ΤΕΕ

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Πρακτικός Οδηγός

για την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και τις δομητικές επισκευές μετά από πυρκαγιά, σε μικρά κτίρια από σκυρόδεμα και από τοιχοποιία

Αθήνα, 2008

ΠΡΟΟΙΜΙΟ

Η πυρκαγιά αποτελεί μια δράση τυχηματική, εξ αιτίας της οποίας μειώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, λαμβάνει χώρα ανακατανομή της έντασης, εκδηλώνονται βλάβες και (σε ορισμένες περιπτώσεις) επέρχεται ακόμη και μερική ή ολική κατάρρευση του δομήματος.

Από απόψεως κανονιστικής, ο σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς αντιμετωπίζεται από τους Ευρωκώδικες (για συνήθεις περιπτώσεις κτιρίων) μέσω κατασκευαστικών διατάξεων (ελάχιστες διαστάσεις στοιχείων, ελάχιστες επικαλύψεις οπλισμών, κλπ.), οι οποίες εξασφαλίζουν την απαραίτητη φέρουσα ικανότητα έναντι πυρκαγιάς ανάλογα με την αναμενόμενη διάρκεια της φωτιάς και τις ταυτόχρονες κατακόρυφες δράσεις που παραλαμβάνει ο φορέας.

Η πειραματική και θεωρητική έρευνα γύρω από τα αντικείμενα της συμπεριφοράς των δομικών υλικών και των δομημάτων έναντι υψηλών θερμοκρασιών έχει δώσει σημαντικά αποτελέσματα. Παρά ταύτα, η πολυπλοκότητα του φαινομένου και οι πολλές και μεγάλες αβεβαιότητες που σχετίζονται με αυτό, δεν επιτρέπουν ακόμη τον πλήρη και λεπτομερή υπολογιστικό χειρισμό της δράσεως της πυρκαγιάς.

Σε ό,τι αφορά την αποτίμηση κτιρίων τα οποία έχουν εκτεθεί σε πυρκαγιά, καθώς και τον ανασχεδιασμό τους μετά από κατάλληλες επεμβάσεις, η διεθνής βιβλιογραφία είναι μάλλον πτωχή, ενώ δεν διατίθενται σχετικά κείμενα Κανονισμών ή Συστάσεων.

Οι καταστρεπτικές πυρκαγιές του Αυγούστου 2007, εκτός από τις οδυνηρές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, την καταστροφή στο περιβάλλον των περιοχών που επλήγησαν και τις απώλειες σε καλλιέργειες και ζωικό κεφάλαιο, προκάλεσαν —για πρώτη φορά στην χώρα μας— μεγάλης έκτασης (και σε ορισμένες περιπτώσεις, μεγάλης έντασης) βλάβες σε σημαντικό πλήθος κτιρίων διαφορετικής μορφής, τρόπου δόμησης και δομικών υλικών. Έτσι, τέθηκε οξύ το θέμα της αποτίμησης και των επεμβάσεων στα κτίρια αυτά, τα οποία είναι σχεδόν στο σύνολό τους ολιγοώροφα κτίρια, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα ή/και φέρουσα ή μη τοιχοποιία. Είναι προφανές ότι η αποκατάσταση ή, όπου απαιτείται, η ανακατασκευή των εστιών τους, αποτελεί για τους κατοίκους των πληγεισών περιοχών απαραίτητη προϋπόθεση για την επάνοδό τους στην ομαλή καθημερινή ζωή.

Το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ), στο πλαίσιο του κοινωνικού του ρόλου, ανέθεσε αμέσως μετά από την σβέση των πυρκαγιών στους Θ.Π.Τάσιο και Μ.Χρονόπουλο την σύνταξη ενός Πρακτικού Οδηγού για την αποτίμηση και τις επεμβάσεις σε κτίρια μετά από πυρκαγιά. Το κείμενο αυτού του Οδηγού αναρτήθηκε στον ιστότοπο του ΤΕΕ.

Εξ άλλου, στο πλαίσιο της προσπάθειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) να συμβάλει στην αποκατάσταση των περιοχών που επλήγησαν, μια ομάδα Πολιτικών Μηχανικών (Μέλη του Διδακτικού Προσωπικού της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών) μετέβη στην Ηλεία, την Αρκαδία και την Εύβοια, και συγκέντρωσε υλικό σχετικό με την τυπολογία των κτιρίων, τις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν, τις βλάβες που εκδηλώθηκαν στα κτίρια, κ.λπ..

Αυτές οι δυο δράσεις, στο πλαίσιο του ΤΕΕ και του ΕΜΠ, ανέδειξαν την ανάγκη σύνταξης του «**Πρακτικού Οδηγού για την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και τις δομητικές επισκευές μετά από πυρκαγιά, σε μικρά κτίρια από σκυρόδεμα και από τοιχοποιία»,** λαμβάνοντας υπ' όψη τις ιδιαιτερότητες των περσινών πυρκαγιών, τα χαρακτηριστικά των κτιρίων που επλήγησαν, καθώς και την διατιθέμενη διεθνή βιβλιογραφία για το θέμα αυτό.

Αυτό το έργο ανατέθηκε από το ΤΕΕ στο ΕΜΠ, μέσω ενός χρηματοδοτούμενου ερευνητικού προγράμματος μικρής διάρκειας.

Πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τις πρακτικές οδηγίες προς τους Μελετητές Πολιτικούς Μηχανικούς, τις σχετικές με την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό των κτιρίων μετά από πυρκαγιά, ο παρών Οδηγός περιλαμβάνει και αναλυτικές πληροφορίες για το φαινόμενο της πυρκαγιάς, για την επιρροή των υψηλών θερμοκρασιών στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, καθώς και για τις διατιθέμενες υπολογιστικές μεθόδους αποτίμησης και ανασχεδιασμού δομημάτων. Η Συντακτική Ομάδα επέλεξε να περιλάβει στον Οδηγό όλες αυτές τις πληροφορίες, παρ' όλον ότι μέρος αυτών δεν προσφέρεται για άμεση χρήση, αναγνωρίζοντας ότι η εκπαίδευση του Πολιτικού Μηχανικού στην Ελλάδα δεν περιλαμβάνει τα θέματα της πυρκαγιάς. Θεωρήθηκε, επομένως, χρήσιμη και η παράθεση στοιχείων τα οποία θα επιτρέπουν στον Μελετητή να αποκτήσει πληρέστερη γνώση του φαινομένου της πυρκαγιάς και των δομητικών συνεπειών της.

Για την σύνταξη του ανά χείρας Οδηγού εργάσθηκαν οι Ε.Βιντζηλαίου (Αν. Καθηγ., Επιστ. Υπεύθυνος), Χ.Ζέρης (Επίκ. Καθηγ.), Κ.Τρέζος (Επίκ. Καθηγ.), Μ.Χρονόπουλος (Επιστ. Συνεργ.), Κ.Μανωλεδάκη (Πολ.Μηχ., Μεταπτ. Φοιτήτρια) και Κ.Ρεπαπής (Δρ. Πολ. Μηχ.). Ο Θ.Π.Τάσιος (Ομ. Καθηγ. ΕΜΠ) ήταν Σύμβουλος της Ομάδας Σύνταξης του Οδηγού καθ' όλη την διάρκεια του έργου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2008

I. Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μόνο βασικά στοιχεία σχετιζόμενα με την πυρκαγιά στο εσωτερικό ενός κτιρίου (ενδο-οικιακή), κύρια πηγή των οποίων αποτέλεσε η έκδοση Εργ. Ω.Σ./ Ε.Μ.Π., «Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα έναντι Πυρκαγιάς», Θ.Π. Τάσιος, Γ. Δεοδάτης, 1984 [1], καθώς και το υλικό των σχετικών Διαλέξεων στο πλαίσιο των Μεταπτυχιακών Σεμιναρίων του Εργ. Ω.Σ./ Ε.Μ.Π, κατά τις δεκαετίες 1980 και 1990. Δεν εξετάζεται το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε δασική περιοχή (και μάλιστα στα όρια ή στο εσωτερικό των οικισμών), για το οποίο μπορούν να αναζητηθούν πληροφορίες στους ακόλουθους δικτυακούς τόπους: 1) www.civilprotection.gr (Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας), 2) www.fria.gr/mmfria (Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων).

I.1 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΟΡΙΣΜΟΙ

I.1.1 Αντιδράσεις οξειδοαναγωγής

Είναι οι αντιδράσεις εκείνες, κατά τη διάρκεια των οποίων μεταβάλλεται ο αριθμός οξειδώσεως δύο ή περισσότερων ατόμων ή ιόντων (είτε λόγω μεταβιβάσεως ηλεκτρονίων, είτε λόγω συνεισφοράς ηλεκτρονίων) με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κοινών ζευγών.

Π.χ. $2Cr + 6H_2SO_4 \longrightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3SO_2 + 6H_2O$.

I.1.2 Καύσεις

Είναι οι οξειδοαναγωγικές εκείνες αντιδράσεις του οξυγόνου, οι οποίες συνοδεύονται από έκλυση φωτός και ανύψωση της θερμοκρασίας.

Π.χ. $C + O_2 \longrightarrow CO_2$.

I.1.3 Πυρκαγιά (φωτιά)

Πρόκειται για μια αντίδραση καύσης, συνοδευόμενη από ταχεία έκλυση σημαντικού ποσού θερμότητας και από ισχυρή φωταύγεια (φλόγες). Από την εκλυόμενη θερμότητα, ένα ποσοστό απορροφάται από τα καιόμενα υλικά (διαβίβαση, αγωγιμότητα) και ένα ποσοστό διαχέεται προς το περιβάλλον, μέσω θερμικής ακτινοβολίας και μέσω της κίνησης του θερμού (ή υπέρθερμου) αέρα (μετάδοση, μεταφορά), ο οποίος παρασύρει σπίθες και καιόμενα υλικά.

I.1.4 Καπνός

Μίγμα σωματιδίων άνθρακα και πίσσας, αλλά και προϊόντων πυρόλυσης και ατελούς καύσης.

I.1.5 Φλόγα

Συγκέντρωση υπέρθερμων ή διάπυρων αερίων και μορίων των καιόμενων υλικών.

I.1.6 Καυσαέρια (γενικώς τοξικά)

Κυρίως CO (σε συγκέντρωση 1,0÷1,2% κ.ο. επέρχεται θάνατος) και CO_2 (σε συγκέντρωση 10,0÷12,0% κ.ο. επέρχεται θάνατος), καθώς καί :

- Αμμωνία (NH_3), όταν καίγεται μαλλί, μετάξι, μελαμίνη, νάυλον
- Διοξείδιο του αζώτου (NO_2), όταν καίγονται υφάσματα (σε συγκέντρωση > 200 ppm επέρχεται θάνατος)
- Υδροφθόριο (HF) και υδροβρώμιο (HBr), όταν καίγονται πλαστικά με αντιπυρικά πρόσμικτα (αλογόνα)
- Υδροκυάνιο (HCN), όταν καίγεται μαλλί, μετάξι, ξύλο, χαρτί, πολυουρεθάνη (σε συγκέντρωση > 350 ppm επέρχεται θάνατος)
- Ακρυλική αλδεΰδη (CH_2:CHCHO), όταν καίγονται πετρελαιοειδή (σε συγκέντρωση > 100 ppm επέρχεται θάνατος)
- Υδρόθειο (H_2S) και διοξείδιο του θείου (SO_2), όταν καίγεται μαλλί ή ελαστικά (σε συγκέντρωση > 500 ppm επέρχεται θάνατος)
- Υδροχλώριο (HCℓ), όταν καίγονται πλαστικά – π.χ. PVC (σε συγκέντρωση > 500 ppm επέρχεται θάνατος).

I.1.7 Ανάφλεξη

Επαφή καύσιμου υλικού με οξυγόνο, οπότε υπό θέρμανση (φλόγα) παρατηρείται έναρξη καύσης.

Ως θερμοκρασία αναφλέξεως ενός σώματος ορίζεται η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το σώμα αρχίζει να καίγεται, ενούμενο με το οξυγόνο του αέρα (βλ. Πίνακα I.1).

I.1.8 Αυτανάφλεξη

Δημιουργία μίγματος αερίων, με «αυτόματη» αναπήδηση φλόγας και φωτιάς, έναρξη καύσης. Για παράδειγμα, αυτανάφλεξη σε θημωνιές λόγω βιολογικής διεργασίας (για τιμές θερμοκρασιών αυτανάφλεξης, βλ. Πίνακα I.1).

Πίνακας Ι.1 Θερμοκρασίες ανάφλεξης και αυτανάφλεξης ορισμένων υλικών.

	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, ^{o}C	
	ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ	**ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ**
Στάχυα, άχυρα, σε θημωνιές	~ 175	(~ 75)
Εφημερίδες, χαρτί	180 ÷ 220	180 ÷ 220
Ροκανίδια	200 ÷ 220	200 ÷ 220
Μαλλί, μετάξι	200 ÷ 240	—
Βαμβάκι, ξυλεία (πεύκου, έλατου)	230 ÷ 270	~ 255 ÷ 260
Πολυστερίνη, πολυουρεθάνη, πολυαιθυλένιο	300 ÷ 350	350 ÷ 450
PVC	~ 400	~ 450

Ι.1.9 Πυροδιαμέρισμα (ΠΔ)

Είναι κάθε κλειστός (ή ανοικτός) χώρος ο οποίος περιβάλλεται από όλες τις πλευρές είτε από τοίχους, είτε από πόρτες και παράθυρα. Έτσι, «πυροδιαμέρισμα» είναι ένα δωμάτιο σε ένα διαμέρισμα ή μια αποθήκη ή μια αίθουσα κινηματογράφου.

Ι.1.10 Καύσιμο φορτίο πυροδιαμερίσματος

Είναι το συνολικό ποσό θερμότητας το οποίο απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση όλης της καύσιμης ύλης που περιέχεται μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Στην καύσιμη αυτή ύλη περιλαμβάνονται τα κάθε είδους αποθηκευμένα υλικά, έπιπλα, υλικά επικαλύψεως τοίχων, πατώματος και οροφής, καθώς και τα φέροντα (ή μη) στοιχεία του σκελετού τα οποία μπορούν να καούν (π.χ. ξύλινα).

I.1.11 Πυκνότητα καυσίμου φορτίου

Η πυκνότητα καυσίμου φορτίου προκύπτει από την διαίρεση του καυσίμου φορτίου του πυροδιαμερίσματος με την επιφάνεια της κατόψεως του πυροδιαμερίσματος. Υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$q_f = \frac{\Sigma \mu_\nu \bullet m_\nu \bullet H_\nu}{A_f},$$

όπου q_f : πυκνότητα καυσίμου φορτίου [MJ/m^2], ανηγμένου ως προς την κάτοψη

m_ν : ολική μάζα της καύσιμης ύλης ν [kg]

H_ν : θερμαντική ικανότητα της καύσιμης ύλης ν [MJ/kg]

μ_ν : βαθμός καύσεως της καύσιμης ύλης ν

A_f : επιφάνεια κατόψεως του πυροδιαμερίσματος [m^2]

ν : δείκτης σειράς των καιόμενων υλικών.

Ο βαθμός καύσεως μ_ν είναι ένας καθαρός αριθμός μεταξύ 0 και 1, ο οποίος υποδεικνύει το ποσοστό της καύσιμης ύλης ν, το οποίο τελικά καίγεται. Ο συντελεστής αυτός έχει εισαχθεί στον παραπάνω τύπο, γιατί σχεδόν ποτέ δεν διαπιστώθηκε πλήρης καύση όλου του καυσίμου υλικού σε ένα πυροδιαμέρισμα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση του είδους της καύσιμης ύλης, του τρόπου στιβάξεώς της, και των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς.

Δυστυχώς δεν υπάρχει αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή μ_ν. Συχνά έχουν εκτιμηθεί ή μετρηθεί τιμές του μ_ν αρκετά μικρότερες της μονάδας. Εναπόκειται, επομένως, στον Μηχανικό να κάνει τις δικές του εκτιμήσεις.

Εκτός από τον ορισμό της πυκνότητας καυσίμου φορτίου που δίνεται από τον τύπο της προηγούμενης σελίδας (με αναγωγή ως προς την κάτοψη του ΠΔ), ένας άλλος συχνά χρησιμοποιούμενος ορισμός βασίζεται στο συνολικό εσωτερικό εμβαδό του ΠΔ, κατά τον παρακάτω τύπο:

$$q_t = \frac{\Sigma \mu_\nu \bullet m_\nu \bullet H_\nu}{A_t},$$

όπου q_t : πυκνότητα καυσίμου φορτίου [MJ/m²], ανηγμένου ως προς το συνολικό εμβαδό

m_ν : ολική μάζα της καύσιμης ύλης ν [kg]

H_ν : θερμαντική ικανότητα της καύσιμης ύλης ν [MJ/kg]

μ_ν : συντελεστής βαθμού καύσεως της καύσιμης ύλης ν

A_t : συνολικό εσωτερικό εμβαδόν όλων των επιφανειών που περικλείουν το πυροδιαμέρισμα, συμπεριλαμβανομένων και των ανοιγμάτων [m²].

Σημειώνεται ότι η πυκνότητα του καυσίμου φορτίου μπορεί να εκφραστεί είτε σε ανηγμένο πυροθερμικό φορτίο (MJ/ m²), όπως γίνεται στους παραπάνω τύπους, είτε σε ισοδύναμο βάρος (μάζα) καιόμενου ξύλου (ή ισόποσο ξύλου) ανά m² κατόψεως (ΙΒΚΞ, kg/ m²), αναλόγως της θερμαντικής ικανότητας (kg υλικών/kg ξύλου ή MJ/ kg) των επιμέρους καύσιμων υλικών. Σχετικώς υπενθυμίζεται πως : 1 kg ξ. ≈ 4.500 kcal, ή, ισοδυνάμως, 1 kg ξ. ≈ 17÷ 19 MJ. Όπου χρησιμοποιείται ή αναφέρεται η πυκνότητα καυσίμου φορτίου, πρέπει να δηλώνεται σαφώς εάν πρόκειται για την q_f ή την q_t (γενικώς, υποδιπλάσια).

I.2 Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

I.2.1 Υπολογισμός με χρήση τύπων

Ο υπολογισμός βασίζεται στην χρήση των δύο εναλλακτικών τύπων της §I.1.11. Οι απαραίτητες τιμές για την θερμαντική ικανότητα Η (σε MJ/kg) υπάρχουν στον Πίνακα I.2 για στερεά υλικά, και στον Πίνακα I.3 για υγρά και αέρια υλικά αντίστοιχα.

Σημειώνεται βέβαια, ότι ο συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού της πυκνότητας καυσίμου φορτίου έχει τα εξής μειονεκτήματα:

(α) Η εκτίμηση της μάζας και του βαθμού καύσεως των καυσίμων υλικών παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, ιδίως όταν γίνεται στο στάδιο του σχεδιασμού.

(β) Είναι αδύνατον τις περισσότερες φορές να ληφθεί υπόψη μια μελλοντική αλλαγή στην ποσότητα της καύσιμης ύλης ή ακόμα και μια αλλαγή στη χρήση του χώρου.

Οι τιμές του Πίνακα Ι.2 ισχύουν για στερεά υλικά χωρίς υγρασία. Η θερμαντική ικανότητα H_F υλικών που περιέχουν υγρασία υπολογίζεται από τον τύπο: $H_F = H\ (1\text{-}0{,}01m) - 0{,}025m$, όπου m είναι η περιεχόμενη υγρασία % κατά βάρος.

Έτσι, για υλικά με υγρασία π.χ. 10%, η απομειωμένη θερμαντική ικανότητα είναι $H_F \approx 0{,}65H$.

Σημειώνεται ότι στοιχεία για τη θερμαντική ικανότητα διαφόρων υλικών μπορούν να βρεθούν και στις περιοδικές εκδόσεις CEB, Bulletin d' Information No. 145/1982, No. 174/1986 και No. 208/1991, Fire Design of Concrete Structures.

Πίνακας Ι.2 Θερμαντική ικανότητα Η ορισμένων στερεών υλικών [1].

ΘΕΡΜΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ Η [MJ/kg]		
ΣΤΕΡΕΑ ΥΛΙΚΑ	Ανθρακίτης	32-36
	Άσφαλτος	40
	Άχυρο	17
	Βαμβάκι	18
	Δέρματα	20
	Κάρβουνο	29
	Κερί (παραφίνη)	47
	Κυτταρίνη	15
	Κωκ	28-34
	Λίπος	40
	Μαλλί	23
	Μετάξι	17-21
	Ξυλάνθρακας	30
	Ξύλο	17-20
	Ακρυλικά πλαστικά	25-30
	Πολυαιθυλενικά πλαστικά	45-50
	Πολυεστερικά πλαστικά	30
	Πολυστυρένιο	40-45
	Πολυουρεθάνη	25
	Ρούχα	17-21
	Σιτηρά	17
	Σκουπίδια (κουζίνας)	8-21
	Φελλός	31-35
	Χαρτί, χαρτόνι	16-18

Πίνακας Ι.3 Θερμαντική ικανότητα Η ορισμένων υγρών και αερίων υλικών [1].

ΘΕΡΜΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ Η [MJ/m³]		
ΥΓΡΑ ΥΛΙΚΑ	Αργό πετρέλαιο, βενζίνη	43-44
	Λινέλαιο	39
	Οινόπνευμα	33-34
	Πίσσα	38
	Πετρέλαιο ντήζελ	41-42
	Παραφινέλαιο	41
ΑΕΡΙΑ ΥΛΙΚΑ	Ακετυλένιο	57
	Ανθρακαέριο	17
	Βουτάνιο	110
	Μονοξείδιο του άνθρακα	13
	Προπάνιο	86
	Υδρογόνο	140

Ι.2.2 Υπολογισμός βάσει στατιστικών παρατηρήσεων

Λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει ο υπολογισμός με χρήση τύπων, μπορεί να εκτιμάται η πυκνότητα καυσίμου φορτίου ως συνάρτηση του είδους του πυροδιαμερίσματος, βάσει στατιστικών παρατηρήσεων.

Για την εκτίμηση της q_f και της q_t μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι Πίνακες Ι.4 και Ι.5, με βάση παλαιότερες Σουηδικές παρατηρήσεις, και για χαρακτηριστικές τιμές ως ποσοστημόριο 80%.

Εναπόκειται στον Μηχανικό να κρίνει πότε μία περίπτωση δεν καλύπτεται ικανοποιητικά από τους Πίνακες, έτσι ώστε να κάνει χρήση του αναλυτικού υπολογισμού.

Σημειώνεται ότι στοιχεία για τις τυπικές τιμές πυκνότητας καυσίμου φορτίου, αναλόγως της χρήσης του κτιρίου, μπορούν να βρεθούν και στις περιοδικές εκδόσεις CEB, Bulletin d' Information No. 145/1982, No. 174/1986 και No. 208/1991, Fire Design of Concrete Structures.

Πίνακας Ι.4 Πυκνότητα καυσίμου φορτίου q_t [1].

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ q_t [(MJ/m²)]			
Είδος πυροδιαμερίσματος	**Μέσος όρος**	**Τυπική απόκλιση**	**Χαρακτ/κή τιμή**
1 Κατοικίες[1]			
Δύο δωμάτια και κουζίνα	150	24,7	168
Τρία δωμάτια και κουζίνα	139	20,1	149
2 Γραφεία[2]			
Τεχνικά γραφεία	124	31,4	145
Διοικητικά γραφεία	102	32,2	132
Όλα τα γραφεία που εξετάστηκαν	114	39,4	138
3 Σχολεία			
Στοιχειώδους εκπαίδευσης	84,2	14,2	98,4
Μέσης εκπαίδευσης	96,7	20,5	117
Ανώτατης εκπαίδευσης	61,1	18,4	71,2
Όλα τα σχολεία που εξετάστηκαν	80,4	23,4	96,3
4 Νοσοκομεία	116	36	147
5 Ξενοδοχεία[2]	67	19,3	81,6

[1]) Εξαιρούνται οι επικαλύψεις πατωμάτων, [2]) Περιλαμβάνονται μόνο τα κινητά καύσιμα υλικά.

Πίνακας Ι.5 Πυκνότητα καυσίμου φορτίου q_f [1].

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ q_f [(MJ/m²)]	
Είδος πυροδιαμερίσματος	**Χαρακτηριστική τιμή**
1 Κατοικίες[1]	
Υπνοδωμάτια	630
Χώροι υποδοχής	510
2 Γραφεία[2]	
Τεχνικά γραφεία	720
Διοικητικά γραφεία	640
3 Σχολεία	
Στοιχειώδους εκπαίδευσης	370
Μέσης εκπαίδευσης	400
Ανώτατης εκπαίδευσης	260
4 Νοσοκομεία-υπνοδωμάτια	80
5 Ξενοδοχεία-υπνοδωμάτια	420

[1]) Εξαιρούνται οι επικαλύψεις πατωμάτων, [2]) Περιλαμβάνονται μόνο τα κινητά καύσιμα υλικά.

Επίσης, αναλόγως της χρήσεως του κτιρίου, η πυκνότητα καυσίμου φορτίου (ανά m^2 επιφανείας/κάτοψης του πυροδιαμερίσματος) έχει ή μπορεί να φθάσει κάποιες τιμές, ενδεικτικώς και συγκριτικώς κατά τον Πίνακα Ι.6.

Πίνακας Ι.6 Ισόποσο ξύλου, αναλόγως της χρήσεως του κτιρίου.

	Χρήση	**ΙΒΚΞ, kg ξ./ m^2**
1	Αποθήκες κ.λπ.	÷ 500
2	Καταστήματα	÷ 250
	Βιοτεχνίες	÷ 150
3	Γραφεία	÷ 50
	Κατοικίες	÷ 25

I.3 ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΦΑΣΕΙΣ ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

I.3.1 Η επώαση

Μια πυρκαγιά (εσωτερική, ενδο-οικιακή) εκδηλώνεται σε ένα πυροδιαμέρισμα όταν η καύσιμη ύλη που βρίσκεται μέσα σε αυτό αποκτήσει ένα ικανό ποσό θερμικής ενέργειας.

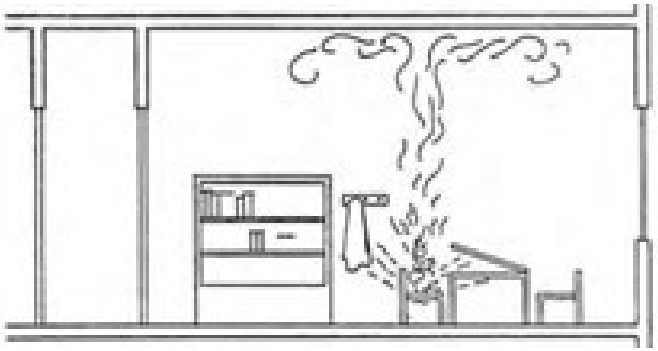
Αυτό μπορεί να γίνει από ένα αναμμένο τσιγάρο ή μια αναμμένη εστία κουζίνας, ένα βραχυκύκλωμα ή ακόμα και από αυτανάφλεξη του καυσίμου υλικού (υπό προϋποθέσεις).

Αποφασιστικοί παράγοντες για την διαδικασία της αναφλέξεως είναι :

- Τα χαρακτηριστικά της πηγής ενεργείας.
- Το είδος και οι γεωμετρικές διαστάσεις των εκτεθειμένων καυσίμων υλικών.
- Ο χρόνος εκθέσεως στην πηγή ενεργείας.

Μετά την αρχική έναυση, η φωτιά παράγει θερμική ενέργεια, ένα μέρος της οποίας χρησιμεύει για την διατήρηση της καύσεως.

Το υπόλοιπο ποσό μεταφέρεται δι' ακτινοβολίας και δια μεταφοράς (μετάδοσης) σε άλλα υλικά, τα οποία θερμαινόμενα αναφλέγονται, συνεισφέροντας στην περαιτέρω εξάπλωση της φωτιάς (βλ. Σχήμα I.1).



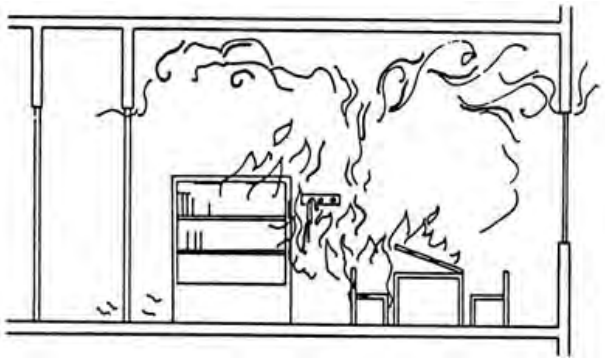
Σχήμα I.1 «Επώαση»: Μετά την αρχική ανάφλεξη, ένα στρώμα θερμών αερίων αρχίζει να δημιουργείται στην οροφή, ενώ αρχίζουν να θερμαίνονται η βιβλιοθήκη και το τραπέζι, δια μεταφοράς και ακτινοβολίας θερμότητας από την αρχική πηγή. [1]

Η διαδικασία αναπτύξεως και εξαπλώσεως μιας πυρκαγιάς σε ένα πυροδιαμέρισμα εξαρτάται από :

- Το μέγεθος, τον όγκο, το ύψος, την κατανομή, τη στοίβαξη και τις ιδιότητες καύσεως του καυσίμου υλικού.
- Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πυροδιαμερίσματος.
- Το μέγεθος και το σχήμα του πυροδιαμερίσματος.
- Τα συστήματα κατασβέσεως (αν υπάρχουν).

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

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «φούντωμα» (flash-over), σημειώνει δε τη μετάβαση από το στάδιο της επωάσεως στο στάδιο της πλήρους αναπτύξεως (βλ. Σχήμα Ι.2).



Σχήμα Ι.2 «Φούντωμα»: Το στρώμα των θερμών αερίων που συσσωρεύεται στην οροφή προκαλεί την ανάφλεξη ενός μεγάλου μέρους της καύσιμης ύλης μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Αρχίζουν τα πρώτα φαινόμενα εξαπλώσεως της φωτιάς εκτός του πυροδιαμερίσματος, συνήθως δια μέσου των ανοιγμάτων. [1]

Ι.3.2 Η πλήρης ανάπτυξη

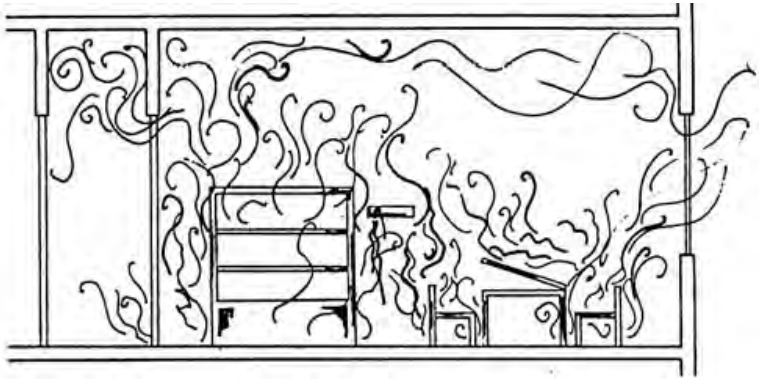
Αυτό το στάδιο είναι αποφασιστικής σημασίας για την συμπεριφορά των φερόντων μελών της κατασκευής, καθώς και για την εξάπλωση της πυρκαγιάς από πυροδιαμέρισμα σε πυροδιαμέρισμα, από όροφο σε όροφο ή και από κτίριο σε κτίριο (βλ. Σχήμα Ι.3).

Τα χαρακτηριστικά του σταδίου αυτού εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες :

- Ποσόν και είδος του καυσίμου υλικού στο πυροδιαμέρισμα.
- Πορώδες και σχήμα των κόκκων του καυσίμου υλικού.
- Στοίβαξη του καυσίμου υλικού στο πυροδιαμέρισμα.
- Ποσόν αέρος που διοχετεύεται μέσα στο πυροδιαμέρισμα στη μονάδα του χρόνου (αερισμός του πυροδιαμερίσματος).
- Γεωμετρία του πυροδιαμερίσματος.
- Θερμικές ιδιότητες των επιφανειών που περικλείουν το πυροδιαμέρισμα.

Οι πυρκαγιές σε στάδιο πλήρους αναπτύξεως μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες : τις αερο-ελεγχόμενες και τις καυσιμο-ελεγχόμενες.

Στην πρώτη κατηγορία, η καύση ελέγχεται από τον αερισμό του πυροδιαμερίσματος, και δεν εξαρτάται σημαντικά από το ποσό και τον τρόπο στοιβάξεως του καυσίμου υλικού. Ενώ στη δεύτερη κατηγορία, η καύση ελέγχεται από το ποσόν του καυσίμου υλικού, και είναι ουσιαστικώς ανεξάρτητη του αερισμού.

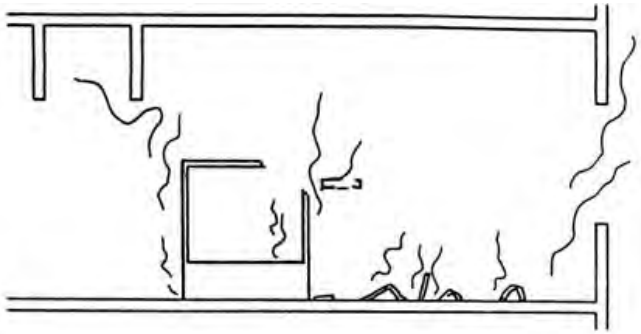


Σχήμα Ι.3 «Πλήρης ανάπτυξη»: Το μεγαλύτερο μέρος της καύσιμης ύλης του πυροδιαμερίσματος καίγεται (εμπειρικώς περίπου το 60%). Φλόγες και υπέρθερμα αέρια μεταφέρονται δια μέσου των ανοιγμάτων σε άλλα πυροδιαμερίσματα ή και κτίρια. [1]

I.3.3 Η απόσβεση

Στην περίπτωση της καυσιμο-ελεγχόμενης πυρκαγιάς, το τρίτο αυτό στάδιο διαδέχεται την πλήρη ανάπτυξη, όταν καεί το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου υλικού μέσα στο πυροδιαμέρισμα.

Στην περίπτωση της αερο-ελεγχόμενης πυρκαγιάς, η απόσβεση αρχίζει όταν ο διατιθέμενος για την καύση αέρας μειωθεί κάτω από κάποιο όριο.



Σχήμα I.4 «Απόσβεση»: Μετά την εξάντληση των καυσίμων μέσα στο πυροδιαμέρισμα, ακολουθεί το στάδιο της αποσβέσεως. Πάντως, είναι πιθανό η πυρκαγιά να έχει διαδοθεί σε άλλα πυροδιαμερίσματα ή και κτίρια. [1]

I.4 Η ΚΑΜΠΥΛΗ «ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΙΩΝ-ΧΡΟΝΟΣ», T-t

Απαραίτητο βήμα στην διαδικασία του σχεδιασμού των κατασκευών ώστε να «αντέχουν» σε κάποια πυρκαγιά, είτε στην διαδικασία αποτίμησης μιας κατασκευής που έχει υποστεί πυρκαγιά, αποτελεί ο υπολογισμός των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται μέσα στη μάζα των φερόντων στοιχείων. Για την εύρεση των θερμοκρασιών αυτών απαιτείται η εκτίμηση της θερμοκρασίας των αερίων μέσα στο πυροδιαμέρισμα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Πρωταρχική, λοιπόν, πληροφορία στη διαδικασία του σχεδιασμού και της αποτίμησης είναι η γνώση της μεταβολής της θερμοκρασίας αερίων συναρτήσει του χρόνου μέσα σε ένα δεδομένο πυροδιαμέρισμα.

Για γνωστά χαρακτηριστικά καύσεως της καυσίμου ύλης, η καμπύλη T-t μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις ισορροπίας ενεργείας και μάζας στο πυροδιαμέρισμα.

Φυσικά, πρέπει να ληφθούν υπόψη το μέγεθος, η γεωμετρία και ο αερισμός του πυροδιαμερίσματος, καθώς και οι θερμικές ιδιότητες των στοιχείων-επιφανειών που το περικλείουν. Η εύρεση της καμπύλης T-t μέσω των δύο εξισώσεων ισορροπίας γίνεται με τη βοήθεια λογισμητή.

Ενδεικτικώς, μερικές τέτοιες «παραμετρικές» καμπύλες, με βάση παλαιότερες Σουηδικές παρατηρήσεις, παρουσιάζονται στο Σχήμα I.5, ως δύο «οικογένειες» καμπυλών. Στοιχείο εισαγωγής σε κάθε ομάδα αποτελεί ο «συντελεστής ανοίγματος»: $\left(\frac{A_0 \bullet \sqrt{h}}{A_t}\right)$,

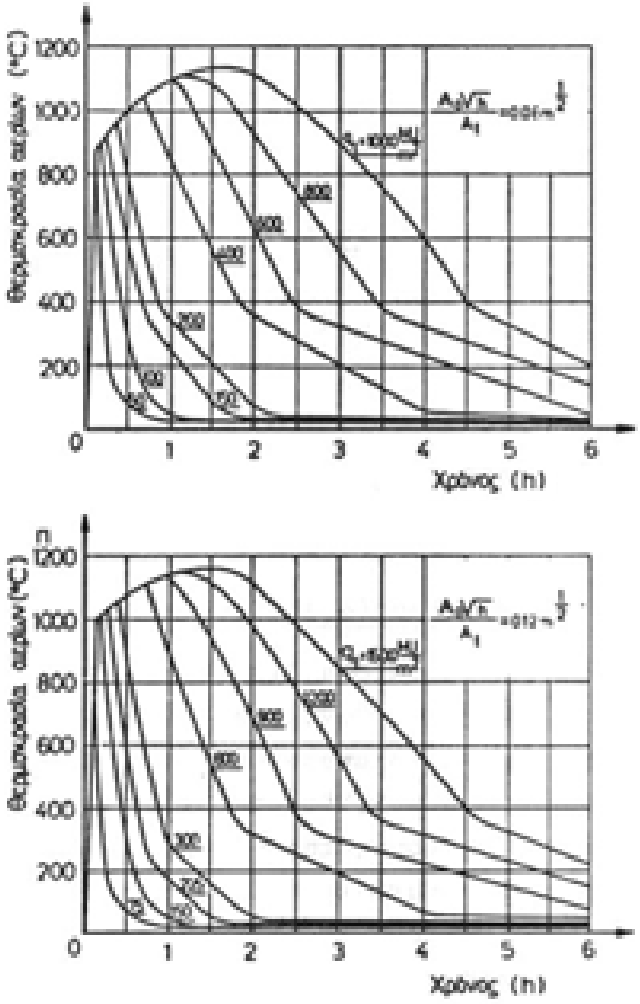
όπου A_0 : ολική επιφάνεια των ανοιγμάτων [m^2]

A_t : συνολικό εσωτερικό εμβαδόν όλων των επιφανειών που περικλείουν το ΠΔ, συμπεριλαμβανομένων και των ανοιγμάτων [m^2]

h : ύψος των ανοιγμάτων [m^2].

Κάθε οικογένεια καμπυλών αποτελείται από οκτώ καμπύλες, όπου καθεμία αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή πυκνότητας καυσίμου φορτίου q_t.

Όλες οι καμπύλες έχουν ισχύ για ένα πρότυπο πυροδιαμέρισμα το οποίο περικλείεται από επιφάνειες που αποτελούνται από ένα ιδεατό υλικό με τις ακόλουθες ιδιότητες : θερμική αγωγιμότητα λ = 0,81 W m^{-1} $^oC^{-1}$ και θερμοχωρητικότητα ρ C_ρ = 1,67 MJ m^{-3} $^oC^{-1}$.



Σχήμα I.5 Παραδείγματα καμπυλών «θερμοκρασία αερίων-χρόνος» για διάφορες τιμές της πυκνότητας καυσίμου φορτίου q_t και του συντελεστή ανοίγματος. Οι καμπύλες ισχύουν για πυροδιαμερίσματα τύπου Α. [1]

Το ιδεατό αυτό υλικό αντιστοιχεί σε ένα μέσο όρο τούβλων, σκυροδέματος και ελαφροσκυροδέματος, και ο συγκεκριμένος τύπος ορίζεται ως πυροδιαμέρισμα τύπου Α.

Για πυρκαγιές σε πυροδιαμερίσματα που περικλείονται από επιφάνειες με θερμικές ιδιότητες διάφορες αυτών του τύπου Α, η διαδικασία υπολογισμού ανάγεται σε καμπύλη T-t για πυροδιαμέρισμα τύπου Α, με τον ακόλουθο τρόπο: Χρησιμοποιείται η έννοια της ανηγμένης πυκνότητας καυσίμου φορτίου q_{tf} και του ανηγμένου συντελεστή ανοίγματος $\left(\frac{A_0 \bullet \sqrt{h}}{A_t}\right)_f$ σύμφωνα με τους τύπους :

$q_{tf} = K_f\, q_t$

$$\left(\frac{A_0 \bullet \sqrt{h}}{A_t}\right)_f = \frac{K_f \bullet A_0 \bullet \sqrt{h}}{A_t}$$

Οι τιμές του συντελεστή K_f δίνονται στον Πίνακα Ι.7 για οκτώ διαφορετικούς τύπους πυροδιαμερισμάτων που ορίζονται από το υλικό των επιφανειών οι οποίες τα περικλείουν.

Σημειώνεται, τέλος, ότι οι καμπύλες T-t έχουν εφαρμογή για πυροδιαμερίσματα μεγέθους περίπου όσο ένα συνηθισμένο δωμάτιο πολυκατοικίας, γραφείου, σχολείου, νοσοκομείου, ξενοδοχείου ή βιβλιοθήκης, ενώ για πυροδιαμερίσματα πολύ μεγάλου όγκου δίνουν αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα.

Πίνακας Ι.7 Τιμές του συντελεστή K_f [1].

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ K_f						
Τύπος πυροδιαμερί-σματος	**Συντελεστής ανοίγματος** $\left(\frac{A_0 \bullet \sqrt{h}}{A_t}\right)$ [$m^{1/2}$]					
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Τύπος Α	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Τύπος Β	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Τύπος C	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,50
Τύπος D	1,35	1,35	1,35	1,50	1,55	1,65
Τύπος E	1,65	1,50	1,35	1,50	1,75	2,00
Τύπος F	1,00-0,50	1,00-0,50	0,80-0,50	0,70-0,50	0,70-0,50	0,70-0,50
Τύπος G	1,50	1,45	1,35	1,25	1,15	1,05
Τύπος H	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,50

Η μικρότερη τιμή για τον συντελεστή K_f ισχύει για τις τιμές της πυκνότητας καυσίμου φορτίου $q_t > 500$ MJ/m², ενώ η μεγαλύτερη για τιμές $q_t < 500$ MJ/m². Για ενδιάμεσες τιμές της πυκνότητας καυσίμου φορτίου, η γραμμική παρεμβολή παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια.

