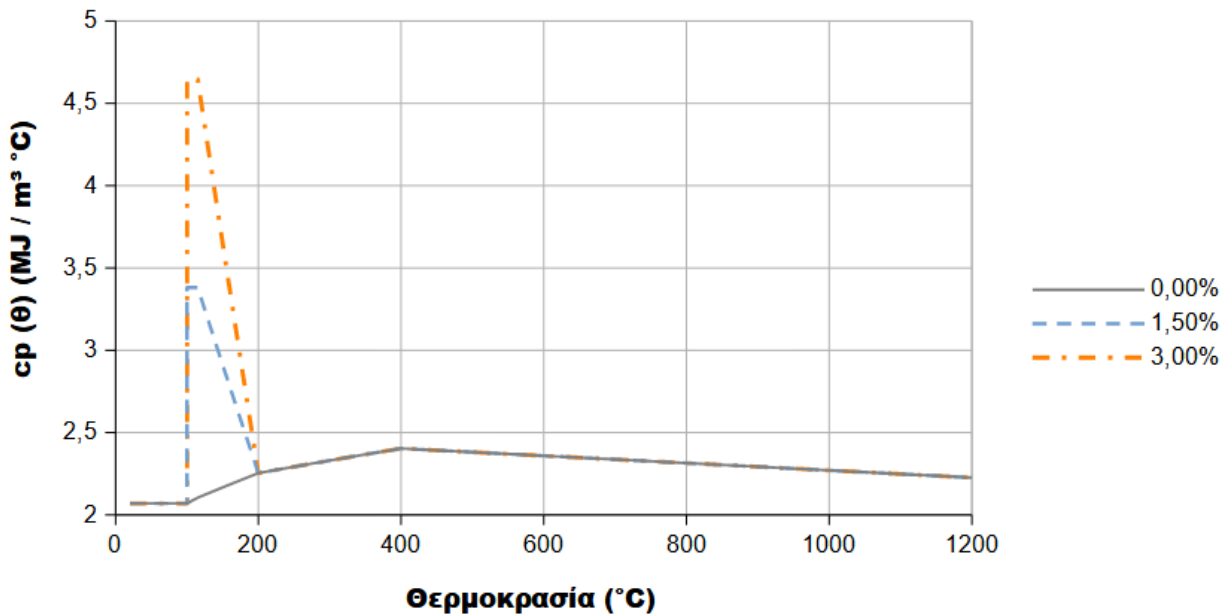
Όπου, θ : θερμοκρασία σκυροδέματος, $c_{p,peak}$: μέγιστη τιμή της ειδικής θερμότητας και ίση με 900 (J/kg · °C) για περιεχόμενη υγρασία 0%, 1470 (J/kg · °C) για περιεχόμενη υγρασία 1,5% και 2020 (J/kg · °C) για περιεχόμενη υγρασία 3%.



Σχήμα 14: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Πολλαπλασιάζοντας την ειδική θερμότητα με την πυκνότητα του σκυροδέματος προκύπτει η θερμοχωρητικότητα του ανά μονάδα όγκου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

$$c_p(\theta) \cdot \rho(\theta) = \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$$



Σχήμα 15: Μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του σκυροδέματος ανά μονάδα όγκου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

5.1.5: Θερμική αγωγιμότητα σκυροδέματος

Η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας εντός του δομικού μέλους πιο πολύ από κάθε άλλη ιδιότητα του σκυροδέματος. Η τιμή της εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία. Αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, επειδή ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ) του νερού ισούται με $0,57 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα ισούται με $0,024 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Συνεπώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αποβάλλεται μέρος του ύδατος και δημιουργούνται μικρορωγμές με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος. Πάλι παρουσιάζεται η συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας μόνο του σκυροδέματος, γιατί η συνάρτηση της αντίστοιχης ιδιότητας του χάλυβα οπλισμού αναφέρεται στον ευρωκώδικα 3. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας καθορίζεται στο εθνικό προσάρτημα εντός του εύρους που οριοθετούν το ανώτερο και το κατώτερο όριο, τα οποία δίνονται στον κανονισμό. Εντούτοις η ευρωπαϊκή τεχνική επιτροπή CEN/TC250/SC2/WG1/TG5, που είναι υπεύθυνη για τη σύνταξη κανονισμών για το σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με ιδιαίτερη έμφαση στην αντιμετώπιση τυχηματικών δράσεων π.χ. πυρκαγιά, έκρηξη, ανέπτυξε μια μεικτή καμπύλη συνδυάζοντας το ανώτερο και το κατώτερο όριο [26].

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- **Ανώτερο όριο (upper limit):**

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right) + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right], \text{για } 20^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C$$

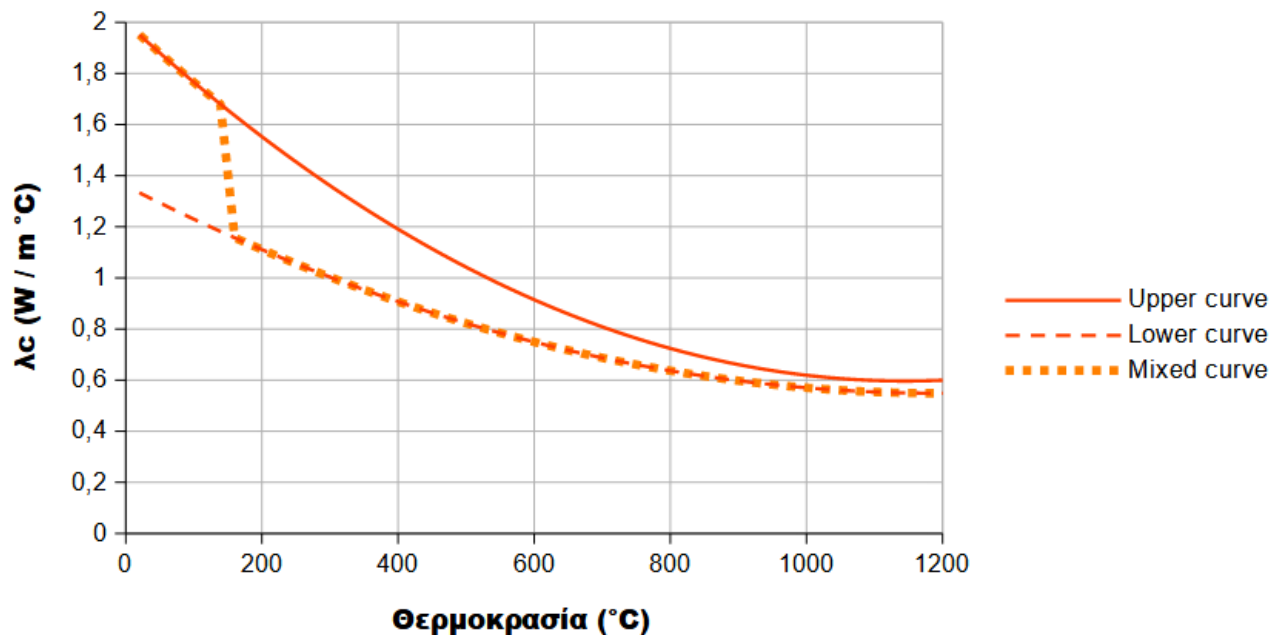
- **Κατώτερο όριο (lower limit):**

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

- **Μεικτή καμπύλη (mixed curve):**

Η μεικτή καμπύλη ακολουθεί το ανώτερο όριο έως τους 140 °C. Μεταξύ των 140 °C και των 160 °C, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται γραμμικά και από τους 160 °C έως τους 1200 °C η μεικτή καμπύλη ακολουθεί το κατώτερο όριο.

Όπου, θ : θερμοκρασία σκυροδέματος.



Σχήμα 16: Διακύμανση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

5.2: Ιδιότητες των υλικών από τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-2 (2005))

Ο κανονισμός EN 1993-1-2 (2005) [13] που μελετά τη συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών εκτεθειμένων σε πυρκαγιά περιέχει δεδομένα για πολλές ιδιότητες του χάλυβα.

5.2.1: Ειδική θερμότητα χάλυβα οπλισμού

Η ειδική θερμότητα του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας περιγράφεται από τέσσερις εξισώσεις:

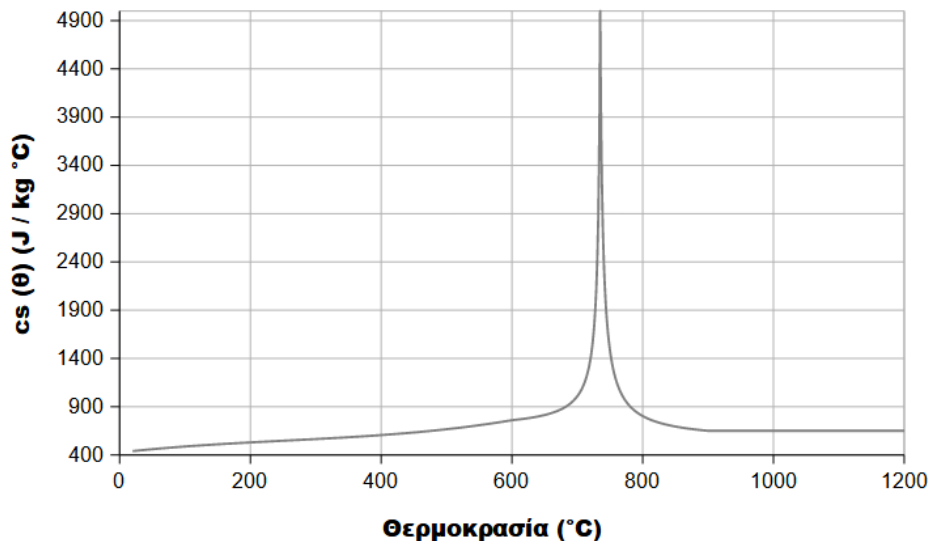
$$c_s(\theta_s) = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_s - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_s^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_s^3 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{για } 20^\circ C \leq \theta_s < 600^\circ C$$

$$c_s(\theta_s) = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_s} \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{για } 600^\circ C \leq \theta_s < 735^\circ C$$

$$c_s(\theta_s) = 545 + \frac{17820}{\theta_s - 731} \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{για } 735^\circ C \leq \theta_s < 900^\circ C$$

$$c_s(\theta_s) = 650 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right], \text{για } 900^\circ C \leq \theta_s \leq 1200^\circ C$$

Όπου, θ_s : θερμοκρασία του χάλυβα.

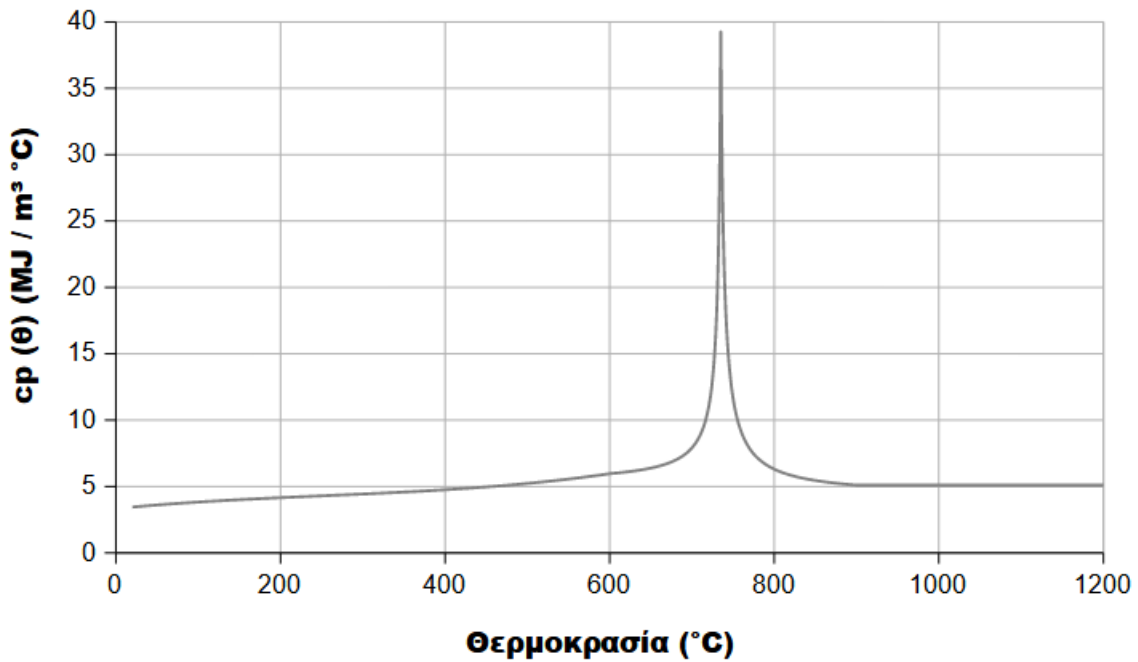


Σχήμα 17: Διακύμανση της ειδικής θερμότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Πολλαπλασιάζοντας την ειδική θερμότητα με την πυκνότητα του χάλυβα προκύπτει η θερμοχωρητικότητα του ανά μονάδα όγκου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

$$c_s(\theta) \cdot \rho_s = \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$$



Σχήμα 18: Μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του χάλυβα ανά μονάδα όγκου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & τον Ευρωκώδικα 3.

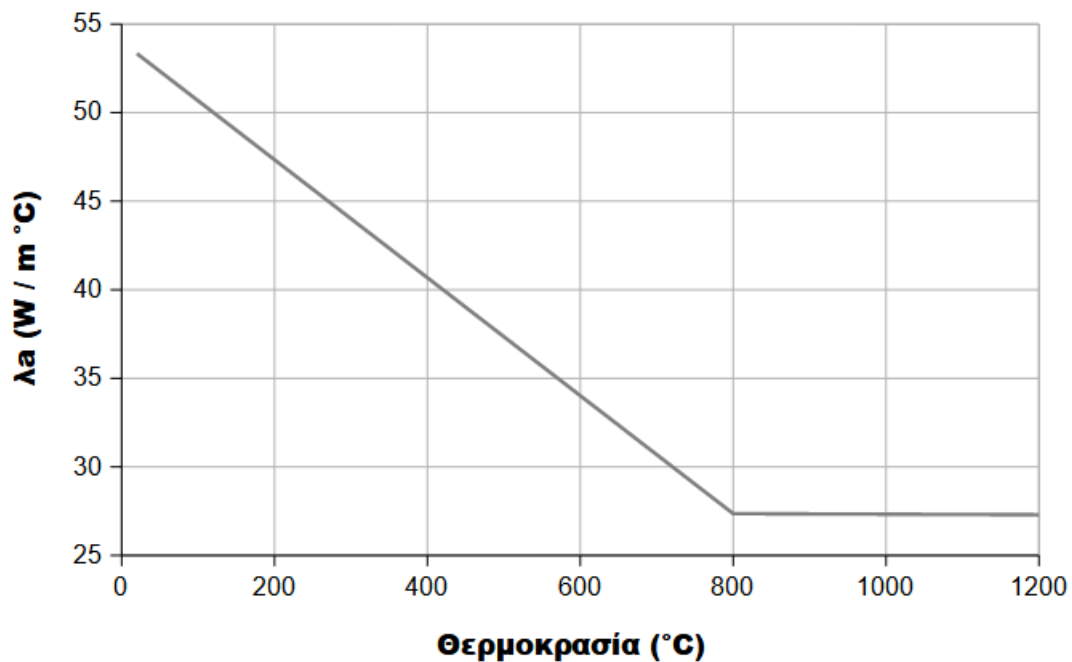
5.2.2: Θερμική αγωγιμότητα χάλυβα οπλισμού

Η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα οπλισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας περιγράφεται από δύο εξισώσεις:

$$\lambda_s = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_s \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 27,3 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right], \text{ για } 800^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C}$$

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Σχήμα 19: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του σκυροδέματος, συνεπώς η ικανότητα του χάλυβα να άγει θερμότητα είναι πολύ μεγαλύτερη. Ο ευρωκώδικας 2 στην παράγραφο 4.3.2 επιτρέπει τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ του στοιχείου αγνοώντας την ύπαρξη του οπλισμού. Όταν όμως ο οπλισμός είναι πυκνός η παραδοχή αυτή αναμένεται να οδηγήσει σε υποεκτίμηση των θερμοκρασιών στο στοιχείο. Επομένως η παραπάνω παραδοχή που προτείνεται στον κανονισμό μπορεί να εφαρμόζεται για γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού στη διατομή μικρότερο ή ίσο του 4%.