Οι διάφοροι τύποι πυροδιαμερισμάτων ορίζονται ως εξής :

Πυροδιαμέρισμα τύπου A : Περικλείοντα στοιχεία από υλικό με θερμοαγωγιμότητα λ = 0,81 W m^{-1} $^oC^{-1}$ και θερμοχωρητικότητα ρ C_ρ = 1,67 MJ m^{-3} $^oC^{-1}$

Πυροδιαμέρισμα τύπου B : Περικλείοντα στοιχεία από σκυρόδεμα.

Πυροδιαμέρισμα τύπου C : Περικλείοντα στοιχεία από κυψελοσκυρόδεμα (πυκνότητα ρ = 500 kg/m^3).

Πυροδιαμέρισμα τύπου D : 50% των περικλειόντων στοιχείων είναι από σκυρόδεμα και 50% από στοιχεία από κυψελοσκυρόδεμα (πυκνότητα ρ = 500 kg/m^3).

Πυροδιαμέρισμα τύπου E : Τα περικλείοντα στοιχεία αποτελούνται από τα παρακάτω υλικά: 50% από κυψελοσκυρόδεμα (πυκνότητα ρ = 500 kg/m^3), 33% από σκυρόδεμα, 17% από τα εξής στρώματα (από μέσα προς τα έξω) : γυψοσανίδες (πυκνότητα ρ = 790 kg/m^3) πάχους 13mm, υαλοβάμβακας (πυκνότητα ρ = 50 kg/m^3) πάχους 10cm, τοιχοποιία από τούβλα (πυκνότητα ρ = 1800 kg/m^3) πάχους 20cm.

Πυροδιαμέρισμα τύπου F : 80% των περικλειόντων στοιχείων είναι από χαλύβδινες λαμαρίνες και 20% από σκυρόδεμα. Το πυροδιαμέρισμα αντιστοιχεί σε αποθηκευτικό χώρο με οροφή και τοίχους από χαλύβδινες λαμαρίνες και δάπεδο από σκυρόδεμα.

Πυροδιαμέρισμα τύπου G : Τα περικλείοντα στοιχεία αποτελούνται από τα παρακάτω υλικά: 20% από σκυρόδεμα, και 80% από τα εξής στρώματα (από μέσα προς τα έξω) : διπλές γυψοσανίδες (πυκνότητα ρ = 790 kg/m^3) πάχους 2x13mm, κενό πάχους 10cm, διπλές γυψοσανίδες (πυκνότητα ρ = 790 kg/m^3) πάχους 2x13mm.

Πυροδιαμέρισμα τύπου H : Τα περικλείοντα στοιχεία αποτελούνται από χαλύβδινες λαμαρίνες και υαλοβάμβακα (πυκνότητα ρ = 50 kg/m^3) πάχους 10cm.

Για τύπους πυροδιαμερισμάτων που δεν αναφέρονται στον Πίνακα I.7, μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή μεταξύ υπαρχόντων τύπων, είτε να εκλεγούν τιμές προς την πλευρά της ασφαλείας.

I.5 Η ΚΑΜΠΥΛΗ ISO « ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΙΩΝ-ΧΡΟΝΟΣ»

Ο σχεδιασμός δομικών στοιχείων έναντι πυρκαγιάς βάσει των Κανονισμών των περισσότερων κρατών, έχει στηριχθεί σε πειραματικά αποτελέσματα ανθεκτικότητας σε μια πρότυπη πυρκαγιά. Από τις διάφορες πρότυπες πυρκαγιές που υπάρχουν, η συχνότερα χρησιμοποιούμενη σήμερα είναι η ISO Standard 834.

Σ' αυτή την πρότυπη πυρκαγιά, τα δοκίμια εκτίθενται σε μια θερμοκρασία η οποία μεταβάλλεται με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$T-T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$,

όπου t : χρόνος [min]

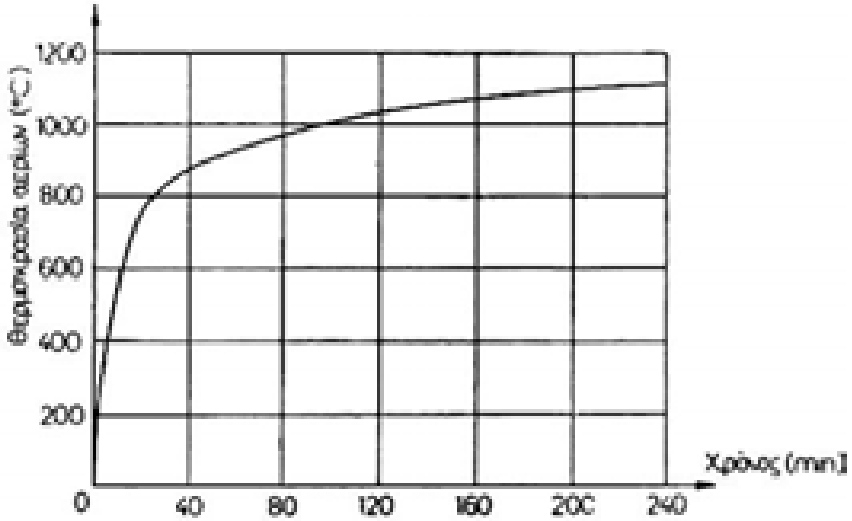
T : θερμοκρασία φούρνου τη χρονική στιγμή t [^oC]

T_0 : θερμοκρασία φούρνου τη χρονική στιγμή t = 0 [^oC].

Παρ' όλο που η καμπύλη T-t της ISO 834 (κατά το Σχήμα I.6) έχει αρκετά μειονεκτήματα, αποτελεί την περισσότερο χρησιμοποιούμενη σήμερα καμπύλη αυτού του είδους.

Υπενθυμίζεται, πως η καμπύλη ISO T-t (ή άλλες κανονιστικές) ισχύει μόνο για τον σχεδιασμό στοιχείων, έναντι «πρότυπης» πυρκαγιάς, και όχι για την αποτίμηση της συμπεριφοράς καμμένων κτιρίων και στοιχείων.

Ακόμη, δε, και για τον σχεδιασμό, υπενθυμίζεται πως μέσα στους φούρνους δοκιμών παρατηρούνται διαφορές (έως και έντονες) θερμοκρασιών του αέρα, καθώς και της επιφάνειας των δοκιμίων, οι οποίες εξαρτώνται <u>καί</u> από το μέγεθος (φούρνου και δοκιμίου) <u>καί</u> από τα θερμικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου.



Σχήμα I.6 Η καμπύλη ISO 834 «θερμοκρασία αερίων-χρόνος». [1]

I.6 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Το επόμενο βήμα μετά την εύρεση της καμπύλης T-t μέσα σε ένα πυροδιαμέρισμα, θα ήταν ο υπολογισμός της κατανομής των θερμοκρασιών μέσα στη μάζα των στοιχείων, τα οποία το περικλείουν. Αυτή όμως είναι μια ιδιαίτερα επίπονη εργασία που πραγματοποιείται με τη βοήθεια λογισμητή, επιλύοντας διαφορικές εξισώσεις με δεδομένα τις τιμές της καμπύλης T-t που έχει ήδη υπολογιστεί.

Για να αποφευχθεί στην πράξη όλη αυτή η δύσκολη διαδικασία επιλύσεων, έχει επινοηθεί μια διαδικασία μετατροπής οποιασδήποτε πυρκαγιάς, σε μια πυρκαγιά ISO 834 κάποιας συγκεκριμένης «ισοδύναμης» χρονικής διάρκειας. Έτσι, μετά την μετατροπή αυτή, είναι εύκολο να υπολογισθεί η κατανομή των θερμοκρασιών στη μάζα των στοιχείων, βάσει των διατιθέμενων βοηθημάτων. (βλ. και στα επόμενα)

Ως <u>ισοδύναμος χρόνος</u> εκθέσεως στην πρότυπη πυρκαγιά ISO 834 (ή απλά «ισοδύναμος χρόνος») ορίζεται εκείνος ο χρόνος εκθέσεως σε καμπύλη ISO 834, ο οποίος θα προκαλούσε στα δομικά στοιχεία τα ίδια μηχανικά αποτελέσματα με την πραγματική πυρκαγιά στην οποία αναμένεται ότι θα υποβληθούν. (π.χ. την ίδια μείωση ορίου διαρροής, δηλ. την ίδια μέγιστη θερμοκρασία, στον οπλισμό μιας δοκού σιδηροπαγούς σκυροδέματος). Υπάρχει μια απλή έκφραση ευρέσεως του ισοδύναμου χρόνου σε ένα πυροδιαμέρισμα δεδομένου τύπου, του οποίου είναι γνωστές οι διαστάσεις, ο συντελεστής ανοίγματος και η πυκνότητα καυσίμου φορτίου q_f :

$$t_e = 0{,}067 \frac{K_f \bullet q_f \bullet A_f}{A_t \left[\left(\frac{A_0\sqrt{h}}{A_t}\right)_f\right]^{1/2}},$$

όπου t_e : ισοδύναμος χρόνος [min]

K_f : συντελεστής τύπου πυροδιαμερίσματος

q_f : πυκνότητα καυσίμου φορτίου [MJ/m^2]

A_f : επιφάνεια κατόψεως του πυροδιαμερίσματος [m^2]

A_t : συνολικό εσωτερικό εμβαδόν όλων των επιφανειών που περικλείουν το πυροδιαμέρισμα, συμπεριλαμβανομένων και των ανοιγμάτων [m^2]

A_0 : ολική επιφάνεια των ανοιγμάτων [m^2]

h : ύψος των ανοιγμάτων [m^2].

Ο τύπος αυτός παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για κατασκευές από χάλυβα και για δοκούς από Ο.Σ.. Ισχύουν και εδώ οι ίδιοι περιορισμοί όσον αφορά τις διαστάσεις του πυροδιαμερίσματος, που εξετάστηκαν στην §Ι.4.

Δεν είναι γνωστή όμως η ακρίβεια που παρέχει αυτός ο τύπος για άλλου είδους δομικά στοιχεία όπως υποστυλώματα, πλάκες, τοιχία κ.λπ.. Η χρήση του για τέτοιου είδους δομικά στοιχεία εισάγει μια πρόσθετη αβεβαιότητα στον σχεδιασμό, την οποία πρέπει απαραίτητα να έχει υπόψη του ο Μηχανικός.

Ι.7 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Ως «ανθεκτικότητα» μιας κατασκευής ορίζεται ο απαιτούμενος χρόνος εκθέσεως στην πυρκαγιά ISO 834 πριν η κατασκευή απωλέσει την ικανότητά της να φέρει φορτία και να υφίσταται ανεκτές παραμορφώσεις.

Η παραπάνω σκέψη μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη εξίσωση : $t_{ev.} - t_{re.} \geq 0$,

όπου $t_{ev.}$: ο εκτιμώμενος χρόνος εκθέσεως σε πυρκαγιά ISO 834, χωρίς το δομικό στοιχείο να απωλέσει την αντοχή του

$t_{re.}$: ο απαιτούμενος χρόνος εκθέσεως του δομικού στοιχείου στην πυρκαγιά ISO 834, λόγω της χρήσεώς, του τύπου και του καυσίμου υλικού που περιέχεται στο πυροδιαμέρισμα στο οποίο ανήκει το δομικό στοιχείο που εξετάζουμε.

Ο απαιτούμενος χρόνος, $t_{re.}$, δεν είναι άλλος από τον ισοδύναμο χρόνο εκθέσεως σε πυρκαγιά ISO 834. Είναι γνωστή δε η μέθοδος υπολογισμού του.

Ασφαλές κατά την παραπάνω σχέση θα είναι ένα δομικό στοιχείο, εάν μπορεί να αντέξει σε τυποποιημένη πυρκαγιά της προβλεπόμενης διαρκείας, χωρίς μείωση της μηχανικής του αντοχής.

I.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

Στα επόμενα, δίνονται λίγες εισαγωγικές και χαρακτηριστικές φωτογραφίες βλαβών σε κτίρια από πυρκαγιές, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό τους (δασικές).

Πυρκαγιά σε μεγάλο κτίριο Ο.Σ. (πολυκατάστημα), μερική κατάρρευση (και βαριές βλάβες). [4]

Δασικές πυρκαγιές και κτίρια στα όρια οικισμών. [4]

Η ξύλινη στέγη έχει καεί και καταρρεύσει, όπως και το πάτωμα στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ γύρω του διατηρείται η εξωτερική πυρκαγιά, ακόμη και μετά από ώρες. [4]

Παρά την κατάκαυση και πτώση στεγών, δωμάτων κ.λπ., η φωτιά «δεν πέρασε» στο εσωτερικό των κτιρίων, λόγω πλακών Ο.Σ.. [4]

I.9 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Θ.Π. Τάσιος, Γ. Δεοδάτης, "Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα έναντι Πυρκαγιάς", Εργαστήριο Ω.Σ./ Ε.Μ.Π., σελ. 3-17 και 58-62, Αθήνα, 1984.

[2] CEB, "Fire Design of Concrete Structures", Bulletin d' Information No. 145/1982, No. 174/1986 και No. 208/1991.

[3] ISO, "Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction", ISO 834.

[4] Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών Μ. Χρονόπουλου, από παλαιότερες αλλά και από τις πρόσφατες πυρκαγιές του 2007 στις περιοχές των Νομών Ηλείας, Αρκαδίας και Ευβοίας.

II. Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

II.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα πρώτα και κύρια βήματα κατά την διαδικασία αποτίμησης ενός κτιρίου μετά από πυρκαγιά είναι η εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν σε διάφορες περιοχές του κτιρίου (στο εσωτερικό του και στην εξωτερική περίμετρό του), καθώς και η εκτίμηση της διάρκειας της πυρκαγιάς. Όπως θα δειχθεί στο Κεφάλαιο ΙΙΙ του παρόντος Πρακτικού Οδηγού, αυτά τα στοιχεία είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της κατανομής των θερμοκρασιών στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων, καθώς και της επιρροής τους στα χαρακτηριστικά των υλικών, στα χαρακτηριστικά φέρουσας ικανότητας και παραμορφώσεων των δομικών στοιχείων και, κατά συνέπεια, για την αποτίμηση του δομήματος συνολικά.

Λόγω της μεγάλης σημασίας του θέματος, στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι παρατηρήσεις, καθώς και οι μετρήσεις που θα πρέπει να γίνουν από τον Μηχανικό επί τόπου, ώστε να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα αξιόπιστα στοιχεία. Πρέπει, βεβαίως, να αναφερθεί ότι πολλά από τα στοιχεία που περιγράφονται σε αυτό το Κεφάλαιο μπορεί να μην είναι στην διάθεση του Μελετητή Πολιτικού Μηχανικού, όταν αναλαμβάνει την σύνταξη μιας μελέτης πυρόπληκτου κτιρίου. Έτσι, για παράδειγμα, ο καθαρισμός του εσωτερικού ενός κτιρίου που έχει υποστεί πυρκαγιά, η απομάκρυνση των επιχρισμάτων και των καμμένων κουφωμάτων κ.λπ., αλλοιώνουν ή/και εξαφανίζουν στοιχεία μεγάλης σημασίας. Γι' αυτόν τον λόγο, οι σχετικές πληροφορίες θα πρέπει να έχουν συλλεγεί και καταχωρισθεί από τα Συνεργεία τα οποία πραγματοποιούν τον ταχύ οπτικό έλεγχο των κτιρίων μετά από πυρκαγιά ή από τον αρμόδιο Μηχανικό, πριν τις αποξηλώσεις και καθαιρέσεις.

II.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ T-t ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι καμπύλες θερμοκρασίας (αέρος) και χρόνου (T-t) για τις πραγματικές (εσωτερικές) πυρκαγιές κτιρίων και άλλων κατασκευών διαφέρουν από τις καμπύλες T-t τυπικών/ πρότυπων πυρκαγιών (π.χ. κατά ISO, DIN κ.λπ.), όπως αναπτύσσονται σε φούρνους δοκιμών.

Για τις πραγματικές (εσωτερικές) πυρκαγιές, και όπως παρουσιάστηκε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο Ι του παρόντος Πρακτικού Οδηγού, η εξέλιξη των μέγιστων θερμοκρασιών αέρος συναρτήσει του χρόνου, δηλ. οι καμπύλες T-t ($T = T_{αερ.}$), εξαρτώνται: (i) απ' τα χαρακτηριστικά του κάθε πυροδιαμερίσματος (μέγεθος/επιφάνεια και όγκος, τύπος/υλικά κελύφους και συντελεστής ανοιγμάτων/αερισμού), και (ii) απ' τα χαρακτηριστικά των καύσιμων υλικών (μάζα και κατανομή, βαθμός καύσης, τύπος/θερμαντική ικανότητα και χαρακτηριστικά/θερμοκρασίες αναφλέξεως).

Γενικώς, για εσωτερικές φωτιές (πυρκαγιές κτιρίων), οι τυπικές καμπύλες T-t παρουσιάζουν τρία (3), μάλλον διακριτά, χαρακτηριστικά στάδια :

Την επώαση (που λήγει με την ανάφλεξη μεγάλου μέρους των καύσιμων υλικών), την ανάπτυξη (κυρίως καύση, οπότε καίγεται το μεγαλύτερο ποσοστό υλικών, εμπειρικώς περίπου 60 %, με περίπου σταθερό ρυθμό/σταθερή ταχύτητα) και την απόσβεση (επίσης με περίπου σταθερό ρυθμό/σταθερή ταχύτητα).

Στα πιο αβέβαια στάδια της επώασης και της απόσβεσης (δηλ. στην αρχή και στο τέλος), οι φωτιές είναι συνήθως καυσιμο-ελεγχόμενες, ενώ στο κύριο στάδιο της ανάπτυξης (και της διάδοσης της φωτιάς σε άλλους χώρους) οι φωτιές είναι αερο-ελεγχόμενες (με περίπου σταθερή καύση/απώλεια μάζας των καύσιμων υλικών, αναλόγως της εισροής του αέρα/οξυγόνου).

Στα επόμενα παρατίθενται :

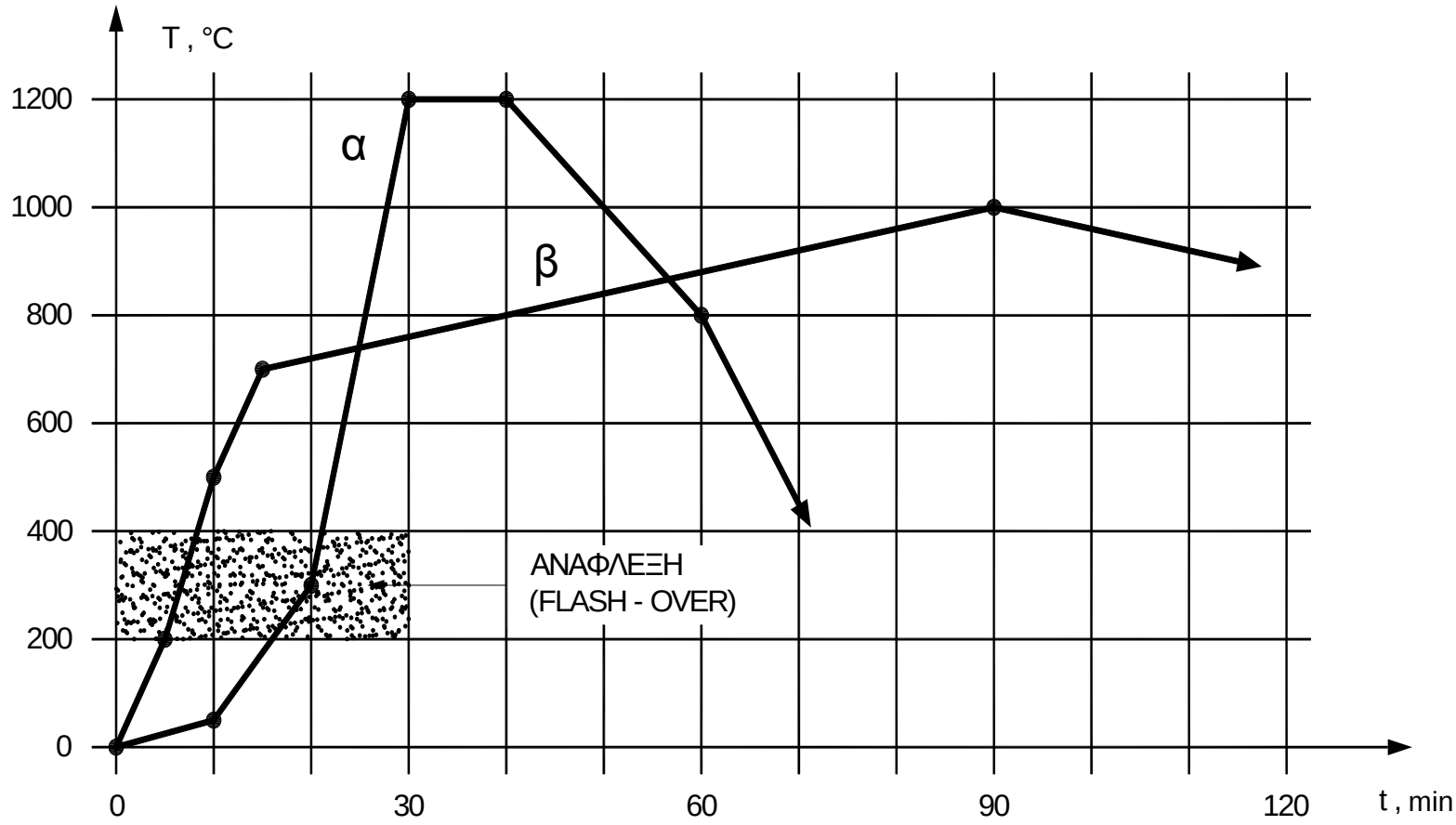
- Σχηματοποιημένες καμπύλες T-t (ενδεικτικές), για πυροδιαμερίσματα με πολλά ή λίγα ανοίγματα (βλ. Σχήμα II.1), δηλαδή για πυρκαγιές αερο-ελεγχόμενες ή καυσιμο-ελεγχόμενες.

- Καμπύλες («σχέσεις») T-t για τυπικές αλλά και πραγματικές πυρκαγιές οικοδομών (και άλλων κτιρίων) (βλ. Σχήμα II.2), με βάση καί ελληνικές παρατηρήσεις.

- Συγκριτικώς, καμπύλες T-t για τις (δυσμενέστερες όλων) εσωτερικές φωτιές σε σήραγγες (και συναφή έργα) (βλ. Σχήμα II.3).

Με βάση αυτές τις καμπύλες, αλλά και πλήθος παρατηρήσεων υπό πραγματικές πυρκαγιές, αναφέρεται πως οι μεγαλύτερες διαφορές και αποκλίσεις για τις μέγιστες θερμοκρασίες αέρος παρατηρούνται σε «μέσης» διάρκειας πλήρως αναπτυγμένες πυρκαγιές, της τάξεως των 30 ÷ 60 min.

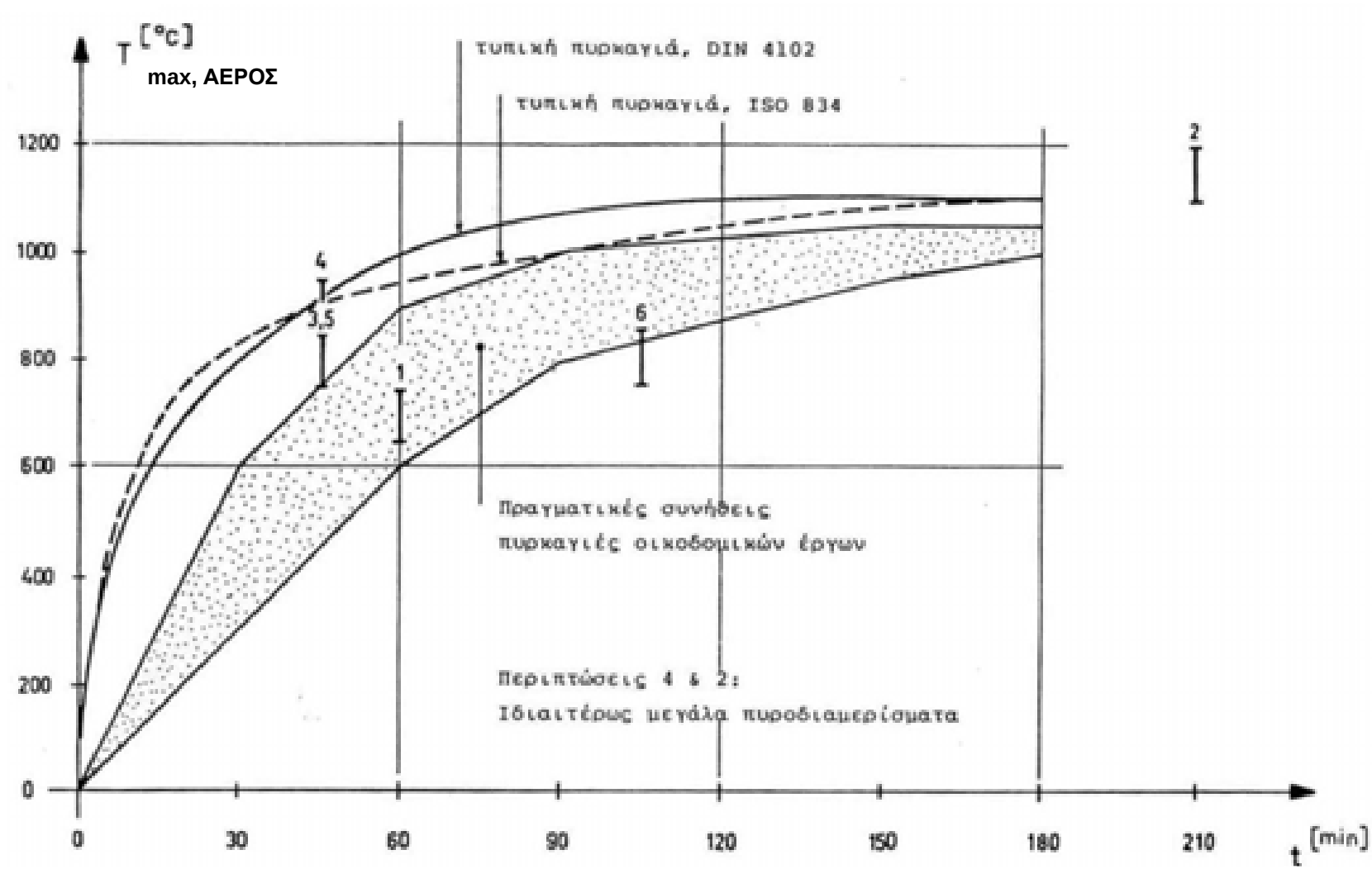
Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται συστηματικότερη και λεπτομερέστερη προσέγγιση του προβλήματος, καλύτερη διασταύρωση όλων των στοιχείων και βαθμονόμηση όλων των ενδείξεων.



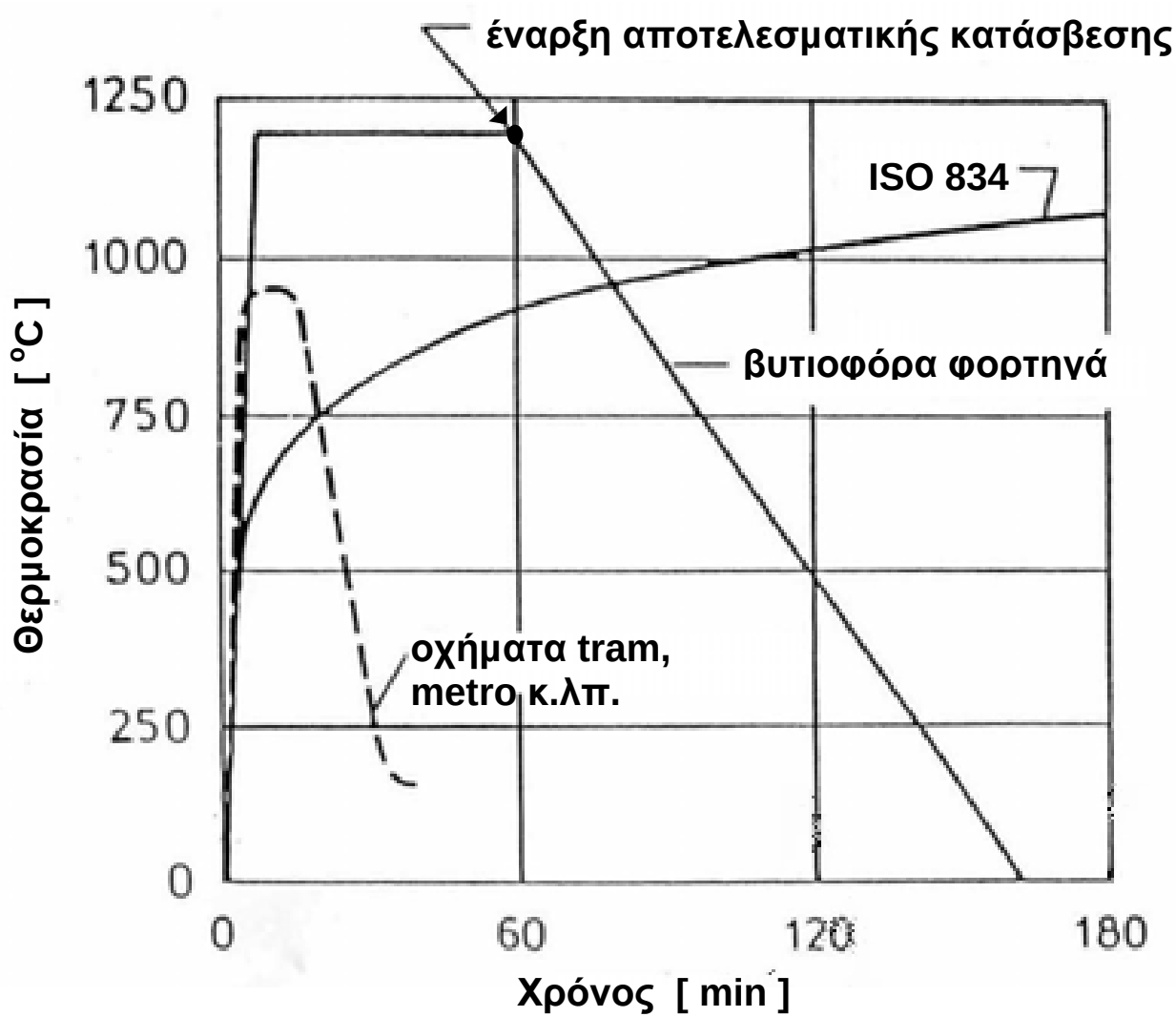
Σχήμα ΙΙ.1 Σχηματοποιημένες και ενδεικτικές τυπικές καμπύλες T-t

α : Πολλά ανοίγματα, αερο-ελεγχόμενη πυρκαγιά, καύση < 45 min, απόσβεση (βλ. §Ι.3.3) ~ 10 °C / min

β : Λίγα ανοίγματα, καυσιμο-ελεγχόμενη πυρκαγιά, καύση > 90 min, απόσβεση (βλ. §Ι.3.3) ~ 5 °C / min



Σχήμα ΙΙ.2 Σχέσεις T-t για «τυπικές» αλλά και πραγματικές πυρκαγιές, για 6 περιπτώσεις κτιρίων. (Μ. Χρονόπουλος – Χ. Σπανός, 1991) [1]



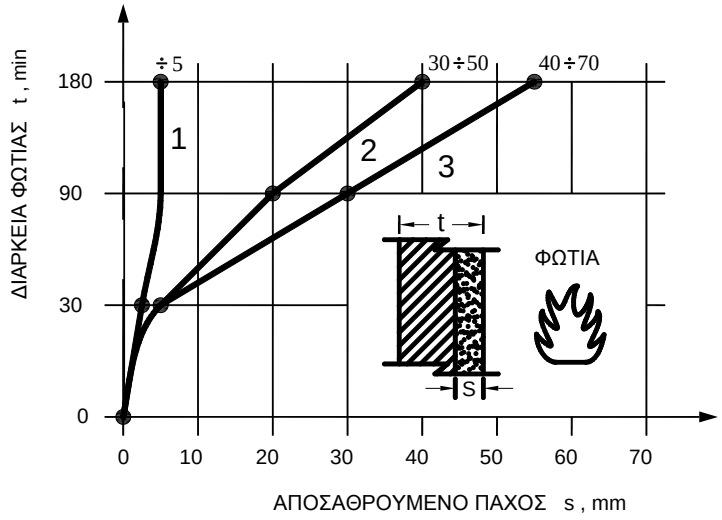
Σχήμα ΙΙ.3 Συγκριτικές καμπύλες T-t για εσωτερικές φωτιές σε σήραγγες.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, εκτιμήσεις του αποσαθρούμενου (υπό πυρκαγιά) πάχους τοίχων μπορούν να οδηγήσουν σε εκτιμήσεις της διάρκειας (και της θερμοκρασίας) της πυρκαγιάς.

Για τοιχοδομές από διάφορα υλικά (και διάφορα σκυροδέματα, πρακτικώς άοπλα), το προσβαλλόμενο και αποσαθρούμενο πάχος μπορεί προσεγγιστικώς να εκτιμηθεί βάσει του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα ΙΙ.4 (C. Meyer – Ottens, 1971) [2], για τυπικές αλλά <u>καί</u> πραγματικές πυρκαγιές, αναλόγως της διάρκειάς τους.

Σχετικώς, απαιτείται προσοχή στην εκτίμηση της διάρκειας μιας (εσωτερικής) πυρκαγιάς :

Είναι άλλη η διάρκεια των φλογών (t_ϕ), μετά την επώαση και την ανάφλεξη, και άλλη (αρκετά μεγαλύτερη) η συνολική διάρκεια της πυρκαγιάς (t_σ), η οποία αρχίζει με την έναυση (βλ. Κεφάλαιο Ι του παρόντος Πρακτικού Οδηγού). Συνήθως, η αρχική φάση της επώασης διαρκεί από λίγα λεπτά (π.χ. 5) έως και αρκετό χρόνο (π.χ. μισή ή και μία ώρα).



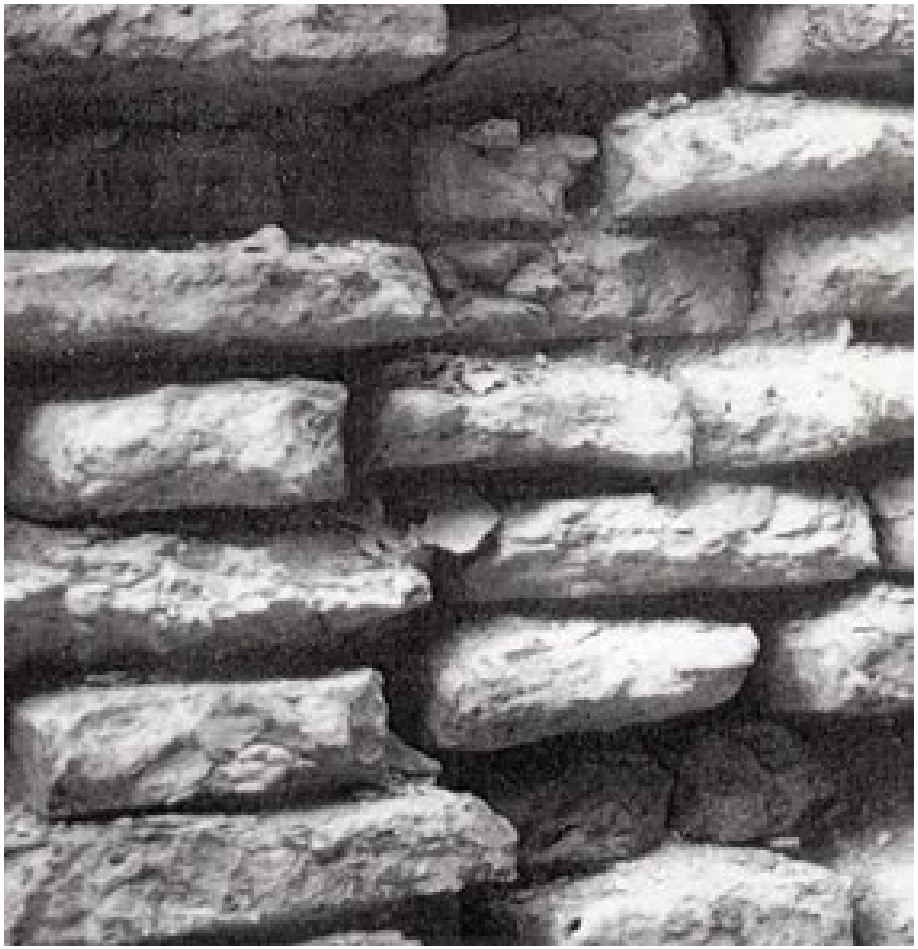
Σχήμα ΙΙ.4 Αποσαθρούμενο πάχος τοίχων, συναρτήσει της διάρκειας της φωτιάς. (C. Meyer – Ottens, 1971) [2]

1 : Πλίνθοι (καλοψημένες)

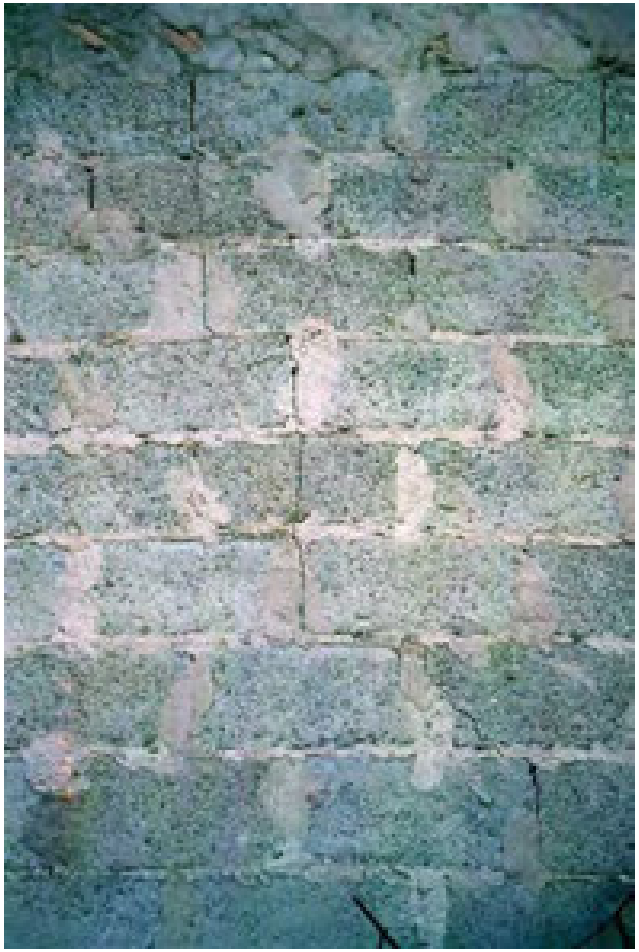
2 : Ασβεστόλιθοι και σκυροδέματα (πρακτικώς άοπλα)

3 : Διάφορα ελαφροσκυροδέματα (επίσης άοπλα)

Καμμένη πλάκα, εκτεταμένη αποσύνθεση σκυροδέματος και εκτεθειμένοι σιδηροπλισμοί (για t/T ≈ 75 min/ 700 ^{o}C, αποσάθρωση s ≈ 40mm). [8]



Καλοχτισμένη λιθοδομή, ρηγματώσεις και απολεπίσεις λιθοσωμάτων, αποσύνθεση κονιάματος σε μεγάλο βάθος (για t/T ≈ 90 min/ 900 ^{o}C, αποσύνθεση κονιάματος s ≈ 50mm). [8]



Άκαυτη πλευρά τσιμεντολιθοδομής, θραύση λίθων, ρωγμή τοίχου, ελαφριά κύρτωση. [8]

Καμμένη πλευρά τσιμεντολιθοδομής, αποσύνθεση λίθων/ κονιάματος (σε βάθος λίγων mm). [8]

II.3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Σχετικώς, περιγράφονται συνοπτικότατα οι συνθήκες και τα δεδομένα της τοπικής πυρκαγιάς (στην περιοχή του κτιρίου, καί στο εσωτερικό του), με κύριο σκοπό να εκτιμηθούν :

- Η ένταση του φαινομένου, και
- Η κρίσιμη διάρκειά του,

προκειμένου να χρησιμεύσουν για την αδρομερή εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν στον αέρα και στα δομικά στοιχεία.

Προς τούτο, αρκεί να συμπληρωθούν (κατά το δυνατόν) οι Πίνακες ΙΙ.1 και ΙΙ.2, με βάση υπεύθυνες και αξιόπιστες πληροφορίες χρηστών, κατοίκων και περιοίκων.

Πίνακας ΙΙ.1 Εξωτερική πυρκαγιά.

Πυκνότητα φυτείας κοντά στο κτίριο			**Απόσταση φυτείας από το κτίριο**			**Διάρκεια φλογών (min)**		
Μεγάλη	Μέτρια	Μικρή	<10m	~20m	>30m	>60	60÷30	<30

Πίνακας ΙΙ.2 Εσωτερική πυρκαγιά.

Χρήση κτιρίου (καύσιμη ύλη)			**Διάρκεια φλογών (min)**			**Συμπεριφορά στέγης**		
Αποθήκες	Καταστήματα, Βιοτεχνίες	Γραφεία, Κατοικίες	>60	60÷30	<30	Κατέρρευσε και κάηκε	Κατέρρευσε αλλά δεν κάηκε	Διατηρήθηκε με ή χωρίς βλάβες

Παρατήρηση :

Στις δασικές πυρκαγιές κοντά σε οικισμούς, οι μέγιστες θερμοκρασίες αέρος ($T_{αερ.}$) μπορεί να διαφέρουν έντονα από θέση σε θέση γύρω από ένα κτίριο, ακόμη και μικρό, ενώ δεν είναι ασυνήθη τα φαινόμενα «θερμικής σκιάς», με διαφορές θερμοκρασίας αρκετών εκατοντάδων ^{o}C (βλ. χαρακτηριστικές φωτογραφίες).

Αντιθέτως, στις εσωτερικές φωτιές κτιρίων (κάθε είδους), οι μέγιστες θερμοκρασίες αέρος ($T_{αερ.}$) που αναπτύσσονται σε ένα συνηθισμένο πυροδιαμέρισμα (π.χ. μεγάλο δωμάτιο, μικρή αποθήκη), είναι περίπου σταθερές για πλήρως αναπτυγμένη πυρκαγιά, με διαφορές από θέση σε θέση που συνήθως δεν ξεπερνούν τους 200 ^{o}C. Αντιστοίχως, και οι διαφορές που παρατηρούνται στις μέγιστες θερμοκρασίες των επιφανειών/ των παρειών των δομικών στοιχείων ($T_{παρ.}$), είναι συνήθως μικρές.