5.3: Ιδιότητες των υλικών από τους κανονισμούς ASCE 78 (1992) & BS 8110 (1985)

Ο αμερικάνικος κανονισμός ASCE 78 [1] και ο βρετανικός κανονισμός BS 8110 [4] παρέχουν την αλλαγή σε υψηλές θερμοκρασίες του χαρακτηριστικού του σκυροδέματος για το οποίο δεν δίνονται πληροφορίες στον ευρωκώδικα 2.

5.3.1: Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος

- **ASCE 78 (1992):**

$$E_{cm}(\theta) = E_{cm}, \text{ για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$$

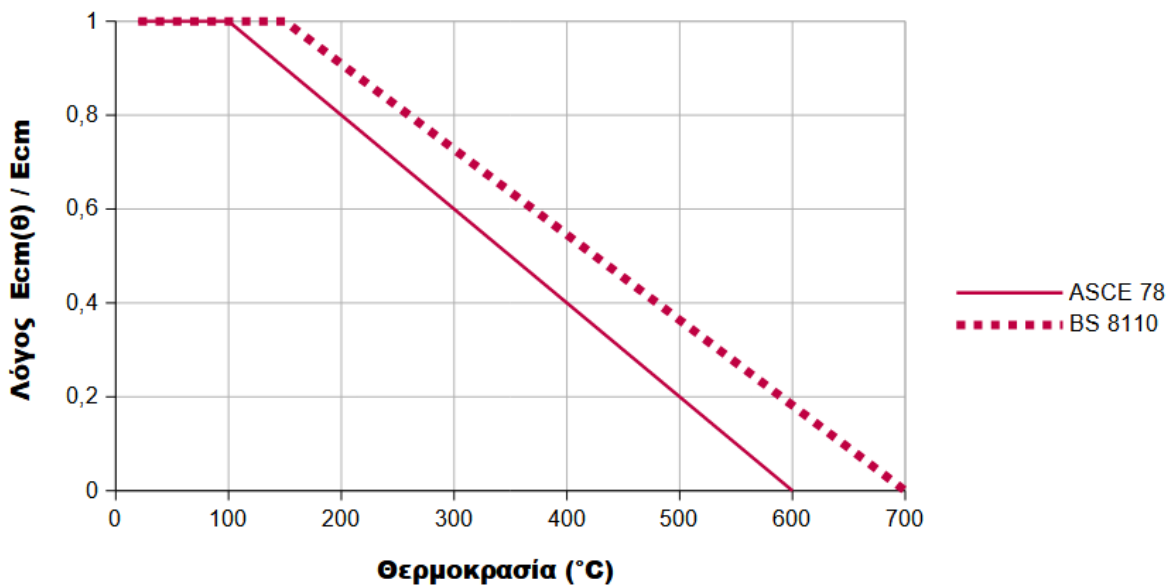
$$E_{cm}(\theta) = E_{cm} \cdot \left(1 + \frac{100 - \theta}{500}\right), \text{ για } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 600^{\circ}\text{C}$$

- **BS 8110 (1985):**

$$E_{cm}(\theta) = E_{cm}, \text{ για } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 150^{\circ}\text{C}$$

$$E_{cm}(\theta) = E_{cm} \cdot \left(1 + \frac{150 - \theta}{550}\right), \text{ για } 150^{\circ}\text{C} < \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$$

Όπου, $E_{cm}(\theta)$: μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος στη θερμοκρασία θ , E_{cm} : μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 20: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος σύμφωνα με τους κανονισμούς ASCE 78 & BS 8110.

5.4: Ιδιότητες των υλικών από ερευνητικές δημοσιεύσεις

Οι υπό εξέταση κανονισμοί δεν παρέχουν κανένα στοιχείο για τη μεταβολή του λόγου Poisson με την άνοδο της θερμοκρασίας στα υλικά του οπλισμένου σκυροδέματος. Επομένως διεξήχθη μια έρευνα στη βιβλιογραφία με σκοπό την εύρεση σχέσεων που περιγράφουν αυτή τη μεταβολή.

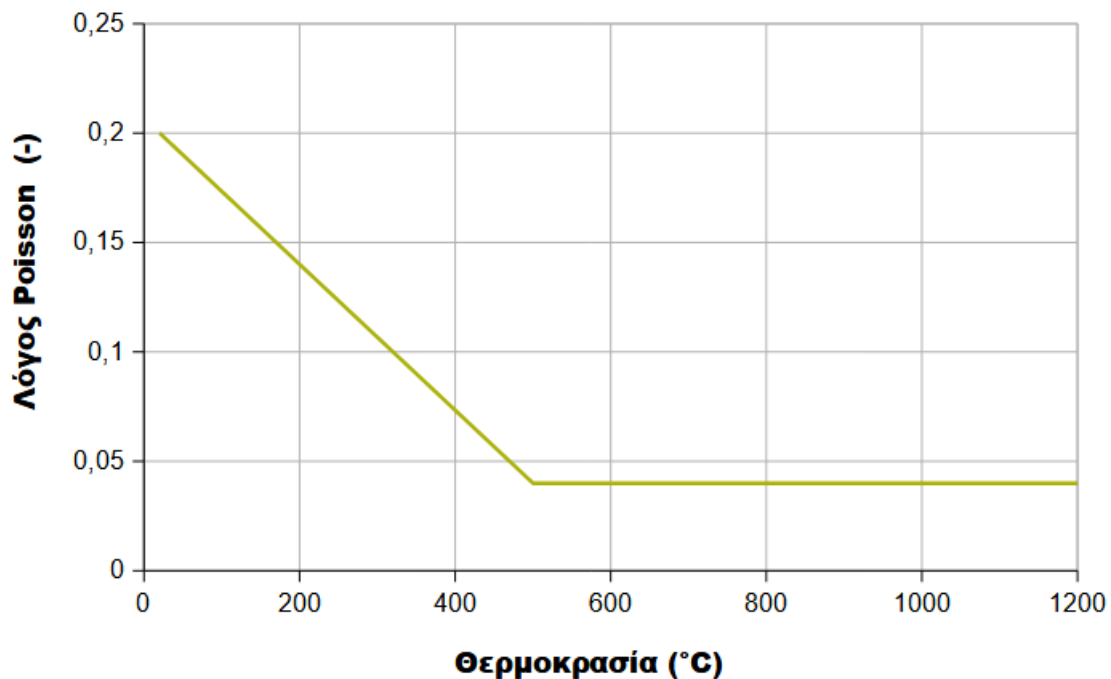
5.4.1: Λόγος Poisson του σκυροδέματος

Η διακύμανση του λόγου Poisson του σκυροδέματος με την άνοδο της θερμοκρασίας περιγράφεται από διγραμμική σχέση που προέκυψε από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων και αναφέρεται στην ερευνητική δημοσίευση των Gernay T., Millard A., Franssen J.M., με τίτλο “A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation: Theoretical formulation”, που δημοσιεύτηκε το 2013 στο International Journal of Solids and Structures [14]:

$$\nu_c(\theta) = \nu_c \cdot \left(0,2 + \frac{0,8 \cdot (500 - \theta)}{500 - 20} \right), \text{για } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$$

$$\nu_c(\theta) = 0,2 \cdot \nu_c, \text{για } 500^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Όπου, $\nu_c(\theta)$: λόγος Poisson του σκυροδέματος στη θερμοκρασία θ , ν_c : λόγος Poisson του σκυροδέματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C), ίσος με 0,2.



Σχήμα 21: Συνάρτηση του λόγου Poisson του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες,

6. Επαλήθευση της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης μέσω προσομοίωσης πειράματος φέροντος στοιχείου εκτεθειμένου σε πυρκαγιά

Στην παράγραφο 4.1 “Μέθοδοι αξιολόγησης πυραντίστασης” του τέταρτου κεφαλαίου παρουσιάζονται οι τρεις κατηγορίες μεθόδων για την αξιολόγηση της πυραντίστασης μεμονωμένων δομικών στοιχείων ή υποφορέων ή και του συνόλου της κατασκευής, που προτείνουν οι ευρωκώδικες. Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην εφαρμογή προηγμένων αναλυτικών μεθόδων που ακολουθούν το σχεδιασμό με βάση την επιτελεσματικότητα. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος προσομοίωσης της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενός πειράματος [19], χρησιμοποιώντας το λογισμικό DIANA FEA.

6.1: Παρουσίαση του λογισμικού DIANA FEA

Το λογισμικό DIANA (Displacement ANAlyzer) FEA είναι ένα ισχυρό εργαλείο υπολογιστικά βοηθούμενης μηχανικής (Computer Aided Engineering) που χρησιμοποιείται εκτενώς στους τομείς της δομοστατικής και της γεωτεχνικής μηχανικής παγκοσμίως. Αναπτύσσεται στο Ντελφτ της Ολλανδίας από την εταιρία – τεχνοβλαστό DIANA FEA BV του ολλανδικού ερευνητικού οργανισμού TNO. Η πρώτη εμπορική κυκλοφορία του λογισμικού έγινε το 1981 και αποτελεί ένα από τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων. Σήμερα είναι συμβατό με τα λειτουργικά συστήματα Microsoft Windows και Linux παρέχοντας ευελιξία και προσβασιμότητα σε μια ευρεία βάση χρηστών. Τα βασικά πλεονεκτήματα του DIANA FEA οφείλονται στην πλούσια βιβλιοθήκη υλικών που διαθέτει (ιδίως στο σκυρόδεμα) και στην ικανότητα εκτέλεσης ενός φάσματος αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένων γραμμικών και μη – γραμμικών, στατικών και δυναμικών και αναλύσεων μεταφοράς θερμότητας για προβλήματα μόνιμης και μη – μόνιμης κατάστασης. Η έκδοση DIANA 10.0 του 2016 αποτελεί ορόσημο, διότι είναι η πρώτη στην οποία εφαρμόζεται η χρήση του DIANA IE (Interactive Environment), ενός σύγχρονου και βελτιστοποιημένου γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI). Το λογισμικό εξειδικεύεται στην επιρροή των ερπυστικών φαινομένων, στις σεισμικές αναλύσεις και στη πυρκαγιά [9]. Συνεπώς, είναι ιδανική επιλογή για τη μελέτη συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση DIANA 10.6 που κυκλοφόρησε το 2022.

6.2: Υποστύλωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα

Το 1988 στον Καναδά οι T. T. Lie και J. L. Woollerton δημοσίευσαν τα αποτελέσματα μίας σειράς πειραμάτων που είχαν πραγματοποιήσει υπό την αιγίδα των National Research Council of Canada και Portland Cement Association σε 41 υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα σε φυσική κλίμακα εκτεθειμένα στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 [19]. Στόχος της έρευνας τους ήταν η διερεύνηση της επίδρασης διάφορων παραγόντων, όπως το μέγεθος και το γεωμετρικό σχήμα (κυκλικό, τετραγωνικό, ορθογωνικό) της διατομής, το μέγεθος και η εκκεντρότητα του επιβαλλόμενου φορτίου και οι συνθήκες στήριξης, στην πυραντίσταση των υποστυλωμάτων.

Από τα 41 υποστυλώματα θα προσομοιωθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό DIANA, κατά το DIANA FEA User's Manual – Release 10.6, 2022 [9], το υποστύλωμα 3 της σειράς I (Column I3). Κατά τη μοντελοποίηση και την ανάλυσή του δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης του σκυροδέματος, αφού σύμφωνα με τους ερευνητές δεν παρατηρήθηκε [19]. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά του υποστυλώματος:

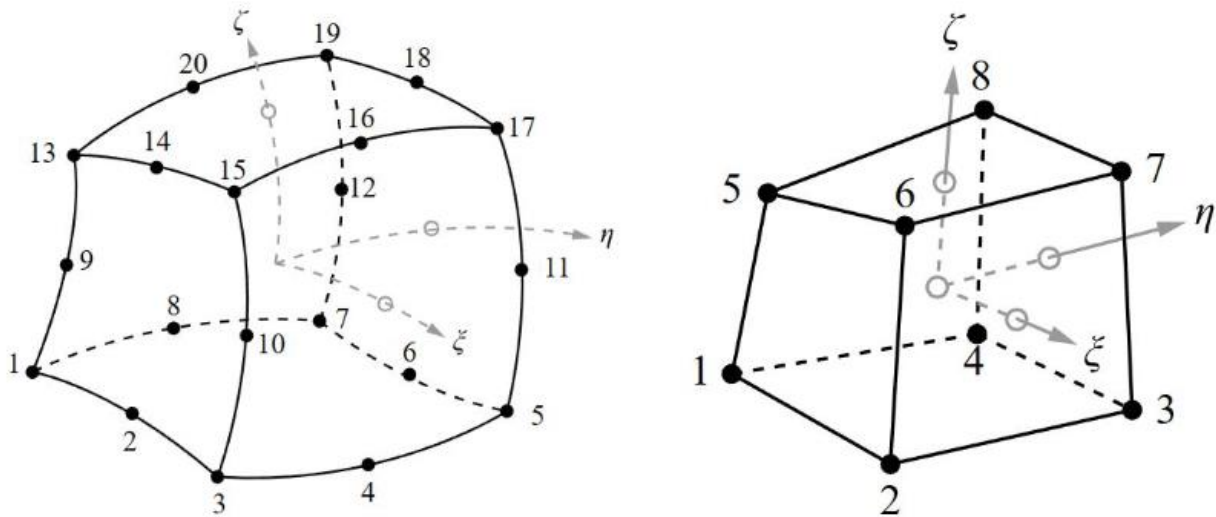
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά του υποστυλώματος Column I3.

Column I3 tested by Lie and Woolerton	
Διαστάσεις διατομής (mm)	305 x 305
Ύψος (m)	3.80
Συνθήκες στήριξης	Πάκτωση – Κυλιόμενη πάκτωση
Τύπος αδρανών	Πυριτικά
Επιβαλλόμενο φορτίο (kN)	800.00 (Θλίψη)
Περιεχόμενη υγρασία κατά βάρος	0 %
Επικάλυψη συνδετήρων (mm)	38
Επικάλυψη διαμήκους οπλισμού (mm)	48
Διαμήκεις οπλισμός	4 Φ25
Συνδετήρες (δίτμητοι)	13 Φ10
f_c (MPa)	34.80
f_{sy} (MPa)	444.00
f_{su} (MPa)	730.00
Χρόνος Πυραντίστασης (min)	218

6.3: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες

Αρχικά, το υποστύλωμα προσομοιώθηκε ως τρισδιάστατο στερεό σώμα και τόσο οι συνδετήρες όσο και οι διαμήκεις οπλισμοί ως ραβδωτά στοιχεία πλήρως ενσωματωμένα στον όγκο του σκυροδέματος. Η διακριτοποίηση του στύλου έγινε με ένα πλέγμα ορθογωνικών εξαέδρων στοιχείων στο οποίο το μέγεθος κάθε στοιχείου είναι ίσο με $x = 12.20 \text{ mm}$, $y = 12.20 \text{ mm}$, $z = 152 \text{ mm}$. Από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του λογισμικού επιλέχθηκε το ΠΣ CHX60 για τη μηχανική ανάλυση και το ΠΣ HX8HT για τη θερμοκρασιακή ανάλυση.