Τέλος, υπενθυμίζεται πως η σχέση θερμοκρασίας – χρόνου (T-t, T = $T_{αερ.}$ ή $T_{παρ.}$) <u>ΔΕΝ</u> είναι ορισμένη και μονοσήμαντη για <u>πραγματικές πυρκαγιές</u>, σε αντίθεση με τυπικές πυρκαγιές, σε «φούρνους» (π.χ. κατά ISO, DIN κ.λπ.), όπου <u>καί</u> σε αυτούς παρατηρούνται διαφοροποιήσεις (αναλόγως μεγέθους φούρνου, μεγέθους και θερμοχωρητικότητας δοκιμίου κ.λπ.).

Τα γύρω δένδρα έχουν μόνο εν μέρει καεί (μάλλον ελαφρώς), ενώ η στέγη έχει καεί και καταρρεύσει. [8]

Στον εξωνάρθηκα, πρόχειρο ξύλινο υπόστεγο με τέντες από nylon έχει παραμείνει σχεδόν άθικτο. [8]

Στο εσωτερικό της εκκλησίας, σπασμένα κεραμίδια και αποκαΐδια της ξύλινης στέγης. [8]

Φαινόμενο έντονης «θερμικής σκιάς». [8]

Αριστερά : $T_{παρ.} \longrightarrow 500\,^{o}C$ (για $t < 15min$), όπως παρατηρείται από την καύση ξύλινων στοιχείων και την προσβολή των επιχρισμάτων.

Δεξιά : $T_{παρ} \leq 200\,^{o}C$, βλ. χαρακτηριστική φωτογραφία με την πλαστική υδρορρόη (από PVC), η οποία έχει απλώς παραμορφωθεί.

II.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Για τους σκοπούς αυτού του Πρακτικού Οδηγού, η εκτίμηση των εξωτερικών θερμοκρασιών μπορεί να γίνει με συνδυασμό στοιχείων και δεδομένων. Προς τούτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες των ενοτήτων §II.4.1 και §II.4.2.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αναλόγως της χρήσης του κτιρίου, οι μέγιστες θερμοκρασίες αέρος που αναπτύσσονται κατά τις (πλήρεις) πυρκαγιές, μπορούν να φθάσουν τιμές κατά τον Πίνακα II.3 (R. Rybicki, 1979) [3].

Πρακτική σημασία έχει και η εξής παρατήρηση :

Για (πλήρεις) πυρκαγιές, κτιρίων με max. ΙΒΚΞ ≈ 250 kg/m², δηλ. συνήθως για κατοικίες, γραφεία, βιοτεχνίες, εργοστάσια και καταστήματα (όχι αποθήκες), η θερμοκρασία αέρος μπορεί να εκτιμηθεί με την ημιεμπειρική σχέση :

max. $T_{\alpha\varepsilon\rho.} \approx 50 \sqrt{t\,(\mathrm{min})} + 500$ (σε °C) ,

για t > 15 min (διάρκεια φλογών) και T < 1000 °C.

(Π.χ. t ≈ 30 min → $T_{\alpha\varepsilon\rho.}$ ≈ 775 °C, t ≈ 90 min → $T_{\alpha\varepsilon\rho.}$ ≈ 975 °C)

Πίνακας II.3 Ενδεικτικές τιμές μέγιστων θερμοκρασιών αέρος, ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου. (R. Rybicki, 1979) [3]

Χρήση	**$T_{\alpha\varepsilon\rho.}$, °C**	**Συνέπειες**
Κατοικίες, Γραφεία	800 ÷ 900	Έντονες αποφλοιώσεις, έντονες λοξές ρωγμές
Αποθήκες με πολλά και αναφλέξιμα υλικά	800 ÷ 1000	Όπως πριν, σε μεγάλη έκταση
Αποθήκες με πολύ εύφλεκτα υλικά	1000 ÷ 1200	Όπως πριν, σύν τήξεις υλικών

II.4.1 Ποιοτικά κριτήρια

Χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της γενικής συνοπτικής περιγραφής της πυρκαγιάς (βλ. §II.3). Σχετικώς, θα μπορούσαν να εκτιμηθούν τρείς (ή το πολύ τέσσερις) κλάσεις θερμοκρασιών (αέρος, $T_{\alpha\varepsilon\rho.}$) με βάση τα γενικά δεδομένα της §II.3, αλλά και τις τοπικές ενδείξεις από υλικά που κάηκαν, κατά τα αμέσως επόμενα.

II.4.2 Ποσοτικά κριτήρια

Εντοπίζονται διάφορα συνηθισμένα και χαρακτηριστικά υλικά κοντά ή πάνω στα δομικά στοιχεία. Η έναντι πυρκαγιάς συμπεριφορά τους (βεβαίως, αναλόγως με τη θέση τους και τον βαθμό έκθεσής τους), δίνει αξιόπιστες ενδείξεις μέγιστης θερμοκρασίας αέρος, <u>κοντά</u> ή <u>πάνω</u> στην επιφάνεια (στις παρειές) των δομικών στοιχείων.

Προς τούτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πρακτικές πληροφορίες κατά τον Πίνακα II.4.

Πίνακας ΙΙ.4 Αλλοιώσεις και φθορές συνηθισμένων υλικών υπό πυρκαγιά.

Α) Απολεπίσεις, αποφλοιώσεις, αποκολλήσεις και εκτινάξεις επιφανειακών στοιβάδων σκυροδέματος και συμπαγών λίθων, πλίνθων κ.λπ.

Ο τύπος, η ένταση και η έκτασή τους εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, βλ. και ιδιαίτερη Σημείωση 1.
Έτσι, δεν είναι ευχερής η άμεση και ευθεία εξάρτηση του φαινομένου από τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.

Β) Χρωματικές αλλαγές

Συνήθεις σε σκυροδέματα (καί με πυριτιακά καί με ασβεστολιθικά αδρανή), αλλά και σε επιχρίσματα (αν δεν αποκολληθούν), αναλόγως της θερμοκρασίας παρειάς ($T_{παρ.}$), ως εξής :

- Για $T_{παρ.} < 300\ ^oC$
  Φυσιολογικό χρώμα σκυροδέματος (γκρί-πράσινο),
  και καπνιά (αρκετή)
- Για $300\ ^oC < T_{παρ.} < 600\ ^oC$
  Ροζ (ελαφρό), και καπνιά (αρκετή)
- Για $600\ ^oC < T_{παρ.} < 900\ ^oC$
  Γκρί (-άσπρο), και καπνιά (αρκετή)
- Για $T_{παρ.} > 900\ ^oC$
  Φαιό, κίτρινο (ελαφρό, κιτρινωπό).

Γ) Μεταβολές δομής (και όγκου και άλλων χαρακτηριστικών)

Τα πυριτιακά αδρανή υφίστανται μεταβολές δομής στους 550 ^{o}C και 850 ^{o}C (περίπου), ενώ τα ασβεστολιθικά αδρανή υφίστανται ασβεστοποίηση στους 750 ^{o}C (περίπου).

Μεταβολές δομής υπό υψηλές θερμοκρασίες υφίσταται και ο χάλυβας οπλισμών (π.χ. ωστενίτης, στους 750 ^{o}C περίπου, με έντονη συστολή). Σχετικώς, βλ. και Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (ΚΤΧ 2008) [4].

Δ) Αλλοιώσεις και τήξεις υλικών

- Χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC)
  Έναρξη αποσύνθεσης στους 125 ^{o}C (περίπου), ανάφλεξη (350 ^{o}C) και έκλυση ατμών HCℓ (με ενδεχόμενους κινδύνους)
- Ελαστικά και πλαστικά
  Αλλοιώσεις στους 100 ÷ 150 ^{o}C, τήξη στους 150 ÷ 250 ^{o}C
- Μόλυβδος
  Τήξη στους 300 ÷ 350 ^{o}C, και από τους 150 ^{o}C για κράματα Pb/Sn
- Ψευδάργυρος
  Τήξη στους 400 ÷ 450 ^{o}C, και από τους 350 ^{o}C για κράματα
- Αλουμίνιο
  Τήξη στους 650 ^{o}C (περίπου), και από τους 500 ^{o}C για κράματα
- Άργυρος
  Τήξη στους 950 ^{o}C (περίπου)

- Μπρούντζος, κρατέρωμα (Cu/Sn)
  Τήξη στους 850 ÷ 950 ^{o}C
- Ορείχαλκος (Cu/Zn)
  Τήξη στους 900 ÷ 1050 ^{o}C
- Χρυσός
  Τήξη στους 1050 ^{o}C (περίπου)
- Χαλκός
  Τήξη στους 1050 ÷ 1100 ^{o}C
- Χυτοσίδηρος και χάλυβας (με αρκετόν C)
  Τήξη από τους 1150 ^{o}C (περίπου), έως και τους 1350 ^{o}C
- Σίδηρος (καθαρός)
  Τήξη στους 1500 ^{o}C
- Σκυρόδεμα
  Τήξη στους 1600 ^{o}C
- Γυαλί (SiO_2, με Ca, Na, Aℓ και Fe, K, Pb κ.λπ.)
  Παραμόρφωση στους 600 ÷ 700 ^{o}C και
  τήξη στους 750 ÷ 950 ^{o}C, βλ. και ιδιαίτερη Σημείωση 2
- Μαγειρικό αλάτι, μαγειρική σόδα
  Τήξη στους 800 ÷ 850 ^{o}C (περίπου)

Ε) Καύση ξύλου

Για χοντρές διατομές (π.χ. με πάχος μεγαλύτερο των 100 mm), και αναλόγως του είδους, της πυκνότητας και της υγρασίας, η καύση (για πλήρως αναπτυγμένη πυρκαγιά) γίνεται με ταχύτητα της τάξεως των 25 ÷ 60 mm την ώρα (για πεύκο ή έλατο).

<u>Σημείωση 1</u> : Για τις αποκολλήσεις και εκτινάξεις επιφανειακών στοιβάδων σκυροδέματος (spalling)

Το υπόψη φαινόμενο, διαφορετικό απ' αυτό των αποκολλήσεων των επιχρισμάτων, παρατηρείται γενικώς είτε στα πρώτα στάδια έντονης πυρκαγιάς (π.χ. στα πρώτα 30min) είτε κατά την απότομη απόψυξη (θερμικό σοκ, με νερό), και είναι συνήθως εκρηκτικό.

Συμβαίνει σε πλάκες και τοιχεία, καθώς και σε λεπτά γραμμικά στοιχεία υπό υψηλή καταπόνηση, σε δοκούς (κυρίως στις στηρίξεις και εδράσεις) και σε στύλους.

Ο τύπος, η ένταση (το βάθος, από λίγα mm έως και αρκετά cm) και η έκταση των αποκολλήσεων (από αρκετά cm^2 έως και λίγα m^2) εξαρτάται απ' τις θερμοκρασίες και τη διάρκεια της πυρκαγιάς, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (τα αδρανή, το πορώδες και την υγρασία) και του δομικού στοιχείου καθ' εαυτό (λεπτομέρειες όπλισης, πάχος και διατομή, έκθεση, καταπόνηση).

Εκ προοιμίου επισημαίνεται πως οι αποκολλήσεις συνιστούν ιδιαίτερο κίνδυνο :
Αφενός μπορεί να συνεπάγονται έντονη (και βεβαίως απότομη) απομείωση των διατομών (σκυροδέματος), και αφετέρου οδηγούν σε πρόωρη έκθεση των οπλισμών και του εσωτερικού των δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίστοιχα φαινόμενα, υπό υψηλές θερμοκρασίες, παρατηρούνται και σε συμπαγείς λίθους, πλίνθους κ.λπ., με ιδιαίτερο κίνδυνο (π.χ. βαριάς αστοχίας και καταρρεύσεως) για κίονες, πεσσούς κ.λπ. υπό υψηλή θλιπτική καταπόνηση.

<u>Σημείωση 2</u> : Για την συμπεριφορά των υαλοπινάκων (κάθε είδους)

Για την συμπεριφορά του γυαλιού στην πυρκαγιά (παραμόρφωση, τήξη), δόθηκαν στοιχεία στον Πίνακα ΙΙ.4, ενώ η συμπεριφορά των υαλοπινάκων καθ' εαυτούς εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως το είδος και η ποιότητα των γυαλιών, το πάχος και οι διαστάσεις των φατνωμάτων, η διάταξή τους (κατακορύφως ή οριζοντίως), οι λεπτομέρειες των περιμετρικών στηρίξεων και σφραγισμάτων, η εν θερμώ συμπεριφορά της κόλλας και των ενδεχόμενων μηχανικών στηριγμάτων κ.λπ.

Σχετικώς, αναφέρεται πως οι συνδυασμένες διαφορές (μέσα – έξω) πίεσης και θερμοκρασίας υπό πυρκαγιά (εσωτερική ή εξωτερική) οδηγούν σε πρόωρη και εκρηκτική αστοχία των (άοπλων, συνήθως) υαλοπινάκων, ακόμη και για θερμοκρασία μικρότερη ή αρκετά μικρότερη των 250 ^{o}C, που είναι η θερμοκρασία ανάφλεξης των περισσότερων και συνηθέστερων υλικών.

Έτσι, όλοι οι συνήθεις τύποι (άοπλων) υαλοπινάκων, σε φατνώματα συνήθων διαστάσεων, με απλά/μονά γυαλιά ή γυαλιά διπλά/με «κενό» ή γυαλιά σύνθετα/triplex (laminated, με εσωτερική μεμβράνη), παρουσιάζουν πρόωρη, σχετικώς, ρηγμάτωση και θραύση υπό υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μόνον ειδικά γυαλιά («ασφαλείας»/securit, με ειδική θερμική κατεργασία/σκλήρυνση – βαφή, tempered/toughened), σε ειδικά πλαισιώματα υαλοστασίων και με ειδικό σχεδιασμό/ειδική μελέτη, μπορούν να παρουσιάσουν αυξημένη πυραντίσταση.

Στην κατηγορία των «πυρασφαλών» γυαλιών, περιλαμβάνονται (i) οι «πυρίμαχοι» υαλοπίνακες (για βιομηχανικές εφαρμογές), με ειδική σύσταση και ειδική παραγωγή, χωρίς ρηγμάτωση ακόμη και για T ≈ 750 ^{o}C, και (ii) οι «πυράντοχοι» υαλοπίνακες (για οικοδομικές εφαρμογές), επίσης ειδικοί, οπλισμένοι ή όχι, που ικανοποιούν τα κριτήρια φέρουσας ικανότητας και ακεραιότητας, ή και (πυρο-)μόνωσης, για φωτιές ακόμη και 120 min (T > 1000 ^{o}C).

Οι οπλισμένοι υαλοπίνακες, με βροχίδες συρμάτινων πλεγμάτων 12,5 ή 25,0 mm, μπορεί να είναι κοινοί (με μή-λειασμένες επιφάνειες) ή μορφής κρυστάλλου (με επίπεδες και λείες επιφάνειες), ενώ γενικώς παρουσιάζουν μικρότερες μηχανικές αντοχές έως και κατά 25% έναντι των αντίστοιχων άοπλων γυαλιών και ταχύτερη ρηγμάτωση υπό πυρκαγιά.

Αντιθέτως, λόγω του ενσωματωμένου πλέγματος, παρουσιάζουν καλύτερη φέρουσα ικανότητα αλλά και «ακεραιότητα», έναντι φλόγας, καπνού κ.λπ.

Τέλος, για λόγους διαφορικής διάγνωσης σε πυρκαγιά, αναφέρονται και τα εξής χαρακτηριστικά :

(i) Θόλωμα/θάμπωμα σύνθετων υαλοπινάκων (triplex), σε χαμηλές σχετικώς θερμοκρασίες, από (100 ÷ 150) ^{o}C, λόγω της αλλοίωσης των εσωτερικών μεμβρανών τους (συνήθως από PVB).

(ii) Έντονη ρηγμάτωση, παραμόρφωση και κατάπτωση (ακόμη και πάνω στις ποδιές/στα περβάζια) υαλοπινάκων με εγκιβωτισμένο συρμάτινο πλέγμα (οπλισμένων), σε υψηλές θερμοκρασίες, από (550 ÷ 600) ^{o}C.

Εκτός των προηγούμενων πρακτικών πληροφοριών, για την εκτίμηση της $T_{αερ.}$ και της $T_{παρ.}$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες ενδείξεις, κατά τα επόμενα.

Όλα τα συνήθη καιόμενα στερεά σώματα παρουσιάζουν διάφορα χαρακτηριστικά χρώματα πυρακτώσεως, αναλόγως της θερμοκρασίας, κατά τον Πίνακα II.5.

Πίνακας II.5 Χαρακτηριστικά χρώματα πυρακτώσεως, αναλόγως της θερμοκρασίας του καιόμενου στερεού σώματος. (R. Rybicki, 1979) [3]

Χρώμα πυρακτώσεως	**Θερμοκρασία σε ^oC**
• Στο σκοτάδι, κόκκινο	περίπου 500
• Κόκκινο βαθύ	700
• Βαθύ βυσσινί	800
• Βυσσινί	900
• Ανοιχτό κόκκινο	1000
• Βαθύ πορτοκαλί	1100
• Ανοιχτό πορτοκαλί	1200
• Ερυθρόλευκο	1300
• Ισχυρά λευκοπυρωμένο	1350
• Αστραφτερό λευκό	1500

Επίσης, και οι φλόγες των (συνηθισμένων) καύσιμων υλικών έχουν χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, κατά τον Πίνακα II.6, χρήσιμο σε περιπτώσεις που οι φλόγες έγλειφαν δομικά στοιχεία (για αρκετό χρονικό διάστημα).

Πίνακας II.6 Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες φλογών καύσιμων υλικών. (R. Rybicki, 1979) [3]

Καύσιμο	**Θερμοκρασία σε ^oC**
• Πολυστερόλη	1100 ÷ 1150
• Βενζίνη, πετρέλαιο, ορυκτέλαιο	1200 ÷ 1300
• Ελαστικό, καουτσούκ	1200
• Ξύλο πεύκου και έλατου	1100
• Υγροποιημένα αέρια	1500

Χρήσιμες λεπτομερέστερες ενδείξεις σχετιζόμενες με τις αλλοιώσεις των υλικών και τις μεταβολές της δομής τους είναι και οι ακόλουθες :

- **<u>Γύψος</u>** (ορυκτή, $CaSO_4 . 2H_2O$ (κρυσταλλικό)+ελεύθερο νερό)

~ 100 ^oC (–)	Εξάτμιση ελεύθερου νερού
~ 200 ^oC (–)	Εξάτμιση κρυσταλλικού νερού
~ 350 ^oC	$CaSO_4$ διαλυτό → αδιάλυτο
~ 1250 ^oC	$CaSO_4 \rightarrow CaO + SO_3$

Ακόμη και οι πυράντοχες γυψοσανίδες (συνήθως με πρόσμιξη διογκωμένου περλίτη και οπλισμένες με ίνες γυαλιού ή υαλοϋφάσματα), παρουσιάζουν έντονη αλλοίωση και έναρξη τήξης στους 700 ^oC (περίπου), οπότε έχει πλήρως εξατμισθεί όλο το κρυσταλλικό νερό και έχει αρχίσει η τήξη των γυάλινων ινών.

Σε υψηλές θερμοκρασίες, παρατηρείται μείωση του πάχους των συνηθισμένων γυψοσανίδων, αποσύνθεση και πτώση της «πούδρας» της άνυδρης γύψου.

Σχετικώς, έχει παρατηρηθεί πως θραύση τμήματος καμμένης γυψοσανίδας μπορεί να οδηγήσει σε εκτίμηση του βάθους της μεταβατικής ζώνης μεταξύ της μαλακής άνυδρης γύψου (πούδρας, σκόνης) και της σκληρής ένυδρης γύψου.

Το φαινόμενο της προσβολής της γύψου εξελίσσεται, για συνηθισμένες γυψοσανίδες, με ρυθμό της τάξεως του 0,5 mm/min, ενώ (όπως ήδη αναφέρθηκε) η καύση του ξύλου γίνεται με ταχύτητα περίπου 0,7 mm/ min.

- **<u>Σκυρόδεμα</u>** <u>(ή τσιμεντοκονία) με **ασβεστολιθικά αδρανή**</u>

~ 100 ^oC (–)	Εξάτμιση ελεύθερου νερού
~ 500 ^oC	Εξάτμιση κρυσταλλικού νερού
~ 750 ^oC	Εξάτμιση κρυσταλλικού νερού
~ 750/800 ^oC	Ασβεστοποίηση αδρανών (τήξη, κρυσταλλική θραύση Ca)
~ 900/950 ^oC	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ (διάλυση, απασβέστωση)

- **<u>Σκυρόδεμα</u>** <u>(ή τσιμεντοκονία) με **πυριτιακά αδρανή**</u>

~ 100 ^{o}C (–)	Εξάτμιση ελεύθερου νερού
~ 500 ^{o}C	Εξάτμιση κρυσταλλικού νερού
~ 750 ^{o}C	Εξάτμιση κρυσταλλικού νερού
~ 550/600 ^{o}C	α-χαλαζίας → β-χαλαζίας, με έντονη διαστολή
~ 850 ^{o}C	β-χαλαζίας → τριδυμίτης, με έντονη διαστολή

(ενώ η εξάτμιση νερού συνοδεύεται από συστολή)

- **Άνθρακας** τήξη στους 3000 ^{o}C (+)

- **Νικέλιο** τήξη στους 1450 ^{o}C

- **Χρώμιο** τήξη στους 1800 ^{o}C

(γι' αυτό και οι ανοξείδωτοι χάλυβες, με Cr και Ni, έχουν αρκετά καλύτερη συμπεριφορά στην πυρκαγιά, με σχετικώς μικρότερη απομείωση των χαρακτηριστικών τους υπό υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικώς με τους κοινούς χάλυβες)

II.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

II.5.1 Επιφανειακές θερμοκρασίες

Μεταξύ των μέγιστων εξωτερικών θερμοκρασιών αέρος και παρειάς των δομικών στοιχείων παρατηρείται γενικώς (ευνοϊκή) θερμοκρασιακή υστέρηση, ως εξής:

$$T_{\pi\alpha\rho.} \approx T_{\alpha\varepsilon\rho.} - \Delta T_{\upsilon\sigma\tau.},$$

όπου $T_{\alpha\varepsilon\rho.}$ η μέγιστη θερμοκρασία αέρος, όπως εκτιμάται κατά την §II.3 και την §II.4.1, και $T_{\pi\alpha\rho.}$ η μέγιστη (και κρίσιμη) θερμοκρασία πάνω στην παρειά των δομικών στοιχείων, κατά τα επόμενα, καθώς και κατά την §II.4.2.

Αδρομερώς, για πρακτικούς σκοπούς, η θερμοκρασιακή υστέρηση (που μπορεί να φθάσει και τους 200 ^{o}C) είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ως εξής:

- Αν οι φλόγες έγλειφαν (για αρκετό χρονικό διάστημα, μεγαλύτερο της 1 ώρας) την παρειά του στοιχείου, λαμβάνεται :

$$\Delta T_{\upsilon\sigma\tau.} \approx 50°C \ (\div 0°C)$$

- Αν οι φλόγες δεν έγλειφαν το υπόψη δομικό στοιχείο καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς, λαμβάνεται συντηρητικώς :

$$\Delta T_{\upsilon\sigma\tau.} \approx 100°C\,.$$

II.5.2 Εσωτερικές θερμοκρασίες

Με βάση την (κρίσιμη) θερμοκρασία παρειάς ($T_{\pi\alpha\rho.}$), μπορεί να εκτιμηθεί η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (πάχος και διατομή, έκθεση, πυκνότητα, αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα κ.λπ.), και κατά το επόμενο Κεφάλαιο III.

Ευτυχώς, στο εσωτερικό των μή-μεταλλικών στοιχείων, οι θερμοκρασίες απομειώνονται μάλλον γρήγορα, ακολουθώντας πρακτικώς καμπύλες 3^{ου} ή 2^{ου} βαθμού συναρτήσει του βάθους απ' την εκτεθειμένη παρειά.

Σχετικώς, και για τους επείγοντες σκοπούς αυτού του Πρακτικού Οδηγού, αρκεί να εκτιμηθεί η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στις εξωτερικές (κρίσιμες) λωρίδες – στοιβάδες των δομικών στοιχείων, είτε με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που ακολουθούν, είτε και με απλούστερες προσεγγίσεις, κατά τη Σημείωση στο τέλος αυτής της παραγράφου.

Επισημαίνεται, πάντως, πως σε περιπτώσεις απολεπίσεων και αποφλοιώσεων σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, ως θέση παρειάς νοείται η νέα «εσωτερική» επιφάνεια του στοιχείου, μετά τη μείωση της διατομής (του πάχους).

Στην σχετική βιβλιογραφία μπορούν να αναζητηθούν λεπτομερέστερες και ίσως ακριβέστερες κατανομές θερμοκρασιών στο εσωτερικό στοιχείων από κανονικό (ή ελαφρό) σκυρόδεμα. Επισημαίνεται, όμως, πως συνήθως αφορούν σκυρόδεμα με πυριτιακά αδρανή, που έχουν χειρότερη συμπεριφορά από τα ελληνικά ασβεστολιθικά αδρανή, πλέον του ότι δίνονται για ζεύγη τιμών θερμοκρασίας – χρόνου (T-t) της πρότυπης πυρκαγιάς κατά ISO, και όχι για πραγματικές πυρκαγιές.

<u>Γραμμικό δομικό στοιχείο με ακμή</u>

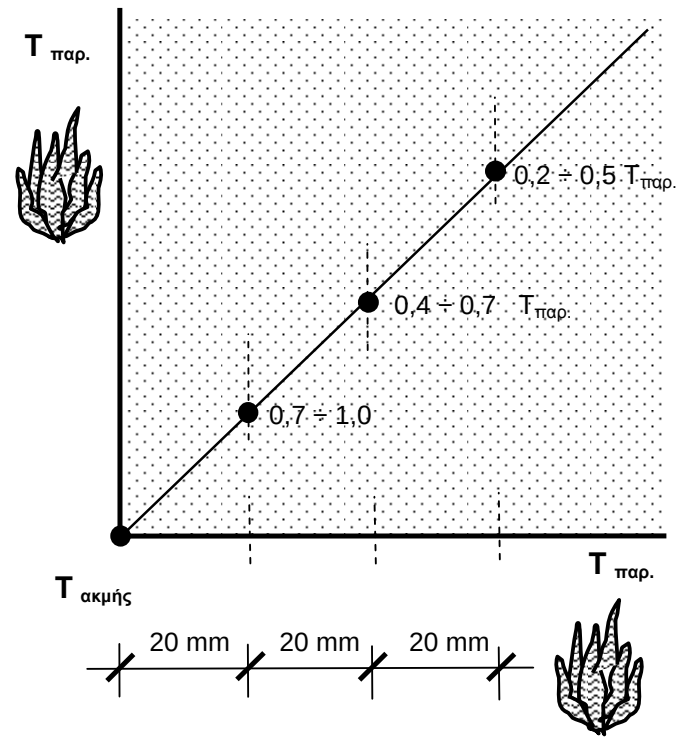
(π.χ στύλοι και δοκοί από Ο.Σ., υπό καθολική έκθεση)

1) $T_{ακμής} \approx (1{,}5 \div 1{,}4)\ T_{παρ.}$ έως $(1{,}2 \div 1{,}1)\ T_{παρ.}$, για έντονη πυρκαγιά (με μεγάλη διάρκεια και υψηλές θερμοκρασίες).

2) Η μείωση της θερμοκρασίας με το βάθος εξαρτάται <u>καί</u> από την ποιότητα (και πυκνότητα) των εξωτερικών στοιβάδων σκυροδέματος της επικάλυψης.

3) Ανάλογα με τη θέση των γωνιακών ράβδων οπλισμού, εκτιμάται και η θερμοκρασία του χάλυβα.

4) Στην περίπτωση καλοδομημένης **τοιχοποιίας**, η μείωση της θερμοκρασίας με το βάθος είναι αρκετά βραδύτερη.



Σχήμα ΙΙ.5 Σχέση μεταξύ $T_{ακμής}$ και $T_{παρ.}$, για γραμμικό δομικό στοιχείο με ακμή.

Επιφανειακό δομικό στοιχείο

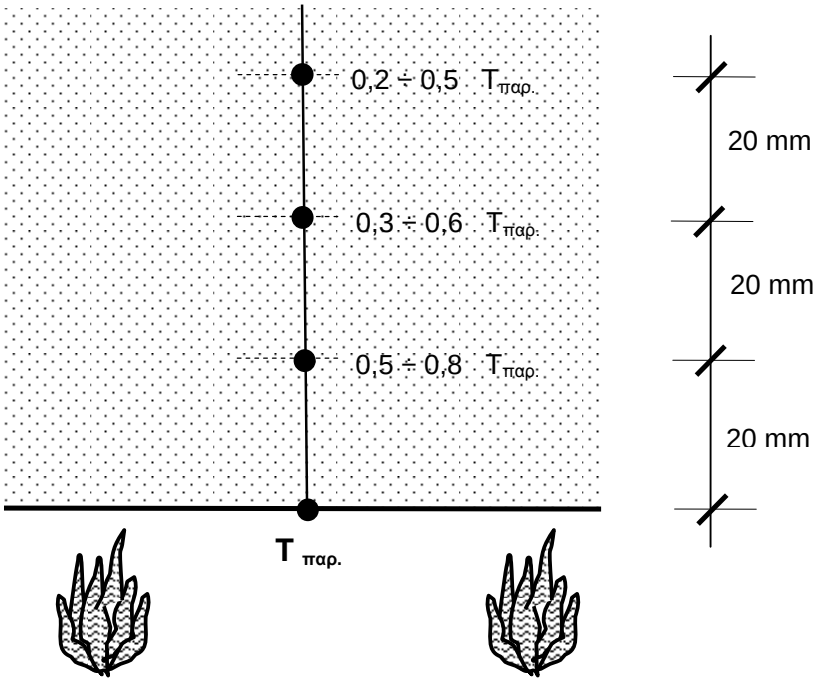
(π.χ πλάκες και τοιχεία από Ο.Σ., υπό μονόπλευρη έκθεση)

1) Ιδιαιτέρως για πλάκες, η $T_{παρ.}$ είναι περίπου σταθερή, σε αρκετή έως μεγάλη έκταση.

2) Η μείωση της θερμοκρασίας με το βάθος εξαρτάται καί από την ποιότητα (και πυκνότητα) των εξωτερικών στοιβάδων σκυροδέματος, της επικάλυψης.

3) Ανάλογα με τη θέση (το βάθος) των ράβδων οπλισμού, εκτιμάται και η θερμοκρασία του χάλυβα.

4) Στην περίπτωση καλοδομημένης **τοιχοποιίας**, η μείωση της θερμοκρασίας με το βάθος είναι αρκετά βραδύτερη.



Σχήμα ΙΙ.6 Τρόπος μεταβολής της $T_{παρ.}$ με την απόσταση, για επιφανειακό δομικό στοιχείο.

Σημείωση :

Ως απλούστερη και ταχύτερη προσέγγιση, για σημαντικές πυρκαγιές με $T_{παρ.} \approx 700\,°C$ και διάρκεια t < 1h, μπορούν να εκτιμηθούν οι μέγιστες (κρίσιμες) εσωτερικές θερμοκρασίες, ως εξής :

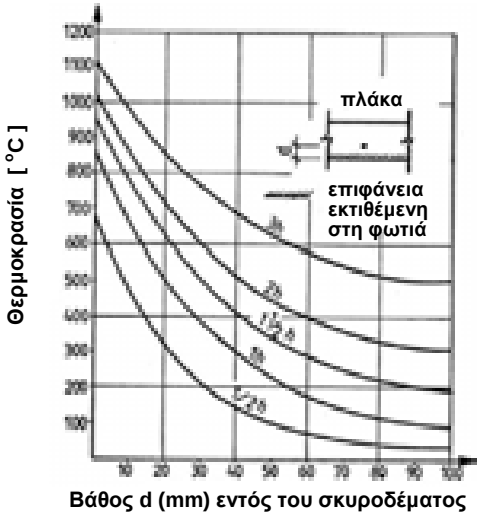
Οι (κρίσιμες) εσωτερικές θερμοκρασίες $T_{εσωτ.}$ που αναπτύσσονται σε βάθος 25mm για Ο.Σ. ή βάθος 70 mm για γυμνό τοίχο Φ.Τ., θεωρούνται μέσες αντιπροσωπευτικές για τους οπλισμούς και για τις εξωτερικές στοιβάδες σκυροδέματος και τοιχοποιίας διπλάσιου πρακτικώς πάχους (δηλ. 50 mm για τα στοιχεία από σκυρόδεμα και 140 mm για τα στοιχεία από τοιχοποιία).

Πρακτικώς, για τις γωνίες στύλων και δοκών (από Ο.Σ.), υπό καθολική έκθεση σε πυρκαγιά, καθώς και για πλάκες (από Ο.Σ.) αλλά και τοιχία/τοίχους (από Ο.Σ. ή τοιχοποιία) υπό μονόπλευρη έκθεση, οι εσωτερικές θερμοκρασίες μπορούν να εκτιμηθούν συντηρητικώς ως εξής, υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχουν συμβεί αποκολλήσεις :

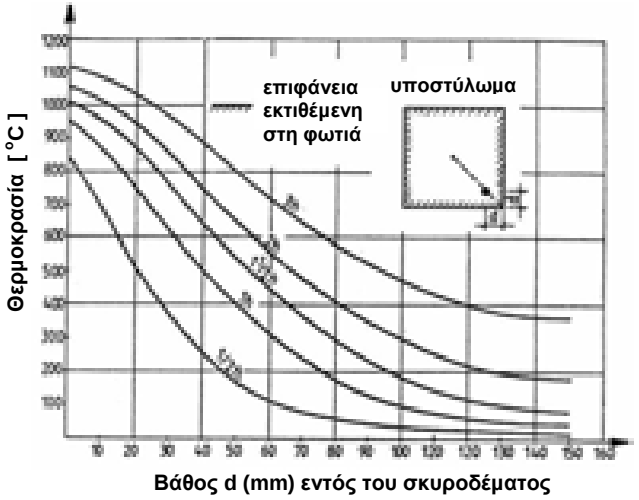
- Στύλοι και δοκοί (σε βάθος ~ 25 mm) : $T_{εσωτ.} \approx T_{παρ.} - 100\,°C$
- Πλάκες (σε βάθος ~ 25 mm) : $T_{εσωτ.} \approx T_{παρ.} - 150\,°C$
- Τοιχεία Ο.Σ. (σε βάθος ~ 25 mm) : $T_{εσωτ.} \approx T_{παρ.} - 200\,°C$
- Τοίχοι ΦΤ (σε βάθος ~ 70 mm) : $T_{εσωτ.} \approx T_{παρ.} - 300\,°C$.

II.5.3 Κατανομή θερμοκρασιών σε στοιχεία Ο.Σ.

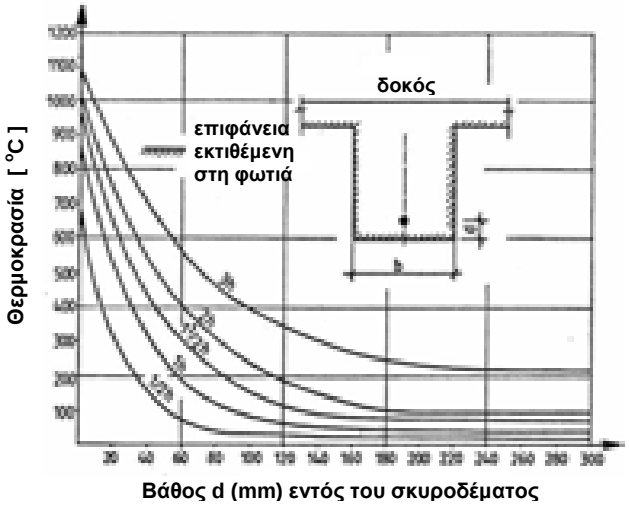
Για τυπικές (κυρίως) πυρκαγιές κτιρίων, οι εσωτερικές θερμοκρασίες στα διάφορα δομικά στοιχεία μπορούν να εκτιμηθούν και με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που φαίνονται στα Σχήματα II.7, II.8 και II.9 (C. Furdui, 1995) [5], λαμβάνοντας (βεβαίως) υπόψη πως η σχέση T-t δεν είναι ορισμένη και μονοσήμαντη για πραγματικές πυρκαγιές (βλ. και Παρατήρηση της §II.3).



Σχήμα II.7 Κατανομή θερμοκρασιών σε πλάκες πάχους ~ 100÷160mm. (C. Furdui, 1995) [5]



Σχήμα II.8 Κατανομή θερμοκρασιών σε στύλους διατομής ~ 300x300mm. (C. Furdui, 1995) [5]



Σχήμα II.9 Κατανομή θερμοκρασιών σε δοκούς πλάτους b ≈ 300mm. (C. Furdui, 1995) [5]

II.5.4 Απαιτούμενος χρόνος για την ανάπτυξη $T_{εσωτ.} \approx 500\ ^oC$ σε στοιχεία Ο.Σ.

Για τυπικές αλλά καί για πραγματικές πυρκαγιές κτιρίων, ο χρόνος που απαιτείται για να αναπτυχθούν θερμοκρασίες ~ 500 ^oC στη στάθμη των οπλισμών (για διάφορα δομικά στοιχεία), μπορεί αδρομερώς να εκτιμηθεί και με βάση τον Πίνακα II.7 (K. Kordina, 1963) [6], που έχει στηριχθεί σε πειραματικά δεδομένα υπό πρότυπη πυρκαγιά.

Στον Πίνακα αυτό, ως «επίχρισμα» θεωρείται ισχυρό ασβεστοτσιμεντοκονίαμα, με καλή πρόσφυση, χωρίς (πρόωρη) αποκόλληση.

Πίνακας II.7 «Κρίσιμες» θερμοκρασίες ολόσωμων δομικών υλικών και στοιχείων. (K. Kordina, 1963) [6]

ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	**ΠΑΧΟΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ή και ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΟΣ**	**ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ (^oC/min)**	**ΧΡΟΝΟΣ για $T_{οπλ.} \approx 500\ ^oC$ (min)**
ΠΛΑΚΕΣ (φωτιά από κάτω)	10 mm μπετόν	12,5	40
	20 mm μπετόν	10,0	50
	20 mm μπετόν + 15 mm επίχρ.	2,0	250
ΔΟΚΟΙ (φωτιά από 3 πλευρές)	20 mm μπετόν	9,5	50 ÷ 55
	40 mm μπετόν	6,5	70 ÷ 85
ΣΤΥΛΟΙ (φωτιά από 4 πλευρές)	15 mm μπετόν	6,0	85
	15 mm μπετόν + 15 mm επίχρ.	3,0	170

II.5.5 «Κρίσιμες» θερμοκρασίες

Κατ' αντιστοιχία προς τον χάλυβα (οπλισμού σκυροδέματος), με «κρίσιμη» θερμοκρασία περίπου 500°C (400 ÷ 600°C), μπορούν να αναφερθούν «κρίσιμες» θερμοκρασίες και για άλλα «ολόσωμα» δομικά υλικά και στοιχεία, κατά τον Πίνακα II.8 (M. Roitmann, 1974) [7].

Σχετικώς, υπενθυμίζεται ότι για τους χάλυβες (οπλισμού σκυροδέματος), παλιούς και νέους, έχει επικρατήσει να θεωρείται ως «κρίσιμη» η θερμοκρασία των 500 °C διότι ενδέχεται να οδηγήσει σε απομείωση αντοχής (κατά την πυρκαγιά) έως και κατά 35%.

Πίνακας II.8 «Κρίσιμες» θερμοκρασίες ολόσωμων δομικών υλικών και στοιχείων. (M. Roitmann, 1974) [7]

Δομικό υλικό	$T_{κρ.}$, °C
• Σκυρόδεμα με πυριτιακά αδρανή	575
• Σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή	675
• Γρανίτης	700
• Ασβεστόλιθος	800
• Πλίνθοι (καλοψημένες)	900

II.6 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Μ. Χρονόπουλος - Χ. Σπανός, "Πρακτικές συστάσεις για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά", 10ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ / ΕΤΣ, Ρόδος, 1991.

[2] C. Meyer-Ottens, "Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften", Teil 2 : Die Bauwirtschaft , Heft 25, 1971.

[3] R. Rybicki, "Βλάβες δομικών έργων", Τόμος 1 και 2, Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 1980.

[4] ΚΕΔΕ, "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ)", Αθήνα, 2008.

[5] C. Furdui, "General criteria regarding fire protection of structures", Int. Symposium on the Fire Protection of Structures (TEMPOS '94), Bucharest, 1995.

[6] K. Kordina, "Das Verhalten von Stahlbeton unter Feueraugriff", Hefte 1 und 2, Befon 1963.

[7] M. Roitmann, "Grundlagen der Brandschutz - Normierung im Bauwesen", Verl. R. Mueller, 1974.

[8] Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών Μ. Χρονόπουλου, από παλαιότερες αλλά και από τις πρόσφατες πυρκαγιές του 2007 στις περιοχές των Νομών Ηλείας, Αρκαδίας και Ευβοίας.

ΙΙΙ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΙΙΙ.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα υλικά δομήσεως επηρεάζει δυσμενώς τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (όπως την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, όρια διαρροής και θραύσεως, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.) όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους (αλλαγή κρυσταλλικής δομής, πορώδες κ.λπ.). Συνέπεια αυτών των μεταβολών είναι αντίστοιχες μειώσεις στην φέρουσα ικανότητα των δομικών μελών, αύξηση των παραμορφώσεών τους υπό σταθερό φορτίο, ανακατανομές εντάσεως κ.λπ., όπως αναλυτικά περιγράφεται στο Κεφάλαιο IV αυτού του Πρακτικού Οδηγού. Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται στοιχεία τα οποία αφορούν βασικές ιδιότητες των δομικών υλικών υπό υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και σχετικά διαγράμματα μεταβολής ιδιοτήτων προς χρήση κατά την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό.