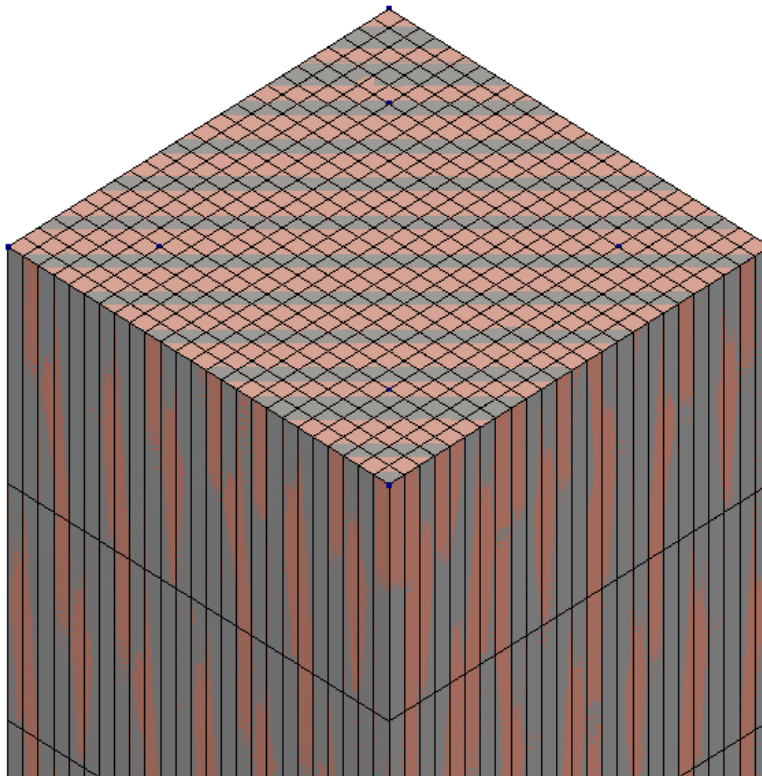
- ΠΣ CHX60:** είναι ένα τρισδιάστατο ισοπαραμετρικό πεπερασμένο στοιχείο με είκοσι κόμβους κατάλληλο για μηχανικές αναλύσεις (στατικές ή δυναμικές, γραμμικές ή μη – γραμμικές, σεισμικές αναλύσεις κλπ.), με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, τις τρεις μετατοπίσεις: u_x , u_y , u_z . Για τον υπολογισμό του μητρώου στιβαρότητάς του είναι προεπιλεγμένη αριθμητική ολοκλήρωση τρίτης τάξης. Η επιλογή στοιχείου ανώτερης τάξης εξασφαλίζει την αποφυγή ανάπτυξης παρασιτικών φαινομένων στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, όπως το “διατμητικό κλείδωμα” (shear locking). Το φαινόμενο αυτό προκύπτει σε στοιχεία πρώτης τάξης και πλήρους ολοκλήρωσης. Το “διατμητικό κλείδωμα” συναντάται πρωτίστως σε ΠΣ που καταπονούνται σε κάμψη. Η αριθμητική ολοκλήρωσή τους δημιουργεί μη - πραγματικές διατμητικές τάσεις, οδηγώντας σε πιο δύσκαμπτη συμπεριφορά.
- ΠΣ HX8HT:** είναι ένα τρισδιάστατο γραμμικό οκτακομβικό ισοπαραμετρικό πεπερασμένο στοιχείο κατάλληλο για αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας τόσο μόνιμων όσο και μη – μόνιμων συνθηκών, με ένα βαθμό ελευθερίας ανά κόμβο, τη θερμοκρασία (T). Για τον υπολογισμό του μητρώου στιβαρότητάς του είναι προεπιλεγμένη αριθμητική ολοκλήρωση δεύτερης τάξης.



Εικόνα 13: Τα ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία CHX60 & HX8HT (DIANA FEA User's Manual – Release 10.6, 2022 [9]).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τα ραβδωτά στοιχεία που προσομοιώνουν τους συνδετήρες και τους διαμήκεις οπλισμούς ανήκουν στην κατηγορία *embedded bar reinforcement*. Η επιλογή αυτή σημαίνει ότι τα ραβδωτά στοιχεία των οπλισμών είναι πλήρως ενσωματωμένα στον όγκο των μητρικών ΠΣ του σκυροδέματος. Το λογισμικό αγνοεί τον χώρο που καταλαμβάνουν και τη συμμετοχή τους στη μάζα του στοιχείου. Αντιθέτως, οι οπλισμοί συνεισφέρουν στη στιβαρότητα του φορέα των ΠΣ. Επίσης, θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης συνάφεια (*perfect bond*) μεταξύ των ραβδωτών στοιχείων οπλισμού και του υλικού που τα περιβάλλει.



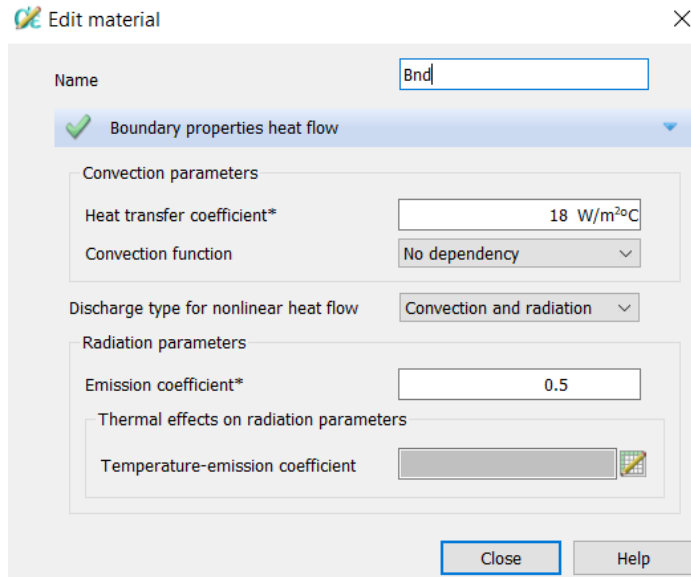
Εικόνα 14: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης του υποστυλώματος στο DIANA FEA.

Ακολουθώς στο μοντέλο εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες για τη θερμοκρασιακή και τη μηχανική ανάλυση.

- **Συνοριακές συνθήκες θερμοκρασιακής ανάλυσης:** για την εκτέλεση της θερμοκρασιακής ανάλυσης εισάγονται στο προσομοίωμα αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Ως αρχική συνθήκη ορίζεται η θερμοκρασία του υποστυλώματος πριν την έκθεση του στην ASTM E 119, που ισούται με 20 °C και επιβάλλεται σε όλο τον όγκο του. Οι συνοριακές συνθήκες που εισάγονται οφείλονται στη μεταφορά θερμικής ενέργειας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας που παρατηρείται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας στις εκτεθειμένες επιφάνειες του υποστυλώματος. Οι τέσσερις έδρες του, διαστάσεων 305 x 3800 mm, είναι εκτεθειμένες στην πρότυπη καμπύλη και η αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας τους ταυτίζεται με την εξέλιξη της θερμοκρασίας σε αυτήν. Επιπλέον, μέσω ενός μοντελικού υλικού θερμικής ροής (*boundary*

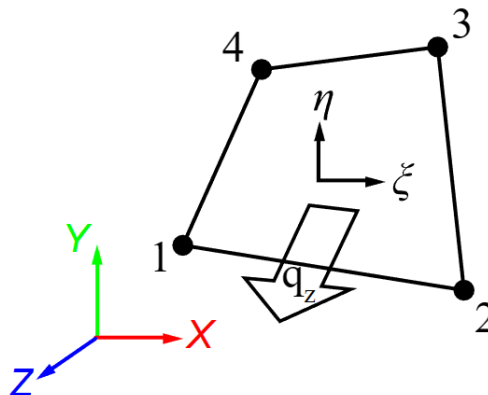
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

element) επιλέγονται οι συντελεστές συναγωγής και εκπομπής για τους οποίους δεν υπάρχουν δεδομένα στην δημοσίευση των Lie και Woolerton. Τέλος, για τις δύο έδρες, διαστάσεων 305 x 305 mm, που δεν εκτίθενται στην πρότυπη καμπύλη ορίζεται σταθερή εξωτερική θερμοκρασία ίση με 20 °C, για όλη τη διάρκεια της έκθεσης.



Εικόνα 15: Εισαγωγή μοντελικού υλικού θερμικής ροής στο DIANA FEA.

Οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες επιβάλλονται στο προσομοίωμα του υποστυλώματος με τη διακριτοποίηση των έξι εδρών του με το δισδιάστατο γραμμικό τετρακομβικό ισοπαραμετρικό πεπερασμένο στοιχείο **BQ4HT**. Για τον υπολογισμό του μητρώου σιβαρότητάς του είναι προεπιλεγμένη αριθμητική ολοκλήρωση δεύτερης τάξης.



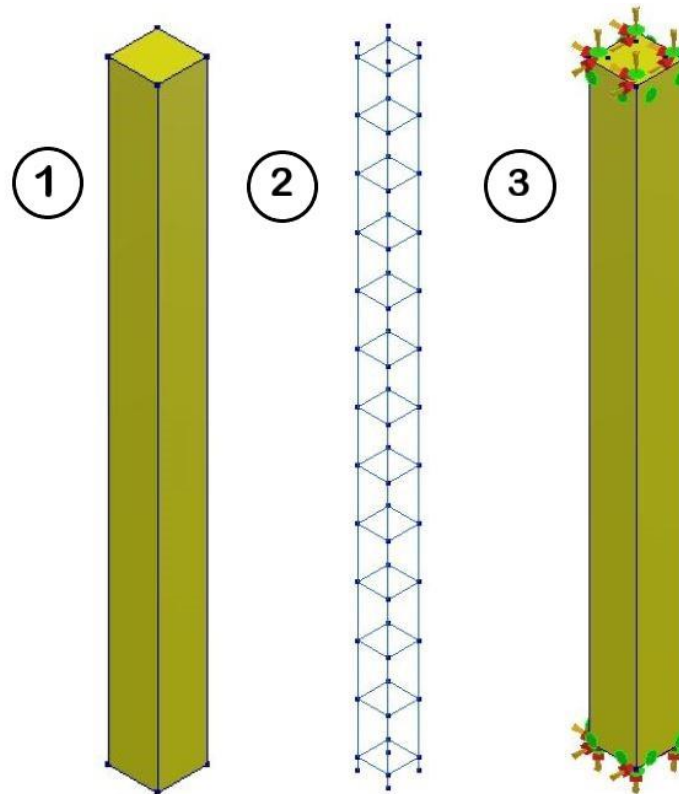
Εικόνα 16: Το ισοπαραμετρικό πεπερασμένο στοιχείο συνοριακών συνθηκών BQ4HT (DIANA FEA User's Manual – Release 10.6, 2022 [9]).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- **Συνοριακές συνθήκες μηχανικής ανάλυσης:** οι συνθήκες στήριξης του υποστυλώματος είναι πάκτωση στο ένα άκρο και κυλιόμενη πάκτωση στο άλλο. Η εφαρμογή τους έγινε στους κόμβους των δύο εδρών, διαστάσεων 305 x 305 mm, όπου στη μία δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις και οι στροφές στους τρεις άξονες (X, Y, Z) ενώ στην άλλη δεσμεύονται οι μετακινήσεις στους άξονες X, Y και οι στροφές στους τρεις άξονες. Η μετακίνηση κατά τη διεύθυνση του υποστυλώματος, άξονα Z, παραμένει ελεύθερη.

Παραδοχές κατά την εισαγωγή της γεωμετρίας και των συνοριακών συνθηκών:

- ◆ Αγνοείται τυχούσα ευνοϊκή θερμοκρασιακή υστέρηση μεταξύ της θερμοκρασίας αερίων και της επιφανειακής θερμοκρασίας των εκτεθειμένων εδρών του υποστυλώματος.
- ◆ Οι μη εκτιθέμενες έδρες θεωρούνται πλήρως μονωμένες.
- ◆ Γίνεται παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού και του περιβάλλοντος σκυροδέματος καθ' όλη τη διάρκεια έκθεσης. Στην πραγματικότητα η τάση συνάφειας μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.
- ◆ Κατά τη θερμοκρασιακή ανάλυση οι οπλισμοί αγνοούνται, σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.2 του EN 1992-1-2 (2004) και η θερμοκρασία του χάλυβα ισούται με τη θερμοκρασία του σκυροδέματος στο σημείο αυτό. Το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού στη διατομή ισούται με 2.19%, ποσοστό μικρότερο του 4%, άρα η παραδοχή είναι εύλογη.
- ◆ Ελλείψει ακριβών τιμών για τους συντελεστές εκπομπής και συναγωγής επιλέγεται σταθερή τιμή ίση με 0.50 για τον πρώτο και τρεις τιμές για τον δεύτερο ίσες με $22 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, $25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ που αποτελεί την τιμή που προτείνει ο EN 1991-1-2 (2002) στην παράγραφο 3.2.1 για τη χρήση της πρότυπης καμπύλης ISO 834 και $28 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$. Δηλαδή, εκτελούνται τρεις συζευγμένες αναλύσεις.



Εικόνα 17: Προσομοίωση του υποστυλώματος (1), των οπλισμών του (2) και των συνοριακών συνθηκών (3) στο DIANA FEA.

6.4: Υλικά

6.4.1: Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται με δύο διαφορετικά μοντέλα. Ένα σύνθετο ελαστοπλαστικό μοντέλο και ένα απλό μοντέλο γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας.

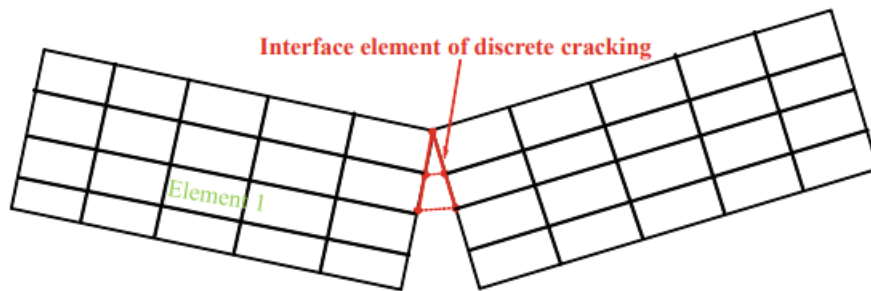
6.4.1.α: Total Strain Based Crack Model

Το πρώτο από τα μοντέλα που επιλέγονται για την προσομοίωση του σκυροδέματος είναι το μοντέλο Total Strain Based Crack Model, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη μη – γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος και ιδιαίτερα τη συμπεριφορά κατά τη ρηγμάτωσή του. Στο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η προοδευτική υποβάθμιση του σκυροδέματος, λόγω της διάδοσης της ρηγμάτωσης. Επομένως, είναι κατάλληλο για αναλύσεις ΟΚΛ και ΟΚΑ που διέπονται σε μεγάλο βαθμό από τη ρηγμάτωση και τη σύνθλιψη του υλικού αντίστοιχα. Στην προσομοίωση του φαινομένου της ρηγμάτωσης σε φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω πεπερασμένων στοιχείων τα δύο πιο διαδεδομένα μοντέλα

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

είναι: το μοντέλο διακριτής ρηγμάτωσης (discrete crack model) και το μοντέλο κατανεμημένης ρηγμάτωσης (smeared crack model) [6].