Οι πληροφορίες οι οποίες αφορούν τον Μηχανικό σχετίζονται με τις ιδιότητες των υλικών:

- **Κατά την διάρκεια της έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες,** διότι τότε επηρεάζουν:
  - την πυρασφάλεια των κατασκευών (δυνατότητα διαφυγής των χρηστών), καθώς και
  - την ασφάλεια της ζωής των πυροσβεστών.
- **Μετά την απόψυξή τους και επαναφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος** προκειμένου να ληφθούν υπόψη κατά:
  - την αποτίμηση και
  - την επισκευή των κατασκευών μετά από μια πυρκαγιά

Στα επόμενα γίνεται συνοπτική αναφορά στην δράση της πυρκαγιάς στις κατασκευές (§ ΙΙΙ.2), και εξετάζεται η έναντι υψηλών θερμοκρασιών συμπεριφορά τεσσάρων από τα βασικότερα δομικά υλικά τόσο των υφισταμένων όσο και των νέων κτηρίων στην χώρα μας:

- Σκυρόδεμα (§ ΙΙΙ.3)
- Χάλυβας (§ ΙΙΙ.4)
- Ξύλο (§ ΙΙΙ.5) και
- Τοιχοποιία (§ ΙΙΙ.6)

III.2 Η ΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Για την δράση της πυρκαγιάς στις κατασκευές, εξετάζονται δύο καταστάσεις:

- Η κατασκευή **κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς:** Για τις νέες κατασκευές, απαιτείται να έχει γίνει ο αντίστοιχος σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς, ο οποίος να αποδεικνύει ότι η κατασκευή θα έχει επαρκή πυρασφάλεια (**§ III.2.1**)
- Η κατασκευή **μετά την πυρκαγιά:** Για τις υφιστάμενες κατασκευές πρέπει να μελετηθούν οι απαραίτητες επεμβάσεις αποκαταστάσεως (**§ III.2.2**)

III.2.1 Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς

Οι βασικές απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς είναι η προστασία:

- των ατόμων,
- της κοινωνίας,
- της περιουσίας και
- του περιβάλλοντος

Κριτήρια για την ικανοποίηση των απαιτήσεων είναι:

- Η εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής για ένα χρονικό διάστημα (π.χ. 30min ή 60min κ.λπ.)
- Ο περιορισμός της ανάπτυξης και της επέκτασης της φωτιάς και του καπνού
- Δυνατότητα διαφυγής ή/και διάσωσης των Χρηστών
- Μέριμνα για την ασφάλεια των διασωστών-πυροσβεστών

Οι σχετικοί Ευρωκώδικες για τον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς είναι οι**:**

- EN 1991-1-2: **Actions** on structures exposed to fire
- EN 1992-1-2:Design of **concrete** structures - Structural fire design
- EN 1993-1-2: Design of **steel** structures - Structural fire design
- EN 1994-1-2: Design of **composite** steel and concrete structures - Structural fire design.
- EN 1995-1-2: Design of **timber** structures - Structural fire design
- EN 1996-1-2: Design of **masonry** structures - Structural fire design
- EN 1999-1-2: Design of **aluminium** structures - Structural fire design

ΙΙΙ.2.2 Επεμβάσεις σε κατασκευές μετά την πυρκαγιά

Η διαδικασία περιλαμβάνει τις εξής φάσεις (όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στα επόμενα κεφάλαια):

- Την **αποτίμηση** της κατασκευής ως έχει (μετά την πυρκαγιά και πριν απ' τις επεμβάσεις)
- Τον **σχεδιασμό** των επεμβάσεων
- Την **εκτέλεση** των επεμβάσεων

ΙΙΙ.3 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ΙΙΙ.3.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα δεν καίγεται, έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, ενώ παρουσιάζει ενδόθερμες αντιδράσεις στον τσιμεντοπολτό. Κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζεται το φαινόμενο της **αποφλοίωσης** του σκυροδέματος λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του (βλ. τις φωτογραφίες του Σχήματος ΙΙΙ.1). Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω:

- της αύξησης της πίεσης των πόρων που προκαλείται από τους υδρατμούς και
- της θερμικής διαστολής των αδρανών.

Η έκταση της αποφλοίωσης εξαρτάται από:

- το ποσοστό της περιεχομένης υγρασίας,
- την ταχύτητα της θέρμανσης, και
- το πορώδες και την περατότητα του επιφανειακού τμήματος του σκυροδέματος.

Η έκταση της αποφλοίωσης μειώνεται με:

- την προσθήκη ινών προπυλενίου
- τον ψεκασμό της επιφάνειας με υλικά που επιβραδύνουν την μετάδοση της θερμότητας
- τοποθέτηση επιφανειακής μονωτικής επίστρωσης (π.χ. σε σήραγγες)

Σχήμα ΙΙΙ.1 Αποφλοίωση σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά. Στην 2η φωτογραφία διακρίνεται και η θραύση των ράβδων οπλισμού της πλάκας λόγω των πολύ μεγάλων αναπτυχθεισών θερμοκρασιών.

Σε ό,τι αφορά τα **ειδικά σκυροδέματα** αναφέρεται ότι:

1. Το **ελαφροσκυρόδεμα** σε γενικές γραμμές παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από το σύνηθες σκυρόδεμα.
2. Τα σκυροδέματα **υψηλής αντοχής** παρουσιάζουν εντονότερη αποφλοίωση, και μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της αντοχής έναντι των συνήθων σκυροδεμάτων.
3. Το **προεντεταμένο** σκυρόδεμα είναι πιο ευάλωτο λόγω:
   - Της μεγαλύτερης ευαισθησίας των χαλύβων προέντασης σε υψηλές θερμοκρασίες
   - Της απώλειας συνάφειας στις περιπτώσεις προεντεταμένης κλίνης (προκατασκευασμένα στοιχεία).
4. Στην περίπτωση των **ινωπλισμένων** σκυροδεμάτων: η αντοχή των επιφανειακών υφασμάτων έναντι πυρκαγιάς είναι πρακτικώς μηδενική, αλλά η παραμένουσα αντοχή της υπόλοιπης διατομής είναι συνήθως επαρκής.

III.3.2 Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος

III.3.2.1 Ειδική θερμότητα

Ειδική θερμότητα σκυροδέματος, $c_p(\theta)$, είναι το ποσόν της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία σκυροδέματος μάζας ενός kg κατά ένα βαθμό.
Η ειδική θερμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία, θ, αλλά και από την περιεχόμενη υγρασία "u,,, ιδιαίτερα στην περιοχή των θερμοκρασιών από 100°C έως 200°C λόγω του βρασμού και εξάτμισης του ύδατος (βλ. Σχ.III.2).

Κατά τον Ευρωκώδικα 2, η ειδική θερμότητα μπορεί να λαμβάνεται (όταν u= 0%) :

$cp(\theta) = 900$ (J/kg K) για $20°C \leq \theta \leq 100°C$ (1)

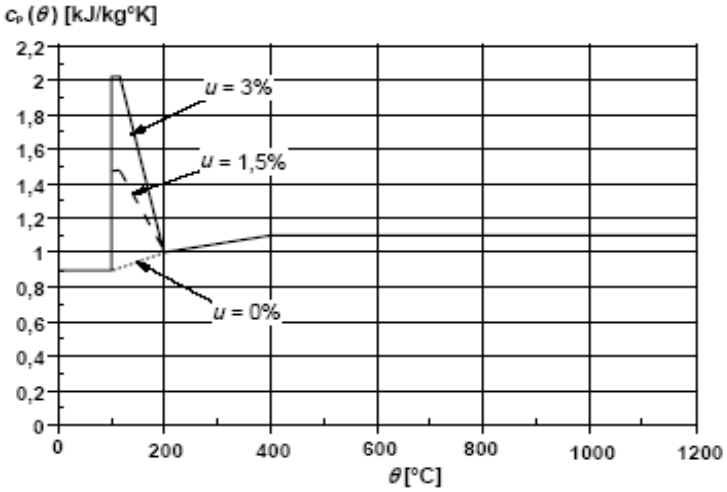
$cp(\theta) = 900 + (\theta - 100)$ (J/kg K) για $100°C \leq \theta \leq 200°C$ (2)

$cp(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2$ (J/kg K) για $200°C \leq \theta \leq 400°C$ (3)

$cp(\theta) = 1100$ (J/kg K) για $400°C \leq \theta \leq 1200°C$ (4)

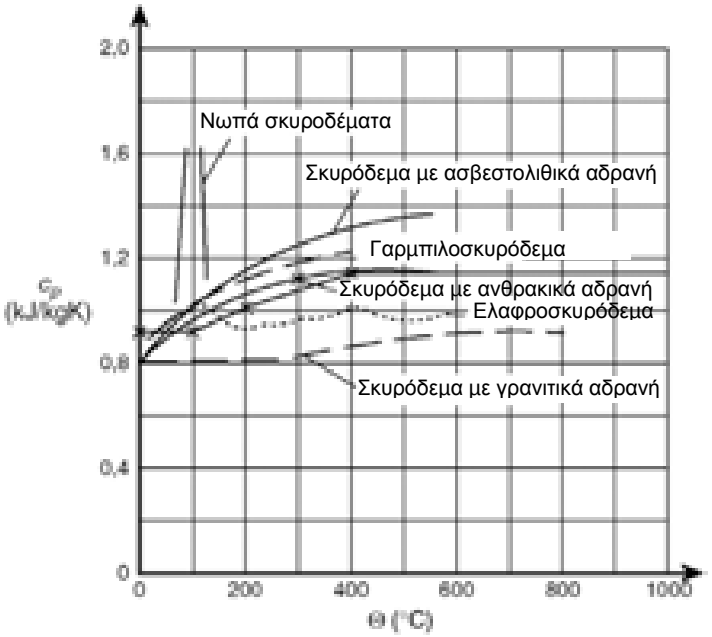
όπου: θ είναι η θερμοκρασία του σκυροδέματος σε (°C).

Η γραφική παράσταση της cp(θ) (σε kJ/kgK) φαίνεται στο Σχήμα III.2.



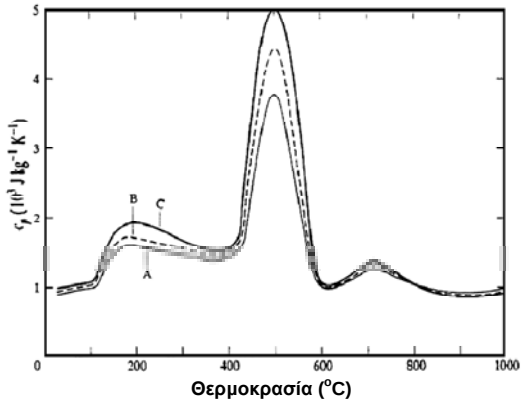
Σχήμα III.2 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας, cp(θ) συναρτήσει της θερμοκρασίας, θ, για τρια διαφορετικά ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας (u= 3%, 1.5% και 0%) κατά τον Ευρωκώδικα 2 [10]

Στο Σχήμα ΙΙΙ.3 φαίνεται η μεταβολή της ειδικής θερμότητας για διάφορους τύπους σκυροδεμάτων όπως έχει προκύψει από δοκιμές. Είναι και εδώ φανερό ότι η περιεχόμενη υγρασία επιδρά στην περιοχή των θερμοκρασιών από 100°C έως 200°C.



Σχήμα ΙΙΙ.3 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας, cp(θ), του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, θ, για διάφορους τύπους σκυροδεμάτων κατά Schneider (1986) [11].

Ο Harmathy (1970) έχει μελετήσει την μεταβολή της ειδικής θερμότητας του τσιμεντοκονιάματος. Οι αιχμές κοντά στους 500°C, αντιστοιχούν στην απελευθέρωση του δεσμευμένου ύδατος. Το πλάτος και το ύψος τέτοιων αιχμών εξαρτώνται σημαντικά από τον ρυθμό θέρμανσης. Ειδικώς για συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι Fu και Chung μέτρησαν την ειδική θερμότητα τσιμεντοκονίας με αναλογία νερού/τσιμέντου 0,45 και πυκνότητα 1,99gr/cm^3, και βρήκαν τιμή περίπου 0,7j/grK.



Σχήμα ΙΙΙ.4 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας, $c_P(\theta)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας, θ, τριών διαφορετικών τσιμεντοκονιαμάτων. (Harmathy, 1970 [3,4] από το [55])

III.3.2.2 Θερμική αγωγιμότητα

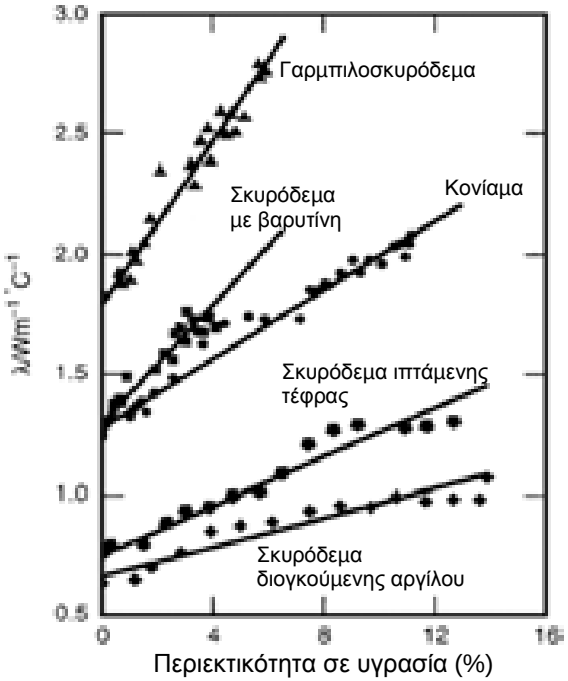
Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια βασική θερμική ιδιότητα για την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας δια μέσου της μάζας του σκυροδέματος που εκτίθεται σε πυρκαγιά.

Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από το πορώδες της τσιμεντοκονίας και των αδρανών, από τον τύπο και την ποσότητα των αδρανών, καθώς και από την περιεχόμενη υγρασία.

Η πυκνότητα γενικώς δεν φαίνεται να επηρεάζει την αγωγιμότητα, αλλά ειδικώς στα ελαφροσκυροδέματα (λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα) η αγωγιμότητα μεταβάλλεται με την πυκνότητα.

Η θερμική αγωγιμότητα σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την θερμική αγωγιμότητα σκυροδεμάτων συνήθους αντοχής.

Στο Σχήμα III.5 παρουσιάζεται η επίδραση της υγρασίας στην θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Προφανώς, αυτή η επίδραση θα ήταν πολύ μικρότερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μιας και με την αύξηση της θερμοκρασίας αποβάλλεται μέρος του ύδατος. Επισημαίνεται ότι είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν τιμές της θερμικής αγωγιμότητας χωρίς να συμβεί μεταβολή της υγρασίας ή/και στέγνωμα.



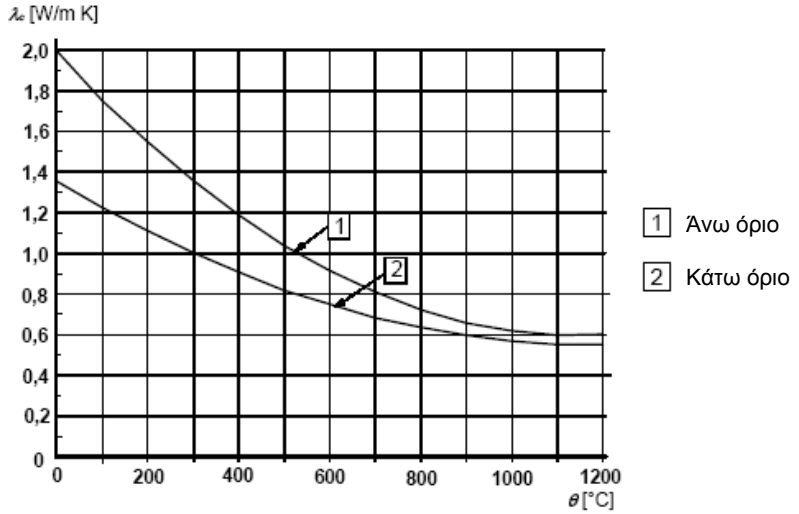
Σχήμα III.5 Η θερμική αγωγιμότητα σκυροδεμάτων συναρτήσει της περιεκτικότητάς τους σε υγρασία [6].

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, και καθώς αποβάλλεται μέρος του ύδατος και δημιουργούνται μικρο-ρωγμές, η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος μειώνεται.

Ο EN 1992-1-2 δίνει την σχέση (5) σαν ανώτερο όριο, και την σχέση (6) σαν κατώτερο, για την θερμική αγωγιμότητα των σκυροδεμάτων κανονικού βάρους (W/mK) [10]: (Για θερμοκρασίες από 20°C έως 1200°C) (βλ. και Σχήμα III.6).

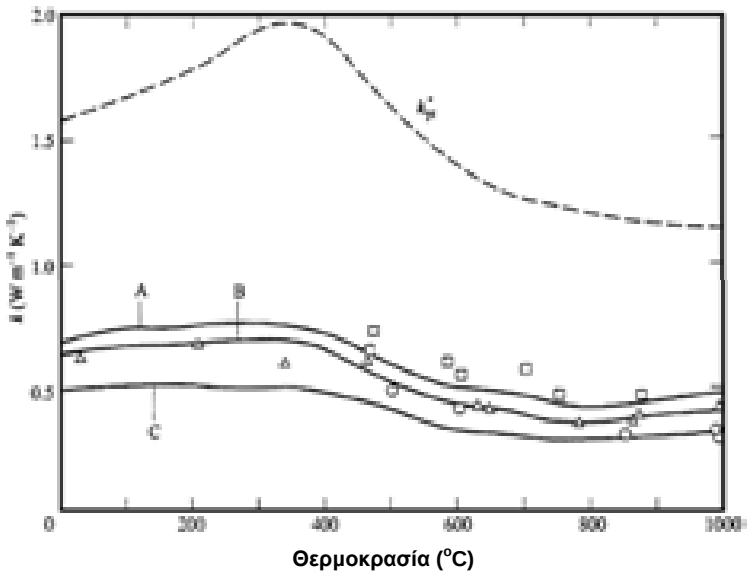
Άνω όριο: $\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta_c / 100) + 0,0107(\theta_c / 100)^2$ (5)

Κάτω όριο: $\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta_c / 100) + 0,0057(\theta_c / 100)^2$ (6)



Σχήμα III.6 Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας, $\lambda_c(\theta)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας, θ, (άνω και κάτω όριο) κατά τον Ευρωκώδικα 2 [10]

Ο Harmathy [3, 4] μελέτησε την επίδραση του πορώδους και των ρωγμών στην θερμική αγωγιμότητα διάφορων τσιμεντοκονιαμάτων, για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, και χρησιμοποίησε αυτά τα αποτελέσματα για να λάβει μια εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας ενός υποθετικού τσιμεντοκονιάματος χωρίς καθόλου πόρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα ΙΙΙ.7.



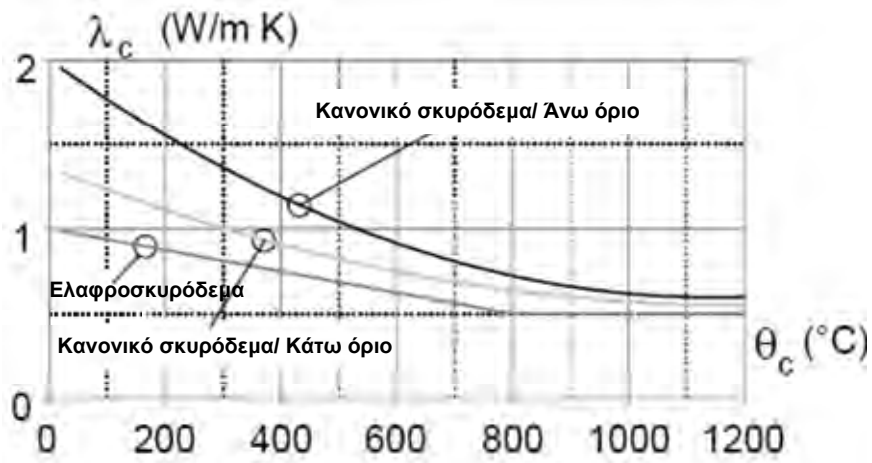
Σχήμα ΙΙΙ.7 Θερμική αγωγιμότητα τσιμεντοκονιαμάτων (A, B, C) και υποθετικού τσιμεντοκονιάματος χωρίς πόρους (Διακεκομμένη γραμμή) [3, 4]

Η θερμική αγωγιμότητα των ελαφροσκυροδεμάτων μπορεί να θεωρηθεί ότι μειώνεται γραμμικά μέχρι την θερμοκρασία των 800°C και μετά παραμένει σταθερή.

Κατά τον Ευρωκώδικα 4 (EN 1994-1-2) ισχύουν τα εξής:

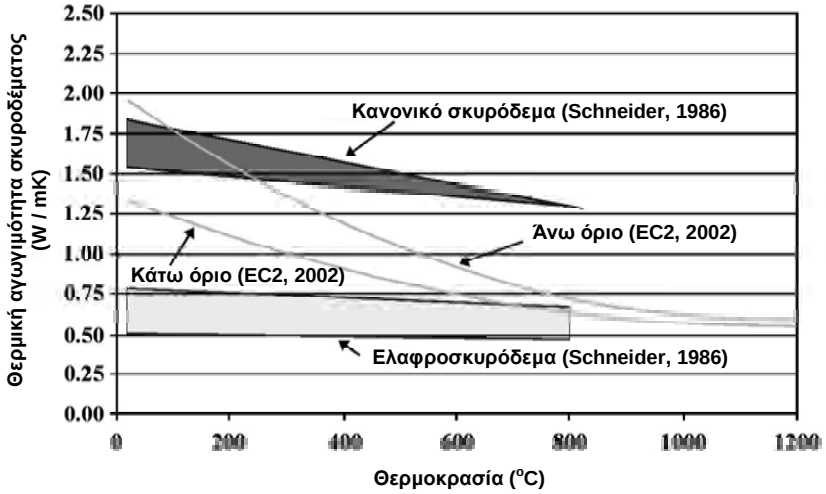
Για $20°C \leq \theta_c \leq 800°C$ $\lambda_c = 1 - \theta_c/1600$

Για $800°C \leq \theta_c$ $\lambda_c = 0.5$



Σχήμα ΙΙΙ.8 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας κανονικών σκυροδεμάτων και ελαφρο-σκυροδεμάτων κατά τον Ευρωκώδικα 4 (EN 1994-1-2) [37].

Σημειώνεται πάντως, ότι στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν μεγάλες διασπορές σχετικά με τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος. Ενδεικτικό είναι το Σχήμα III.9 (Schneider 1986)



Σχήμα III.9 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας κανονικών σκυροδεμάτων και ελαφρο-σκυροδεμάτων κατά τον Schneider (1986) [11].

III.3.2.3 Θερμική διαστολή

Κατά τον Ευρωκώδικα 2, η θερμική διαστολή του σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται από τις σχέσεις:

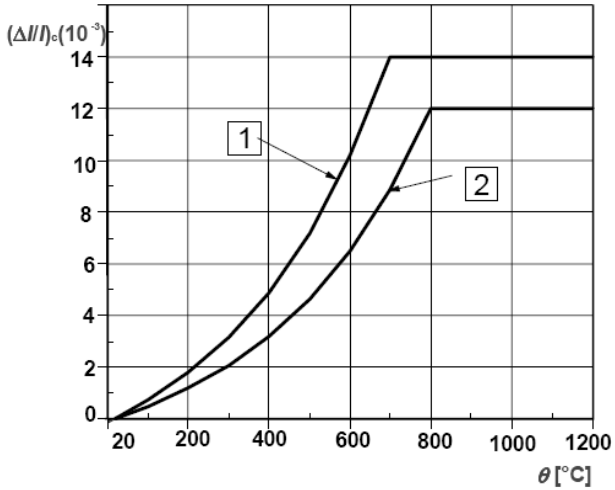
- Για σκυρόδεμα με **πυριτικά** αδρανή:

  Για $20°C \leq \boldsymbol{\theta} \leq 700°C$: $\Delta l/l = 9*10^{-6}\theta + 2.3*10^{-11}\theta^3 - 1.8*10^{-4}$
  Για $700°C \leq \boldsymbol{\theta} \leq 1200°C$: $\Delta l/l = 14*10^{-3}$
  Όπου l το μήκος στους 20°C
  Δl η μεταβολή του μήκους λόγω της θερμοκρασίας, και
  θ η θερμοκρασία του σκυροδέματος (°C)
  Η μεταβολή φαίνεται στο Σχήμα III.10, καμπύλη 1.

- Για σκυρόδεμα με **ασβεστολιθικά** αδρανή:

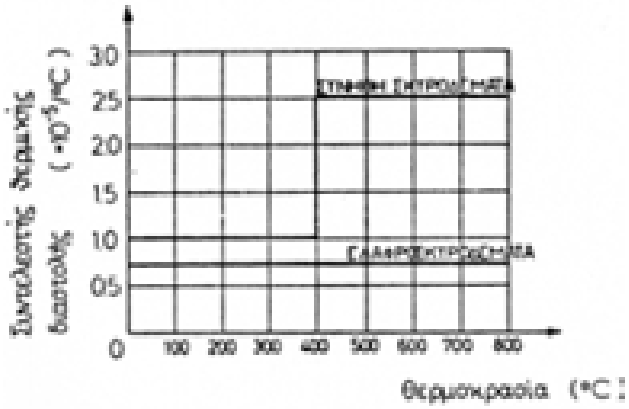
  Για $20°C \leq \theta \leq 805°C$: $\Delta l/l = 6*10^{-6}\theta + 1.4*10^{-11}\theta^3 - 1.2*10^{-4}$
  Για $805°C \leq \theta \leq 1200°C$: $\Delta l/l = 12*10^{-3}$
  Όπου l το μήκος στους 20°C
  Δl η μεταβολή του μήκους λόγω της θερμοκρασίας, και
  θ η θερμοκρασία του σκυροδέματος (°C)
  Η μεταβολή φαίνεται στο Σχήμα III.10, καμπύλη 2.

- Παρατηρείστε στο Σχήμα III.11 ότι ο «συντελεστής θερμικής διαστολής» μετά τους 200°C αυξάνεται μέχρι σχεδόν τριπλασιασμού! Κάτι τέτοιο δέν συμβαίνει πρακτικώς στον χάλυβα.



Σχήμα III.10 Μεταβολή της θερμικής διαστολής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. (EN 1992-1-2)[10]:

- Καμπύλη 1 σκυρόδεμα με πυριτικά αδρανή,
- Καμπύλη 2 σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή



Σχήμα III.11 Συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες [43]

ΙΙΙ.3.3 Μηχανικές ιδιότητες

ΙΙΙ.3.3.1 Γενικά

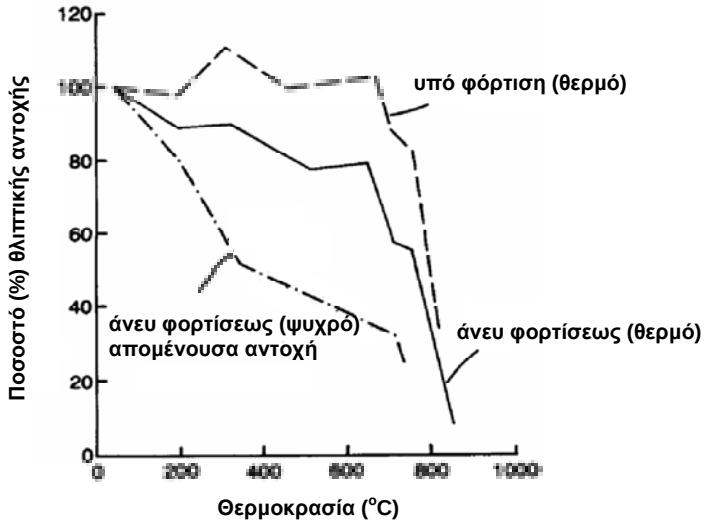
Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι:

- Υπό υψηλές θερμοκρασίες, κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, παρατηρείται υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος.

- Μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, μετά την πυρκαγιά, οι μηχανικές ιδιότητες δεν επανέρχονται στις αρχικές τους τιμές ή τις ανακτούν κατά μικρό ποσοστό μόνον. Κατά τους υπολογισμούς, συνιστάται να αγνοείται αυτή η ανάκτηση.

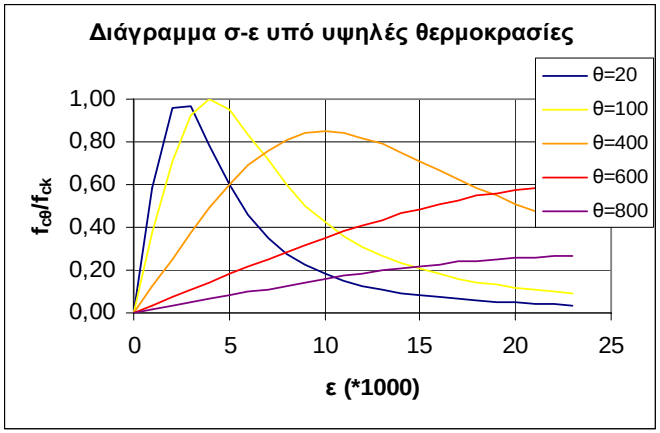
ΙΙΙ.3.3.2 Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, κυρίως λόγω των εσωτερικών ρηγματώσεων που προκαλεί η θέρμανση του ύδατος και της ανομοιόμορφης κατανομής των θερμοκρασιών στην μάζα του σκυροδέματος, καθώς και λόγω των φυσικοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται (ασβεστοποίηση). Η μείωση αυτή εξαρτάται τόσο από το είδος των αδρανών όσο και από την στάθμη της φόρτισης [14]. (Σχήμα ΙΙΙ.12).



Σχήμα ΙΙΙ.12 Ποσοστιαία μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή (Bažant et al., 1996) [1]

Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων υπό μονοαξονική θλίψη σκυροδεμάτων υπό υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να λαμβάνεται από το Σχήμα ΙΙΙ.13 (Ευρωκώδικας 2, Πίνακας 3.1 [10]) για τις διάφορες θερμοκρασίες. Παρατηρείται μια αύξηση των παραμορφώσεων για την ίδια στάθμη τάσεων, καθώς και μια μείωση της μέγιστης θλιπτικής τάσεως του σκυροδέματος.



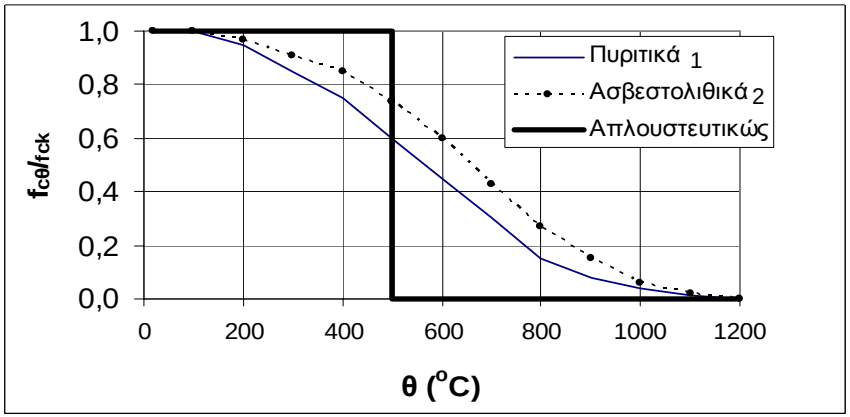
Σχήμα ΙΙΙ.13 Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδεμάτων, με ασβεστολιθικά αδρανή, υπό υψηλές θερμοκρασίες (Ευρωκώδικας 2) [10]

Η μείωση της μέγιστης θλιπτικής τάσεως του σκυροδέματος εκφράζεται μέσω του συντελεστή, $\boldsymbol{k_c}$, ως [10]:

$$k_c(\theta) = f_{c\theta}(\theta) / f_{ck}$$

Η καμπύλη του συντελεστή $\boldsymbol{k_c}$ φαίνεται στο Σχήμα ΙΙΙ.14:

Απλουστευτικώς (σύμφωνα με το Παράρτημα Β του Ευρωκώδικα 2 [10]) μπορεί να θεωρηθεί ότι μέχρι τους 500°C δεν μειώνεται η αντοχή του σκυροδέματος και για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C η αντοχή του σκυροδέματος μηδενίζεται.



Σχήμα ΙΙΙ.14 Μεταβολή του συντελεστή k_c (θ) συναρτήσει της θερμοκρασίας (1: κανονικά σκυροδέματα με πυριτικά αδρανή, 2: κανονικά σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή) (Ευρωκώδικας 2) [10]

Στην βιβλιογραφία προτείνονται, λοιπόν, διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος υπό θλίψη ή εφελκυσμό (π.χ. Σχήμα ΙΙΙ.15). Τα σχετικά διαγράμματα βασίζονται σε αποτελέσματα πειραμάτων σε δοκίμια τα οποία είχαν, πριν απ' την φόρτιση, θερμανθεί σε προκαθορισμένη θερμοκρασία. Σε μερικές περιπτώσεις, τα δοκίμια –πριν από την θέρμανσή τους– είχαν υποβληθεί σε θλιπτική τάση μέχρι προκαθορισμένη στάθμη. Τέτοια διαγράμματα έχουν προταθεί από τους:

- Lie, Rowe and Lin, 1986 [44]

$$f'_{cT} = f'_c \cdot (1 - 0.001 \cdot T) \quad T \leq 500\,°\mathrm{C}$$

$$f'_{cT} = f'_c \cdot (1.375 - 0.00175 \cdot T) \quad 500\,°\mathrm{C} \leq T \leq 700\,°\mathrm{C}$$

$$f'_{cT} = 0 \quad T \geq 700\,°\mathrm{C}.$$

- Eurocode 2, 2004 [10]

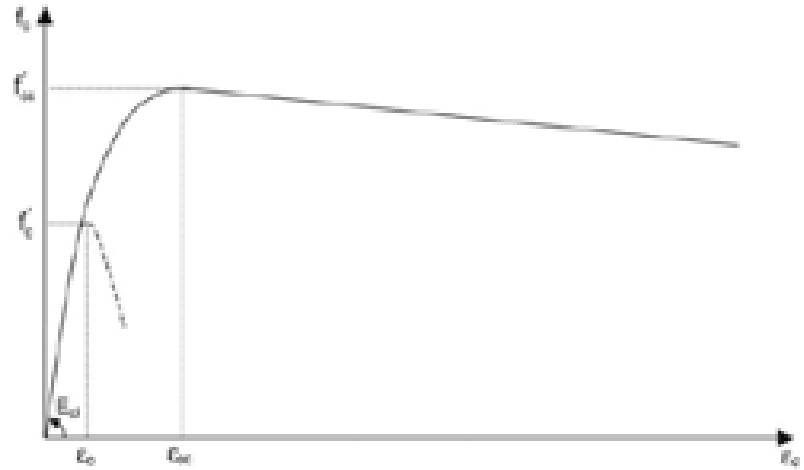
$$f'_{cT} = f'_c \quad T \leq 100\,°\mathrm{C}$$

$$f'_{cT} = f'_c \cdot (1.067 - 0.00067 \cdot T) \quad 100\,°\mathrm{C} \leq T \leq 400\,°\mathrm{C}$$

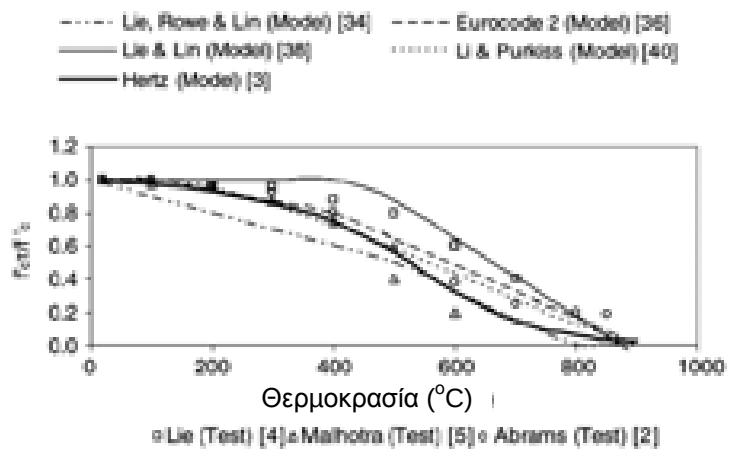
$$f'_{cT} = f'_c \cdot (1.44 - 0.0016 \cdot T) \geq 0 \quad T \geq 400\,°\mathrm{C}.$$

- Lie and Lin, 1985 [45]

$$f'_{cT} = f'_c \cdot \left(2.011 - 2.353 \cdot \frac{T - 20}{1000}\right) \leq f'_c.$$



Σχήμα ΙΙΙ.15 Καταστατικός νόμος σκυροδέματος υπό θλίψη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά Mander et al.,1988 [50].



(α) Πυριτικά αδρανή

- Li and Purkiss, 2005 [46]

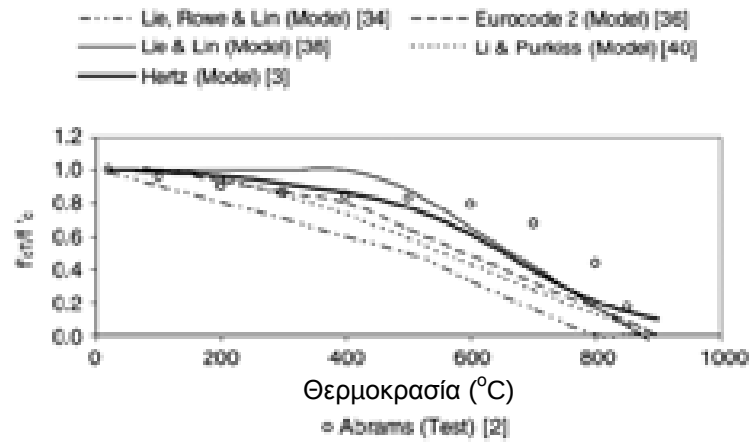
$$f'_{cT} = f'_c \cdot \left[0.00165 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^3 - 0.03 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^2 + 0.025 \cdot \left(\frac{T}{100}\right) + 1.002 \right].$$

- Ο Hertz, 2005 [47] προτείνει έναν νόμο ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον τύπο των αδρανών, προτείνοντας συγχρόνως μια μείωση του ρυθμού απομείωσης της αντοχής λόγω αρχικής επιβολής θλιπτικής τάσης στο σκυρόδεμα, πολλαπλασιάζοντας την παρακάτω σχέση με 1.25, σε περίπτωση που η αρχική προφόρτιση στο υλικό είναι μέχρι 0.25 f_c:

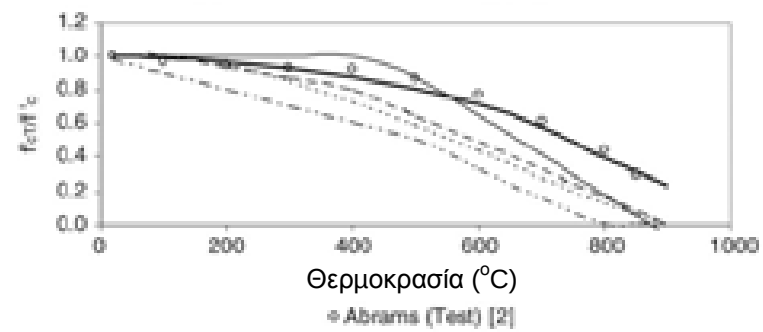
Οι παράμετροι T_1, T_2, T_8 και T_{64} καθορίζονται από τον τύπο του αδρανούς ως ακολούθως :

Πυριτικά αδρανή: $T_1 = 15000$ $T_2 = 800$ $T_8 = 570$ και $T_{64} = 100000$
Ελαφροβαρή αδρανή: $T_1 = 100000$ $T_2 = 1100$ $T_8 = 800$ και $T_{64} = 940$
Άλλα αδρανή: $T_1 = 100000$ $T_2 = 1080$ $T_8 = 690$ και $T_{64} = 1000$

$$f'_{cT} = f'_c \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{T}{T_1} + \left(\frac{T}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_8}\right)^8 + \left(\frac{T}{T_{64}}\right)^{64}} \right].$$



(β) Ανθρακικά αδρανή



(γ) Ελαφροβαρή αδρανή

Σχήμα ΙΙΙ.16 Σύγκριση εναλλακτικών προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα, της θλιπτικής αντοχής, f'_{cT}, ως προς τη θερμοκρασία Τ.

Από την παραπάνω σύγκριση είναι εμφανές ότι :

- Τα προσομοιώματα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία καθώς και στον εν ισχύει Κανονισμό είναι ικανοποιητικά, περιβάλλουν δε τα πειραματικά αποτελέσματα με επαρκή ακρίβεια.

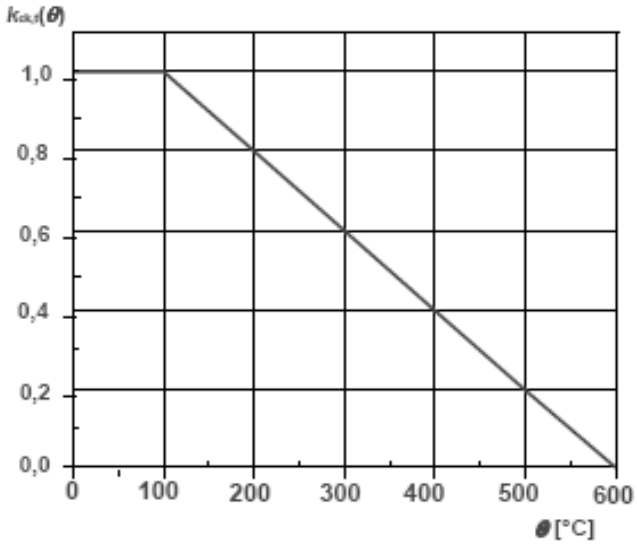
- Η επιρροή των αδρανών είναι ουσιαστική, απ' ό,τι φαίνεται και στα Σχήματα ΙΙΙ.16 (α) – (γ). Το προσομοίωμα του Hertz, 2005 [47] ακολουθεί τα πειραματικά δεδομένα με ικανοποιητική ακρίβεια.

  Σημείωση: Ο Ευρωκώδικας 2, 2004 [10], δεν διαφοροποιεί μεταξύ των διαφορετικών τύπων των αδρανών, αλλά μόνο ως προς το βάρος τους.

III.3.3.3 Εφελκυστική αντοχή

Γενικώς, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δεν λαμβάνεται υπόψη απ' ευθείας στους υπολογισμούς. Η εφελκυστική αντοχή μειώνεται περισσότερο από την θλιπτική αντοχή (επειδή είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μικρορηγματώσεις). Αν πάντως πρέπει η εφελκυστική αντοχή να ληφθεί υπόψη (π.χ. στην περίπτωση της αρχικής συνάφειας), και απουσία άλλων ακριβέστερων στοιχείων, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή είναι σταθερή μέχρι τους 100°C και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 600°C, οπότε και μηδενίζεται (βλ. Σχήμα III.17).

$$k_{ck,t}(\theta) = f_{ck,t}(\theta) / f_{ck}(20°C)$$

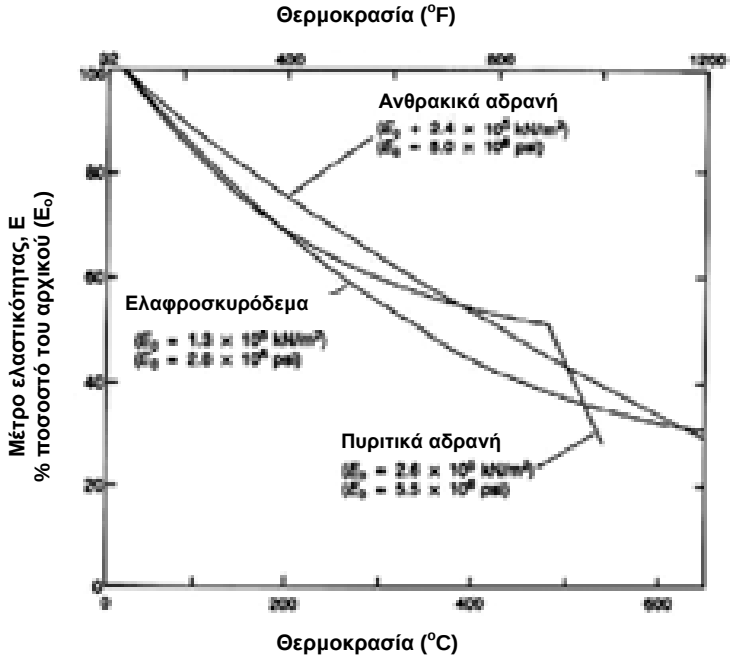


Σχήμα III.17 Μεταβολή του συντελεστή $k_{ck,t}(\theta)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας (Ευρωκώδικας 2) [10]

III.3.3.4 Μέτρο ελαστικότητας

Επειδή το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος δεν είναι γραμμικό, συνήθως, ως μέτρο ελαστικότητας ορίζεται η κλίση χορδής απ' το μηδέν έως το $f_{cc}/3$ (αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας).

Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην θραύση των δεσμών στη μικροδομή του τσιμεντοπολτού όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, καθώς επίσης και στην αύξηση του βραχυπρόθεσμου ερπυσμού λόγω του ότι τα αδρανή αναλαμβάνουν μεγαλύτερες τάσεις καθώς απομακρύνεται το ύδωρ των πόρων (βλ. Σχήμα III.18 Bažant et al., 1996) [1].



Σχήμα III.18 Μέτρο ελαστικότητας σκυροδεμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας. (Bažant et al., 1996) [1]

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_{ciT} εξαρτάται από την θερμοκρασία ομοίως με την θλιπτική αντοχή.

Προσομοίωμα του Lu (βλ. Xiao, 2004 [48])

$$E_{ciT} = (1 - 0.0015 \cdot T) \cdot E_{ci} \quad 20 \le T \le 200\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$E_{ciT} = (0.87 - 0.00084 \cdot T) \cdot E_{ci} \ge 0.28 \cdot E_{ci}.$$

Προσομοίωμα του Li and Guo (βλ. Xiao, 2004 [48])

$$E_{ciT} = E_{ci} \quad 20 \le T \le 60\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$E_{ciT} = (0.83 - 0.0011 \cdot T) \cdot E_{ci} \quad 60 \le T \le 700\ ^\circ\mathrm{C}.$$

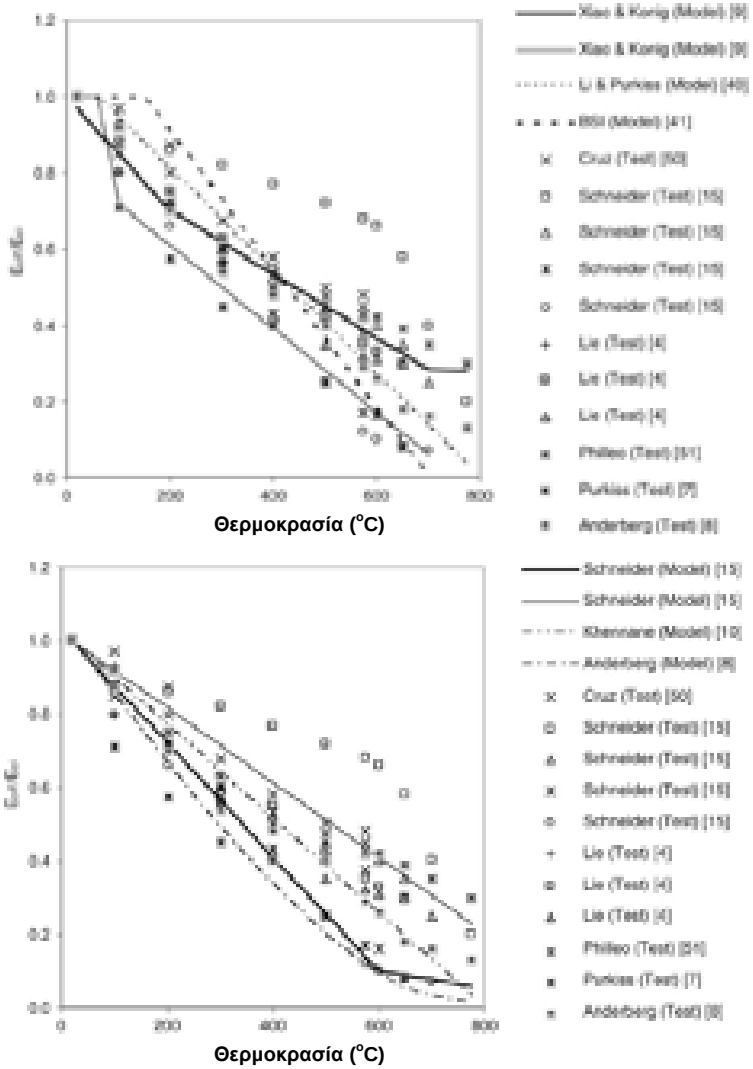
Προσομοίωμα του Schneider, 1986 [49]

$$E_{ciT} = (-0.001552 \cdot T + 1.03104) \cdot g \cdot E_{ci}$$
$$20 \le T \le 600\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$E_{ciT} = (-0.00025 \cdot T + 0.25) \cdot g \cdot E_{ci}$$
$$600 \le T \le 1000\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Προσομοίωμα των Li and Purkiss, 2005 [46]

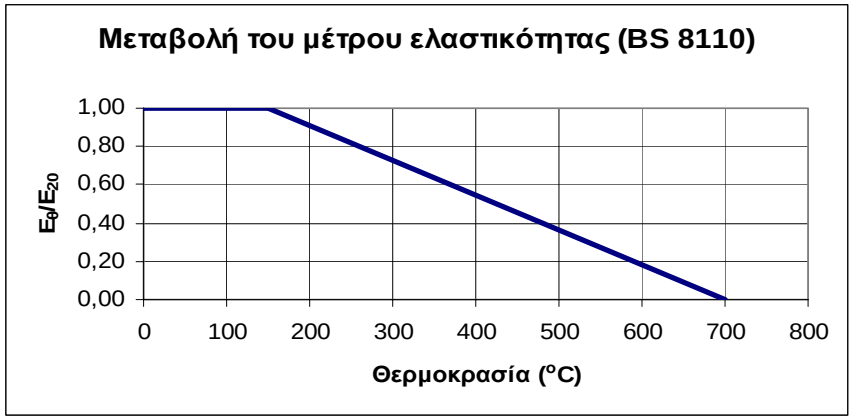
$$E_{ciT} = \frac{800 - T}{740} \cdot E_{ci} \le E_{ci}.$$

Από την σύγκριση των παραπάνω είναι εμφανές ότι υπάρχει διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σήμα III.19 Σύγκριση εναλλακτικών προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα του αρχικού εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας E_{ciT}.

Κατά το BS 8110 το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώνεται γραμμικά από τους 150 ^{o}C και μηδενίζεται στους 700°C (βλ. Σχήμα ΙΙΙ.20) – πρόκειται όμως πιθανώς για σκυρόδεμα με πυριτικά αδρανή.

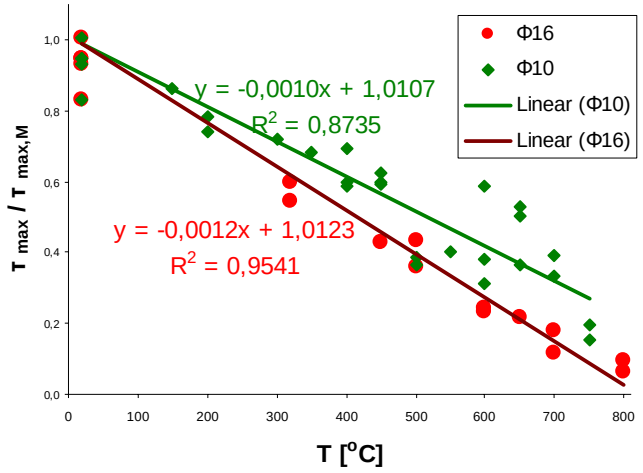


Σχήμα ΙΙΙ.20 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος κατά BS8110.

III.3.3.5 Συνάφεια

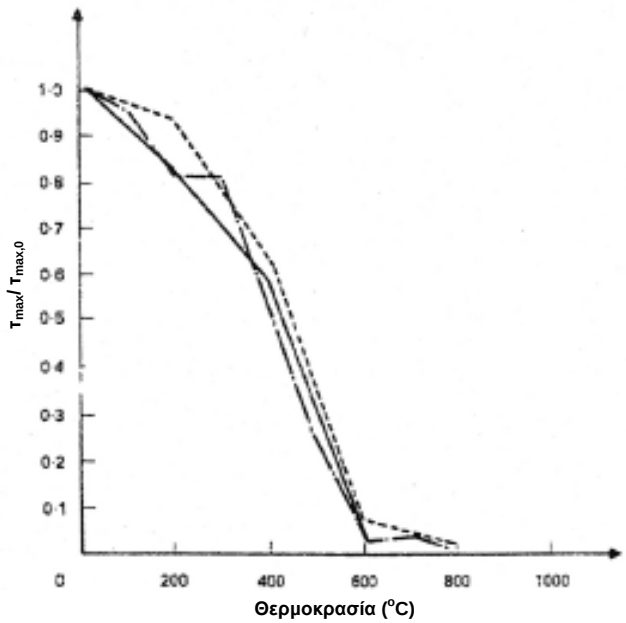
Η διεθνής εμπειρία σχετικά με την επίδραση της πυρκαγιάς και των υψηλών θερμοκρασιών στην συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος είναι περιορισμένη. Η αντοχή σε συνάφεια ράβδων σιδηροπλισμού και σκυροδέματος εξαρτάται αρχικώς από την εφελκυστική αντοχή. Τελικά όμως εξαρτάται περισσότερο απ'την θλιπτική αντοχή (παρά από την εφελκυστική αντοχή). Ο Ευρωκώδικας 2 δεν προτείνει σαφώς κάποια σχέση μειώσεως, έμμεσα όμως συνάγεται ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η σχέση που περιγράφει την μείωση της εφελκυστικής αντοχής (βλ. παράγραφο 3.1.2.3).

Στα Σχήματα III.21 και III.22 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην συνάφεια όπως προέκυψε από πειράματα εξολκεύσεως.



Σχήμα III.21 Μεταβολή της ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας ($\tau_{max}/\tau_{max,M}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) για ράβδους Φ10 και Φ16 [41]

Κατά τον D.J. Naus η μείωση της συνάφειας συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορεί να λαμβάνεται από το Σχήμα ΙΙΙ.22.



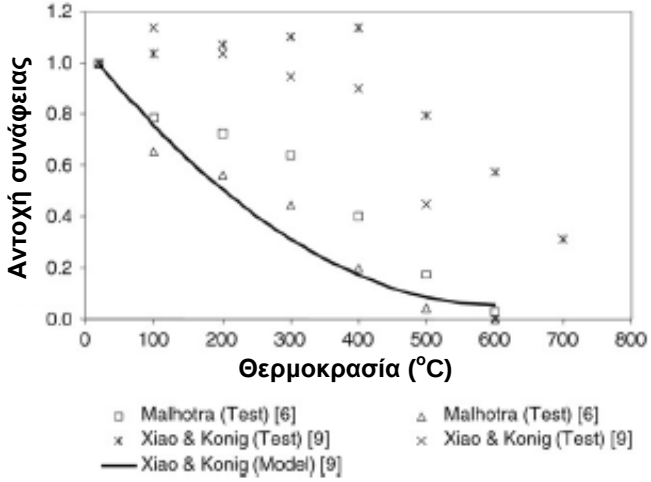
Σχήμα ΙΙΙ.22 Μεταβολή της ανηγμένης μέγιστης τάσης συνάφειας ($\tau_{max}/\tau_{max,0}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας (Τ) [31]

Η συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, ανάλογα με την μορφή του χάλυβα και τον τύπο σκυροδέματος. Καλύτερη σχετικά συμπεριφορά αποδίδουν οι νευροχάλυβες (ιδιαίτερα με επιφανειακή οξείδωση) στις υψηλές θερμοκρασίες.

Οι Xie and Qian (βλ. Xiao and Konig, 2004 [48]) έχουν προτείνει ένα προσομοίωμα που περιγράφει την αντοχή συνάφειας (τ_{uT}) σε θερμοκρασία (T), συναρτήσει της αντοχής συνάφειας σε συνθήκες δωματίου (τ_{uo}).

$$\tau_{uT} = \tau_{uo} \cdot \left[2.7438 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 3.322 \cdot \left(\frac{T}{10} \right) + 105.881 \right] \times 10^{-2}.$$

Η αξιοπιστία του προσομοιώματος στην πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα III.23.



Σχήμα III.23 Σύγκριση προσομοιώματος αντοχής συνάφειας ως προς τη θερμοκρασία με πειραματικά αποτελέσματα.

III.3.3.6 Παραμόρφωση του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η παραμόρφωση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες προέρχεται αθροιστικά από τρεις παράγοντες:

- την άμεση παραμόρφωση ε_{fT} ,
- την ανεμπόδιστη θερμοκρασιακή παραμόρφωση συστολο-διαστολής ε_{th}, και
- την παραμόρφωση λόγω ερπυσμού ε_{cr} .

III.3.3.6.1 Άμεση παραμόρφωση ε_{fT}

Η άμεση παραμόρφωση καθορίζει το διάγραμμα τάσεων – άμεσων παραμορφώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας, και – για τα προσομοιώματα καταστατικής συμπεριφοράς που χρησιμοποιούνται στην πράξη – ορίζεται από ι) την παραμόρφωση στη μέγιστη θλιπτική αντοχή ε_{oT} και το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_{ciT}. Όπως και με την θλιπτική αντοχή, οι πειραματικές σχέσεις παραμόρφωσης ε_{oT} ως προς T και αρχικού μέτρου E_{ciT} ως προς T από τη βιβλιογραφία καλύπτονται από μια πληθώρα προτεινόμενων «νόμων», όπως :

Li and Purkiss :

$$\varepsilon_{oT} = \frac{2 \cdot f_c'}{E_{ci}} + 0.21 \times 10^{-4} \cdot (T - 20) - 0.9 \times 10^{-8} \cdot (T - 20)^2 .$$

Lu and Yao :

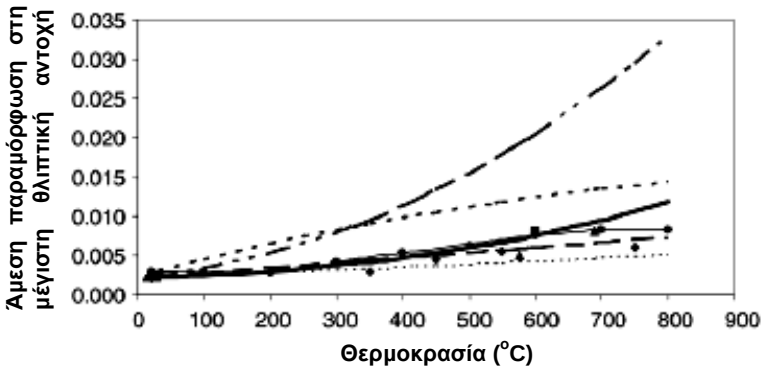
$$\varepsilon_{oT} = \varepsilon_o \cdot (0.0019 \cdot T + 0.9615) .$$

Khennane and Baker :

$$\varepsilon_{oT} = 0.003 \quad 20 \le T \le 200\ °C$$
$$\varepsilon_{oT} = 0.00001156 \cdot T + 0.000686 \le 0.0082 \quad T \ge 200\ °C.$$

Bazant and Chern :

$$\varepsilon_{oT} = 0.0000064 \cdot T + 0.00216 \quad 20 \le T \le 600\ °C$$
$$\varepsilon_{oT} = 0.000015 \cdot T - 0.003 \quad 600 \le T \le 650\ °C.$$



(α) Αφόρτιστο σκυρόδεμα

ή, λαμβάνοντας υπόψη και την αρχική προφόρτιση του υλικού σε ποσοστό της αντοχής του, λ, η σχέση του Terro, 1998 [51] :

$$\varepsilon_{oT} = \left(50\lambda_L^2 - 15\lambda_L + 1\right) \cdot \varepsilon_{o1} + 20 \cdot \left(\lambda_L - 5\lambda_L^2\right) \cdot \varepsilon_{o2} + 5 \cdot \left(10\lambda_L^2 - \lambda_L\right) \cdot \varepsilon_{o3}.$$

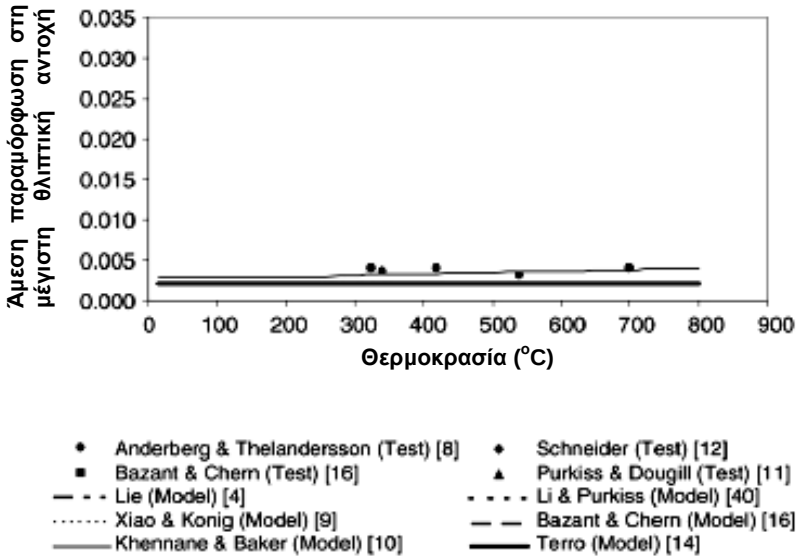
Όπου :

$$\varepsilon_{o1} = 2.05 \times 10^{-3} + 3.08 \times 10^{-6} \cdot T + 6.17 \times 10^{-9} \cdot T^2 + 6.58 \times 10^{-12} \cdot T^3$$

$$\varepsilon_{o2} = 2.03 \times 10^{-3} + 1.27 \times 10^{-6} \cdot T + 2.17 \times 10^{-9} \cdot T^2 + 1.64 \times 10^{-12} \cdot T^3$$

$$\varepsilon_{o3} = 0.002.$$

Οι παραπάνω σχέσεις συγκρίνονται με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας στο Σχήμα ΙΙΙ.24, ανάλογα με την φόρτιση του υλικού.



(β) Προφορτισμένο σκυρόδεμα

Σχήμα ΙΙΙ.24 Σύγκριση εναλλακτικών προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα της μεταβολής της άμεσης παραμόρφωσης στη μέγιστη θλιπτική αντοχή, ε_{oT}, ως προς τη θερμοκρασία Τ.

III.3.3.6.2 Ανεμπόδιστη θερμοκρασιακή παραμόρφωση συστολο-διαστολής ε_{th}

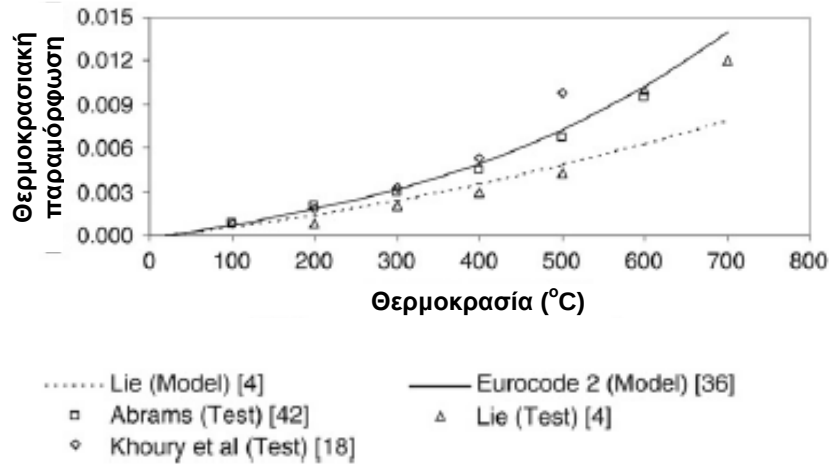
Η θερμοκρασιακή παραμόρφωση υπολογίζεται στην απλούστερη μορφή σαν μια γραμμική σχέση της διαφοράς θερμοκρασίας και της ανηγμένης παραμόρφωσης, μέσω ενός συντελεστή θερμοκρασιακής διαστολής α,

$$\varepsilon_{th} = \alpha \cdot (T - 20) \quad [^{o}C]$$

όπου ο συντελεστής α λαμβάνει τιμή μεταξύ $12 \cdot 10^{-6}$ και $18 \cdot 10^{-6}$, για σκυρόδεμα με πυριτικά αδρανή.

Ο Ευρωκώδικας 2, 2004 [10] υιοθετεί μια μη γραμμική σχέση, λόγω θερμικής ασυμβατότητας μεταξύ αδρανών και της σκληρυμένης πάστας, η οποία για πυριτικά αδρανή είναι της μορφής (βλ. και Σχήμα III.25):

$$\varepsilon_{th} = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \cdot (T - 20\,^{\circ}\mathrm{C}) + 2.3 \times 10^{-11} \cdot (T - 20\,^{\circ}\mathrm{C})^3 \leq 14 \times 10^{-3}$$



Σχήμα III.25 Σύγκριση εναλλακτικών προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα της θερμοκρασιακής παραμόρφωσης συστολο-διαστολής, ε_{th}, ως προς τη θερμοκρασία T, για πυριτικά αδρανή.

III.3.3.6.3 Παραμόρφωση λόγω θερμοκρασιακού ερπυσμού ε_{cr}

Η παραμόρφωση αυτή βασίζεται σε πειραματικές παρατηρήσεις οι οποίες εμφανίζουν μια ερπυστική παραμόρφωση του υλικού, υπό σταθερή τάση και αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία είναι υψηλότερη αυτής λόγω συμβατικού ερπυσμού στο σκυρόδεμα.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, έχουν προταθεί τα ακόλουθα προσομοιώματα ερπυσμού:

α) Προσομοίωμα των Anderberg and Thelandersson, 1976 [18]

Η θερμοκρασιακή ερπυστική παραμόρφωση είναι ευθέως ανάλογη προς την δρώσα τάση και θερμοκρασιακή παραμόρφωση.

$$\varepsilon_{tr} = k_{tr} \cdot \left(\frac{f_{cT}}{f'_c}\right) \cdot \varepsilon_{th} \quad T \leq 550\,°\mathrm{C}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{tr}}{\partial T} = 0.0001 \cdot \left(\frac{f_{cT}}{f'_c}\right) \quad T \geq 550\,°\mathrm{C}$$

, όπου $1.8 < \kappa < 2.35$.

β) Προσομοίωμα του Schneider, 1986 [49]

Η θερμοκρασιακή ερπυστική παραμόρφωση είναι συνάρτηση της τάσης (f_{cT}), της θερμοκρασίας, της αρχικής παραμόρφωσης πριν από τη φόρτιση (f_{ci}) και της αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του υλικού ως προς T.

$$\varepsilon_{tr} = \frac{\Phi}{g} \cdot \frac{f_{cT}}{E_{ciT}}$$

$$\Phi = g \cdot \{C_1 \cdot \tanh[\gamma_w \cdot (T - 20)] + C_2 \cdot \tanh[\gamma_o \cdot (T - T_g)] + C_3\} + \frac{f_{cT}}{f'_{cT}} \cdot \frac{T - 20}{100}$$

$$g = 1 + \frac{f_{ci}}{f'_c} \cdot \frac{T - 20}{100} \quad \frac{f_{ci}}{f'_c} \leq 0.3.$$

,

$$\gamma_w = (0.3 \cdot w + 2.2) \times 10^{-3}$$

και w το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας και C_1, C_2, C_3, γ_o, T_g σταθερές ίσες προς 2.60, 1.40, 1.40, 0.0075 και 700 για πυριτικά αδρανή.

γ) Προσομοίωμα του Terro, 1998 [51]

Βασίζεται σε πειράματα του Khoury, 1985 [52] και λαμβάνει υπόψη το ποσοστό κατ' όγκο των αδρανών V_a.

$$\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{0.3} \times \left(0.032 + 3.226 \cdot \frac{f_{ci}}{f'_c}\right) \cdot \frac{V_a}{0.65}$$

, όπου $f_{ci}/f_c' \leq 3.0$.

III.4 ΧΑΛΥΒΑΣ

III.4.1 Γενικά

Με την έκθεση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζονται κυρίως:

- το όριο διαρροής,
- η εφελκυστική αντοχή και
- η παραμόρφωση θραύσεως.

Επίσης ενδέχεται να εμφανισθούν και φαινόμενα όπως:

- ερπυσμός και χαλάρωση
- μεταβολή της μικροδομής του χάλυβα.

Η συμπεριφορά των χαλύβων **κατά την έκθεση** σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από:

- Την θερμοκρασία της έκθεσης
- Τον χρόνο της έκθεσης
- Την σύσταση και την μέθοδο παραγωγής των χαλύβων

Μετά την επάνοδο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι μεταβολές:

- είτε παραμένουν
- είτε αίρονται (μερικώς ή ολικώς)

ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής, την θερμοκρασία έκθεσης αλλά και με την διάρκεια έκθεσης

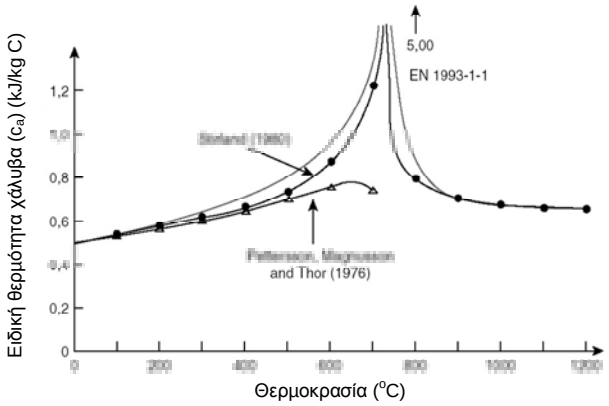
III.4.2 Θερμικές ιδιότητες χάλυβα

III.4.2.1 Ειδική θερμότητα

Ο Malhotra [12], βασιζόμενος στα πειραματικά αποτελέσματα των Pettersson, Magnusson και Thor (1976) και Stirland (1980) προτείνει για την ειδική θερμότητα του χάλυβα c_α (J/kg^oC) την σχέση:

$$c_\alpha = 475 + 6,010 \times 10^{-4}\theta_\alpha^{\,2} + 9,64 \times 10^{-2}\theta_\alpha^{\,2}, \qquad \theta_\alpha \not> 750^oC \qquad (1)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ασυνέχειας που παρουσιάζει η ειδική θερμότητα του χάλυβα γύρω στους 750°C, η προηγούμενη εξίσωση ισχύει μέχρι αυτή την θερμοκρασία.



Σχήμα III.26 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας. (Stirland – Εξίσωση 1), (EN 1993-1-1 – Εξισώσεις 2, 3, 4, 5) [12].

Ο EN 1993-1-2 δίνει τις παρακάτω εξισώσεις που ισχύουν μέχρι τους 1200°C [10]:

Για 20°C $\leq \theta\alpha \leq$ 600°C $$c_\alpha = 425 + 0,773\theta_\alpha - 1,69 \times 10^{-3}\theta_\alpha^{\,2} + 2,22 \times 10^{-6}\theta_\alpha^{\,3} \qquad (2)$$

Για 600°C $\leq \theta\alpha \leq$ 735°C $$c_\alpha = 666 - \frac{1302}{\theta_\alpha - 738} \qquad (3)$$

Για 735°C $\leq \theta\alpha \leq$ 900°C $$c_\alpha = 545 - \frac{17820}{\theta_\alpha - 731} \qquad (4)$$

Για 900°C $\leq \theta\alpha \leq$ 1200°C $$c_\alpha = 650 \qquad (5)$$

Πάντως, για απλά υπολογιστικά προσομοιώματα, μπορεί να θεωρηθεί και μία σταθερή τιμή για το c_α , ίση με 600 J/kg•K.

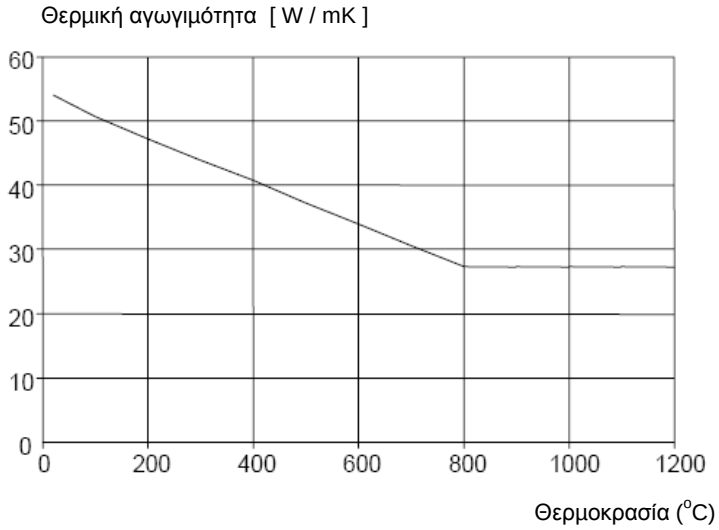
III.4.2.2 Θερμική αγωγιμότητα

Κατά τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 [10], η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 800°C και μετά παραμένει σταθερή. Ειδικότερα, η ειδική θερμότητα μπορεί να λαμβάνεται από τις σχέσεις:

Για 20°C $\leq \theta_\alpha \leq$ 800°C: $\lambda_\alpha = 54 - 33,3 \times 10^{-3} \theta_\alpha$ (1)

Για 800°C $\leq \theta_\alpha$: $\lambda_\alpha = 27,3$ (2)

Να σημειωθεί επίσης ότι, για προσεγγιστικούς υπολογισμούς, είναι επιτρεπτό να θεωρηθεί η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα ίση με 45 W/mK.



Σχήμα III.27 Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας. (EN 1993-1-2 – Εξισώσεις 1, 2)

III.4.2.3 Θερμική διαστολή

Κατά τον Ευρωκώδικα 3, η θερμική διαστολή των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται από τις σχέσεις:

Για 20°C $\leq \boldsymbol{\theta}_\alpha \leq$ 750°C: $\Delta l/l = 1.2*10^{-5}\theta_\alpha + 0.4*10^{-8}\theta_\alpha^2 - 2.416*10^{-4}$ (2)

Για 750°C $\leq \boldsymbol{\theta}_\alpha \leq$ 860°C: $\Delta l/l = 1.1*10^{-2}$ (3)

Για 860°C $\leq \boldsymbol{\theta}_\alpha \leq$ 1200°C: $\Delta l/l = 2*10^{-5}\theta_\alpha - 6.2*10^{-3}$ (4)

Όπου l το μήκος στους 20°C

Δl η μεταβολή του μήκους λόγω της θερμοκρασίας, και

θ_α η θερμοκρασία του χάλυβα (°C)

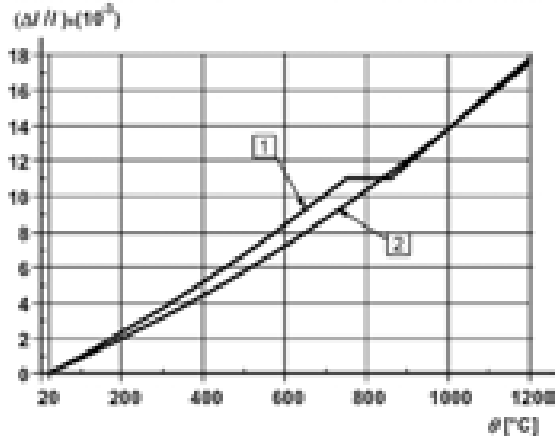
Η μεταβολή φαίνεται στο Σχήμα III.28, καμπύλη 1.

Η αντίστοιχη σχέση για χάλυβα προεντάσεως είναι:

Για 20°C $\leq \boldsymbol{\theta}_\alpha \leq$ 1200°C: $\Delta l/l = -2{,}016 \times 10^{-4} + 10^{-5}\,\theta_\alpha + 0{,}4 \times 10^{-8}\,\theta_\alpha^{\,2}$

Η μεταβολή φαίνεται στο Σχήμα III.28, καμπύλη 2.

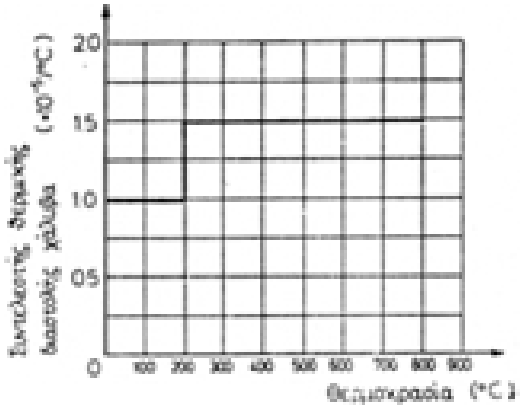
Παρατηρείστε ότι σε σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, η θερμική παραμόρφωση στους 600°C είναι κατά 25% μικρότερη της παραμόρφωσης του χάλυβα. Τούτο είναι άλλη μια αιτία βλαβών του Ο.Σ..



Σχήμα III.28 Μεταβολή της θερμικής διαστολής του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας. (EN 1993-1-2)):

- Καμπύλη 1 για κοινούς χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος,
- Καμπύλη 2 για χάλυβες προεντάσεως

Και εδώ, παρατηρείται μια αύξηση του συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα III.29 Συντελεστής θερμικής διαστολής χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες [43]

III.4.3 Εφελκυστική αντοχή και όριο διαρροής χάλυβα

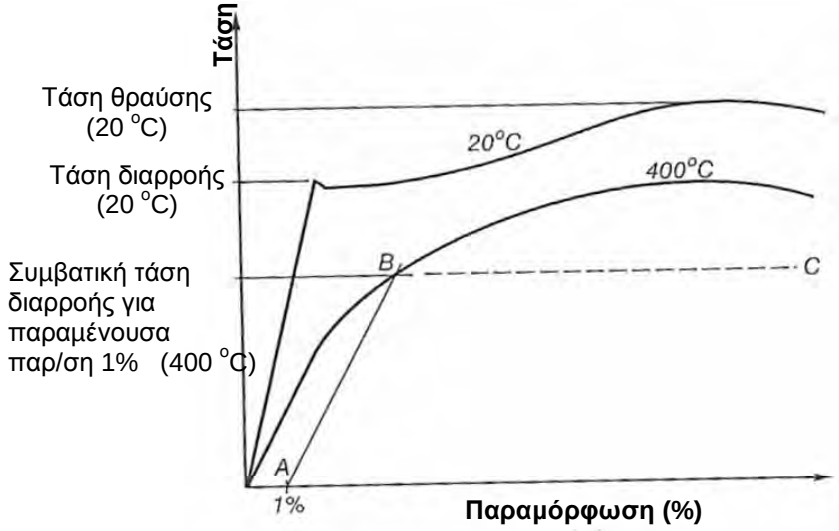
Οι αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος μειώνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης. Οι μειώσεις είναι σχετικά μικρές για εκθέσεις σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200°C, και γίνονται μεγαλύτερες για υψηλότερες θερμοκρασίες, φθάνοντας σε μείωση έως και 60% των αρχικών τιμών για θερμοκρασία 600°C. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες η γραμμική παρεμβολή δίνει ικανοποιητική προσέγγιση.

Στους χάλυβες ψυχρής κατεργασίας, μεταβολές μπορεί να παρατηρηθούν από θερμοκρασίες της τάξης των 150°C (βλ. και ΚΤΧ [33] Παραγρ. 3.6.2.2.)

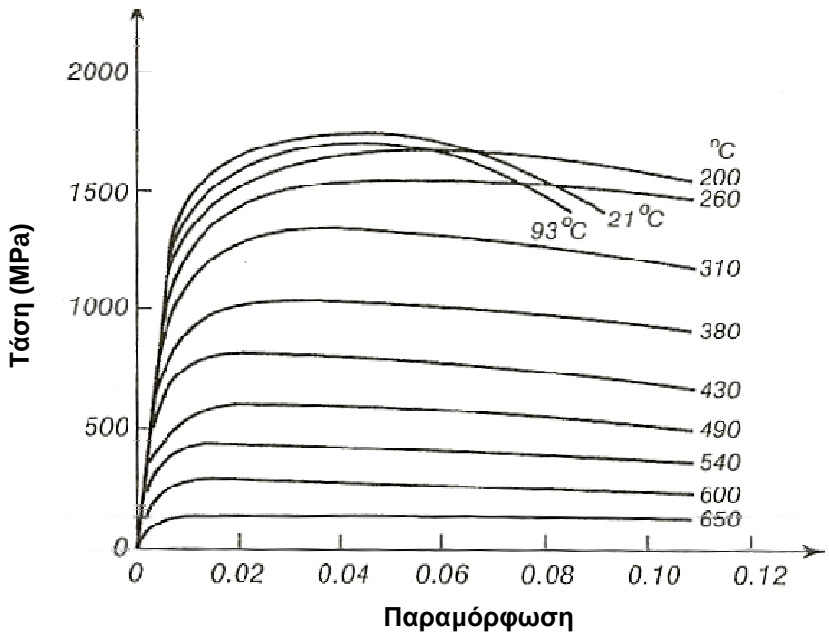
Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600°C ο ρυθμός μείωσης της αντοχής αυξάνεται, ενώ λόγω και των υπόλοιπων μεταβολών που θα συμβούν στον χάλυβα (μεταβολές μικρογραφικής μορφής) αλλά και στο σκυρόδεμα (μείωση συνάφειας), είναι ενδεχόμενο να προκληθούν σοβαρές βλάβες σε στοιχεία της κατασκευής.

Στους χάλυβες με διακριτό όριο διαρροής η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί καμπύλωση του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων. Βλέπε σχηματικό διάγραμμα στο Σχήμα III.30, καθώς και διάγραμμα σ-ε χαλύβων θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες (Σχήμα III.29).

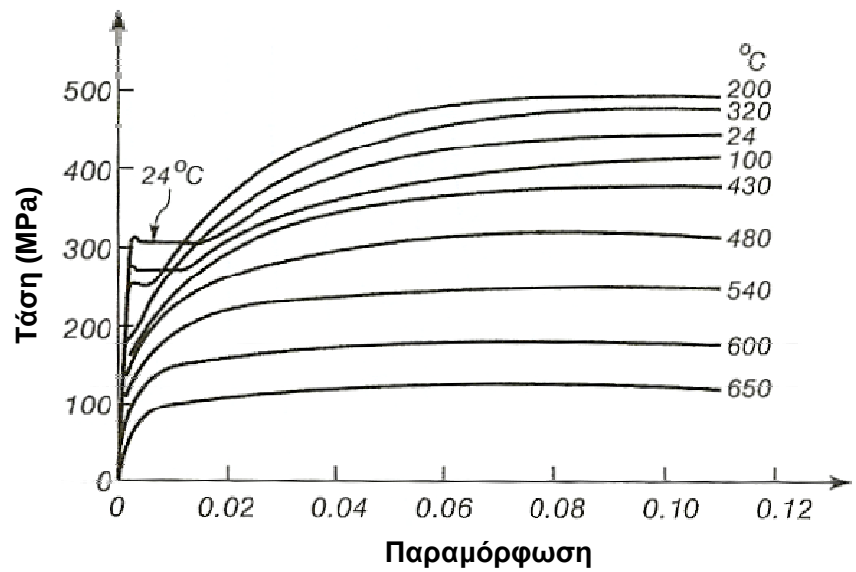
Στο Σχήμα III.32 παρουσιάζονται τα διάγραμμα σ-ε χαλύβων προεντάσεως για διάφορες θερμοκρασίες (Harmathy, 1993) [4] από το από το [16] (Σχήμα 8.25).