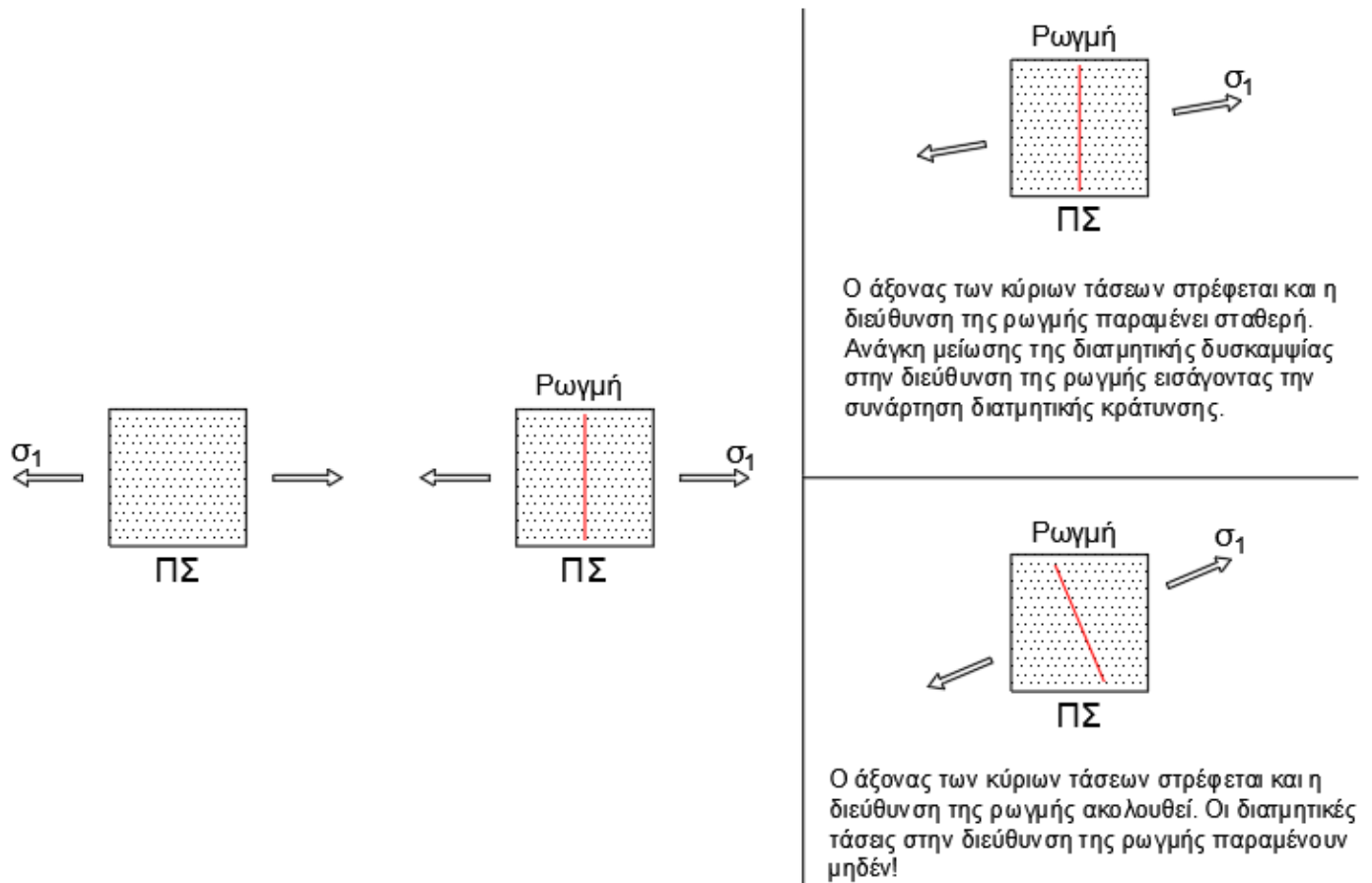
Στο μοντέλο της διακριτής ρηγμάτωσης η θέση όπου το υλικό θα ρηγματωθεί και θα αναπτυχθεί γεωμετρική ασυνέχεια πρέπει να είναι γνωστή πριν την ανάλυση, ώστε τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία να συνδεθούν χρησιμοποιώντας ειδικά στοιχεία διεπιφάνειας. Αν και το μοντέλο της διακριτής ρηγμάτωσης είναι πιο ρεαλιστικό, συνήθως δεν προτιμάται λόγω της απαίτησης προκαθορισμού των περιοχών που αναμένεται ρηγμάτωση και του πολύπλοκου πλέγματος ΠΣ που απαιτεί [6].



Εικόνα 18: Μοντέλο διακριτής ρηγμάτωσης (Chai Shun, 2020 [6]).

Στο μοντέλο κατανεμημένης ρηγμάτωσης γίνεται η θεώρηση πως το υλικό και κατ' επέκταση το πλέγμα των ΠΣ δεν ρηγματώνεται σε ορισμένες διακριτές θέσεις, αλλά οι ρωγμές κατανέμονται εντός των ΠΣ. Η επιρροή της ρηγμάτωσης σε κάθε ΠΣ εισάγεται ως μια ισοδύναμη παραμόρφωση στο αντίστοιχο διάνυσμα των παραμορφώσεων. Διακρίνονται δύο κατηγορίες μοντέλων κατανεμημένης ρηγμάτωσης ως προς τη γωνία των κύριων τάσεων. Τα μοντέλα σταθερής ρηγμάτωσης, όπου οι καταστατικές σχέσεις θεμελιώνονται στην παραδοχή ότι η διεύθυνση της ρωγμής είναι σταθερή ως προς τους άξονες των κύριων τάσεων και τα μοντέλα περιστρεφόμενης ρηγμάτωσης, όπου η γωνία των αξόνων των κύριων τάσεων ταυτίζεται με τη γωνία των αξόνων των κύριων παραμορφώσεων μετά τη ρηγμάτωση και η διεύθυνση της ρωγμής είναι συνεχώς κάθετη ως προς αυτούς. Άρα, στα μοντέλα περιστρεφόμενης ρηγμάτωσης οι διατμητικές τάσεις κατά τη διεύθυνση της ρωγμής παραμένουν μηδενικές, ενώ στα μοντέλα σταθερής ρηγμάτωσης πρέπει να εισαχθεί μία συνάρτηση διατμητικής κράτυσης (shear retention function) που περιγράφει την απομειωμένη ικανότητα μεταφοράς διατμητικών τάσεων στην διεύθυνση της ρωγμής ως ποσοστό της ελαστικής διατμητικής δυσκαμψίας [6].

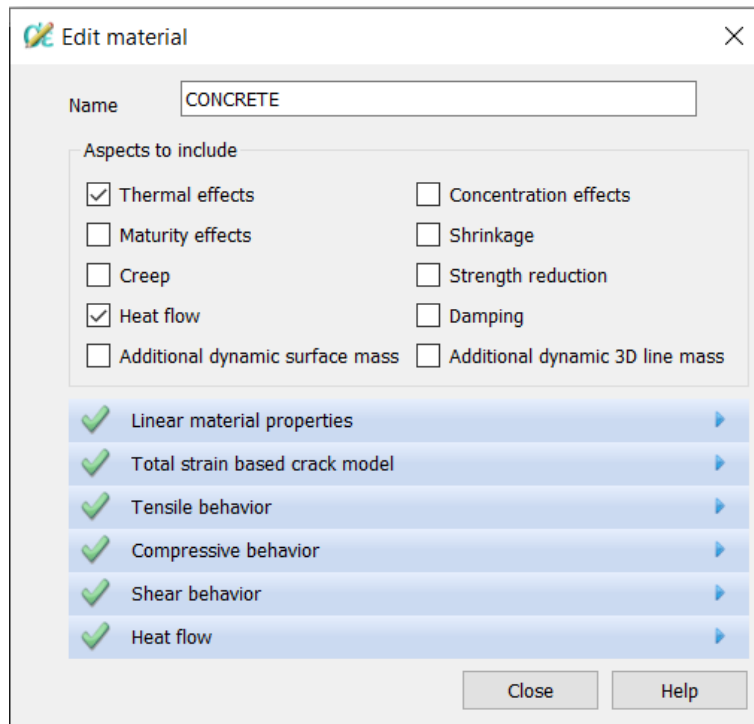
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Εικόνα 19: Μοντέλο κατανεμημένης ρηγματώσης (σταθερής και περιστρεφόμενης).

Το μοντέλο Total Strain Crack Model ανήκει στα μοντέλα κατανεμημένης ρηγματώσης και ορίζεται τόσο για σταθερή όσο και για περιστρεφόμενη ρηγματώση. Ειδικά για τη συζευγμένη θερμοκρασιακή και μηχανική ανάλυση συμπεριλαμβάνονται οι μεταβολές των ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας (Thermal effects) και οι θερμικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής (Heat flow).

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Εικόνα 20: Εισαγωγή ελαστοπλαστικού υλικού σκυροδέματος στο DIANA FEA.

Παραδοχές κατά την εισαγωγή του ελαστοπλαστικού υλικού του σκυροδέματος:

- ◆ Το μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C) υπολογίστηκε με βάση τον πίνακα 3.1 του EN 1992-1-1 (2004) [11] από τη σχέση: $E_{cm} \text{ (GPa)} = 22 \cdot (f_{cm} \text{ (MPa)} / 10)^{0.3}$, όπου $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$ για $f_{ck} = 34.80 \text{ MPa}$.
- ◆ Η διακύμανση της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αγνοείται.
- ◆ Η εφελκυστική αντοχή λαμβάνεται ως το 10% της θλιπτικής αντοχής. Η καμπύλη εφελκυστικών τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων έχει γραμμική μορφή έως την εφελκυστική αντοχή και μόλις η τάση γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή το διάγραμμα μηδενίζεται ψαθυρά.

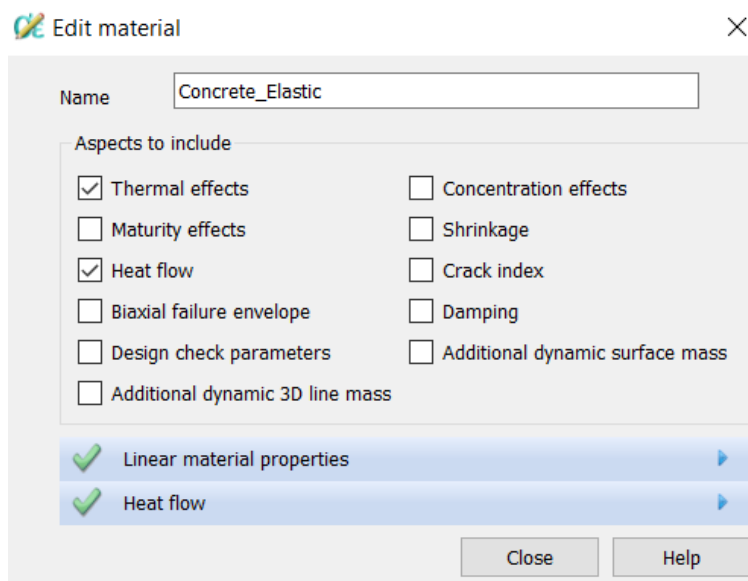
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Πίνακας 7: Ελαστοπλαστικό υλικό σκυροδέματος στο DIANA FEA.

Υλικό: Σκυρόδεμα	Μοντέλο στο DIANA FEA: Total Strain Crack Model
Ιδιότητες του υλικού (Linear material properties)	
Μέτρο ελαστικότητας (N/m ²)	3.403e+10
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με BS 8110
Λόγος Poisson	0.20
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με παρ. 4.4.1 Κεφ. 4
Πυκνότητα (kg/m ³)	2300
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σταθερή
Συντελεστής θερμικής διαστολής (°C ⁻¹)	9.0276e-06
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) (Πυριτικά αδρανή)
Total strain-based crack model	
Crack orientation	Περιστρεφόμενη (Rotating)
Συμπεριφορά σε εφέλκυσμό (Tensile behavior)	
Μορφή διαγράμματος σ-ε σε εφέλκυσμό	Brittle
Αντοχή σε εφέλκυσμό (N/m ²)	3.48e+06
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004)
Συμπεριφορά σε θλίψη (Compressive behavior)	
Μορφή διαγράμματος σ-ε σε θλίψη	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004)
Αντοχή σε θλίψη (N/m ²)	3.48e+07
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) (Πυριτικά αδρανή)
Ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση και μεταβολή της	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) (Πυριτικά αδρανή)
Ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας και μεταβολή της με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) (Πυριτικά αδρανή)
Θερμικές ιδιότητες του υλικού (Heat flow)	
Θερμική αγωγιμότητα	1.95141W/(m·°C)
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Mixed curve παρ. 4.1.5 Κεφ. 4
Θερμοχωρητικότητα	2.07e+06 J/(m ³ ·°C)
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) για 0% περιεχόμενη υγρασία κατά βάρος

6.4.1.β: Linear Elastic Isotropic

Το δεύτερο από τα μοντέλα που επιλέγονται για τη προσομοίωση του σκυροδέματος είναι το μοντέλο Linear Elastic Isotropic, το οποίο αποτελεί και το απλούστερο μοντέλο για το σκυροδέμα. Ειδικά για τη συζευγμένη θερμοκρασιακή και μηχανική ανάλυση συμπεριλαμβάνονται οι μεταβολές των ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας (Thermal effects) και οι θερμικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής (Heat flow).



Εικόνα 21: Εισαγωγή γραμμικά ελαστικού υλικού σκυροδέματος στο DIANA FEA.

Παραδοχές κατά την εισαγωγή του γραμμικά ελαστικού υλικού του σκυροδέματος:

- ◆ Το μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C) υπολογίστηκε με βάση τον πίνακα 3.1 του EN 1992-1-1 (2004) [11] από τη σχέση: $E_{cm} \text{ (GPa)} = 22 \cdot (f_{cm} \text{ (MPa)} / 10)^{0.3}$, όπου $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$ για $f_{ck} = 34.80 \text{ MPa}$.
- ◆ Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος παραμένει σταθερό έως τους 150 °C και ίσο με την τιμή του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C). Στους 200 °C ισούται με την τιμή της θλιπτικής αντοχής σε αυτή τη θερμοκρασία ($f_{c,\theta}$), σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 του EN 1992-1-2 (2004), διαιρούμενη με την αντίστοιχη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή ($\epsilon_{cu1,\theta}$). Ακολουθείται η ίδια λογική και για την τιμή του μέτρου ελαστικότητας στους 300 °C, 400 °C, 500 °C, ..., 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C. Μεταξύ αυτών των τιμών το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλεται γραμμικά.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

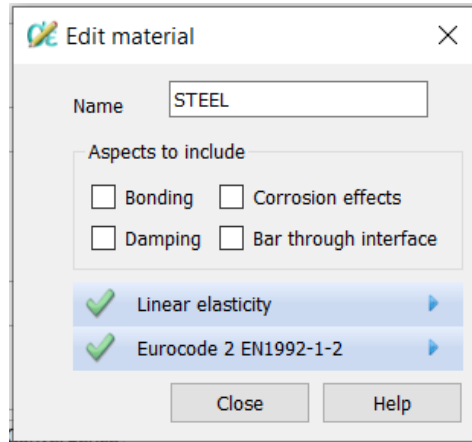
- ◆ Η διακύμανση της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αγνοείται.

Πίνακας 8: Γραμμικά ελαστικό υλικό σκυροδέματος στο DIANA FEA.

Υλικό: Σκυρόδεμα	Μοντέλο στο DIANA FEA: Linear Elastic Isotropic
Ιδιότητες του υλικού (Linear material properties)	
Μέτρο ελαστικότητας (N/m ²)	3.403e+10
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Περιγράφεται στις παραδοχές
Λόγος Poisson	0.20
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με παρ. 4.4.1 Κεφ. 4
Πυκνότητα (kg/m ³)	2300
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σταθερή
Συντελεστής θερμικής διαστολής (°C ⁻¹)	9.0276e-06
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) (Πυριτικά αδρανή)
Θερμικές ιδιότητες του υλικού (Heat flow)	
Θερμική αγωγιμότητα	1.95141W/(m·°C)
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Mixed curve παρ. 4.1.5 Κεφ. 4
Θερμοχωρητικότητα	2.07e+06 J/(m ³ ·°C)
Μεταβολή με τη θερμοκρασία	Σύμφωνα με EN 1992-1-2 (2004) για 3% περιεχόμενη υγρασία κατά βάρος

6.4.2: Χάλυβας οπλισμού

Για την προσομοίωση του χάλυβα οπλισμού επιλέχθηκε το μοντέλο του EN 1992-1-2 (2004) που διαθέτει το λογισμικό.