Σχήμα III.30 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος στο οποίο φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλωση που υφίσταται το διάγραμμα όταν ο χάλυβας εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. [16]

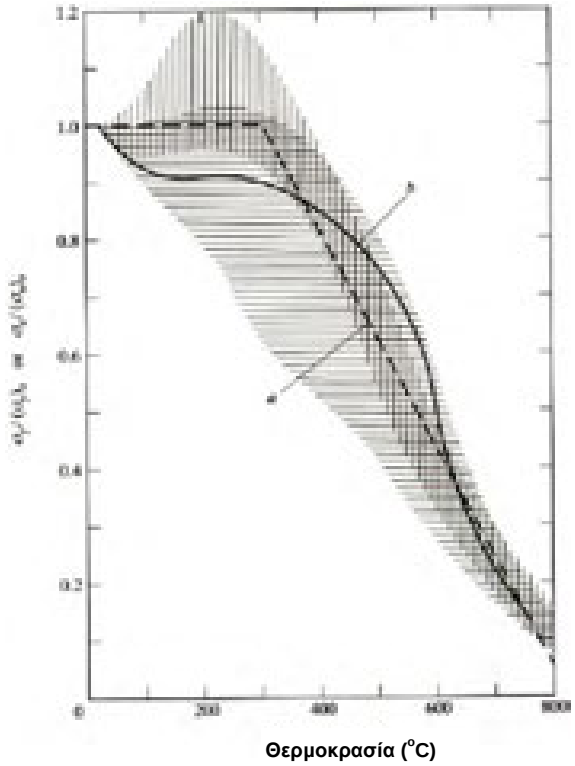


Σχήμα ΙΙΙ.31 Διάγραμμα σ-ε χαλύβων θερμής έλασης για διάφορες θερμοκρασίες (Harmathy, 1993)[4] από το [16] (Σχήμα 8.24)

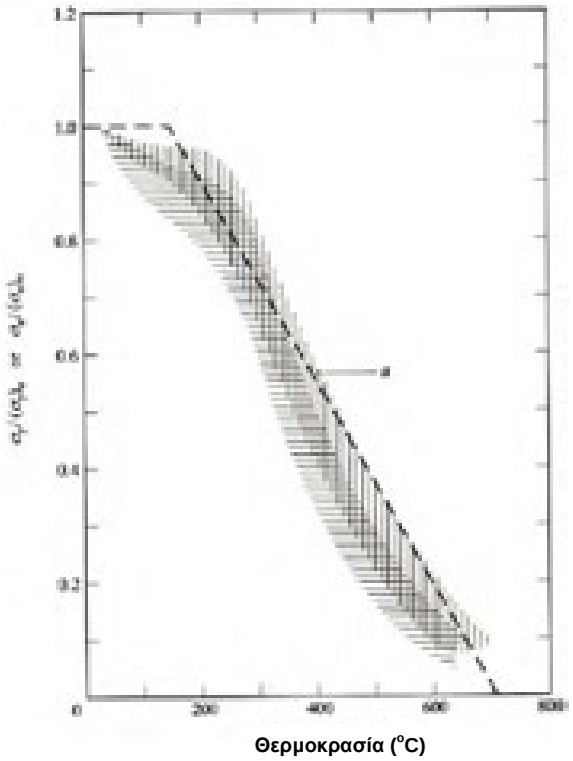


Σχήμα ΙΙΙ.32 Διάγραμμα σ-ε χαλύβων προεντάσεως για διάφορες θερμοκρασίες (Harmathy, 1993) [4] από το [16] (Σχήμα 8.25)

Τα Σχήματα ΙΙΙ.33 και ΙΙΙ.34 παρουσιάζουν τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής και του ορίου διαρροής για χάλυβες ψυχρής κατεργασίας (ΨΚ) και θερμής κατεργασίας (ΘΕ-Χ) αντιστοίχως κατά τον Harmathy [4].

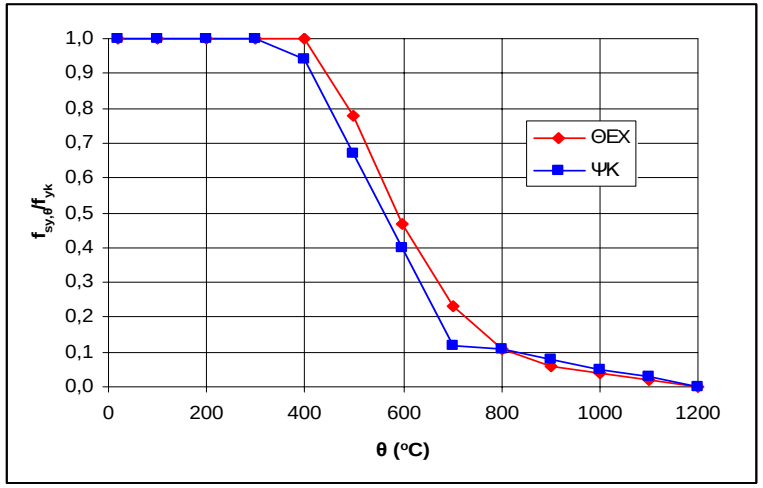


Σχήμα ΙΙΙ.33 Μεταβολή του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος **ψυχρής κατεργασίας (ΨΚ)** κατά Harmathy [4]. (Οι περιοχές με κατακόρυφη διαγράμμιση αντιπροσωπεύουν την εφελκυστική αντοχή και οι περιοχές με οριζόντια διαγράμμιση το όριο διαρροής) από το [16] (Σχήμα 8.27).

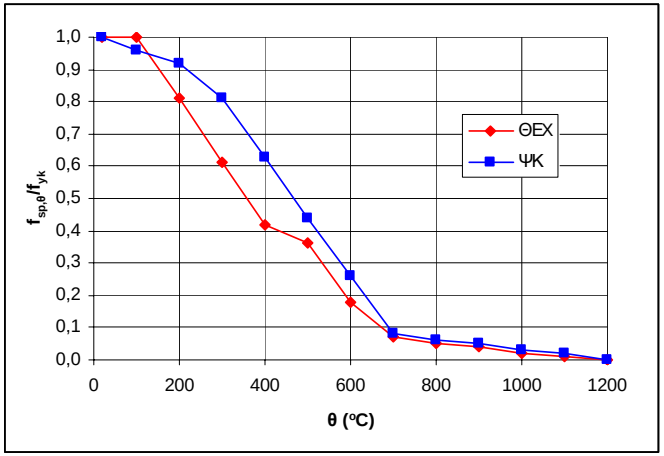


Σχήμα ΙΙΙ.34 Μεταβολή του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος **θερμής έλασης χωρίς άλλη περαιτέρω θερμική επεξεργασία (ΘΕ-Χ)** κατά Harmathy [4]. (Οι περιοχές με κατακόρυφη διαγράμμιση αντιπροσωπεύουν την εφελκυστική αντοχή και οι περιοχές με οριζόντια διαγράμμιση το όριο διαρροής) από το [16] (Σχήμα 8.28)

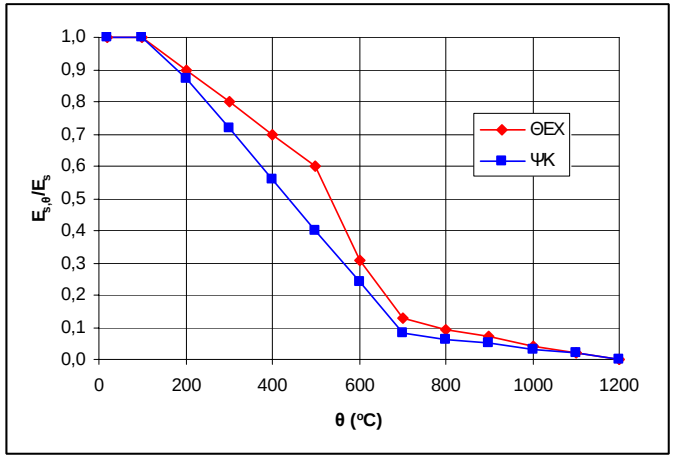
Για το όριο διαρροής (Σχ. ΙΙΙ.35) και το μέτρο ελαστικότητας (Σχ. ΙΙΙ.37) των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος καθώς και για το όριο διαρροής του χάλυβα προεντάσεως (Σχ. ΙΙΙ.36) σε υψηλές θερμοκρασίες ο Ευρωκώδικας 2 (Πιν. 3.2.α και 3.2.β) δίνει τιμές μόνον για τους χάλυβες ψυχρής κατεργασίας (ΨΚ) και για τους χάλυβες θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω θερμική κατεργασία (ΘΕ-Χ), ενώ για τους χάλυβες θερμής έλασης η οποία ακολουθείται από μία άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας (χάλυβες ΘΕ-Θ, χάλυβες τύπου Tempcore, Thermex κ.λπ.) οι οποίοι είναι οι συνηθέστερα παραγόμενοι σήμερα δεν δίνονται τιμές. Ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντοχή αρχίζει να μειώνεται από τους 200°C μεταβαλλόμενη γραμμικά μέχρι τους 600°C όπου έχει μειωθεί στο 40% των αρχικών τιμών.



Σχήμα ΙΙΙ.35 Μεταβολή του ορίου διαρροής χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, Ευρωκώδικας 2 [10].



Σχήμα ΙΙΙ.36 Μεταβολή του ορίου διαρροής χαλύβων προεντάσεως συναρτήσει της θερμοκρασίας, Ευρωκώδικας 2 [10].



Σχήμα ΙΙΙ.37 Μεταβολή του μέτρου Ελαστικότητας χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, Ευρωκώδικας 2 [10].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής σε διαρροή του χάλυβα οπλισμού καθώς και τη σταδιακή αφαίρεση του πλατώ διαρροής το οποίο χαρακτηρίζει τους μαλακούς χάλυβες. Ως εκ τούτου, η αντοχή διαρροής σε υψηλές θερμοκρασίες αφορά την φαινόμενη αντοχή διαρροής f_{yT} σε παραμόρφωση 2.0% αντί της συμβατικής 0.2%.

α) Προσομοίωμα του Lie, 1992 [53]

$$f_{yT} = \left[1 + \frac{T}{900 \cdot \ln\left(\frac{T}{1750}\right)}\right] \cdot f_y \quad 0 < T \leq 600\,°\mathrm{C}$$

$$f_{yT} = \left[\frac{340 - 0.34 \cdot T}{T - 240}\right] \cdot f_y \quad 600 < T \leq 1000\,°\mathrm{C}.$$

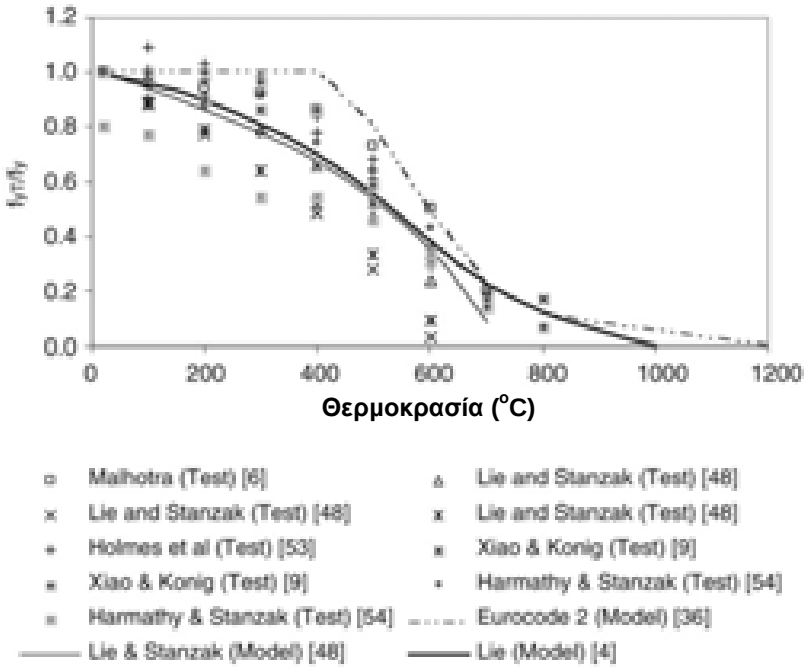
β) Προσομοίωμα των Lie and Sanzak, 1974 [54]

$$f_{yT} = f_y\left(1 - 0.78 \cdot T^* - 1.89 \cdot T^{*4}\right)$$

$$T^* = \frac{\left(\frac{9}{5} \cdot T - 36\right)}{1800}.$$

γ) Σχέσεις Ευρωκώδικα 2 , 2004 [10]

Οι παραπάνω σχέσεις συγκρίνονται με τη σχέση που παρέχεται στον Ευρωκώδικα 2 στο Σχήμα ΙΙΙ.38.



Σχήμα ΙΙΙ.38 Σύγκριση εναλλακτικών προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα, της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής διαρροής, f_{yT}, ως προς τη θερμοκρασία Τ.

III.4.4 Συμπεριφορά χαλύβων μετά από την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (βλ. και ΚΤΧ [33], Παραγρ. 3.6.2.2)

Μετά από την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και την επαναφορά των χαλύβων σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

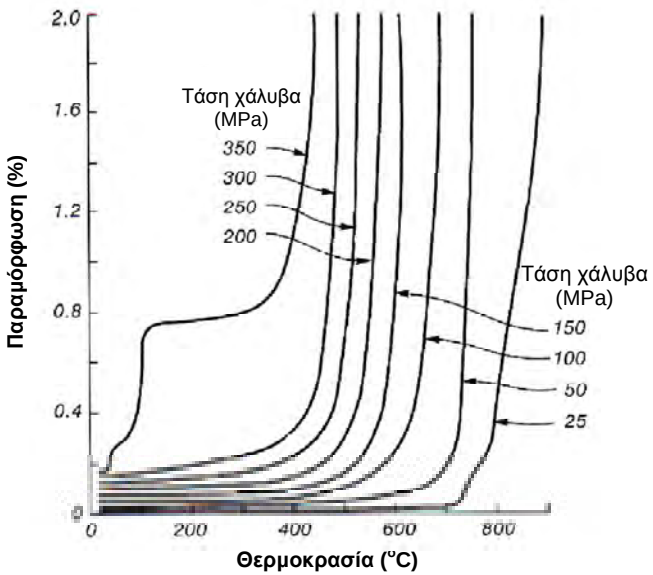
- Για θερμοκρασίες έκθεσης μέχρι περίπου 500°C:
  - Οι χάλυβες ΘΕ-Θ και ΘΕ-Χ ανακτούν πρακτικώς τις μηχανικές ιδιότητες που είχαν πριν από την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.
  - Οι χάλυβες ΨΚ, ανάλογα και με τον βαθμό ψυχρής κατεργασίας που είχαν υποστεί κατά την φάση της παραγωγής τους, μπορεί να παρουσιάσουν σημαντική μείωση της παραμόρφωσης θραύσης ε_u μετά την επάνοδό τους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο φαινόμενο της εργογήρανσης του υλικού (strain aging) που έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής, τη μεγαλύτερη σχετικά αύξηση του ορίου διαρροής και τη μείωση της ολκιμότητάς τους (η οποία εκφράζεται με τη μείωση του λόγου κράτυνσης (f_t/f_y) και τη μείωση της παραμόρφωσης θραύσης). Η μείωση της ολκιμότητάς τους έχει φυσικά αντίστοιχες επιπτώσεις και στην πλαστιμότητα των στοιχείων από Ο.Σ.. Σημειώνεται ότι έχουν μετρηθεί μεταβολές των παραπάνω μεγεθών σε ποσοστά έως και 15%.

- Για θερμοκρασίες έκθεσης από 500°C μέχρι 650°C:
  - Οι ΘΕ-Θ χάνουν μέρος της αντοχής τους (περίπου γραμμική μείωση από το 0% της αντοχής στους 500°C, μέχρι το 50% της αντοχής στους 650°C). Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην μετατροπή των εκτός ισορροπίας φάσεων (που με την παρουσία τους αυξάνουν την αντοχή) σε φάσεις ισορροπίας (δηλαδή Fe-α και Fe_3C).
  - Οι ΘΕ-Χ πρακτικώς δεν χάνουν την αντοχή τους.
  - Οι χάλυβες ΨΚ, ανάλογα με το βαθμό ψυχρής κατεργασίας, μπορεί και να χάσουν όλη την επιπλέον αντοχή που είχαν αποκτήσει με την ψυχρή κατεργασία (και πρακτικώς να μεταπέσουν σε χάλυβα κατηγορίας S200). Αυτό συμβαίνει καθώς η θερμοκρασία των 500°C είναι η κατώτερη στην οποία θεωρητικά είναι πιθανόν να προκύψει ανακρυστάλλωση, η οποία είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων στους χάλυβες ΨΚ (αναλυτικότερα βλ. Παράγραφο 3.6.2.2 (β) του ΚΤΧ [33]).

- Για θερμοκρασίες έκθεσης άνω των 650°C:
  - Οι ΘΕ-Χ, πρακτικώς, δεν χάνουν την αντοχή τους για θέρμανση μέχρι τους 723°C.
  - Οι υπόλοιποι χάλυβες (ΘΕ-Θ και ΨΚ) χάνουν ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό της αντοχής τους από ό,τι είχαν χάσει σε θερμοκρασίες έκθεσης από 500°C μέχρι 650°C. Οι τελικές τιμές των αντοχών τους μπορούν να μειωθούν ακόμη και κάτω από το 50% των αρχικών.

III.4.5 Παραμόρφωση λόγω ερπυσμού

Οι ερπυστικές παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές για τους χάλυβες σε κανονικές θερμοκρασίες, αλλά μπορεί να πάρουν σημαντικές τιμές για θερμοκρασίες άνω των 500°C. Οι Kirby and Preston (1988), διαπίστωσαν ότι η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού εξαρτάται ιδιαίτερα από την θερμοκρασία και το μέγεθος των τάσεων. Στο Σχήμα III.39 φαίνεται η επίδραση αυτή για δομικό χάλυβα.



Σχήμα III.39 Διάγραμμα παραμόρφωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας για χάλυβα. Ρυθμός θέρμανσης = 10 °C/min. (Kirby et al., 1988) από το [16] (Σχήμα 8.23)

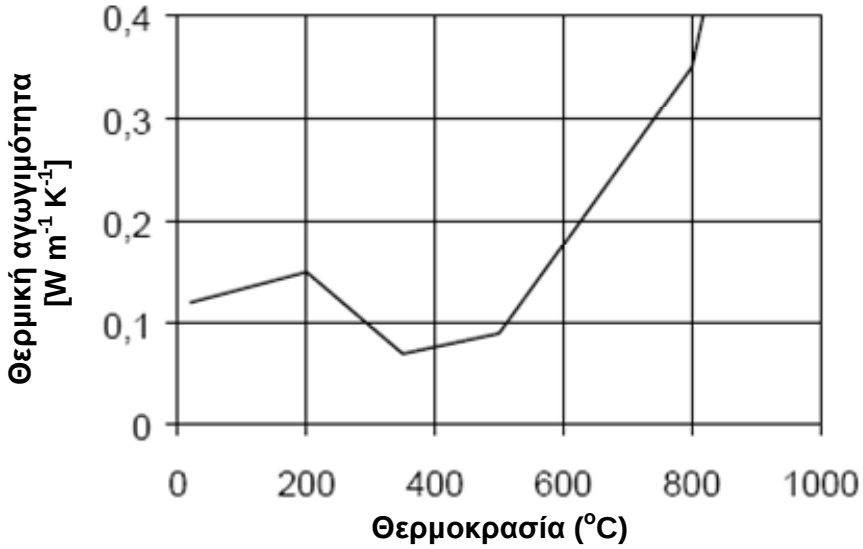
III.5 ΞΥΛΟ

III.5.1 Γενικά

Το ξύλο παρουσιάζει σημαντικές ιδιαιτερότητες:

- Μεγάλες διασπορές των τιμών των ιδιοτήτων
- Διαφορετικές τιμές των ιδιοτήτων σε διαφορετικές διευθύνσεις (ορθότροπο υλικό)
- Διαφορετική συμπεριφορά σε εφελκυσμό και θλίψη
- Μεγάλη επίδραση από το μέγεθος του στοιχείου και από την διάρκεια φόρτισης
- Επίδραση από την θερμοκρασία:
  - Στους 100°C: έντονη επίδραση από τον ατμό
  - Στους 200°C: πυρόλυση (θερμική αποσύνθεση)
  - Στους 300°C: απανθράκωση

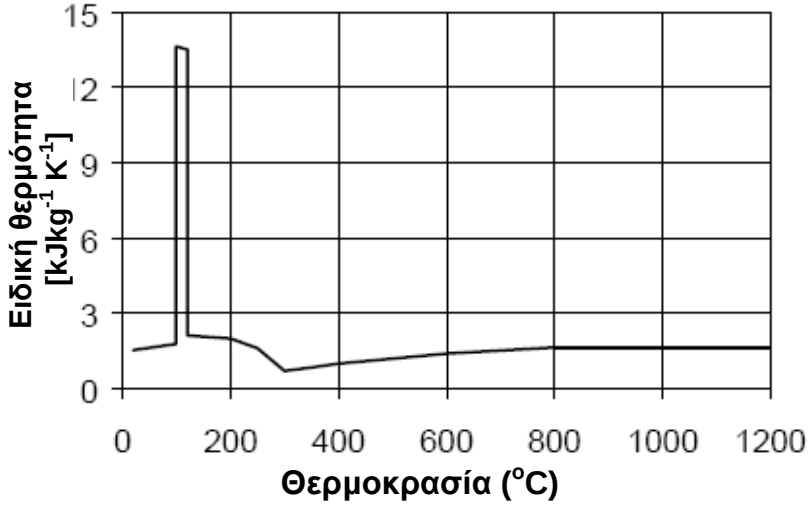
III.5.2 Θερμική αγωγιμότητα



Σχήμα III.40 Θερμική αγωγιμότητα ξύλου (και του απανθρακωμένου στρώματος). Ευρωκώδικας 5, [38].

III.5.3 Ειδική θερμότητα

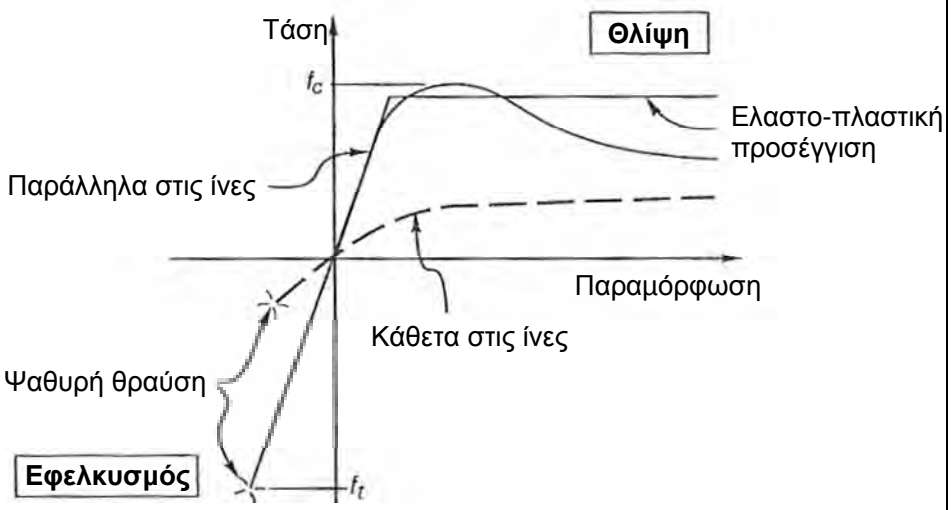
Στο Σχήμα III.41 φαίνεται η μεταβολή της ειδικής θερμότητας του ξύλου συναρτήσει της θερμοκρασίας κατά τον Ευρωκώδικα 5. Η έντονη αύξηση της ειδικής θερμότητας που παρατηρείται στην περιοχή των 100°C οφείλεται στην εξάτμιση της περιεχόμενης υγρασίας.



Σχήμα III.41 Ειδική θερμότητα ξύλου (και του απανθρακωμένου στρώματος). Ευρωκώδικας 5, [38].

III.5.4 Μηχανικές ιδιότητες

Ως γνωστόν, το ξύλο παρουσιάζει διαφορετικές τιμές των ιδιοτήτων του παράλληλα και κάθετα προς τις ίνες, υπό συνήθεις θερμοκρασίες.

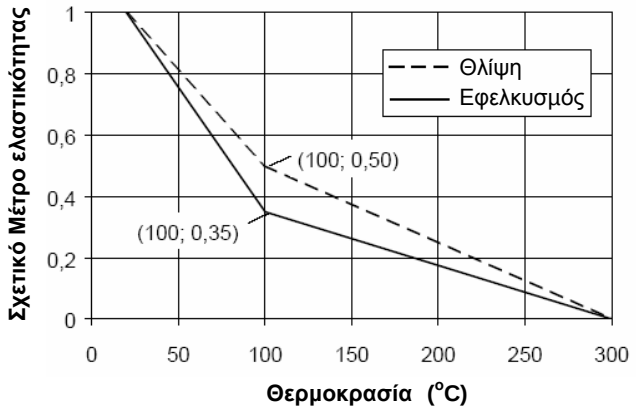


Σχήμα III.42 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ξύλου για φόρτιση παράλληλα προς τις ίνες (συνεχής καμπύλη) και κάθετα στις ίνες (διακεκομμένη καμπύλη), υπό συνήθεις θερμοκρασίες (Buchanan 2001) [16]

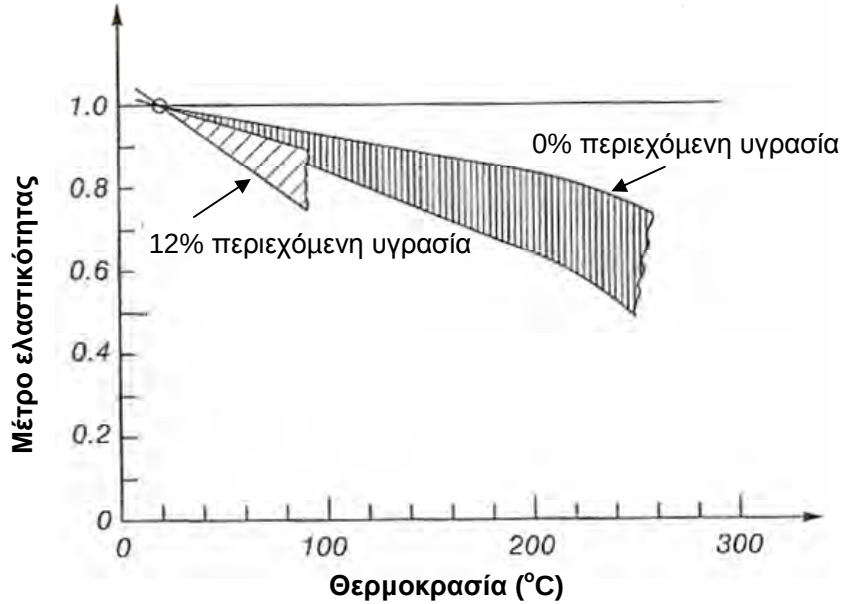
III.5.4.1 Μέτρο ελαστικότητας

Υπό υψηλές θερμοκρασίες

Η αύξηση της θερμοκρασίας μαζί με την ενυπάρχουσα υγρασία έχουν συνέπεια την μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ξύλου˙ (δημιουργούνται συνθήκες ανάλογες με εκείνες που εφαρμόζονται κατά την κατεργασία προκειμένου να επιτευχθεί καμπύλωση του ξύλου).



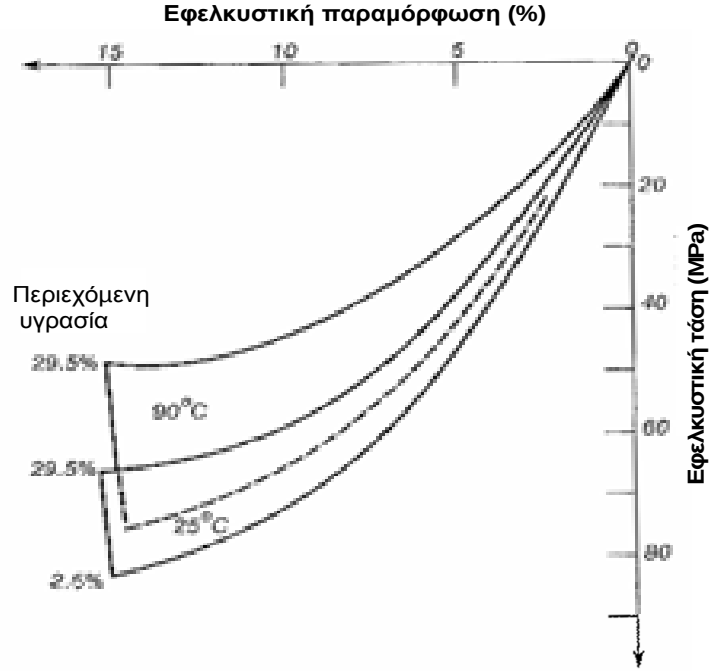
Σχήμα III.43 Μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ξύλου σε θλίψη και σε εφελκυσμό, **παράλληλα** προς τις ίνες υπό υψηλές θερμοκρασίες, για κωνοφόρα Ευρωκώδικας 5 [38] σχήμα Β.5



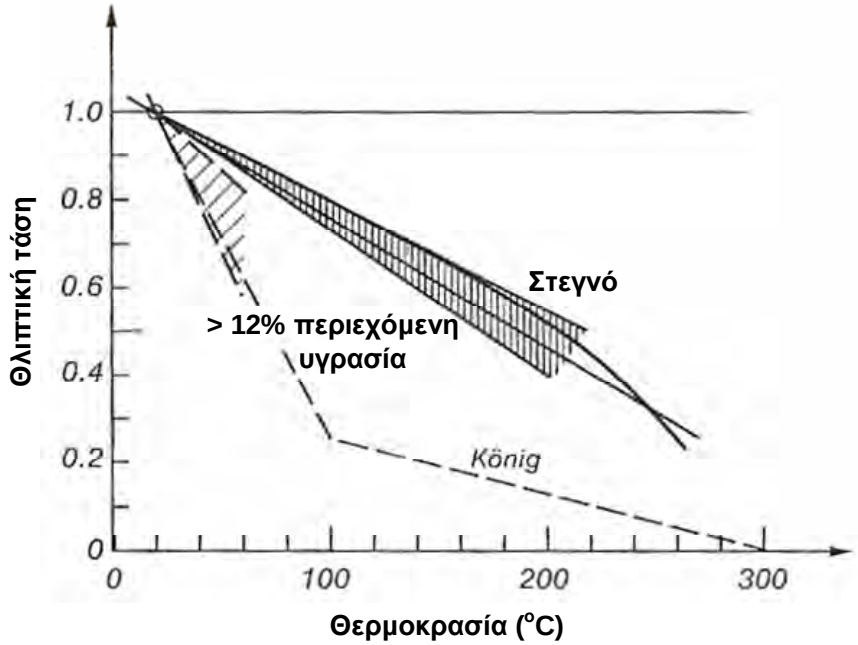
Σχήμα III.44 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, υπό υψηλές θερμοκρασίες, **παράλληλα** προς τις ίνες (Wood handbook,1987) από το Buchanan [16], σχήμα 10.8.

III.5.4.2 Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή παράλληλα προς τις ίνες

Η αντοχή του ξύλου, παράλληλα προς τις ίνες, μειώνεται αυξανομένης της θερμοκρασίες και της υγρασίας ξύλου. Ενδεικτικά, από το Σχήμα III.45 προκύπτει ότι στους 90°C, με 29,5% υγρασία ξύλου, η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 60% της αντοχής του ξηρού ξύλου υγρασίας 2,5% σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C). Κάτι ανάλογο γίνεται και στη θλίψη (βλ. Σχήμα III.46).



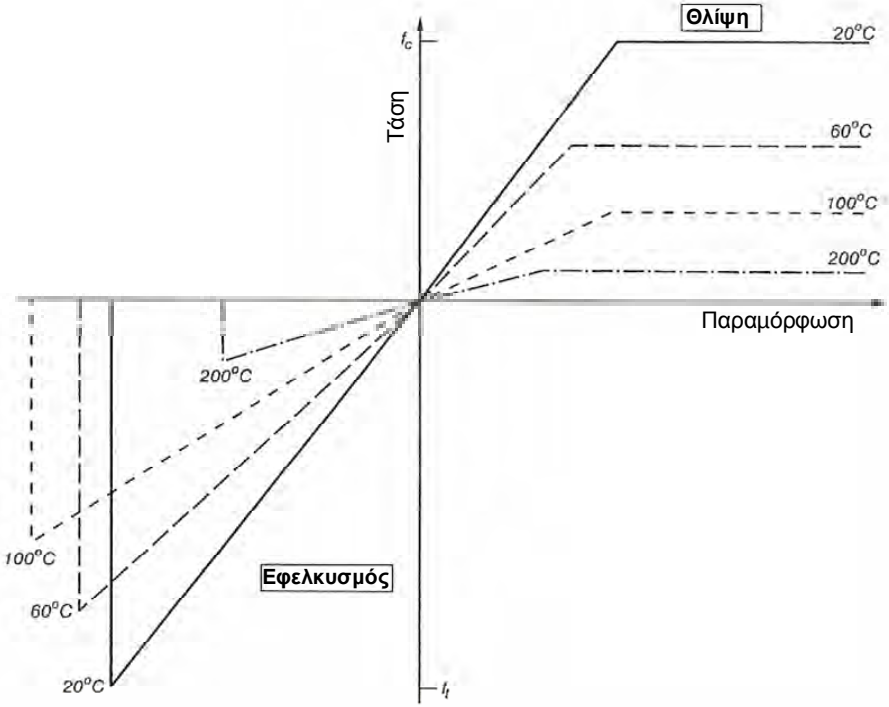
Σχήμα III.45 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ξύλου σε εφελκυσμό παράλληλα προς τις ίνες για δύο ποσοστά υγρασίας (2,5% και 29,5%) και για δύο θερμοκρασίες 25° και 90°) (Östman, 1985) από το Buchanan [16], σχήμα 10.10.



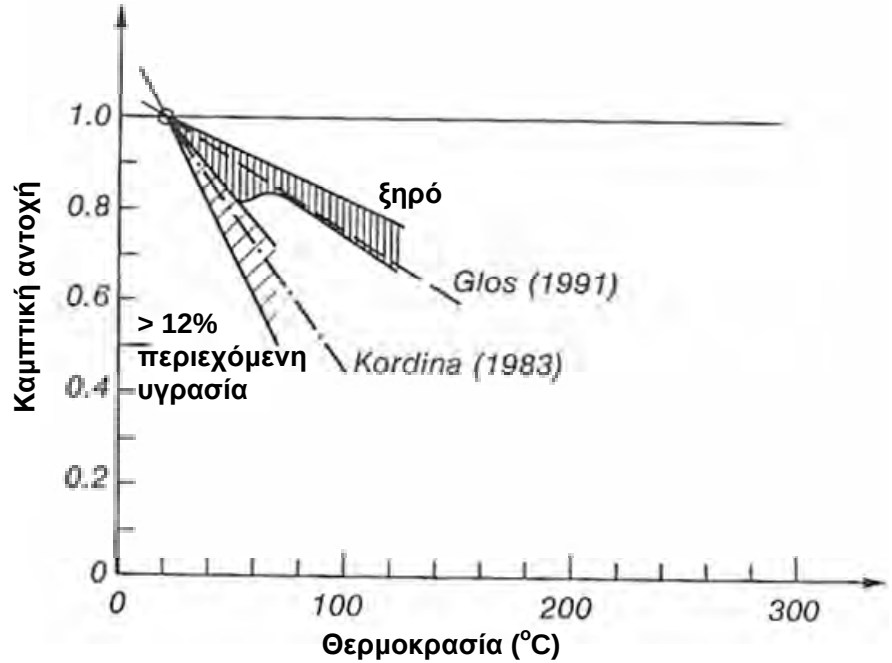
Σχήμα III.46 Μείωση της θλιπτικής αντοχής του ξύλου παράλληλα προς τις ίνες, συναρτήσει της θερμοκρασίας και για διάφορα ποσοστά υγρασίας (Lau & Barrett, 1977) από το Buchanan [16], σχήμα 10.12.

III.5.4.3 Κάμψη παράλληλα προς τις ίνες

Η καμπτική αντοχή του ξύλου, παράλληλα προς τις ίνες, μειώνεται αυξανομένης της θερμοκρασίες και της υγρασίας ξύλου.



Σχήμα III.47 Τυποποιημένα - Υπολογιστικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ξύλου, σε θλίψη ή σε εφελκυσμό, για διάφορες θερμοκρασίες (και για κοινή υγρασία) (König – Walleij, 2000) από το Buchanan [16], σχήμα 10.20



Σχήμα III.48 Καμπτική αντοχή ξύλου παράλληλα προς τις ίνες συναρτήσει της θερμοκρασίας (Gerhards, 1982) από το Buchanan [16], σχήμα 10.13.

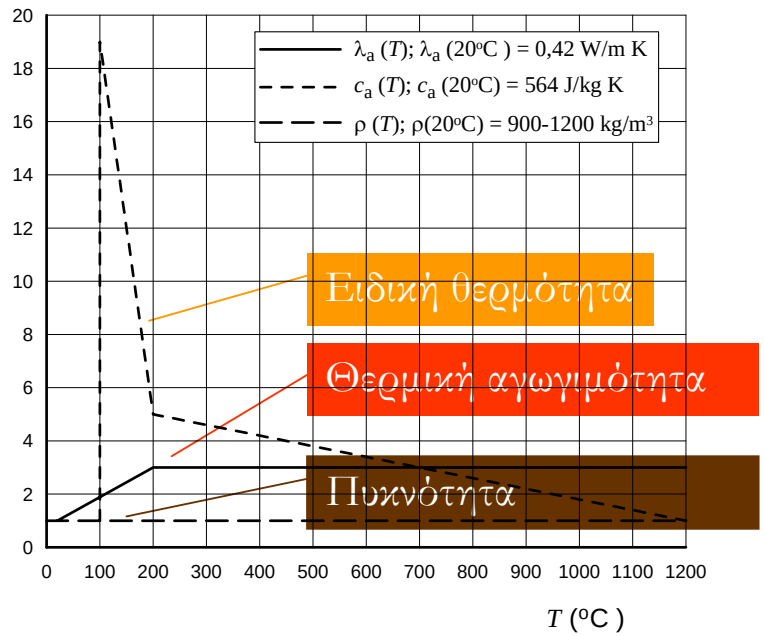
III.6 ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Για την συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε πυρκαγιά δεν υπάρχουν πολλά διαθέσιμα στοιχεία. Ακολουθούν πάρα ταύτα στις επόμενες σελίδες ορισμένες πληροφορίες για τη θερμική συμπεριφορά των λιθοσωμάτων, ενώ για το (τσιμεντο)κονίαμα της τοιχοποιίας μπορεί να θεωρηθεί συμπεριφορά ανάλογη προς αυτήν του σκυροδέματος.

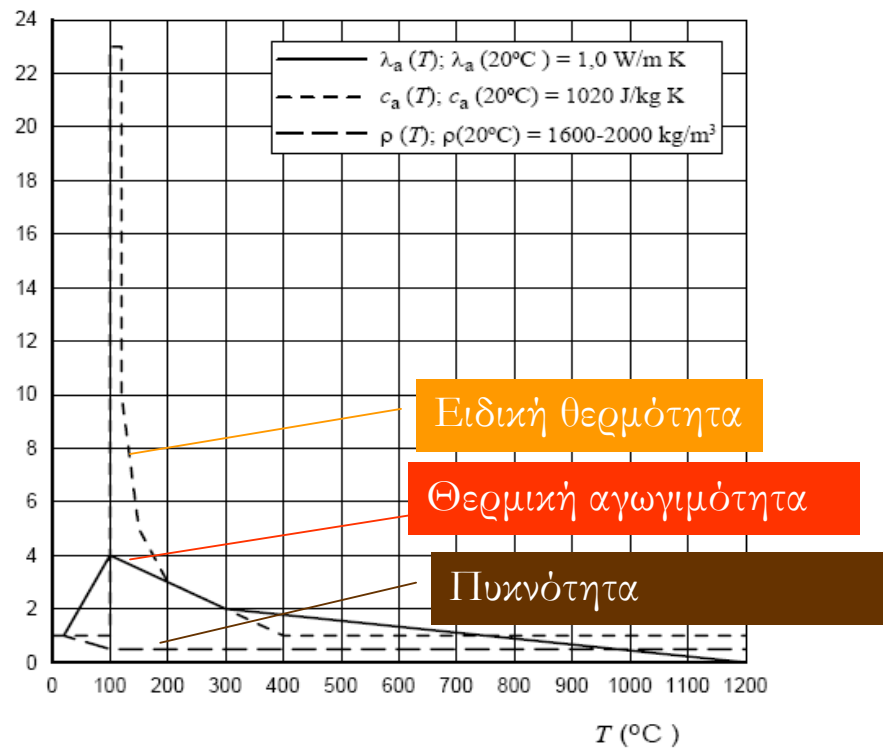
Ο συνδυασμός των δύο αυτών συμπεριφορών, θα μπορούσε να οδηγήσει σε κάποια θεωρητική πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς της Τοιχοποιίας ως συνόλου. Ή, ακόμη απλούστερα, σε μιαν εκτίμηση «μείωσης του ενεργού πάχους» της τοιχοποιίας – με αντίστοιχη μείωση της αντοχής της, ανάλογα με τη διείσδυση θερμοκρασιών (βλ. Κεφάλαιο ΙΙ του παρόντος Πρακτικού Οδηγού).

III.6.1 Θερμικές ιδιότητες λιθοσωμάτων

Τα υπολογιστικά διαγράμματα των θερμικών ιδιοτήτων (θερμική αγωγιμότητα, λ_a, ειδική θερμότητα, c_a, και πυκνότητα, ρ) **οπτοπλίνθων και ασβεστο-πυριτικών λίθων** σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6 φαίνονται στα σχήματα III.49 και III.50.



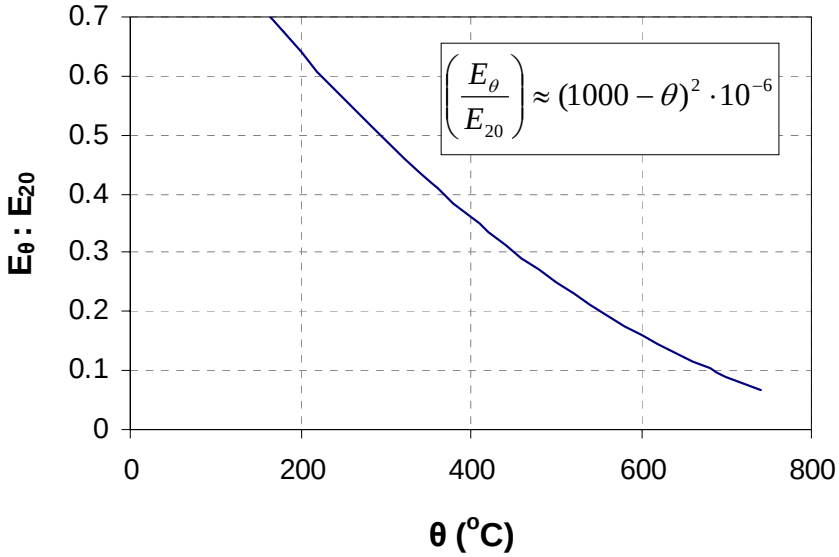
Σχήμα III.49 Θερμική αγωγιμότητα, λ_a, ειδική θερμότητα, c_a, και πυκνότητα, ρ, **οπτοπλίνθων** πυκνότητας από 900kg/m3 έως 1200kg/m3 (Ευρωκώδικας 6, σχήμα D.1.a). Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο λόγος της τιμής του μεγέθους στην θερμοκρασία T προς την τιμή στην θερμοκρασία των 20ºC.



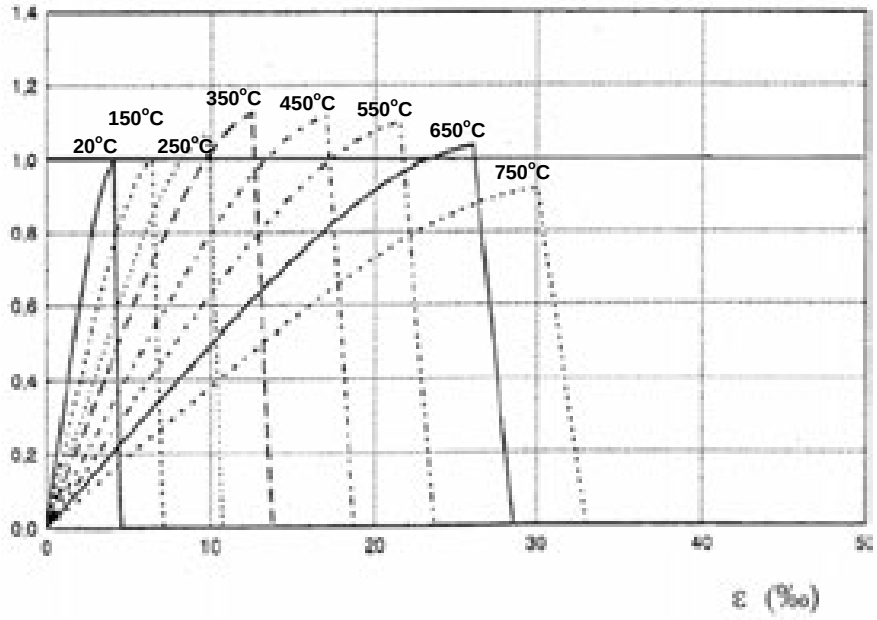
Σχήμα III.50 Θερμική αγωγιμότητα, λ_a, ειδική θερμότητα, c_a, και πυκνότητα, ρ, **ασβεστο-πυριτικών λίθων** πυκνότητας από 1600kg/m³ έως 2000kg/m³ (Ευρωκώδικας 6, σχήμα D.1.b). Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο λόγος της τιμής του μεγέθους στην θερμοκρασία T προς την τιμή στην θερμοκρασία των 20ºC.

III.6.2 Μηχανικές ιδιότητες λιθοσωμάτων

Ο ασβεστόλιθος δεν χάνει την θλιπτική-του αντοχή μέχρι τους 700°C περίπου, αυξάνεται όμως θεαματικά η παραμόρφωση θραύσεως, μειώνεται δηλαδή δραστικά το μέτρο ελαστικότητάς-του σε θλίψη.

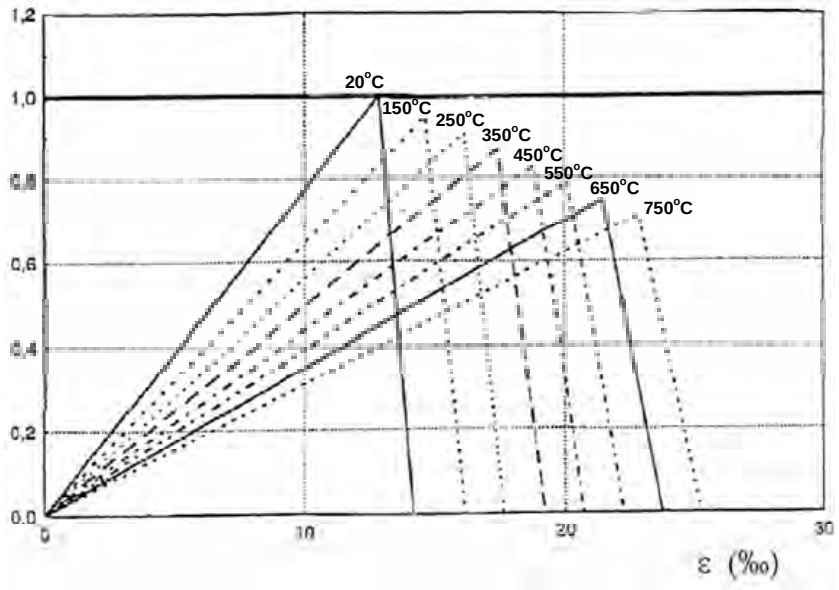


Σχήμα III.51 Μεταβολή του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας ασβεστολίθου συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα III.52 Υπολογιστικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων **ασβεστολιθικών στοιχείων**, αντοχής 12-20N/mm² και πυκνότητας από 1600kg/m3 έως 2000kg/m3 για διάφορες θερμοκρασίες. (Ευρωκώδικας 6, σχήμα D.2.d). Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο λόγος της θλιπτικής αντοχής στην θερμοκρασία T προς την αντοχή στην θερμοκρασία των 20°C.

Οι οπτόπλινθοι, μετά τους 400°C περίπου, αρχίζουν να χάνουν την θλιπτική-τους αντοχή και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητάς-των.



Σχήμα III.53 Υπολογιστικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων **οπτοπλίνθων**, αντοχής 12-20N/mm^2 και πυκνότητας από 900kg/m^3 έως 1200kg/m^3 για διάφορες θερμοκρασίες. (Ευρωκώδικας 6, σχήμα D.2.b). Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο λόγος της θλιπτικής αντοχής στην θερμοκρασία T προς την αντοχή στην θερμοκρασία των 20°C.

III.7 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Z. P. Bažant and M. F. Kaplan, "Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models", Longman (Addison-Wesley), London, 1996.

[2] National Institute of Standards and Technology, "Response of High Performance Concrete to Fire Conditions: Review of Thermal Property Data and Measurement Techniques", NIST GCR 99-767, 1999.

[3] T. Z. Harmathy, "Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures", J.Matlas.5, 47-74, 1970.

[4] T. Z. Harmathy, "Fire Safety Design & Concrete", Longman Scientific & Technical, Essex, England, 1993.

[5] T. T. Lie and V. K. R. Kodur, "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures", Canad. J. Civil Eng. 23, 511-517, 1996.

[6] P. Morabito, "Measurements of the Thermal Properties of Different Concretes", High Temperatures-High Pressures 21, 51-59, 1989.

[7] Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy (Eds.), "Physical Properties of Rocks and Minerals", CINDAS Data Series on Material Properties, Vol. II-2, Hemisphere Publishing, 1989.

[8] U. Schneider, "Behaviour of Concrete at High Temperature", Deutsher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 337, 1982.

[9] G. G. Wang, "Performance of Reinforced Concrete Flat Slabs", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 2006.

[10] Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1-2 : General Rules – Structural Fire Design, EN 1992-1-2, December 2004.

[11] U. Schneider, "Properties of Materials at High Temperatures – Concrete", RILEM Report, Gesamthochschule Kassel, Germany, 1986.

[12] H. L. Malhotra, "Design of Fire-Resisting Structures", Surrey University Press, Glasgow, 1982.

[13] O. Petterson, S. E. Magnusson and J. Thor, "Fire Engineering Design of Steel Structures", Publication No 50, Swedish Institute of Steel Construction, 1976.

[14] U. Schneider, "Behaviour of Concrete at High Temperatures", RILEM Committee 44-PHT, January 1985.

[15] U. Schneider, "Concrete at High Temperatures: A General Review", Fire Safety Joyrnal, vol. 13, pp. 55-68, 1988.

[16] A. H. Buchanan, “Structural Design for Fire Safety”, Wiley, Chichester, England, New York, 2001.

[17] J. A. Purkiss and A. Bali, “The Transient Behaviour of Concrete at Temperatures up to 800°C”, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimer, Section 2/1, pp. 234-9, 1988.

[18] Y. Anderberg and S. Thelanderson, “Stress and Deformation Characteridtics of Concrete, 2 –Experimental Investigation and Material Behaviour Model”, Bulletin 54, University of Lund, Sweden, 1976.

[19] A. H. Buchanan, “Structural Design for Fire Safety”, Wiley, Chichester, England, New York, 2001.

[20] B. R. Kirby and R. R. Preston, “High Temperature Properties of Hot-rolled Structural Steels for Use in Fire Engineering Design Studies”, Fire Safety Journal, vol. 13, pp. 27-37, 1988.

[21] National Institute of Standards and Technology, “Fire Performance of High-Strength Concrete : A Report of the State-of-the-Art”, NISTIR 5934, 1996.

[22] M. S. Abrams, “Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F”, American Concrete Institute (ACI) SP 25, Temperature and Concrete, Detroit, Michigan, 1971.

[23] U. Diederichs, U. M. Jumppanen and V. Penttala, “Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures”, IABSE 13th Congress, Helsinki, 1988.

[24] C. Castillo and A. J. Durrani, “Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete”, ACI Materials Journal v.87 n.1, Jan-Feb p.47-53, 1990.

[25] P. J. E. Sullivan and R. Sharshar, “Performance of Concrete at Elevated Temperatures-As Measured by the Reduction in Compressive Strength”, Fire Technology, v.28, n.3, p. 240-250, August 1992.

[26] T. Morita, H. Saito and H. Kumagai, “Residual Mechanical Properties of High Strength Concrete Members Exposed to High Temperatures” - Part 1: Test on Material Properties, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Niigata, 1992.

[27] F. Furumura, T. Abe and Y. Shinohara, “Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures”, Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design, held at Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, pp. 237-254, 1995.

[28] T. A. Hammer, "High-Strength Concrete Phase 3: Compressive Strength and E-Modulus at Elevated Temperatures", SP6 Fire Resistance, Report 6.1, SINTEF Structures and Concrete, STF70 A95023, 1995.

[29] T. A. Hammer, "High-Strength Concrete Phase 3: Spalling Reduction Through Material Design", SP6 Fire Resistance, Report 6.2, SINTEF Structures and Concrete, STF70 A95024, 1995.

[30] A. N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki and J. L. Costaz, "Thermal Stresses and Water Vapor Pressure of High Performance Cocrete at High Temperature", Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, 1996.

[31] D.J. Naus, "The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - A Literature Review", U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, November 2005.

[32] Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, EN 1993-1-2, December 2003.

[33] ΚΕΔΕ, "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ)", Αθήνα, 2008.

[34] EN 1991-1-2: Actions on structures exposed to fire

[35] EN 1992-1-2:Design of concrete structures - Structural fire design

[36] EN 1993-1-2: Design of steel structures - Structural fire design

[37] EN 1994-1-2: Design of composite steel and concrete structures - Structural fire design

[38] EN 1995-1-2: Design of timber structures - Structural fire design

[39] EN 1996-1-2: Design of masonry structures - Structural fire design

[40] EN 1999-1-2: Design of aluminium structures - Structural fire design

[41] Σαγιάς Θ.Δ., "Συνάφεια χάλυβα σκυροδέματος: επίδραση υψηλών θερμοκρασιών", Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ, 2006.

[42] Ufuk Dilek, "Assessment of Fire Damage to a Reinforced Concrete Structure during Construction", Journal of Performance of Constructed Facilities © ASCE / July/August 2007.

[43] Θ.Π. Τάσιος, Γ. Δεοδάτης, "Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα έναντι Πυρκαγιάς", Εργαστήριο Ω.Σ./ Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1984.

[44] Lie T.T., Rowe T.J., Lin T.D., "Residual strength of fire exposed RC columns evaluation and repair of fire damage to concrete", Detroit: American Concrete Institute, σελ. 153–74. SP-92, 1986.

[45] Lie T.T., Lin T.D., "Fire performance of reinforced concrete columns, in: ASTM STP 882", Fire Safety: Science and Engineering, σελ. 176–205, 1985.

[46] Li L., Purkiss J. A., "Stress–strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures", Fire Safety J, **40**, σελ. 669–86, 2005.

[47] Hertz K.D., "Concrete strength for fire safety design", Magazine of Concrete Research, **57**, 8, σελ. 445–53, 2005.

[48] Xiao J., Konig G., "Study on concrete at high temperature in China an overview", Fire Safety Journal, **39**, σελ. 89–103, 2004.

[49] Schneider U., "Modelling of concrete behaviour at high temperatures", In: Anchor RD, Malhotra HL, Purkiss JA. Proceeding of international conference of design of structures against fire, σελ. 53–69, 1986.

[50] Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of the Structures Division, ASCE, **114**, No 8, σελ. 1804–1826, 1988.

[51] Terro M.J., "Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire", ACI Struct J, **95**, 2, σελ. 183–93, 1998.

[52] Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E., "Strain of concrete during first heating to 600 ^{o}C under load", Magazine of Concrete Research, **37**, 133, σελ. 195–215, 1985.

[53] Lie T.T., "Structural fire protection", New York: American Society of Civil Engineers; 1992.

[54] Lie T.T., Sanzak W.W., "Empirical method for calculating fire resistance of protected steel columns", Eng Jrnl AISC, 57, 1974.

[55] Daniel Flyn, "Response of high performance concrete to fire conditions: review of thermal property data and measurement techniques", US Department of commerce, NIST GCR99-767, March 1999.

IV. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

IV.1 ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΒΛΑΒΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Πίνακα ΙΙ.4 της §ΙΙ.4.2), η πυρκαγιά προκαλεί διάφορες χαρακτηριστικές αλλοιώσεις των υλικών, τήξεις και καύσεις. Πέραν αυτών, οι κύριες και τυπικές «γεωμετρικές» βλάβες λόγω πυρκαγιάς, μπορούν να συνοψισθούν στις ακόλουθες (βλ. και χαρακτηριστικές φωτογραφίες στην §IV.5) :

(α) Πρόωρες αποκολλήσεις και καταπτώσεις επιχρισμάτων και οροφοκονιαμάτων, λόγω πλημμελούς πρόσφυσης και μεγάλου πάχους.

(β) Απομειώσεις διατομών των φερόντων στοιχείων λόγω απολεπίσεων, αποφλοιώσεων και αποκολλήσεων των εξωτερικών στοιβάδων (βλ. και Σημείωση 1 της §ΙΙ.4.2), καθώς και αποσύνθεση της μάζας του σκυροδέματος ή του κονιάματος.

(γ) Χαρακτηριστικές (και αισθητές) παραμένουσες παραμορφώσεις, τόσο για τους οριζόντιους φορείς (π.χ. βέλη πλακών και δοκών), όσο και για κατακόρυφα στοιχεία (π.χ. αποκλίσεις στύλων και τοίχων).

Ας σημειωθεί ότι μεγάλο μέρος των παρουσιαζόμενων θερμικών παραμορφώσεων παραμένει ως μόνιμο (εμπειρικώς, έως και 50%).

(δ) Λόγω των έντονων παραμορφώσεων (σε συνδυασμό με την απομείωση των διατομών και των αντοχών), παρατηρούνται σημαντικές καμπτικές καθώς και διατμητικές βλάβες (ρωγμές). Οι πιο τυπικές διατμητικές βλάβες είναι οι λοξές ρωγμές σε μεσαίες εδράσεις συνεχών δοκών από Ο.Σ. (και λόγω ανακατανομής της έντασης), καθώς και τα θερμικά «λακτίσματα», δηλαδή, οι έντονες λοξές ρωγμές σε ισχυρά και δύσκαμπτα κατακόρυφα στοιχεία (από Ο.Σ. ή τοιχοποιία).

Έντονες και μεγάλης διάρκειας πυρκαγιές μπορούν να οδηγήσουν σε βαριές (έως και πολύ βαριές) βλάβες των δομικών στοιχείων, τοπικές ή και γενικότερες καταρρεύσεις, ορόφου ή και κτιρίου ως συνόλου.

Στα τυπικά σκαριφήματα που ακολουθούν (βλ. Σχήμα IV.1 και Σχήμα IV.2), για κτίρια από Ο.Σ. ή τοιχοποιία υπό εσωτερική φωτιά, δίνονται χαρακτηριστικές εικόνες παθολογίας, οι οποίες είναι πολύ χρήσιμες για μια αρχική ποιοτική κατανόηση των βλαβών.

(i) <u>Κτίριο από Ο.Σ.</u>

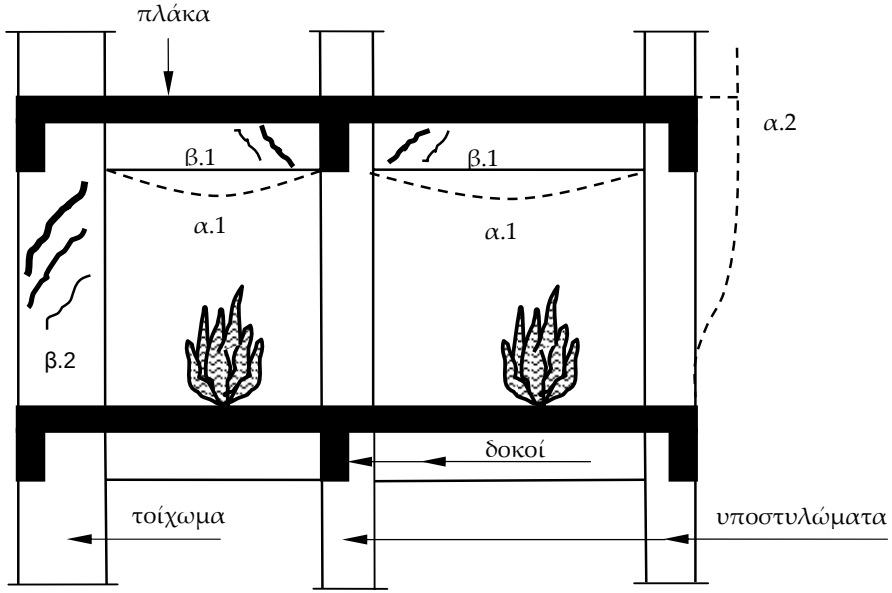
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ
(συνήθως συνοδεύεται και από αποφλοιώσεις ή αποσύνθεση των επιφανειακών στοιβάδων σκυροδέματος)

Το βέλος κάμψης δομικών στοιχείων αυξάνεται γρήγορα επειδή η αύξηση της θερμοκρασίας σε μια από τις παρειές των δομικών στοιχείων συνεπάγεται αύξηση του μήκους και επιβολή καμπυλότητας, καθώς και απομείωση των χαρακτηριστικών των υλικών (και της συνάφειας), επομένως και μείωση των δυσκαμψιών.

Για ισοστατικούς φορείς, η αύξηση των παραμορφώσεων πραγματοποιείται χωρίς τροποποίηση της έντασής τους, ενώ για υπερστατικούς φορείς (δηλ. για τα συνήθη κτίρια από Ο.Σ.), η αύξηση των παραμορφώσεων των στοιχείων που καίγονται συνεπάγεται <u>καί</u> έντονη ανακατανομή της εντάσεως (ανακούφιση των ανοιγμάτων και επιβάρυνση των στηριγμάτων).

Επί πλέον, η λόγω υψηλών θερμοκρασιών μείωση των αντοχών χάλυβα (και σκυροδέματος) στα ανοίγματα, οδηγεί σε μείωση της ροπής αντοχής, ενώ στα στηρίγματα η ροπή αντοχής επηρεάζεται πολύ λιγότερο και βραδύτερα (ευτυχώς).

Αυτά τα δύο συζευγμένα φαινόμενα οδηγούν σε παραμορφώσεις και ρηγματώσεις, καμπτικές (στα ανοίγματα) αλλά και διατμητικές (στα στηρίγματα).



Σχήμα IV.1 Χαρακτηριστική παθολογική εικόνα κτιρίου από Ο.Σ., υπό εσωτερική φωτιά. Οι αριθμοί α.1, β.1 κ.λπ., παραπέμπουν στις περιγραφές των δύο επόμενων σελίδων.

Έτσι, συνήθως παρατηρείται :

α.1 : Καμπτική βλάβη, «κοίλιασμα» πλακών/ δοκών και ρηγμάτωση (έντονη), λόγω των συζευγμένων φαινομένων που αναφέρθηκαν αμέσως πριν.

β.1 : Διατμητική βλάβη, ρηγματώσεις (σοβαρές) συνεχών δοκών στις ενδιάμεσες στηρίξεις (κυρίως), πάλι λόγω των συζευγμένων φαινομένων που προαναφέρθηκαν.

α.2 : Καμπτική βλάβη, «φούσκωμα» στύλων και ρηγμάτωση (μάλλον απλή).

Οφείλεται στην επιμήκυνση του ζυγώματος λόγω θερμοκρασίας. Στην περίπτωση στύλων μικρής διατομής και δυσκαμψίας, η επιμήκυνση αυτή μπορεί να μην συνοδεύεται από ρωγμές στο υποστύλωμα.

β.2 : Διατμητική βλάβη, έντονες λοξές ρωγμές σε ισχυρό και δύσκαμπτο τοίχωμα, θερμικό «λάκτισμα».

Οφείλεται, πάλι, στην επιμήκυνση του καιόμενου συστήματος πλακών και δοκών.

γ : Τέλος, συνηθισμένες βλάβες είναι και οι διαμπερείς ρωγμές σε πλάκες εξωστών (προβόλους), οι οποίες γενικώς εκτείνονται και στους κορμούς των υποκείμενων περιμετρικών δοκών του κτιρίου.

Οι φλόγες που εξέρχονται από το κτίριο, μέσω των κουφωμάτων, συνεπάγονται έντονη αύξηση των θερμοκρασιών και επιμήκυνση των υπερκείμενων δοκών και προβόλων (αν υπάρχουν), με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλαπλών ρηγματώσεων, κάθετων προς την όψη.

(ii) **<u>Κτίριο από τοιχοποιία</u>**

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ
(συνήθως συνοδεύεται και από απολεπίσεις λίθων, πλίνθων κ.λπ. ή και αποσύνθεση κονιάματος)

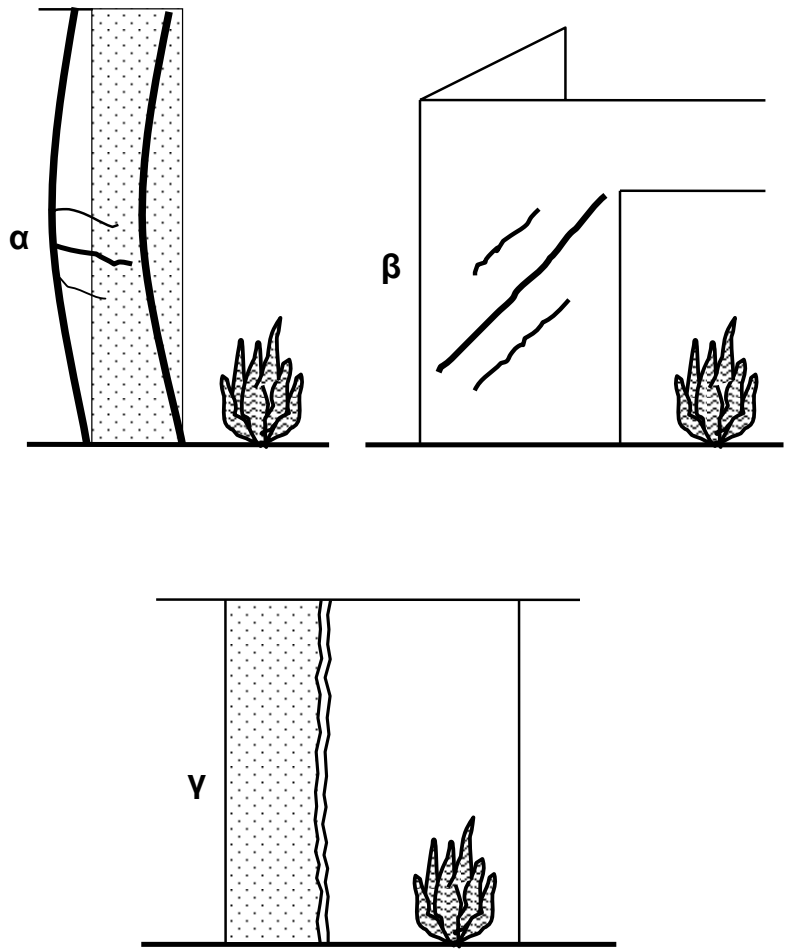
Οι λόγω πυρκαγιάς βλάβες των τοιχοποιιών είναι γενικώς απλούστερες αυτών των κτιρίων από Ο.Σ., λόγω του απλούστερου δομητικού συστήματος.

Τα συζευγμένα φαινόμενα των επιβαλλόμενων θερμικών καμπυλοτήτων και παραμορφώσεων, σε συνδυασμό με την μικρή (γενικώς) απομείωση των αντοχών, οδηγούν σε καμπτικές αλλά και διατμητικές βλάβες των φερόντων τοίχων.

Έτσι, συνήθως παρατηρείται :

α **:** Κύρτωση («ελεύθερων») τοίχων και καμπτική ρηγμάτωση (στους οριζόντιους αρμούς), ενίοτε έντονη, με ενδεχόμενη αστάθεια και κίνδυνο λυγισμού.

β : Διατμητική ρηγμάτωση («λάκτισμα») καλοχτισμένων πεσσών στις γωνίες, έως και τοπική αποδιοργάνωση, με πολλαπλές ρωγμές ή κατάρρευση γωνίας. Συχνά, οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται όταν υπάρχει πλάκα Ο.Σ. ή δοκός Ο.Σ. στην στέψη των πεσσών: Τότε είναι μεγαλύτερη η αύξηση μήκους των πλακών ή των δοκών και η πρόκληση οριζόντιας τέμνουσας στον πεσσό.



Σχήμα IV.2 Χαρακτηριστική παθολογική εικόνα κτιρίου από τοιχοποιία, υπό εσωτερική φωτιά.

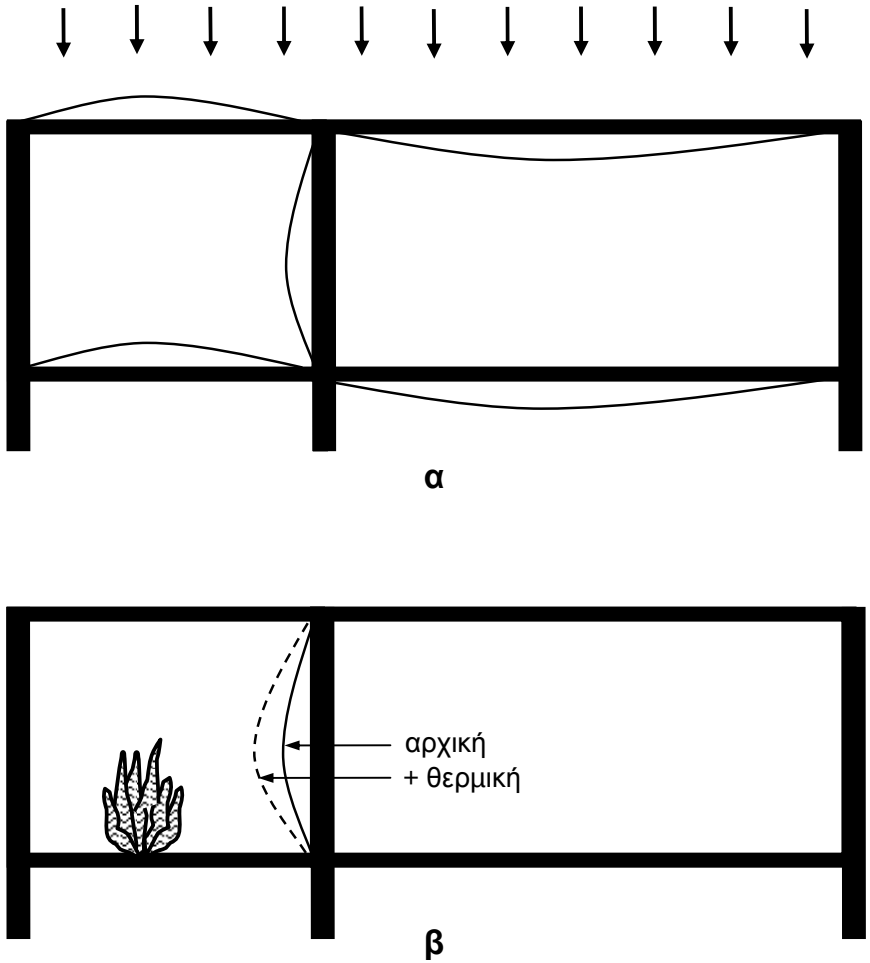
γ : Αποκόλληση, αποσύνδεση κακοχτισμένων εγκάρσιων τοίχων, με διαμπερείς κατακόρυφες ρωγμές, ίσως όχι σε όλο το ύψος των τοίχων, αναλόγως της ύπαρξης διαζωμάτων ή ελκυστήρων.

δ : Τέλος, είναι συνηθισμένη και η (πρόωρη) καύση εκτεθειμένων ξύλινων πρεκιών ή διαζωμάτων, στρωτήρων κ.λπ., η οποία συνοδεύεται καί από τοπικές καταπτώσεις τοίχων πάνω από τα κουφώματα ή από έντονη τοπική προσβολή και αποδιοργάνωση του τοίχου.

(iii) <u>Ειδικότερες βλάβες υβριδικών κτιρίων, με φέροντες τοίχους και συστήματα πλακών/ δοκών από Ο.Σ.</u>

α **:** Αρχική εκκεντρότητα (λυγηρού) τοίχου, λόγω κάμψης της υπερκείμενης πλάκας (με άνισα ανοίγματα ή/ και φορτία).

β : Πρόσθετη εκκεντρότητα τοίχου, λόγω επιβαλλόμενων καμπυλοτήτων από την πυρκαγιά: ενδεχόμενος λυγισμός και κατάρρευση.



Σχήμα IV.3 Ειδικότερες βλάβες υβριδικών κτιρίων, με φέροντες τοίχους και συστήματα πλακών/ δοκών από Ο.Σ..

(iv) Αξίζει, τέλος, να σημειωθούν οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις :

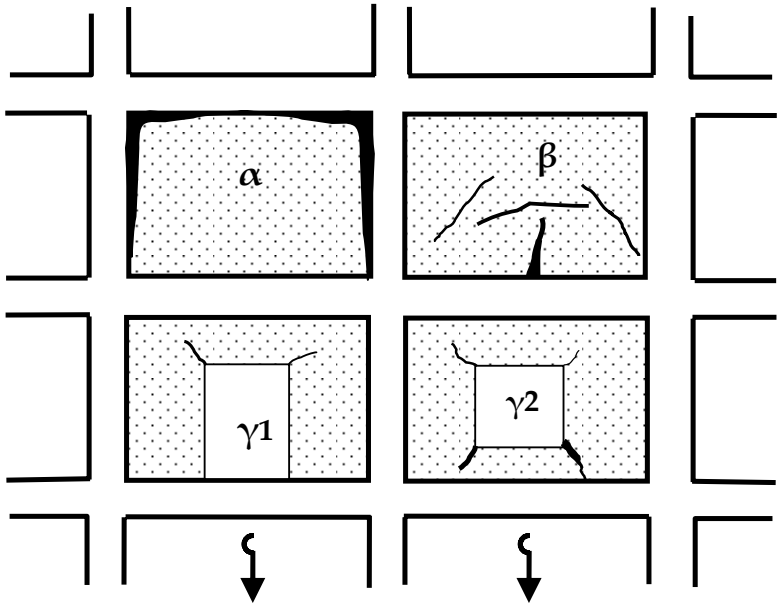
1. Έναντι εξωτερικής πυρκαγιάς, έχει ιδιαίτερη σημασία η συμπεριφορά των εξωτερικών κουφωμάτων (του κελύφους του κτιρίου) και κυρίως <u>των στεγών</u> (για κτίρια από Ο.Σ. ή τοιχοποιία), για τις οποίες υπάρχει κίνδυνος **πρόωρης** καύσης και κατάρρευσης, από την υψηλή θερμική ακτινοβολία αλλά καί από τις σπίθες ή τα καιόμενα υλικά που παρασύρονται από τον άνεμο.

2. Επίσης έναντι εξωτερικής (αλλά και εσωτερικής) πυρκαγιάς, έχει ιδιαίτερη σημασία το ποσοστό ανοιγμάτων και το πάχος των εξωτερικών τοίχων κτιρίων από Ο.Σ. ή τοιχοποιία, δηλ. η θερμοχωρητικότητά τους. Στην περίπτωση έντονης (και μεγάλης διάρκειας) ακτινοβολίας από εξωτερική πυρκαγιά, και για μικρή θερμοχωρητικότητα των εξωτερικών τοίχων (πολλά ανοίγματα, λεπτοί τοίχοι), παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές θερμικών διαστολών μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής παρειάς των τοίχων, που μπορούν να οδηγήσουν σε έντονες βλάβες, βαριές και εκτεταμένες, έως και σε κατάρρευση. Μετά από παρατηρήσεις υπό πραγματικές πυρκαγιές, αναφέρεται πως ο υπόψη κίνδυνος μπορεί να περιορισθεί, με καθολική και συνεχή διαβροχή, έτσι ώστε να κρατηθεί σχετικώς χαμηλή η θερμοκρασία (π.χ. $T_{παρ.} < 400\ ^{o}C$) της εξωτερικής, προσβαλλόμενης επιφάνειας του τοίχου (ή των τοίχων).

IV.2 ΒΛΑΒΕΣ ΠΛΙΝΘΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ

Για πλινθοπληρώσεις κτιρίων με σκελετό από Ο.Σ., ή και για φερόμενους (μικρού πάχους) τοίχους κτιρίων από τοιχοποιία, μπορούν να παρατηρηθούν και οι εξής τυπικές βλάβες όταν συμβούν έντονες πυρκαγιές με υψηλές θερμοκρασίες:

i) Χαρακτηριστικές ρηγματώσεις (βλ. Σχήμα IV.4), κυρίως λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων του **υποκείμενου σκελετού** αλλά και της προσβολής των πλινθοπληρώσεων καθ' εαυτές, που συνοδεύονται και από μετακινήσεις των τεμαχών των τοίχων και των χειλέων των ρωγμών (εκτός επιπέδου).



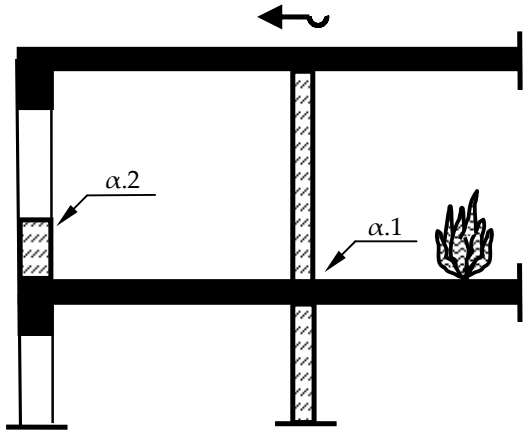
α : Αποσύνδεση, αποκόλληση ΦΟ και ΟΠ (έως έντονη), με μετακινήσεις εκτός επιπέδου ή κατάρρευση.

β : Διαγώνιες (λοξές) αλλά και κατακόρυφες ή οριζόντιες ρωγμές (κάτω ή στη μέση), λειτουργία τόξου.

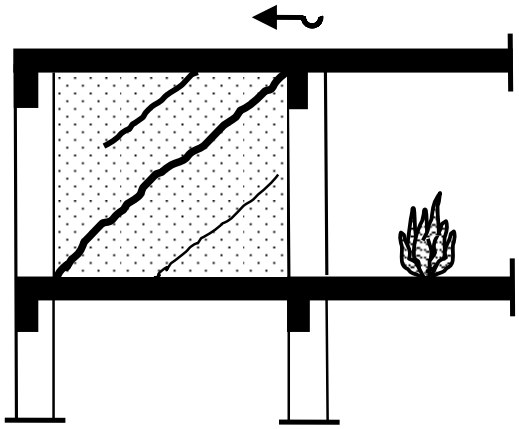
γ : Ρηγματώσεις γύρω από τα ανοίγματα, έως και έντονες (με βλάβη των διαζωμάτων).

Σχήμα IV.4 Χαρακτηριστικές βλάβες πλινθοπληρώσεων, λόγω βυθίσεων των υποκείμενων στοιχείων του σκελετού.

ii) Χαρακτηριστικές ρηγματώσεις (βλ. Σχήμα IV.5), λόγω έντονης θερμικής διαστολής και μετακινήσεων του **υπερκείμενου συστήματος πλακών/δοκών**, τόσο για τοίχους εγκάρσιους προς τη διεύθυνση διαστολής (καμπτικές ρωγμές) όσο και για τοίχους παράλληλους προς τη διεύθυνση διαστολής υπό φωτιά (διατμητικές ρωγμές).



α **:** Τοίχοι εγκάρσιοι προς τη διαστολή, ρωγμές στους αρμούς, στους πόδες (α.1) ή πάνω απ' τις ποδιές (α.2).



β : Τοίχοι παράλληλοι προς τη διαστολή, λοξές βαθμιδωτές ρωγμές στους αρμούς (με μετακινήσεις τεμαχών)

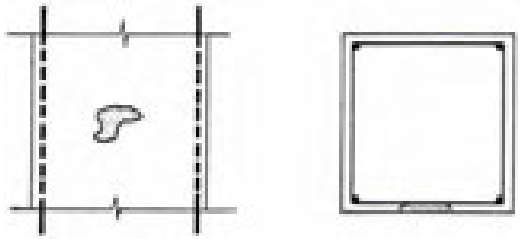
Σχήμα IV.5 Χαρακτηριστικές βλάβες πλινθοπληρώσεων, λόγω μηκύνσεως των υπερκείμενων στοιχείων του σκελετού.

IV.3 ΣΤΑΘΜΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΕΡΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι στάθμες (ή οι βαθμοί) βλάβης για στύλους από Ο.Σ. και για τοίχους κτιρίων από τοιχοποιία, κατά τα επόμενα, αντιστοιχούν γενικώς σε διαθέσιμα περιθώρια αντιστάσεων των καμμένων δομικών στοιχείων (βλ. §IV.4), καθώς και σε απαιτούμενα μέτρα επισκευών και ενισχύσεων, αναλόγως της βαρύτητας της βλάβης.

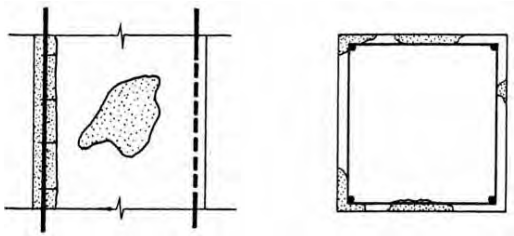
IV.3.1 Στύλοι από Ο.Σ. (βλ. και Σχήματα IV.6 έως IV.9)

- **Βλάβες βαθμού Α** (ασήμαντες):
  Εκτινάξεις επιχρισμάτων, περιορισμένες απολεπίσεις / αποφλοιώσεις σκυροδέματος.
  Καπνιά.



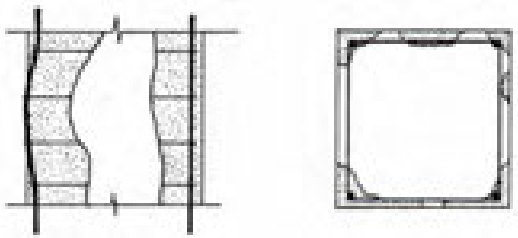
Σχήμα IV.6 Βλάβες βαθμού Α (μάλλον ασήμαντες).

- **Βλάβες βαθμού Β** (ελαφρές):
  Εκτινάξεις σκυροδέματος, απολεπίσεις/αποφλοιώσεις.
  Εκτεταμένες επιφανειακές μικρο-ρηγματώσεις.
  Όχι αισθητές παραμορφώσεις.
  Όχι αποκολλήσεις οπλισμών, μικρά γυμνά μήκη.
  Καπνιά και ρόζ χρώμα σκυροδέματος.



Σχήμα IV.7 Βλάβες βαθμού Β (μικρές, ελαφρές).

- **Βλάβες βαθμού Γ** (σοβαρές):
  Εκτεταμένες εκτινάξεις και αποκολλήσεις επικαλύψεως σκυροδέματος (ή σε μεγαλύτερο βάθος).
  Γενικώς, όχι αποκολλήσεις οπλισμών, όχι περισσότερες από δύο λυγισμένες ράβδοι οπλισμού.
  Γκρί ή ρόζ χρώμα σκυροδέματος.



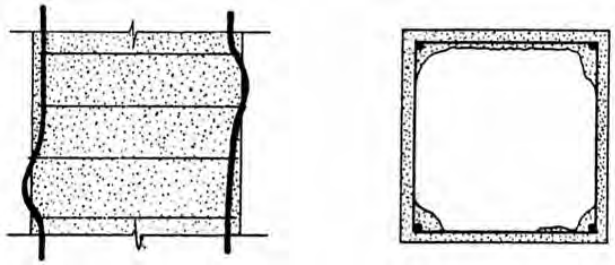
Σχήμα IV.8 Βλάβες βαθμού Γ (σοβαρές).

Πλάκες :
Όχι αισθητά βέλη κάμψεως, ελαφρές ρωγμές,
όχι αποκολλήσεις ράβδων οπλισμού,
μερικές ράβδοι οπλισμού εκτεθειμένες.
Ρόζ χρώμα σκυροδέματος (και καπνιά).

Δοκοί :
Όχι αισθητά βέλη κάμψεως, ελαφρές ρωγμές,
όχι αποκολλήσεις ράβδων οπλισμού,
μερικές ράβδοι οπλισμού εκτεθειμένες.
Γκρί ή ρόζ χρώμα σκυροδέματος (και καπνιά).

- **Βλάβες βαθμού Δ** (βαριές):
  Αισθητές παραμορφώσεις,
  Εκτεταμένες αποκολλήσεις οπλισμών.
  Πρακτικώς, όλες οι ράβδοι οπλισμού είναι εκτεθειμένες, ενώ μερικές (έως αρκετές) είναι λυγισμένες.
  Γκρι ή φαιό, κιτρινωπό χρώμα σκυροδέματος.

Γενικώς, έντονες βλάβες στο σύστημα δαπέδων (στις πλάκες και στις δοκούς), παραμορφώσεις και ρηγματώσεις, πολλές γυμνές και λυγισμένες (ή κομμένες) ράβδοι οπλισμού.



Σχήμα IV.9 Βλάβες βαθμού Δ (βαριές).

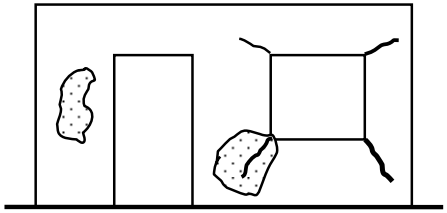
- **<u>Βλάβες βαθμού Ε</u>** (πολύ βαριές):
  Έντονες παραμορφώσεις και πολλαπλές ρηγματώσεις, έντονες αποφλοιώσεις (και αποσύνθεση) σκυροδέματος, καθώς και αποκολλήσεις οπλισμών, λυγισμένες (ή κομμένες) ράβδοι, τοπική ή γενικότερη αποδιοργάνωση του δομικού στοιχείου, θραύση.