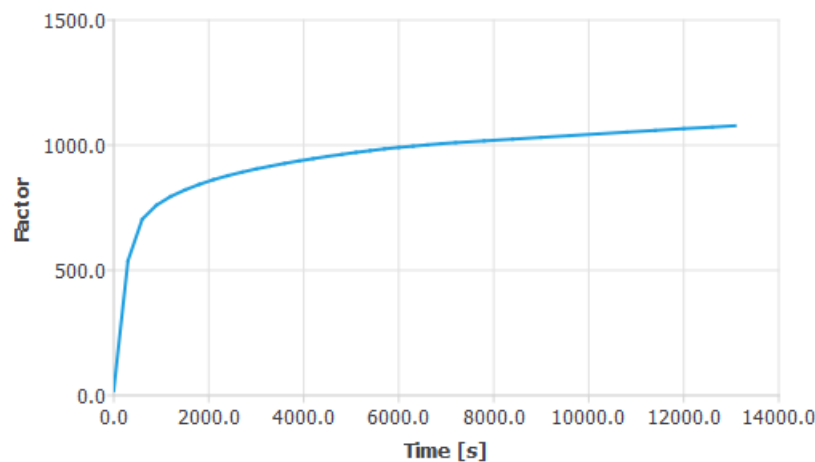
Εικόνα 22: Εισαγωγή υλικού χάλυβα στο DIANA FEA.

Παραδοχές κατά την εισαγωγή του υλικού του χάλυβα οπλισμού:

- ◆ Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με 200 GPa.
- ◆ Γίνεται η θεώρηση πως ο χάλυβας είναι θερμής έλασης (hot rolled) και οι μηχανικές ιδιότητες του μεταβάλλονται σύμφωνα με τον πίνακα 3.2.α, EN 1992-1-2 (2004).

6.5: Θερμοκρασιακή και μηχανική φόρτιση

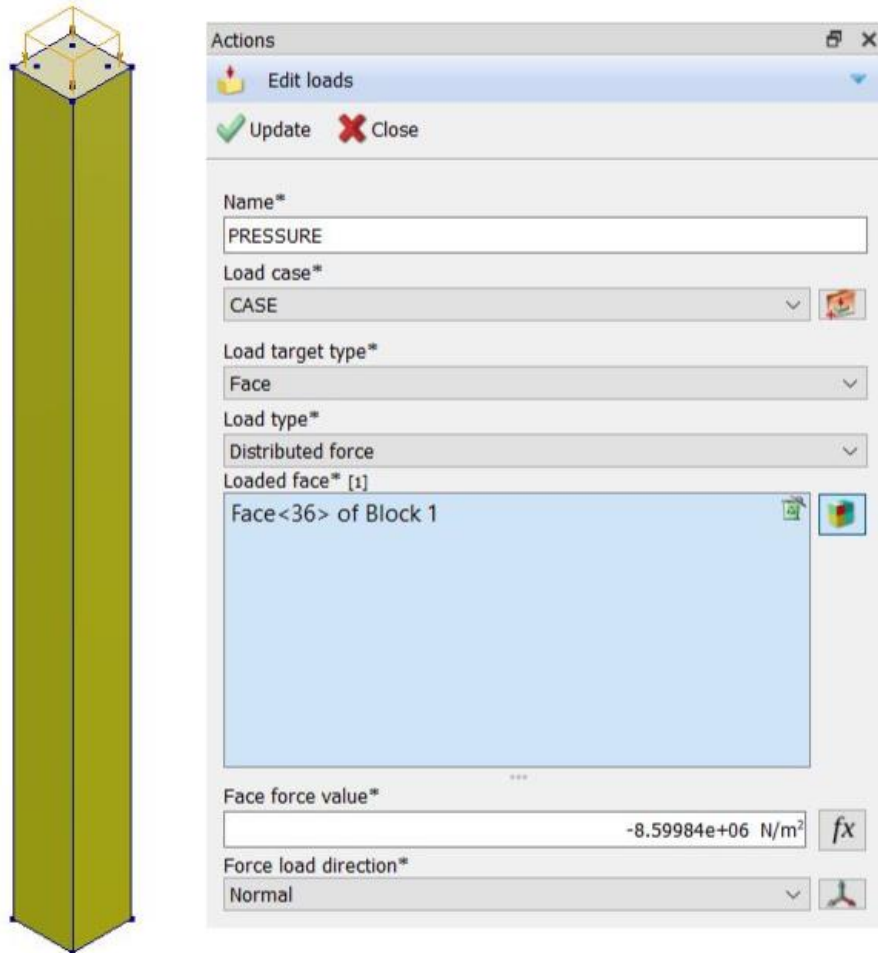
Το υποστύλωμα είναι εκτεθειμένο στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 [2] έως την αστοχία του, που συμβαίνει έπειτα από 218 λεπτά έκθεσης.



Σχήμα 22: Θερμοκρασιακή φόρτιση: η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 για διάρκεια 218 λεπτά.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τη μηχανική φόρτιση του υποστυλώματος συνθέτουν το ίδιο βάρος του και ένα εξωτερικό κεντρικό θλιπτικό φορτίο 800 kN που ασκείται στην κορυφή του, οι τιμές των οποίων παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της μηχανικής ανάλυσης.



Εικόνα 23: Εισαγωγή του θλιπτικού φορτίου των 800 kN στο DIANA FEA ως πίεση.

6.6: Συζευγμένη θερμοκρασιακή και μηχανική ανάλυση

Η συζευγμένη ανάλυση στην περίπτωση του υποστυλώματος που εξετάζεται, χαρακτηρίζεται ως μονόδρομη (one – directional coupling), δηλαδή η θερμοκρασιακή διάχυση στον όγκο του φορέα επηρεάζει τη μηχανική απόκριση του, ενώ η θερμική κατανομή εντός του φορέα παραμένει ανεπηρέαστη από τις παραμορφώσεις λόγω μηχανικής φόρτισης. Η ανάλυση που οδηγεί στην επίλυση συζευγμένων προβλημάτων μονόδρομης αλληλεπίδρασης καλείται ως Staggered Flow – Stress Analysis. Η ακολουθούμενη διαδικασία είναι η εξής [9]:

- Αρχικά εκτελείται η θερμοκρασιακή ανάλυση σε διακριτά χρονικά βήματα για όλη τη διάρκεια της έκθεσης σε πυρκαγιά και υπολογίζεται η θερμοκρασιακή διάχυση στον όγκο του υποστυλώματος.
- Εν συνεχεία η θερμοκρασιακή διάχυση δρα ως εξωτερική φόρτιση (εξωτερικώς επιβαλλόμενη παραμόρφωση) στη μηχανική ανάλυση που ακολουθεί.

Επομένως, η σύζευξη της θερμοκρασιακής και της μηχανικής ανάλυσης γίνεται εν σειρά και το DIANA μετατρέπει αυτοματοποιημένα το μοντέλο θερμοκρασιακής ανάλυσης σε μοντέλο μηχανικής ανάλυσης.

Στο DIANA το μοντέλο για Staggered Flow – Stress Analysis περιλαμβάνει ουσιαστικά δύο κατηγορίες οντοτήτων. Οντότητες για τη θερμοκρασιακή ανάλυση και οντότητες για τη μηχανική ανάλυση. Συνήθως, ένα σημαντικό ποσοστό οντοτήτων ανήκει και στις δύο κατηγορίες, όπως και το υπό μελέτη υποστύλωμα. Για να είναι δυνατή η αυτόματη μετατροπή του μοντέλου θερμοκρασιακής ανάλυσης σε μοντέλο μηχανικής ανάλυσης, πρέπει τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη μηχανική ανάλυση να μπορούν να μετατραπούν σε στοιχεία θερμοκρασιακής ανάλυσης σύμφωνα με τον πίνακα 66.2 “ELEMENTS FOR STAGGERED FLOW – STRESS ANALYSIS” του DIANA FEA User’s Manual – Release 10.6 (2022).

Πίνακας 9: ΠΣ μηχανικής ανάλυσης και τα αντίστοιχα ΠΣ ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας, στα οποία μετατρέπονται (DIANA FEA User’s Manual – Release 10.6, 2022 [9]).

Table 66.2: ELEMENTS FOR STAGGERED FLOW-STRESS ANALYSIS

Flow-stress domain	Conversion to flow analysis			
	heat	concen.	groundwater	
solid	TE12L	TE4HT	TE4HT	TE4GW
	PY15L	PY5HT	PY5HT	PY5GW
	TP18L	TP6HT	TP6HT	TP6GW
	HX24L	HX8HT	HX8HT	HX8GW
	CTE30	TE4HT	TE4HT	TE4GW
	CPY39	PY5HT	PY5HT	PY5GW
	CTP45	TP6HT	TP6HT	TP6GW
	CHX60	HX8HT	HX8HT	HX8GW
	CHX64	HX8HT	HX8HT	HX8GW

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Σύμφωνα με τον πίνακα παρατηρείται ότι το ΠΣ CHX60 ανώτερης τάξης, με δευτεροβάθμιες συναρτήσεις παρεμβολής, που χρησιμοποιείται στη μηχανική ανάλυση μετατρέπεται στο ΠΣ HX8HT γραμμικής τάξης, με γραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής, που χρησιμοποιείται στη θερμοκρασιακή ανάλυση. Ως εκ τούτου στην ανάλυση μεταφοράς θερμότητας οι ενδιάμεσοι κόμβοι των ΠΣ που χρησιμοποιούνται στη μηχανική ανάλυση είναι επουσιώδεις.

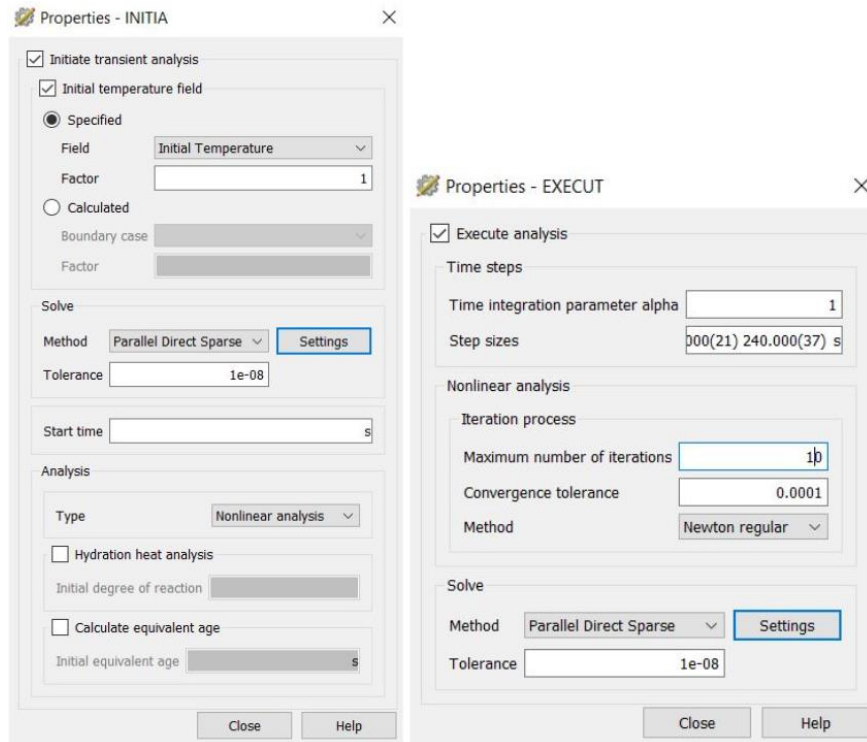
6.6.1: Θερμοκρασιακή ανάλυση

Η έκθεση του υποστυλώματος στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 συνεπάγεται μια χρονικά μεταβαλλόμενη μεταφορά θερμότητας στον όγκο του. Άρα, για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο του υποστυλώματος εκτελείται ανάλυση μεταφοράς θερμότητας μη – μόνιμης κατάστασης (Transient Heat Transfer).

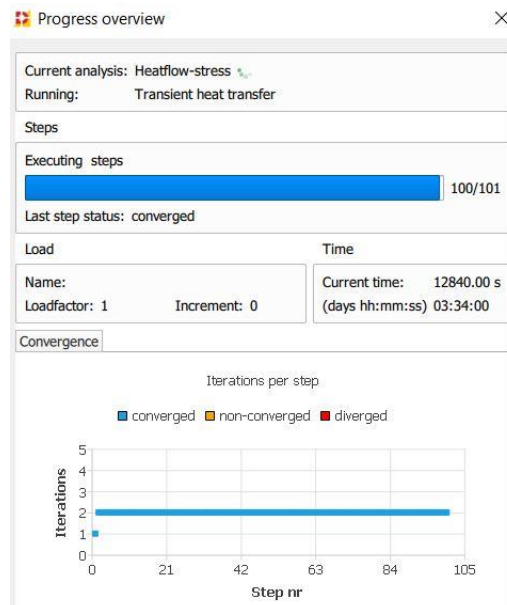
Η διάρκεια έκθεσης του υποστυλώματος (218 min) διακριτοποιείται σε πεπερασμένα χρονικά βήματα. Αρχικά, υπάρχουν 30 βήματα των 30 δευτερολέπτων (900 sec = 15 min), ακολουθούμενα από 13 βήματα των 60 δευτερολέπτων (780 sec = 13 min), ακολουθούμενα από 21 βήματα των 120 δευτερολέπτων (2520 sec = 42 min) και τέλος 37 βήματα των 240 δευτερολέπτων (8880 sec = 148 min). Η πύκνωση των βημάτων στα πρώτα 15 λεπτά της έκθεσης στην ASTM E 119 στοχεύει στην ακριβή καταγραφή της θερμοκρασιακής διάχυσης στον όγκο του υποστυλώματος, καθώς ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την υπόλοιπη διάρκεια έκθεσης.

Η ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, μη – μόνιμης κατάστασης, είναι μη – γραμμική (Transient Heat Transfer non linear) καθώς τόσο η θερμική αγωγιμότητα όσο και η θερμοχωρητικότητα του σκυροδέματος μεταβάλλονται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Επίσης, επιλέγεται η επίλυση με την επαναληπτική μέθοδο σύγκλισης Newton – Raphson (πλήρης - regular), όπου ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για κάθε βήμα ορίζεται στα 10 και η ανοχή για την επίτευξη σύγκλισης ορίζεται ως 0.0001.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Εικόνα 24: Εισαγωγή παραμέτρων της μη – γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη -μόνιμης κατάστασης στο DIANA FEA.

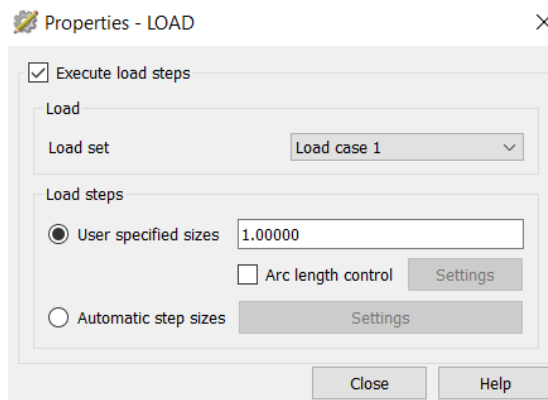


Εικόνα 25: Εξέλιξη σύγκλισης της επίλυσης της μη – γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη -μόνιμης κατάστασης στο DIANA FEA.

6.6.2: Μηχανική ανάλυση

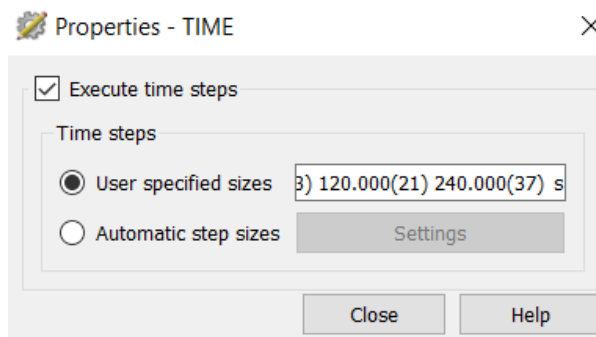
Με την ολοκλήρωση της θερμοκρασιακής ανάλυσης και έχοντας ως δεδομένο τη θερμοκρασιακή διάχυση στον φορέα και κατά επέκταση τις αναπτυσσόμενες θερμικές δράσεις για τα χρονικά βήματα που ορίστηκαν, ακολουθεί διαδοχικά η μηχανική ανάλυση του φορέα για τον προσδιορισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων του. Η μέθοδος ανάλυσης που επιλέγεται είναι η μη – γραμμική (Structural non – linear), αφού υπάρχει έντονη μη – γραμμικότητα υλικού και χαρακτηρίζεται ως δυναμική διότι οι θερμικές δράσεις μεταβάλλονται χρονικά.

Επομένως, αρχικά πραγματοποιήθηκε Load – Step ανάλυση όπου εφαρμόστηκαν στο υποστύλωμα τα φορτία που δεν μεταβάλλονται χρονικά, ήτοι το ίδιο βάρος του και το θλιπτικό φορτίο των 800kN, σε ένα βήμα. Συνεπώς, η μηχανική ανάλυση εκτελείται σε 102 βήματα, όπου στο πρώτο βήμα, που είναι ανεξάρτητο του χρόνου, εφαρμόζεται η σταθερή χρονικά φόρτιση και στα υπόλοιπα 101 χρονικά βήματα, όσα και στη θερμοκρασιακή ανάλυση, επιλύεται το υποστύλωμα για τον συνδυασμό της σταθερής φόρτισης και των μεταβαλλόμενων χρονικά θερμικών δράσεων.



Εικόνα 26: Παράθυρο Load – Step ανάλυσης.

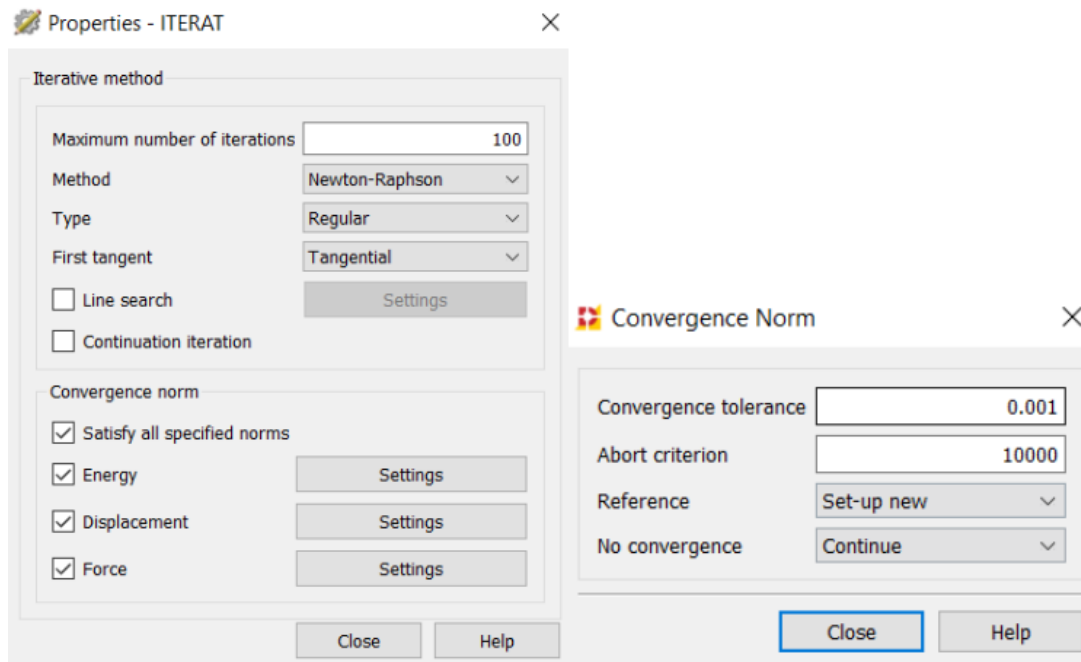
Στη συνέχεια, εκτελείται Time – Step ανάλυση όπου εφαρμόζονται στο υποστύλωμα οι θερμικές δράσεις με βάση τον χρόνο. Τα πεπερασμένα χρονικά βήματα που επιλέγονται ταυτίζονται με αυτά της θερμοκρασιακής ανάλυσης.



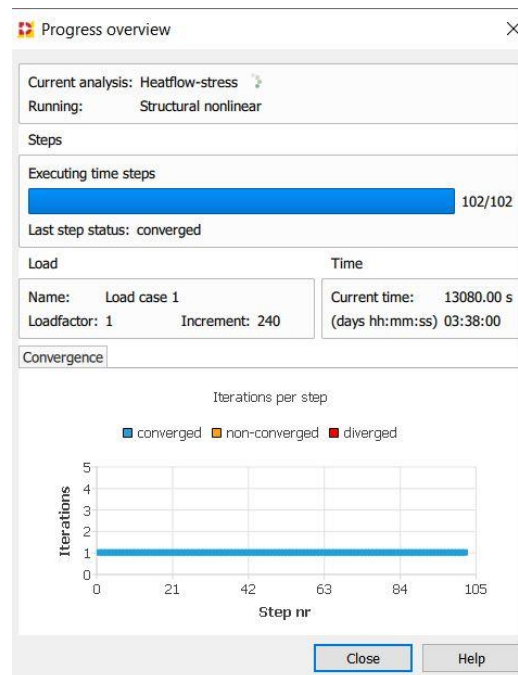
Εικόνα 27: Παράθυρο Time – Step ανάλυσης.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η επαναληπτική μέθοδος σύγκλισης που επιλέγεται είναι η Newton – Raphson (πλήρης - regular), με 100 επαναλήψεις για κάθε βήμα. Τα κριτήρια σύγκλισης που χρησιμοποιούνται είναι της ενέργειας, των μετακινήσεων και των δυνάμεων, με ακρίβεια 0.001. Ακόμα, για την επίτευξη ακριβέστερης λύσης σε κάθε βήμα πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα και τα τρία κριτήρια σύγκλισης.



Εικόνα 28: Εισαγωγή της μεθόδου και των κριτηρίων σύγκλισης στο DIANA FEA.



Εικόνα 29: Εξέλιξη σύγκλισης της επίλυσης της μη – γραμμικής μηχανικής ανάλυσης.

7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα συγκεντρώνονται, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης του υποστυλώματος για την οποία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DIANA FEA και αναλύθηκε επαρκώς και με σαφήνεια στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Επίσης, η εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της διατομής του υποστυλώματος και η αξονική παραμόρφωσή του συναρτήσει του χρόνου συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Στην τελευταία παράγραφο του Κεφαλαίου αποτυπώνονται τα προκύπτοντα συμπεράσματα από τη μελέτη της έκθεσης στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119 του υποστυλώματος και παρατίθενται προτάσεις για επέκταση της έρευνας στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

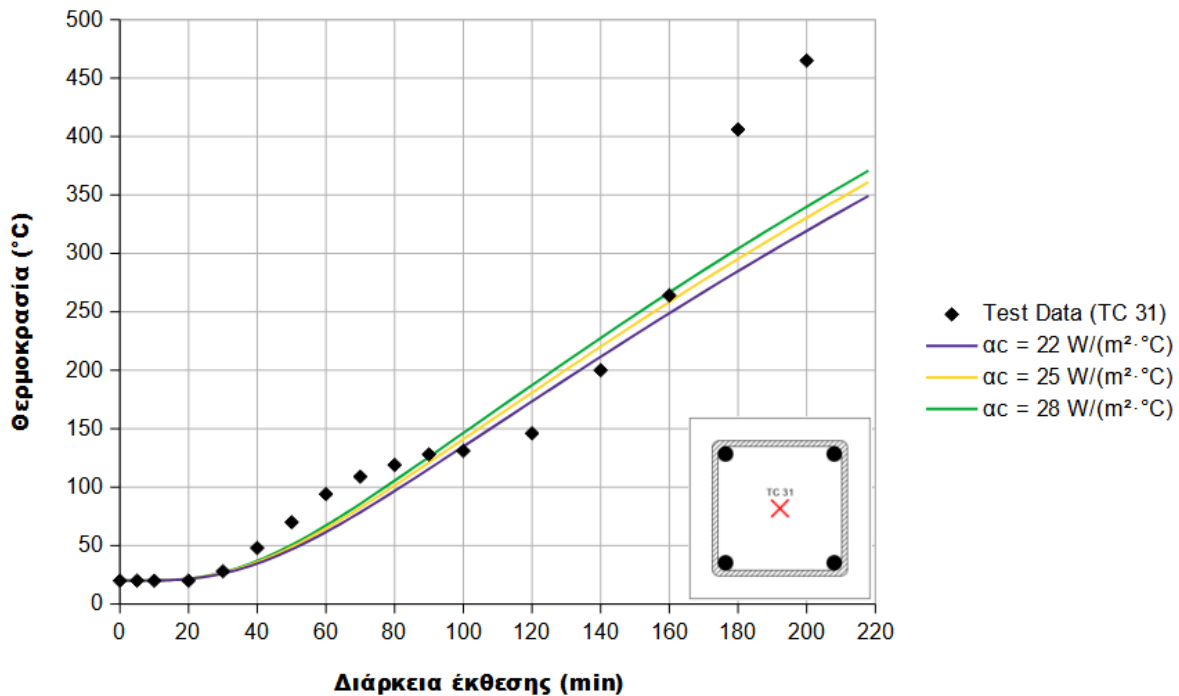
7.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμοκρασιακής ανάλυσης

Η εκτέλεση της θερμοκρασιακής ανάλυσης πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο του όγκου του υποστυλώματος και για τον υπολογισμό της εξέλιξής της συναρτήσει του χρόνου. Το πεδίο των θερμοκρασιών καθορίζει τις θερμικές ιδιότητες των υλικών για κάθε χρονικό βήμα της θερμοκρασιακής ανάλυσης καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες τους και τις θερμικές δράσεις που ασκούνται στον όγκο του υποστυλώματος σε κάθε χρονικό βήμα της μηχανικής ανάλυσης. Ως εκ τούτου, ο ακριβής υπολογισμός του πεδίου θερμοκρασιών είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αξιοπιστία της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης.

Για τον προσδιορισμό του πεδίου θερμοκρασιών οι ερευνητές τοποθέτησαν μία πληθώρα θερμοστοιχείων (θερμοηλεκτρικών θερμομέτρων – thermocouples) χρωμίου - αλουμινίου (chromel - alumel) σε διάφορα σημεία, συμπεριλαμβανομένων και των ράβδων οπλισμού, συγκεκριμένων διατομών του υποστυλώματος [19]. Άρα, ο έλεγχος της θερμοκρασιακής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο DIANA FEA, γίνεται συγκρίνοντας τη θερμοκρασιακή συνάρτηση που υπολογίστηκε στις συντεταγμένες τριών θερμοστοιχείων με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Τα τρία θερμοστοιχεία βρίσκονται στη μεσαία διατομή του υποστυλώματος, δηλαδή ισχύει $z = 1.90$ m και η θέση τους στη διατομή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

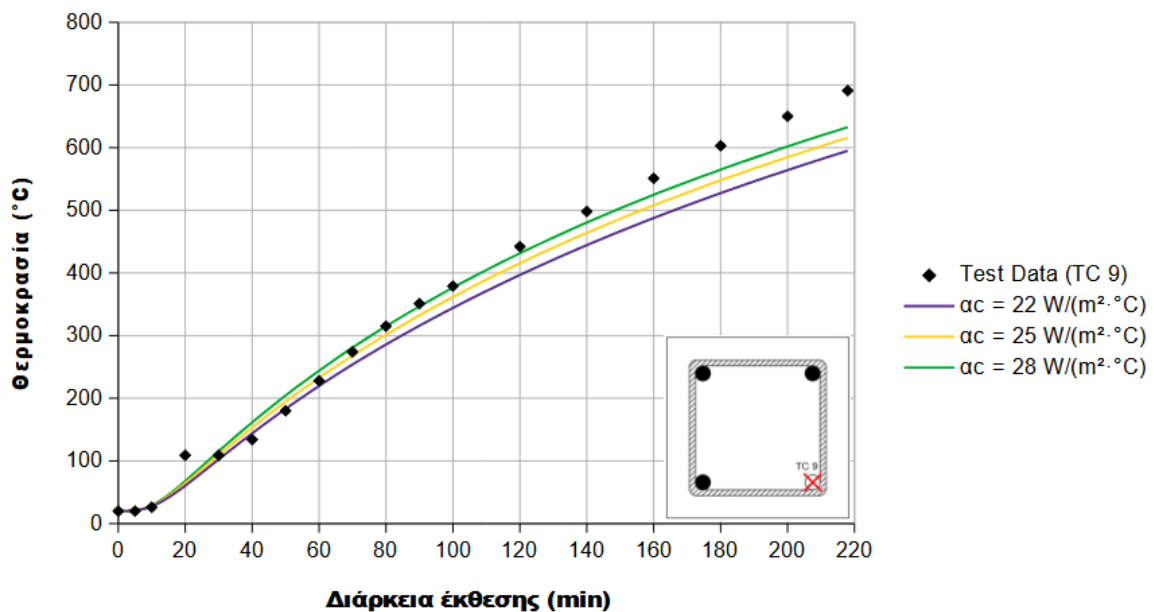
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Εξέλιξη της θερμοκρασίας συναρτήσει της διάρκειας έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 31 (κέντρο διατομής):



Σχήμα 23: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 31.

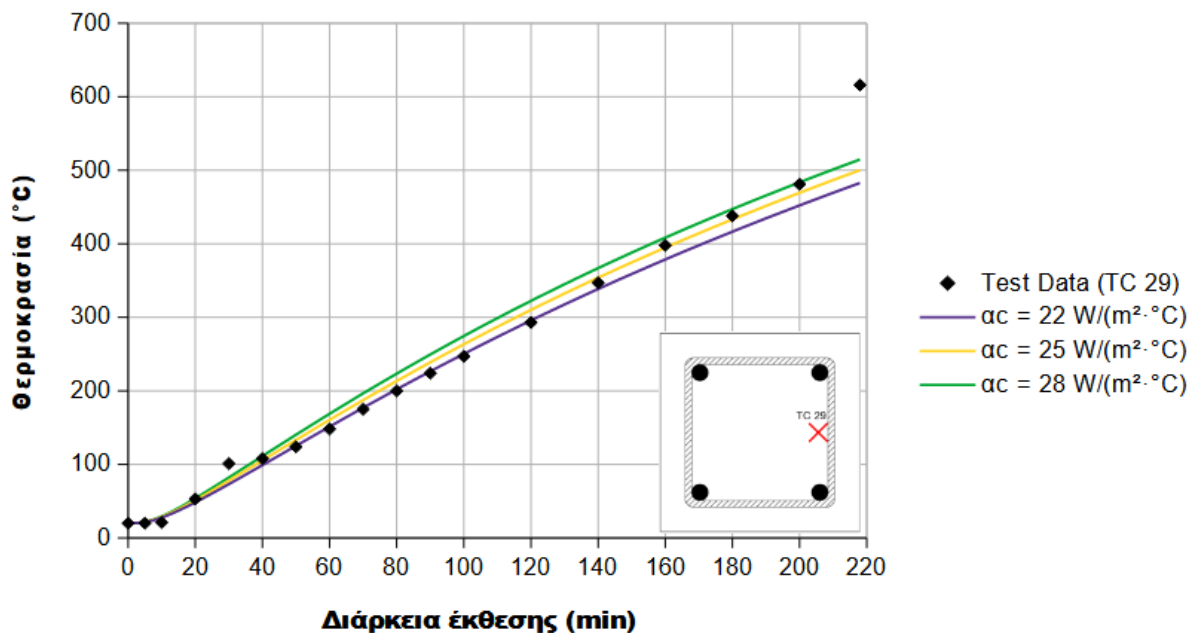
Εξέλιξη της θερμοκρασίας συναρτήσει της διάρκειας έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 9 (διαμήκης ράβδος οπλισμού):



Σχήμα 24: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 9.

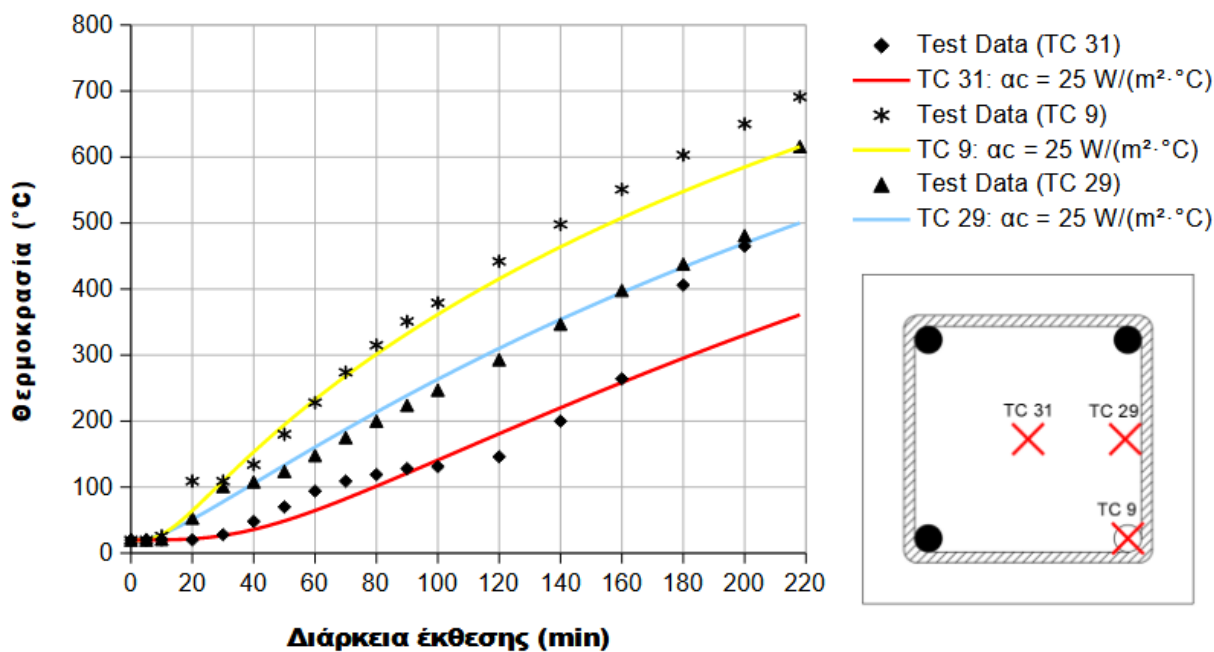
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Εξέλιξη της θερμοκρασίας συναρτήσει της διάρκειας έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 29:



Σχήμα 25: Συνάρτηση της θερμοκρασίας ως προς τη διάρκεια έκθεσης για το θερμοστοιχείο TC 29.

Συγκεντρωτική εξέλιξη των θερμοκρασιών συναρτήσει της διάρκειας έκθεσης των τριών θερμοστοιχείων θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$:



Σχήμα 26: Συναρτήσεις των θερμοκρασιών ως προς τη διάρκεια έκθεσης των τριών θερμοστοιχείων θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η σύγκριση ανάμεσα στα στοιχεία που παρουσιάστηκαν δείχνει ότι τα αποτελέσματα της μη – γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη – μόνιμης κατάστασης, που εκτελέστηκε στο DIANA FEA, προσεγγίζουν ικανοποιητικά σε γενικές γραμμές τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και στα τρία θερμοστοιχεία καθ' όλη τη διάρκεια έκθεσης στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119. Μικροδιαφορές που εντοπίζονται καθ' όλη τη διάρκεια έκθεσης στο θερμοστοιχείο TC 31 και ύστερα από δύο ώρες έκθεσης στο θερμοστοιχείο TC 9, μπορούν να αποδοθούν σε έναν συνδυασμό σφαλμάτων ακρίβειας των πειραματικών μετρήσεων και αβεβαιοτήτων της μοντελοποίησης. Δύο σημαντικές αβεβαιότητες – παραδοχές κατά το στάδιο της μοντελοποίησης αποτελούν οι εξής:

- Επιλογή σταθερής τιμής ποσοστού υγρασίας κατά βάρος 0 %, για όλο τον όγκο του υποστυλώματος. Στην πραγματικότητα το ποσοστό υγρασίας κατά βάρος είναι πιθανών μη – μηδενικό στα εσωτερικά σημεία επηρεάζοντας τη θερμοχωρητικότητά τους.
- Δεν λαμβάνεται υπόψη στο υπολογιστικό προσομοίωμα του υποστυλώματος η ρηγμάτωση. Οι ρωγμές που δύναται να αναπτυχθούν στο σκυρόδεμα επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας, ακόμα και για εύρη ρωγμών μικρότερα από αυτά που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του, επιταχύνοντας την άνοδο της θερμοκρασίας στον όγκο του.

Οι τιμές των θερμοκρασιών στα τρία θερμοστοιχεία ακολουθούν την αναμενόμενη συμπεριφορά, με υψηλότερες θερμοκρασίες στο θερμοστοιχείο TC 9, που βρίσκεται εγγύτερα στην εκτεθειμένη περίμετρο και χαμηλότερες θερμοκρασίες στο θερμοστοιχείο TC 31, που βρίσκεται στο κέντρο της διατομής.

Επιπλέον, από το παρακάτω σχήμα στο οποίο παρουσιάζεται η θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα που σχηματίζουν τα σημεία [0.0,0.1525,1.9] & [0.305,0.1525,1.9], για διάφορα χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια της έκθεσης εξάγονται δύο σημαντικά συμπεράσματα:

- Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος και της μεγάλης τιμής που λαμβάνει ο αδιάστατος αριθμός Biot για τη διατομή του υποστυλώματος, ενδεικτικά:

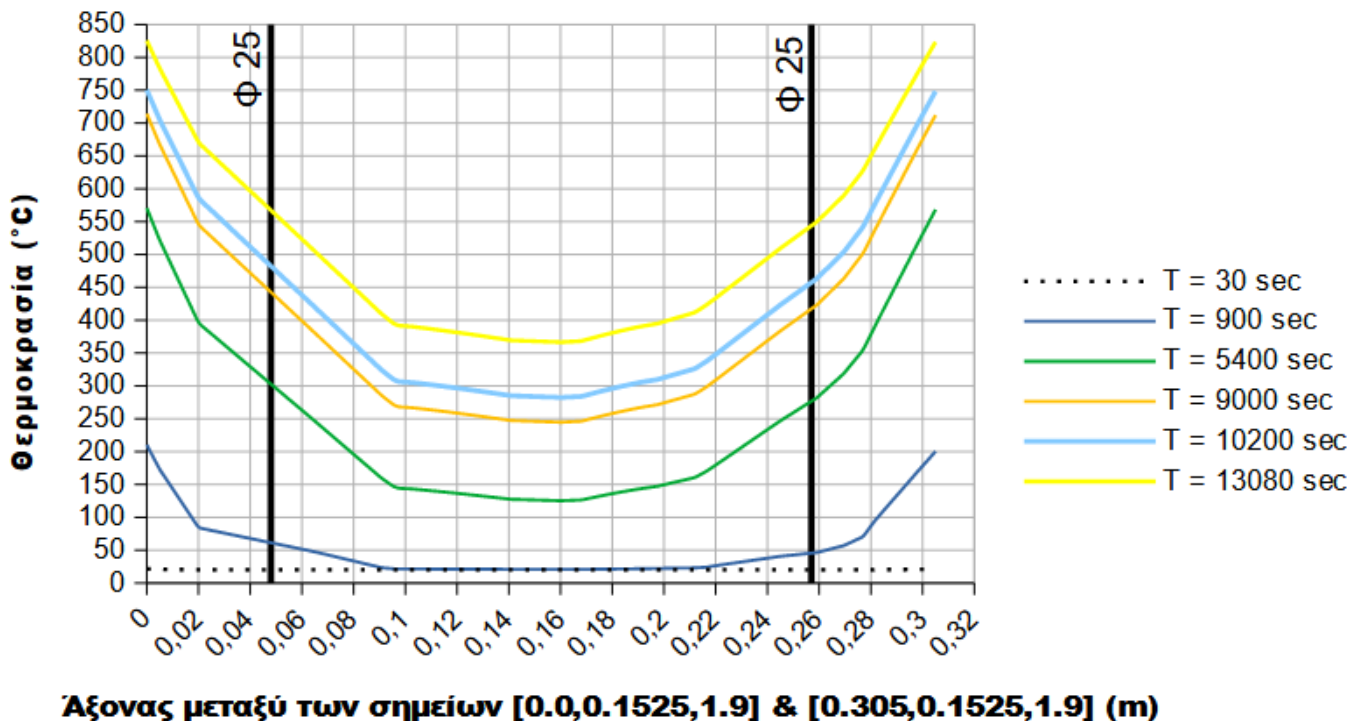
$$Bi = \frac{\frac{A(m^2)}{\lambda(W/m \cdot ^\circ C)}}{\frac{P_{exp}(m)}{\alpha_c(W/m^2 \cdot ^\circ C)}} = \frac{0,305^2(m^2)}{\frac{1,6(W/m \cdot ^\circ C)}{4 \cdot 0,305(m)}} = 1,19 > 1$$

παρατηρείται έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση. Δηλαδή, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα για τη χρονική στιγμή των 150 λεπτών (9000 sec) το σημείο του άξονα που απέχει όσο η επικάλυψη του διαμήκους οπλισμού (48 mm) από την εκτεθειμένη επιφάνεια αναπτύσσει θερμοκρασία περί τους 450 °C με 500 °C, ενώ το σημείο που ανήκει στην εκτεθειμένη στην πυρκαγιά επιφάνεια αναπτύσσει θερμοκρασία περί τους 710 °C. Η διατήρηση των εσώτερων στρωμάτων και των οπλισμών των φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία και άρα σε σημαντικά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα επιφανειακά στρώματα, έχει ως αποτέλεσμα να αντέχουν την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίας,

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

με ελάχιστες δυνατές παραμορφώσεις, για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αντίθεση με τα φέροντα στοιχεία από δομικό χάλυβα χωρίς ειδική προστασία.

- Η επαρκής επικάλυψη των οπλισμών έχει θεμελιώδη συνεισφορά στην αντοχή έναντι πυρκαγιάς του φέροντος στοιχείου, διότι συμβάλλει καθοριστικά στη διατήρηση της θερμοκρασίας τους κάτω από την κρίσιμη τιμή των 600 °C για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χάλυβας σύμφωνα με τον πίνακα 3.2.a του EN 1992-1-2 (2004) [12] όταν η θερμοκρασία του φτάσει τους 600 °C χάνει πάνω από το 50 % της αντοχής του.



Σχήμα 27: Θερμοκρασιακό προφίλ κατά μήκος του άξονα μεταξύ των σημείων [0.0,0.1525,1.9] & [0.305,0.1525,1.9] για διάφορα χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε θεώρησης συντελεστή συναγωγής $\alpha_s = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$.

7.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μηχανικής ανάλυσης

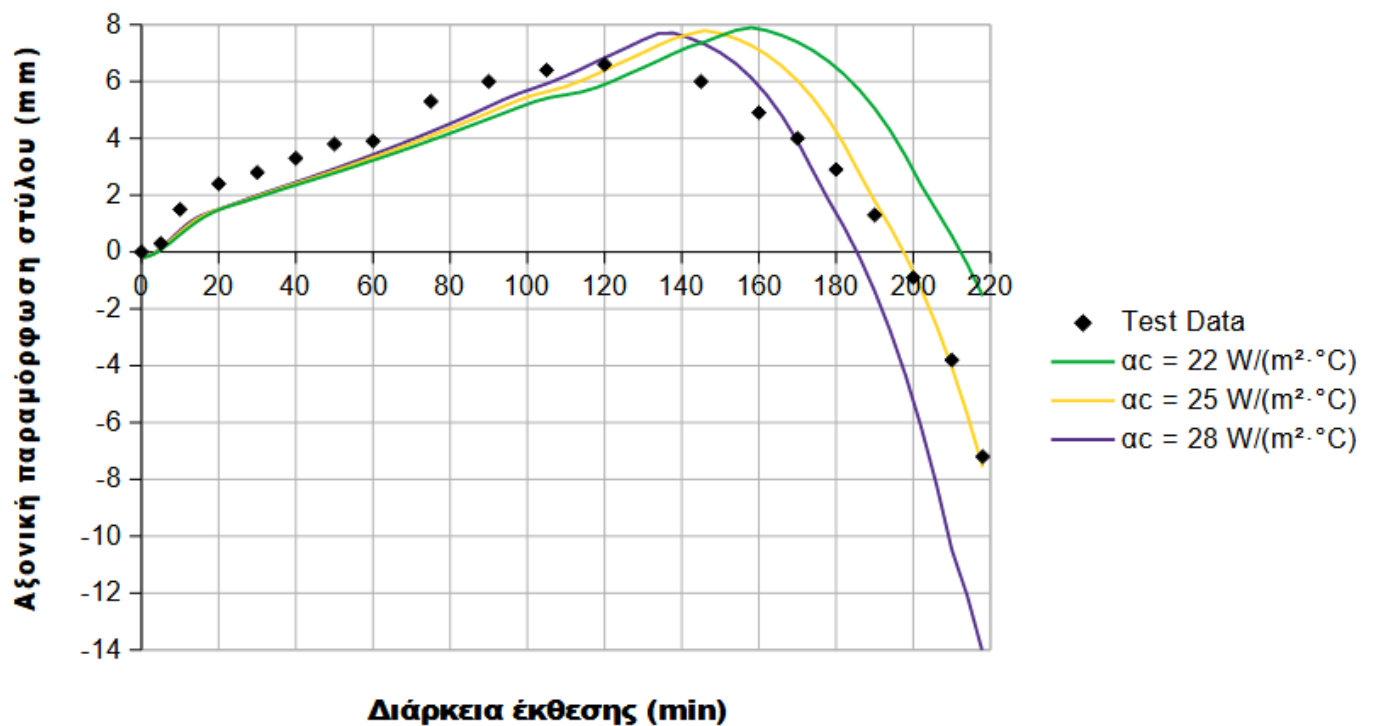
Κατά τη διάρκεια έκθεσης του υποστυλώματος στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας αερίων – χρόνου ASTM E 119, οι ερευνητές κατέγραψαν την χρονοεξαρτώμενη αξονική παραμόρφωση του [19]. Συνεπώς, ο έλεγχος της μηχανικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο DIANA FEA, έπειτα από τη θερμοκρασιακή ανάλυση, γίνεται συγκρίνοντας την αξονική παραμόρφωση που υπολογίστηκε με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Στο λογισμικό πραγματοποιήθηκαν δύο συζευγμένες θερμοκρασιακές και μηχανικές αναλύσεις, διότι χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα, ένα ελαστοπλαστικό και ένα ελαστικό έχοντας τις ίδιες θερμικές ιδιότητες, για τη προσομοίωση των καταστατικών σχέσεων

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

του σκυροδέματος (περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο προηγούμενο Κεφάλαιο, όπου τα δύο χρησιμοποιούμενα μοντέλα σκυροδέματος επεξηγούνται αναλυτικά).

Το ελαστοπλαστικό μοντέλο Total Strain Based Crack Model για το σκυρόδεμα εμφάνισε σοβαρά προβλήματα σύγκλισης, με αποτέλεσμα να μην ολοκληρωθεί η δυναμική μη – γραμμική ανάλυση. Αυτό οφείλεται ενδεχομένως στην έντονα μη – γραμμική συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου, λόγω της προοδευτικής υποβάθμισης της αντοχής του (softening behaviour) που συμβαίνει με τη διάδοση της ρηγμάτωσης [9]. Όταν συνδυάζεται με έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες ενισχύεται η ήδη έντονη μη – γραμμική συμπεριφορά του, οδηγώντας σε δυσκολίες σύγκλισης για την εύρεση λύσης.

Η αξονική παραμόρφωση του υποστυλώματος που υπολογίστηκε για το ελαστικό μοντέλο Linear Elastic Isotropic του σκυροδέματος σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



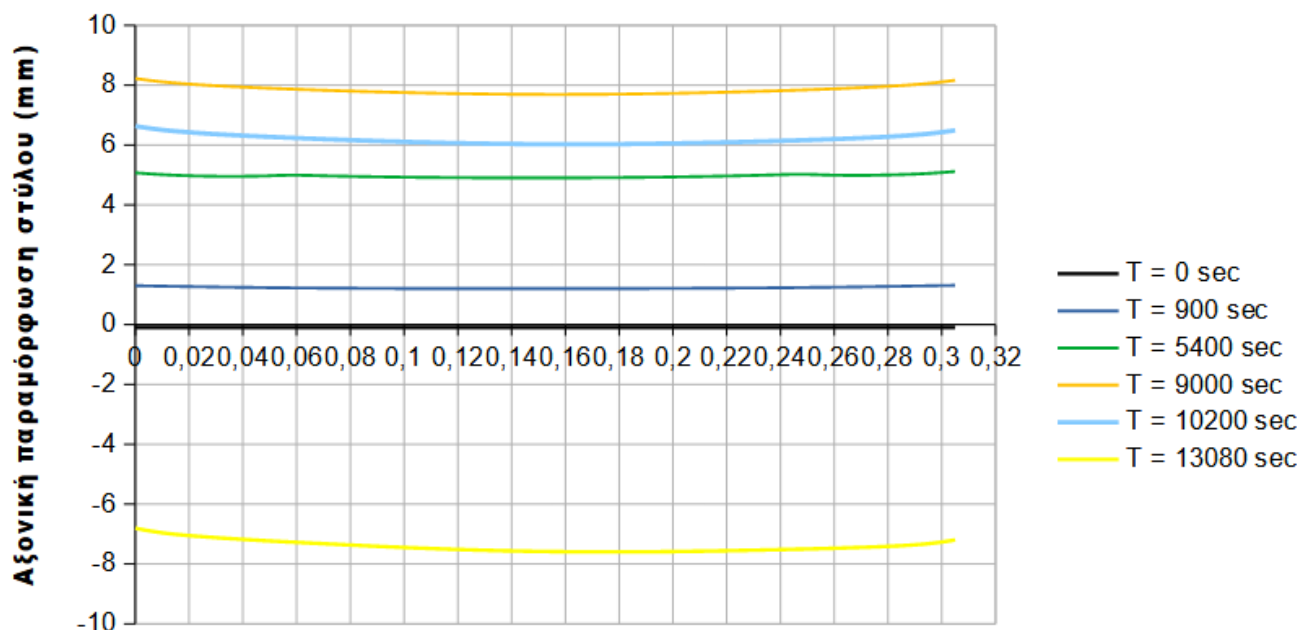
Σχήμα 28: Χρονοεξαρτώμενη αξονική παραμόρφωση του υποστυλώματος.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Συγκρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα με τις καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης που υπολογίστηκαν στο DIANA FEA, παρατηρείται ότι στα πρώτα 110 λεπτά της έκθεσης οι υπολογιζόμενες θετικές αξονικές παραμορφώσεις είναι λίγο μικρότερες από τις μετρούμενες. Για το ίδιο χρονικό διάστημα οι τρεις καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε συντελεστές συναγωγής ίσους με $\alpha_c = 22 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ και $\alpha_c = 28 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ σχεδόν ταυτίζονται. Βάσει των πειραματικών μετρήσεων το υποστυλωμα μήκνεται για τα πρώτα 120 λεπτά της έκθεσης με μέγιστη τιμή μήκνωσης ίση με 6.60 mm. Η καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 22 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, εμφανίζει αυξανόμενη θετική αξονική παραμόρφωση (μήκνωση) για τα πρώτα 158 λεπτά έκθεσης με μέγιστη τιμή μήκνωσης ίση με 7.89 mm. Η καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, εμφανίζει αυξανόμενη θετική αξονική παραμόρφωση (μήκνωση) για τα πρώτα 146 λεπτά έκθεσης με μέγιστη τιμή μήκνωσης ίση με 7.79 mm. Η καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 28 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, εμφανίζει αυξανόμενη θετική αξονική παραμόρφωση (μήκνωση) για τα πρώτα 138 λεπτά έκθεσης με μέγιστη τιμή μήκνωσης ίση με 7.70 mm. Εν συνεχεία, η αξονική παραμόρφωση του υποστυλώματος αρχίζει να μειώνεται. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η βράχυνση του υποστυλώματος ξεκινά έπειτα από 195 λεπτά έκθεσης και τη στιγμή της αστοχίας του, η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης ισούται με -7.20 mm. Στην καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 22 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, η βράχυνση ξεκινά μετά από 210 λεπτά έκθεσης και τη στιγμή της αστοχίας ισούται με -2.54 mm. Στην καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, η βράχυνση ξεκινά μετά από 196 λεπτά έκθεσης και τη στιγμή της αστοχίας ισούται με -7.57 mm. Στην καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 28 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$, η βράχυνση ξεκινά μετά από 186 λεπτά έκθεσης και τη στιγμή της αστοχίας ισούται με -13.92 mm.

Ακόμα, από τη μελέτη του παραπάνω σχήματος συμπεραίνεται ότι η αξονική παραμόρφωση του εκτεθειμένου σε υψηλές θερμοκρασίες υποστυλώματος αυξάνεται στα αρχικά στάδια της έκθεσης. Η διατήρηση σημαντικού μέρους της ακαμψίας και της αντοχής του καθώς και η αυξανόμενη με τη θερμοκρασία θερμική διαστολή τόσο του σκυροδέματος όσο και του χάλυβα οπλισμού αποτελούν τις αιτίες αυτής της συμπεριφοράς. Ωστόσο, όσο η διάρκεια έκθεσης αυξάνεται η ακαμψία και η αντοχή του φέροντος στοιχείου μειώνονται σε μεγάλο βαθμό, οδηγώντας σε μείωση της μήκνωσης σε προχωρημένα στάδια έκθεσης και εμφάνιση βράχυνσης στα τελευταία στάδια.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ



Άξονας μεταξύ των σημείων [0.0,0.1525,3.8] & [0.305,0.1525,3.8] (m)

Σχήμα 29: Αξονική παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα μεταξύ των σημείων [0.0,0.1525,3.8] & [0.305,0.1525,3.8] για διάφορα χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια της έκθεσης θεωρώντας συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$.

7.3: Συμπεράσματα και προτάσεις για επέκταση της μελέτης

Από τις συζευγμένες αναλύσεις του υποστυλώματος που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DIANA FEA προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα τόσο της μη - γραμμικής ανάλυσης μεταφοράς θερμότητας μη - μόνιμης κατάστασης όσο και της δυναμικής μη - γραμμικής μηχανικής ανάλυσης προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, καθιστώντας το DIANA FEA ένα αξιόπιστο εργαλείο για την εκτέλεση συζευγμένων θερμοκρασιακών και μηχανικών αναλύσεων στις περιπτώσεις όπου αγνοείται η επιρροή του φαινομένου της εκρηκτικής αποφλοίσωσης του σκυροδέματος.
- Για τον συντελεστή συναγωγής $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ επιτυγχάνεται η ακριβέστερη συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα της συζευγμένης θερμοκρασιακής και μηχανικής ανάλυσης που εκτελέστηκε στο DIANA FEA και στα πειραματικά δεδομένα. Ενώ στη θερμοκρασιακή ανάλυση και οι τρεις τιμές του συντελεστή συναγωγής προσεγγίζουν τις πειραματικές μετρήσεις με παρόμοια ακρίβεια, στη μηχανική ανάλυση η προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων της

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

αξονικής παραμόρφωσης για συντελεστή συναγωγής ίσο με $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ είναι πιστότερη εν συγκρίσει με τις προσεγγίσεις για τις άλλες δύο τιμές του συντελεστή συναγωγής.

- Η επιλογή ελαστοπλαστικών μοντέλων για την προσομοίωση των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος υπό υψηλές θερμοκρασίες, δύναται να προκαλέσει την εμφάνιση προβλημάτων σύγκλισης στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η εγγενής μη – γραμμικότητα στις καταστατικές σχέσεις των μοντέλων αυτών ενισχύεται από τη μη – γραμμικότητα των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών λόγω της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, αυξάνεται η περιπλοκότητα της μεθόδου και η απαίτηση υπολογιστικής ισχύος, καθιστώντας τη χρονοβόρα και ακριβή.
- Η προσομοίωση των υλικών με ελαστικά μοντέλα στα οποία το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας, προσέγγισε ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις.

Όσον αφορά την επέκταση της παρούσας εργασίας προτείνεται η προσομοίωση πειράματος ενός έκκεντρα φορτισμένου υποστυλώματος με ταυτόχρονη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, που αποτελεί δυσμενέστερη περίπτωση από το κεντρικά φορτισμένο υποστύλωμα που εξετάστηκε. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η προσομοίωση μίας πολυπλοκότερης διάταξης, για παράδειγμα ενός πλαισίου. Τότε θα ήταν δυνατή η μελέτη της αλληλεπίδρασης των διαφορικών παραμορφώσεων ανάμεσα σε υποστυλώματα και δοκούς αλλά και η εξέταση της ανακατανομής της έντασης που θα συνέβαινε μεταξύ των φερόντων στοιχείων.

Επιπρόσθετα, σε επίπεδο υλικού και ειδικότερα του σκυροδέματος προτείνεται η διερεύνηση εφαρμογής ελαστοπλαστικών μοντέλων, όπως το κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager [9]. Ίσως με σωστή παραμετροποίηση της μη – γραμμικής ανάλυσης υπερκεραστούν τα προβλήματα σύγκλισης και επιτευχθεί ακόμα καλύτερη ακρίβεια ανάμεσα στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης και τις πειραματικές μετρήσεις.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η αναλυτική εξέταση και η σύγκριση της συμπεριφοράς άλλων τύπων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην πράξη, όπως το ελαφροσκυρόδεμα, τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής, το προεντεταμένο σκυρόδεμα και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Εν κατακλείδι, η υιοθέτηση του σχεδιασμού με βάση την επιτελεσματικότητα έναντι πυρκαγιάς είναι κρίσιμη και συντελεί σε λύσεις ορθολογικές, καινοτόμες και πρωτίστως οικονομικές. Η ύπαρξη υπολογιστικών εργαλείων όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και αλγορίθμων σύζευξης δύο ή και περισσότερων φυσικών φαινομένων καθιστούν την πρόοδο στο σχεδιασμό κατασκευών να μοιάζει ανεξάντλητη.

8. Βιβλιογραφία

8.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- [1] American Society of Civil Engineers Manual of Practice no.78, 1992.
- [2] ASTM Designation: E119. Standard methods of fire test of building construction and materials. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials; 1983.
- [3] Bakalagos, S. “Advanced high performance computing methods for the solution of crack propagation and material design problems using the extended Finite Element method (XFEM)” PhD thesis, National Technical University of Athens, Athens, 2022, p. 271.
- [4] BSI: Structural Use of Concrete. British Standards Institution. BS 8110, 1985.
- [5] Buchanan, Andrew Hamilton, and Anthony Abu. Structural Design for Fire Safety. Second edition, John Wiley & Sons Inc, 2017, p. 30-31, 56-95, 126-128, 165-167, 364.
- [6] Chai, Shun. Finite Element Analysis for Civil Engineering with DIANA Software. Springer, 2020, p. 44-56, 91-103, 442-472.
- [7] Cioni, Paolo, et al. “Assessing Fire Damage to r.c. Elements.” Fire Safety Journal, vol. 36, no. 2, Mar. 2001, pp. 181–99. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00050-3).
- [8] Denoel, JF. Fire Safety and Concrete Structures. Febelcem, 2007, p. 16-17, 36-50.
- [9] DIANA FEA User's Manual -- Release 10.6, Denise Ferreira, 2022.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- [10] EN 1991-1-2 (2002), «Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire», European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2002.
- [11] EN 1992-1-1 (2004), «Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings», European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [12] EN 1992-1-2 (2004), «Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design», European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [13] EN 1993-1-2 (2005), «Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design», European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2005.
- [14] Gernay, Thomas, et al. “A Multiaxial Constitutive Model for Concrete in the Fire Situation: Theoretical Formulation.” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, no. 22–23, Oct. 2013, pp. 3659–73. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.013>.
- [15] Hertz, K. D. “Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete.” *Fire Safety Journal*, vol. 38, no. 2, Mar. 2003, pp. 103–16. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6).
- [16] Hurley, Morgan J., editor. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth edition, Springer, 2016, p. 120.
- [17] Jansson, R. “Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies.” PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013, p. 25-52, 79-82.
- [18] Khoury, G. A. “Passive Fire Protection of Concrete Structures.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 161, no. 3, June 2008, pp. 135–45. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1680/stbu.2008.161.3.135>.
- [19] Lie, T. T., and J. L. Woollerton. *Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns*. National Research Council of Canada, July 1988, p. 302 p. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.4224/20386656>, p. 15-20, 26, 32, 35, 39-42, 61-66.
- [20] Lienhard, John H. *A Heat Transfer Textbook*. 3rd ed, Phlogiston Press, 2003, p. 19-23, 28-29, 36-41, 58-66, 147-149.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

- [21] Lu, Fangxia. On the Prediction of Concrete Spalling under Fire. ETH Zurich, 2015. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010581905>, p. 22-39.
- [22] Maraveas, Chrysanthos, and Apostolos A. Vrakas. "Design of Concrete Tunnel Linings for Fire Safety." *Structural Engineering International*, vol. 24, no. 3, Aug. 2014, pp. 319–29. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.2749/101686614X13830790993041>.
- [23] Mineral Commodity Summaries 2023. 2023. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3133/mcs2023>, p. 56-57.
- [24] "Residential Fire Estimate Summaries." U.S. Fire Administration, 28 Apr. 2022, <https://www.usfa.fema.gov/statistics/residential-fires/>.
- [25] Schneider, Ulrich. "Concrete at High Temperatures — A General Review." *Fire Safety Journal*, vol. 13, no. 1, Apr. 1988, pp. 55–68. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1).
- [26] Zehfuß, Jochen, et al. "Evaluation of Eurocode 2 Approaches for Thermal Conductivity of Concrete in Case of Fire." *Civil Engineering Design*, vol. 2, no. 3, July 2020, pp. 58–71. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1002/cend.202000001>.

8.2 Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

- [27] Ασημακόπουλος Δ., Λυγερού Β., Αραμπατζής Γ., Μεταφορά Θερμότητας, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2009, p. 9-25, 63-68, 159-163, 175-182, 211-215, 379-409.
- [28] Βιντζηλαίου Ε., Ζέρης Χ., Τρέζος Κ., Πρακτικός Οδηγός Για Την Αποτίμηση Φέρουσας Ικανότητας Και Τις Δομητικές Επισκευές Μετά Από Πυρκαγιά, Σε Μικρά Κτίρια Από Σκυρόδεμα Και Από Τοιχοποιία, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας και Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008, p. 2-4, 12-21, 58-97, 113-116, 138, 144, 166-169.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

[29] Παπαδρακάκης Μ., Ανάλυση φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001, ρ. 7-23, 53-163, 179-317, 451-477.

[30] Π.Δ. 41/2018 (ΦΕΚ 80/Α/07-05-2018) “Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων”, ρ. 4, 23-27.