IV.3.2 Τοίχοι από τοιχοποιία (βλ. και Σχήματα IV.10 έως IV.13)

Η διαθέσιμη εμπειρία δεν επιτρέπει προς το παρόν μια ορθολογική ταξινόμηση των βλαβών και μια ποσοτική εκτίμηση της εξασθένησης της φέρουσας ικανότητας τοίχου ή πεσσού λόγω πυρκαγιάς, με βάση τη μορφολογία βλαβών.

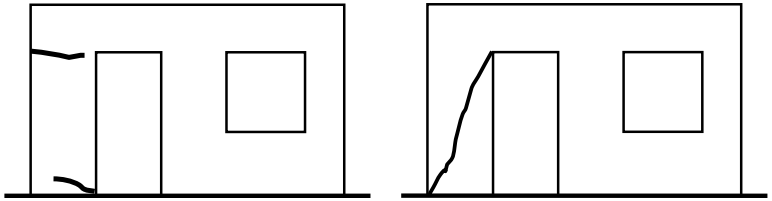
Παρά ταύτα, οι ακόλουθες καταστάσεις βλάβης φέρουσας τοιχοποιίας, μπορούν να αποτελέσουν διακεκριμένες «στάθμες», οι οποίες μπορεί να βοηθήσουν τη λήψη αποφάσεων, ποιοτικώς τουλάχιστον.

- **<u>Βλάβες στάθμης Ι</u>** (ασήμαντες):
  Τοπικές αποκολλήσεις επιχρισμάτων ή / και μικρορηγματώσεις στις γωνίες των ανοιγμάτων.



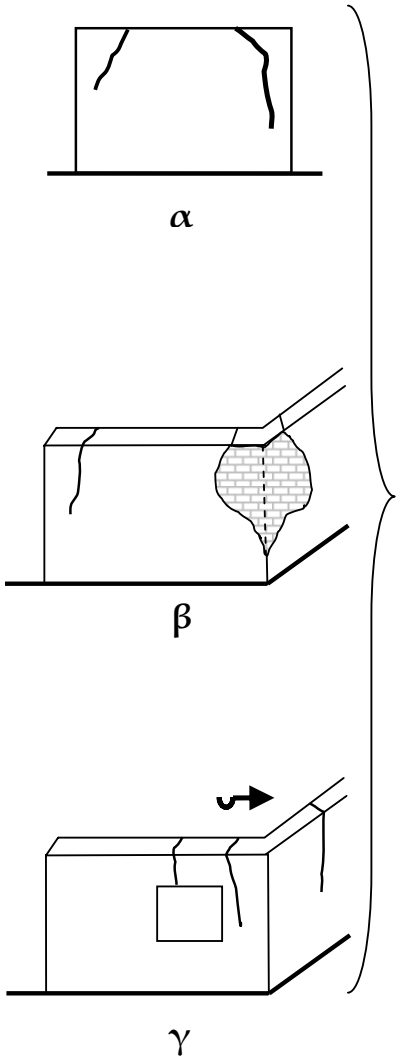
Σχήμα IV.10 Βλάβες στάθμης Ι (μάλλον ασήμαντες).

- **<u>Βλάβες στάθμης ΙΙ</u>** (ελαφρές):
  Όπως στη στάθμη Ι, σύν μεμονωμένες καμπτικές ή διατμητικές ρωγμές σε καλοχτισμένους πεσσούς, κοντά σε γωνίες.



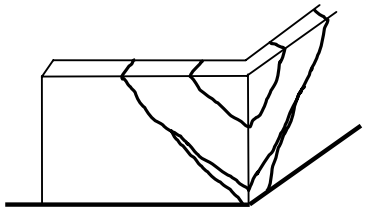
Σχήμα IV.11 Βλάβες στάθμης ΙΙ (μικρές, ελαφρές).

- **<u>Βλάβες στάθμης ΙΙΙ</u>** (σοβαρές):
  Εκτεταμένες αποκολλήσεις επιχρισμάτων και επιφανειακή αποσύνθεση του κονιάματος δομήσεως, έντονες (σχεδόν) κατακόρυφες ρωγμές λόγω θερμικής ασυμβατότητας στη στάθμη της στέγης ή σε καλοδομημένες γωνίες, αποσύνδεση εγκάρσιων τοίχων ή χαρακτηριστικές έντονες ρωγμές στις γωνίες (δράση εγκαρσίων τοίχων – ένταση διαμήκων τοίχων).

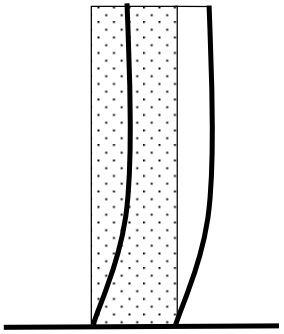


Σχήμα ΙΥ.12 Βλάβες στάθμης ΙΙΙ (σοβαρές)
α. Ασυμβατότητα στέγης
β. Ασυμβατότητα γωνιών
γ. Δράση εγκάρσιων τοίχων (λειτουργία τριέρειστων πλακών) και εφελκυσμός διαμήκων τοίχων (με ενδεχόμενη αποσύνδεση)

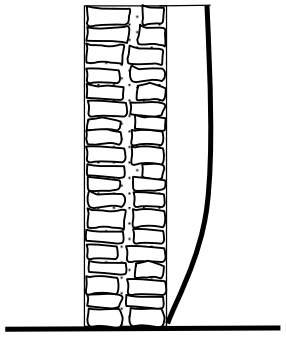
- **<u>Βλάβες στάθμης IV</u>** (βαριές):
  Όπως στη στάθμη ΙΙΙ, με τοπική ή γενικότερη αποδιοργάνωση της τοιχοδομής, ή θερμικά λακτίσματα σε καλοχτισμένες γωνίες (με δύσκαμπτους πεσσούς), ή κυρτώσεις τοίχων εκτός επιπέδου (με ή χωρίς έντονες καμπτικές ρηγματώσεις στους αρμούς), ή έντονες κυρτώσεις («κοιλιάσματα») τρίστρωτης τοιχοποιίας, με βλάβες διαζωμάτων, συνδέσμων, διατόνων λίθων κ.λπ.



β



γ



δ

Σχήμα IV.13 Βλάβες στάθμης IV (βαριές)

α. Όπως στη στάθμη ΙΙΙ, με τοπική ή γενικότερη αποδιοργάνωση

β. Θερμικά λακτίσματα γωνιών, πολλαπλές λοξές ρωγμές

γ. Κυρτώσεις (έντονες), αποκλίσεις από την κατακόρυφο

δ. Κοιλιάσματα τρίστρωτων τοίχων, αποσύνδεση.

- **<u>Βλάβες στάθμης V</u>** (πολύ βαριές):
  Έντονες παραμορφώσεις και πολλαπλές ρηγματώσεις, αποσύνθεση και τοπική ή γενικότερη αποδιοργάνωση της τοιχοδομής, έντονες βλάβες πατωμάτων και στεγών, βλάβες διαζωμάτων ή συνδέσμων, βλάβες γωνιών, τοπικές καταπτώσεις ή καταρρεύσεις τοίχων.

IV.4 ΒΑΘΜΟΙ Ή ΣΤΑΘΜΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΕΝΟΥΣΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ

Οι τυπικοί βαθμοί ή οι τυπικές στάθμες βλάβης των κύριων δομικών στοιχείων, κατά την §IV.3, θα μπορούσαν να συνδυαστούν με συντελεστές απομενουσών αντοχών λόγω πυρκαγιάς $r_R = R_{μετά} / R_{πριν}$, κυρίως σε όρους αξονικής δύναμης (αλλά και τέμνουσας δύναμης ή ροπής κάμψεως).

Έτσι, για τους βαθμούς και τις στάθμες βλάβης για στύλους από Ο.Σ. και για τοίχους κτιρίων από τοιχοποιία, κατά την §IV.3, μπορούν (ελλείψει άλλων ακριβέστερων στοιχείων) να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές απομενουσών αντοχών κατά τους Πίνακες IV.1 και IV.2.

Διευκρινίζεται ότι οι συντελεστές αυτοί (από την ίδια τους την εμπειρική φύση) δεν μπορούν να ερμηνευθούν ως το πραγματικό πηλίκο αντοχών. Χρησιμεύουν όμως για μια συμβατική εκτίμηση της τάξης μεγέθους απώλειας αντοχής κατά τόπους, με κύριο σκοπό την απόφανση περί προτεραιοτήτων επέμβασης καθώς και περί της σοβαρότητας των μέτρων επέμβασης.

Πίνακας IV.1 Απομένουσα φέρουσα ικανότητα στύλου από Ο.Σ. ανάλογα με τον βαθμό βλάβης.

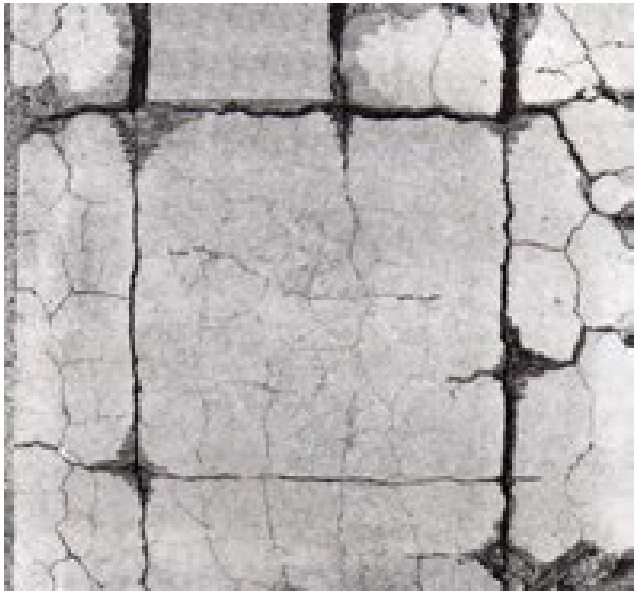
ΚΤΙΡΙΟ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (Ο.Σ.)				
Ηλικία	**Συντελεστής r_R**			
	Α	**Β**	**Γ**	**Δ**
< 20 έτη	0,95	0,80	0,60	0,40
> 20 έτη	0,85	0,70	0,50	0,30

Πίνακας IV.2 Απομένουσα φέρουσα ικανότητα τοίχου κτιρίου από τοιχοποιία ανάλογα με την στάθμη βλάβης.

ΚΤΙΡΙΟ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ (Φ.Τ.)				
Ηλικία	**Συντελεστής r_R**			
	I	**II**	**III**	**IV**
< 35 έτη	0,90	0,75	0,55	0,35
> 35 έτη	0,80	0,65	0,40	0,20

IV.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΒΛΑΒΩΝ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Βιομηχανία/ αποθήκη χρωμάτων, από Ο.Σ., μετά από έντονη πυρκαγιά: Εκτινάξεις υαλοστασίων, παραμορφώσεις υαλοστασίων, αποκολλήσεις επιχρισμάτων, ρηγματώσεις στοιχείων Ο.Σ. και πλινθοπληρώσεων, αποσύνδεση σκελετού και τοιχοπληρώσεων, σοβαρές βλάβες. [1]



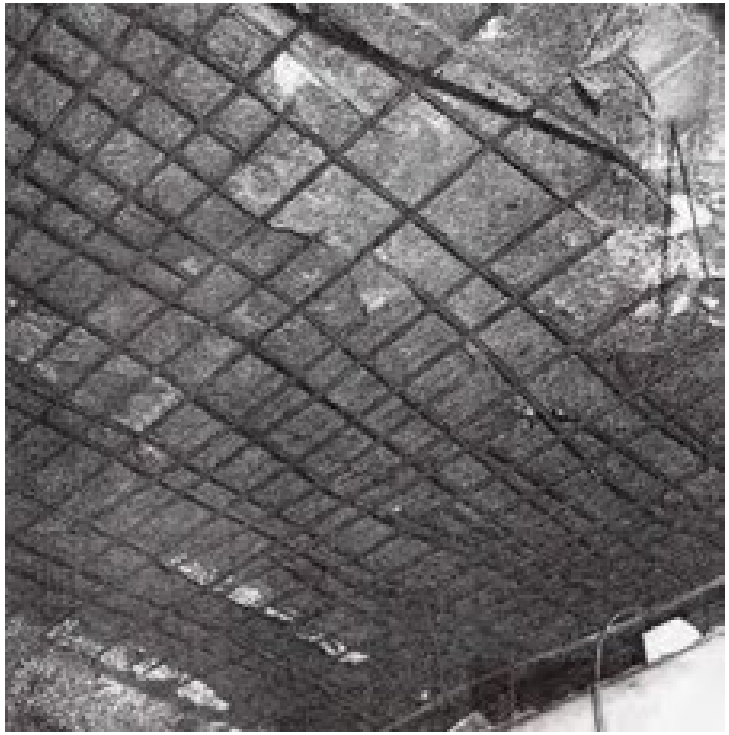
Έντονες παραμορφώσεις και ρηγματώσεις (διαμπερείς), σε πλάκες (και δοκούς), βαριές βλάβες. [1]

Καύση πολυστερίνης, κατάρρευση δοκιδωτής πλάκας σε σύγχρονη αποθήκη από Ο.Σ.. [1]

Καμμένη, μεγάλη δοκιδωτή πλάκα αποθήκης, πολύ βαριές βλάβες, βέλη (έως 250 mm) και ρωγμές (έως 25 mm), έντονες εκτινάξεις σκυροδέματος, έντονος λυγισμός ράβδων οπλισμού, φαιή/κιτρινωπή απόχρωση σε μεγάλη έκταση. [1]

Δοκίδες/ νευρώσεις χωρίς συνδετήρες, πιο γρήγορη αστοχία των πιο λεπτών απ' αυτές. [1]

Σοβαρές κακοτεχνίες, έντονες βλάβες από την πυρκαγιά. [1]



Βαριές και εκτεταμένες βλάβες μυκητοειδούς συστήματος, έντονες εκτινάξεις σκυροδέματος και εκτεθειμένοι οπλισμοί. [1]

Πλάκα Ο.Σ., χαρακτηριστικές πολλαπλές ρωγμές (καί «άτακτες», καί πάνω στον οπλισμό). [1]

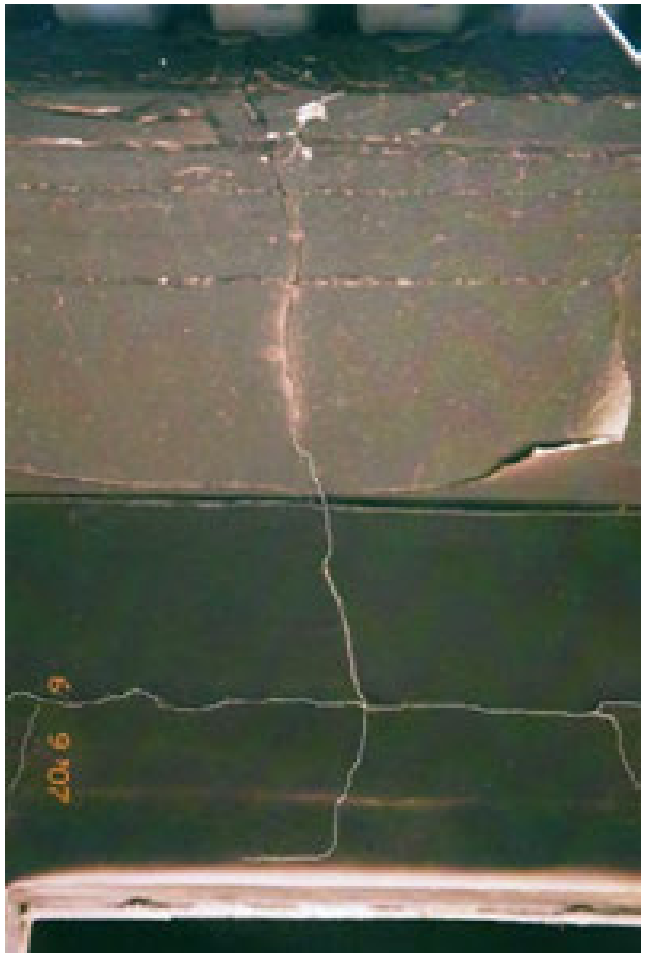
Εσωτερική φωτιά σε υπόγειον αποθηκευτικό χώρο («εγκιβωτισμένη», καυσιμο-ελεγχόμενη πυρκαγιά): Βαριές και εκτεταμένες εκτινάξεις και ρωγμές σε πλάκες (αριστερά) αλλά και τοιχεία (δεξιά). [1]

Κατάκαυση θερμομόνωσης, πολλαπλές ρωγμές πλακών και δοκών. [1]

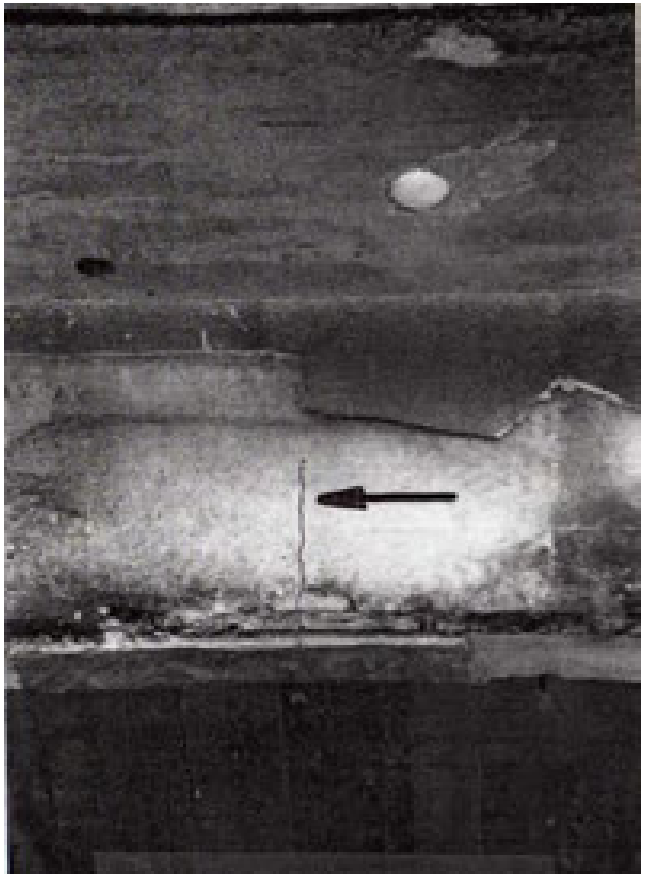
Έντονη, διαμπερής ρωγμή πλάκας και δοκού, αποκόλληση πλινθοπλήρωσης. [1]

Χαρακτηριστικές πολλαπλές ρωγμές δοκών (καμπτικές και διατμητικές). [1]

Διαμπερής ρωγμή πλάκας/προβόλου στην πρόσοψη κτιρίου. [1]

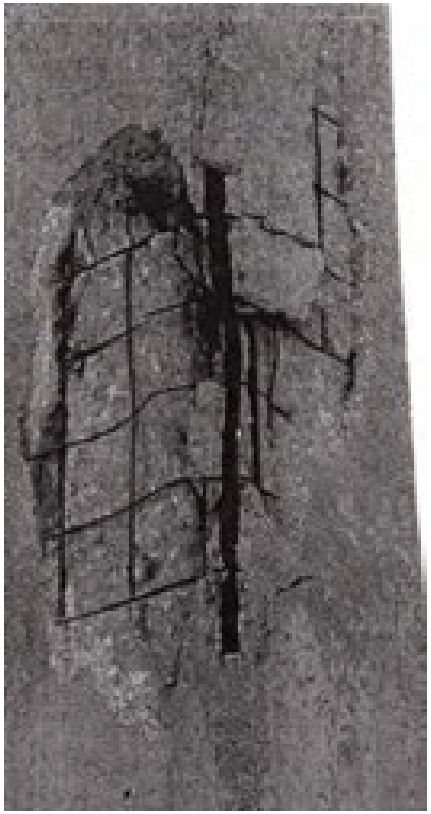


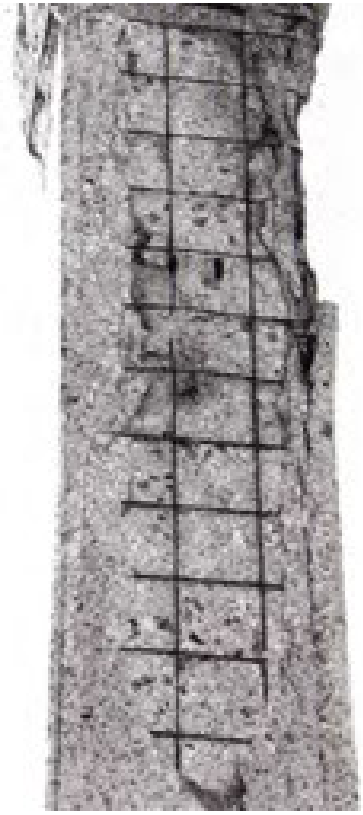
Χαρακτηριστικές ρωγμές προβόλου/γείσου και δοκού από Ο.Σ.. [1]



Απολεπίσεις επιχρισμάτων, έντονες καμπτικές και διατμητικές ρωγμές δοκών (στο άνοιγμα και στο στήριγμα). [1]

Απλή και τοπική απολέπιση στύλου, μικρό βάθος προσβολής, ελαφριά (έως και ασήμαντη) βλάβη. [1]



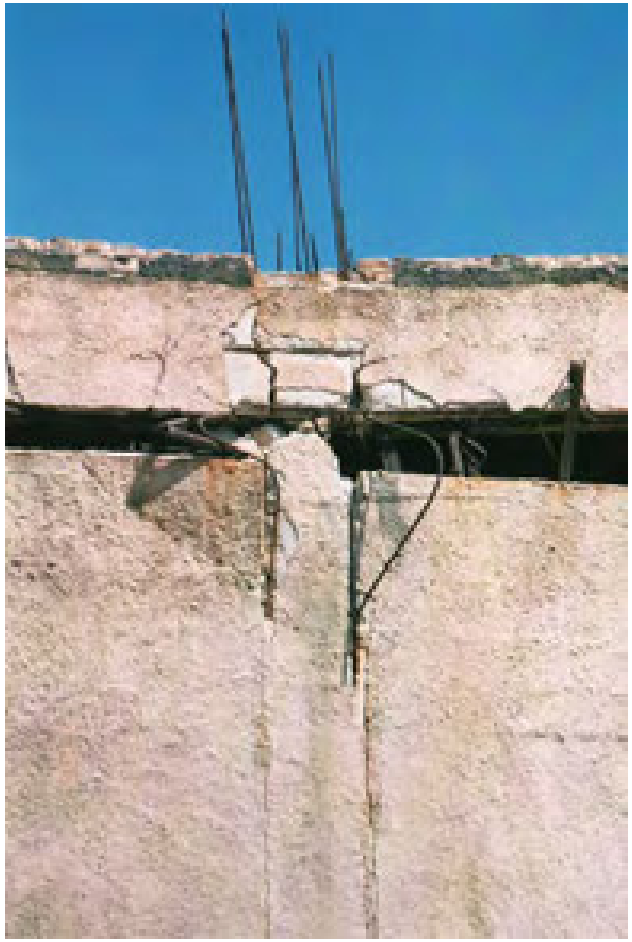


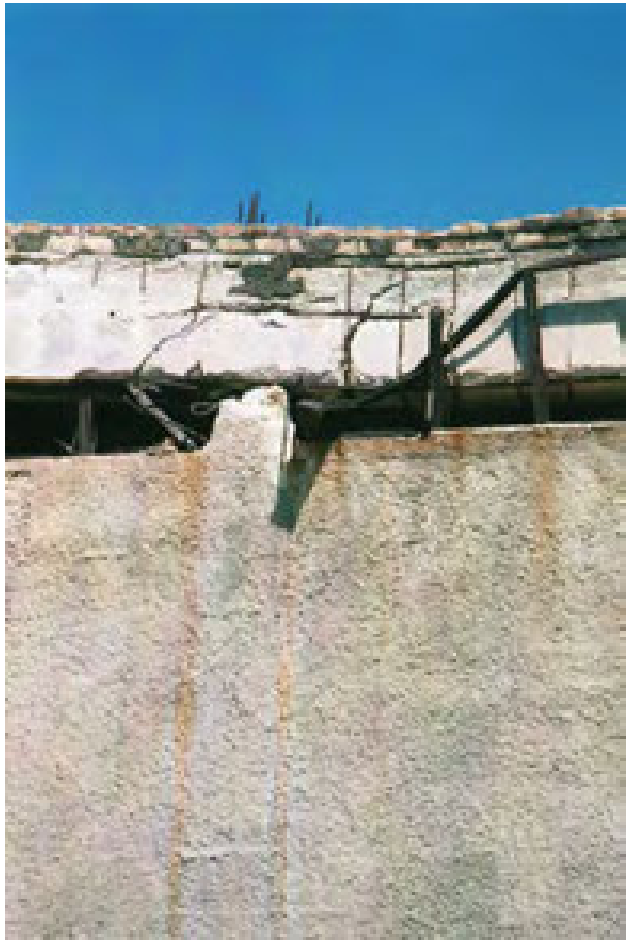
Έντονες αποφλοιώσεις στύλων, γυμνά μήκη οπλισμών, λυγισμένες ράβδοι, σοβαρές (έως βαριές) βλάβες. [1]

Θερμικό λάκτισμα ισχυρού και δύσκαμπτου στύλου, βαριά βλάβη. [1]

Θραύση υποστυλωμάτων με ανεπαρκείς συνδετήρες, χαρακτηριστικές ρωγμές προβόλων και δοκών. [1]

Αποκόλληση ΦΟ και ΟΠ, θραύση οπλισμών κοντού υποστυλώματος. [1]

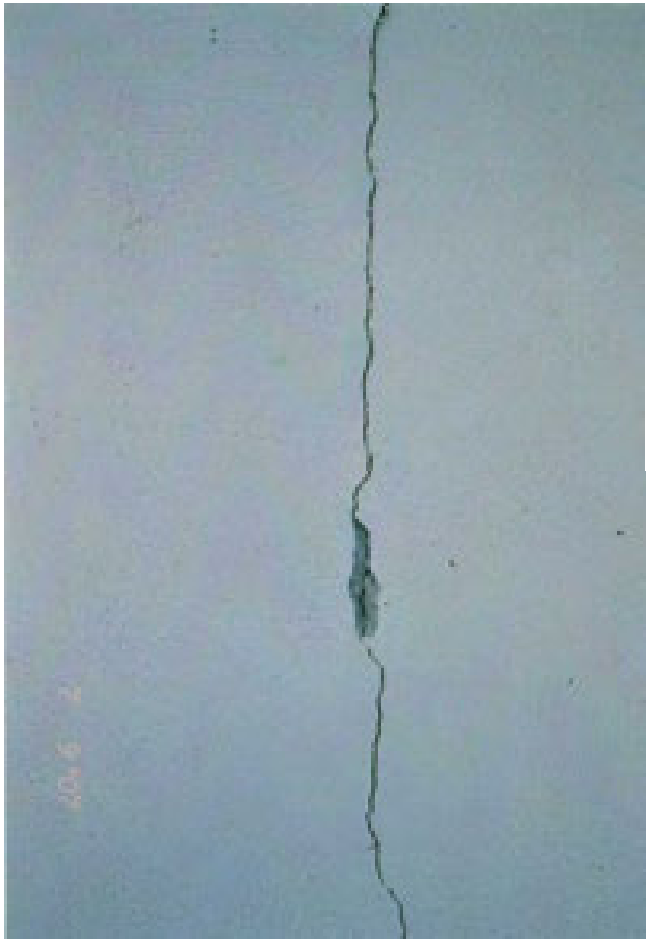




Θραύση κοντών υποστυλωμάτων, και κατάρρευση. [1]

Βλάβες γωνιακού κόμβου, έξω – μέσα. [1]

Κτίριο από Ο.Σ.. Αποσύνδεση και μετακίνηση της τοιχοπλήρωσης, καπνός από την εσωτερική φωτιά μέσα από την ρωγμή, ενώ παρατηρείται καί ελαφριά ρηγμάτωση του γωνιακού κόμβου. [1]



Έντονη αποκόλληση (και μετακίνηση) τοιχοπληρώσεων. [1]

Αποκολλήσεις ΦΟ και ΟΠ, μετακινήσεις ~ 25 mm στο κάτω μέρος των τοίχων. [1]

Αποφλοίωση τοίχων πλήρωσης, αποσύνθεση κονιάματος, ρηγμάτωση. [2]

Φλοιοί τούβλων: Θραύση, εκτίναξη.
Κονίαμα: Αποσύνθεση (σε βάθος ~ 10 mm).
Ρωγμές τούβλων και διαζώματος. [1]

Η ξύλινη μαρκίζα κάηκε πλήρως. Οι υαλοπίνακες έσπασαν και εκτινάχτηκαν, ενώ τα αλουμινένια πλαίσια και παραθυρόφυλλα έλιωσαν. Η μαρμαροποδιά κάμφθηκε προς τα άνω. [1]

Στην μαρμαροποδιά, με πάχος $t \approx 2{,}5$ cm και μήκος $\ell \approx 100$ cm παρατηρείται βέλος κάμψης $f \approx 3{,}5$ cm , ΧΩΡΙΣ ΡΩΓΜΗ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΗ.

Έτσι, η ανηγμένη εφελκυστική (και θλιπτική) παραμόρφωση εκτιμάται σε $\varepsilon \approx 5 \cdot 10^{-3}$ ($\varepsilon \approx 5\, f\, t/\ell^2$).

Η παραμόρφωση αυτή είναι ανεκτή ακόμη και από όχι ιδιαίτερα ανθεκτικό μάρμαρο, για υψηλές θερμοκρασίες. Ενδεικτικώς παρατηρούμε ότι για τα δεδομένα του Σχήματος ΙΙΙ.42, η οριακή παραμόρφωση θραύσεως ασβεστολίθου για περίπου 500 ^{o}C θα ήταν ίση με $10 \cdot 10^{-3}$.

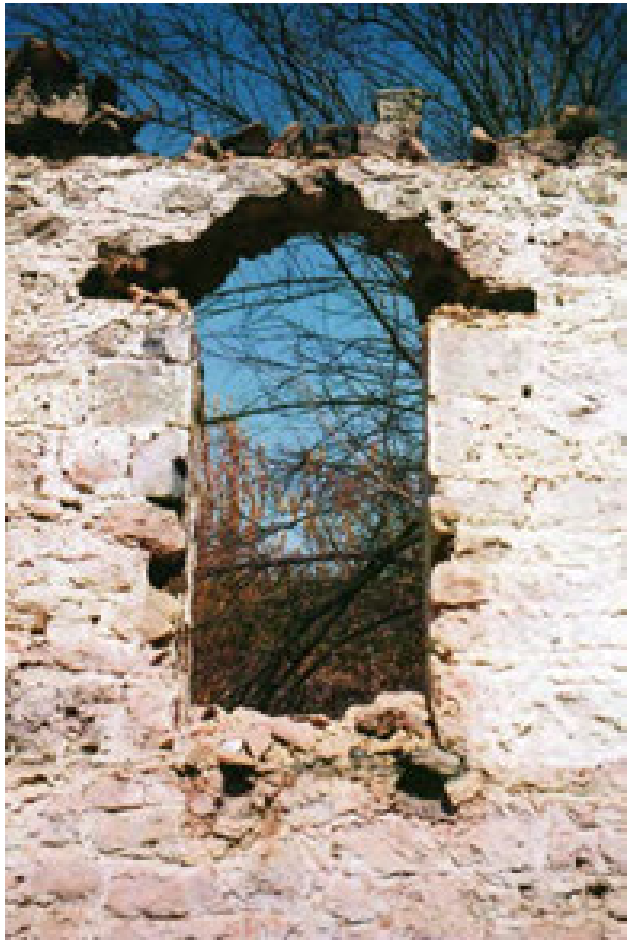
Διώροφο κτίριο από τοιχοποιία, ετοιμόρροπο μετά την πυρκαγιά. Η στέγη και το πάτωμα κάηκαν και κατέρρευσαν, ενώ έχουν καταρρεύσει και τμήματα τοίχων. [1]

Κύρτωση (φούσκωμα) τοίχων εκτός του επιπέδου τους, ρηγμάτωση στους αρμούς λόγω εξωτερικής αλλά και εσωτερικής πυρκαγιάς. [2]

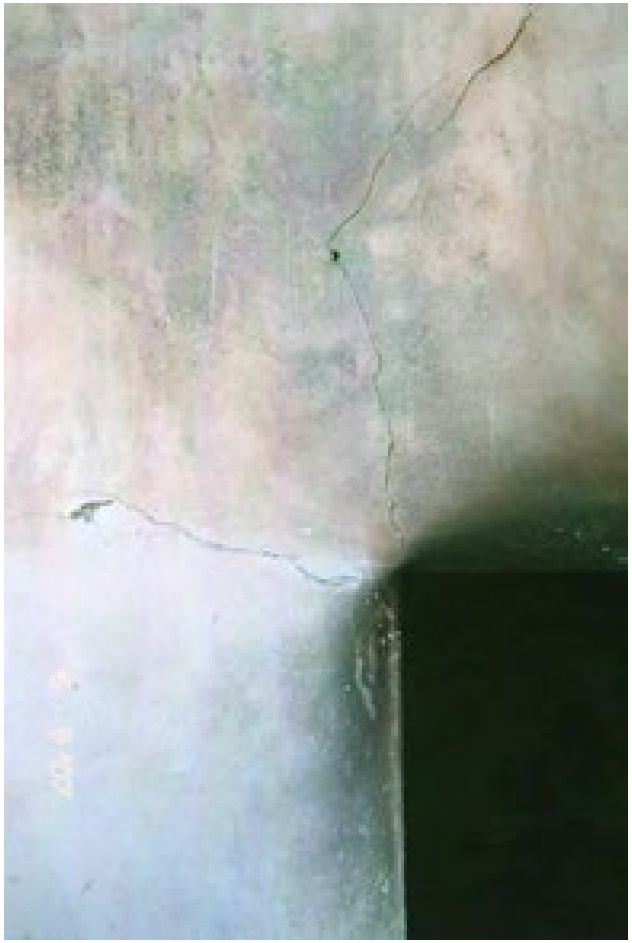
Έντονη διατμητική ρηγμάτωση καλοχτισμένων πεσσών σε γωνία, λάκτισμα πλάκας οροφής.[2]

Κτίριο από ωμοπλινθοδομή. [1]
Αριστερά: Χαρακτηριστική βλάβη γωνίας.
Δεξιά: Κατάπτωση επιχρίσματος, ρηγμάτωση και αποσύνθεση πλίνθων.

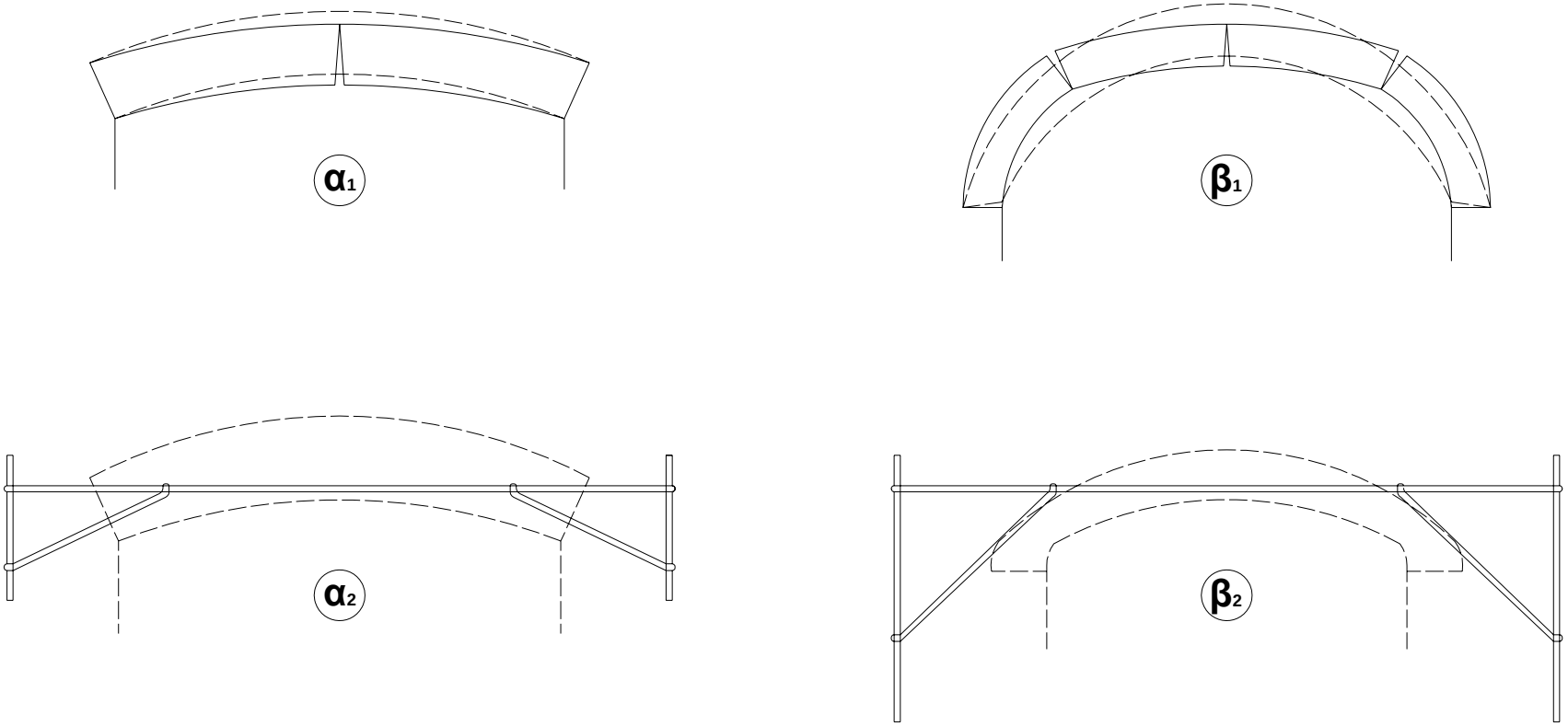
Η στέγη και το πάτωμα κάηκαν, μάλλον γρήγορα. Παρατηρείται καύση ξύλινων πρεκιών συνεχόμενων κουφωμάτων, με τοπική κατάρρευση τοίχου. [1]



Καμμένη στέγη και καμμένο πάτωμα. Καύση ξύλινων πρεκιών χωρίς πλήρη κατάρρευση του υπερκείμενου τοίχου (λειτουργία τόξου). [1]



Χαρακτηριστικές ρωγμές στις γωνίες ανοιγμάτων τοίχων. [1]



Ιδιαίτερη βλάβη τόξων: Κίνδυνος ενδόσεως (και βλάβες) αψίδων με μικρό (α) ή μεγάλο (β) βέλος, ακόμη και σε περιπτώσεις ενσωματωμένων χαλύβδινων συνδέσμων – ελκυστήρων, οι οποίοι επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά.

ΚΑΜΜΕΝΗ ΠΡΥΤΑΝΕΙΑ ΕΜΠ

IV.6 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών Μ. Χρονόπουλου, από παλαιότερες αλλά και από τις πρόσφατες πυρκαγιές του 2007 στις περιοχές των Νομών Ηλείας, Αρκαδίας και Ευβοίας.

[2] Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών Ε. Βιντζηλαίου, από τις πρόσφατες πυρκαγιές του 2007 στις περιοχές των Νομών Ηλείας, Αρκαδίας και Ευβοίας.

V. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το Κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται το θέμα της αριθμητικής προσομοίωσης με στόχο τον (ανα)σχεδιασμό δομικών στοιχείων και/ή φορέων μετά από πυρκαγιά. Αρχικώς, παρουσιάζονται οι αρχές σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς, ενώ ακολούθως γίνονται αριθμητικές προβλέψεις της συμπεριφοράς κατά ή μετά την πυρκαγιά, θεωρώντας μή συζευγμένη και ακολούθως συζευγμένη επίλυση του θερμικού/μηχανικού προβλήματος.

Σε ό,τι αφορά τον σχεδιασμό, εξετάζονται οι προτεινόμενες μέθοδοι ανάλυσης και επίλυσης για διατομές στοιχείων, στατικώς ορισμένα συστήματα και στατικώς αόριστα συστήματα. Τέλος, στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται οι δυνατότητες ανάλυσης με χρήση πλέον εξειδικευμένων συζευγμένων επιλύσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες – πάντως – δεν προτείνονται για την αντιμετώπιση του θέματος στο πλαίσιο αυτού του Πρακτικού Οδηγού.

Σε ό,τι αφορά την προσομοίωση, μελετάται αρχικά το πρόβλημα επίλυσης της διάχυσης της θερμότητας στα δομικά στοιχεία, είτε πρόκειται για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε πρόκειται για στοιχεία από τοιχοποιία. Ακολουθεί ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας στοιχείων και κατασκευών κατά και μετά την πυρκαγιά, χρησιμοποιώντας αρχικά απλές βήμα προς βήμα επιλύσεις και, ακολούθως, λεπτομερέστερες αριθμητικές μεθόδους.

V.1 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Ο σχεδιασμός δομικού στοιχείου ή μίας κατασκευής σε πυρκαγιά δεν απέχει ουσιαστικά από τον συμβατικό σχεδιασμό έναντι άλλων δράσεων (μόνιμα ή κινητά φορτία, σεισμός, άνεμος, χιόνι), υιοθετώντας, όπως και στις άλλες περιπτώσεις, τη λογική των Οριακών Καταστάσεων Αστοχίας (ΟΚΑ) και Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Γενικά, ο σκοπός του σχεδιασμού της κατασκευής έναντι πυρκαγιάς είναι η ασφαλής παραλαβή των μονίμων και κινητών φορτίων αυτής κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της πυρκαγιάς, χωρίς να επέλθει κατάρρευση είτε ακραίες παραμορφώσεις του φορέα, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε κατάρρευση. Από την άποψη σχεδιασμού του φέροντος οργανισμού, ο Μελετητής πρέπει να εξασφαλίσει ότι τα μόνιμα και κινητά φορτία θα εξακολουθούν να παραλαμβάνονται από τα δομικά στοιχεία έως τη θεμελίωση, ακόμη και αν η έκθεση της κατασκευής σε πυρκαγιά έχει αλλοιώσει τα γεωμετρικά στοιχεία της κατασκευής (μόνιμες παραμορφώσεις, βέλη, συστολο-διαστολές κ.λπ.), ή έχει αλλοιώσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών – χάλυβας και σκυρόδεμα – και άρα τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων (αντοχή σε θερμοκρασιακή έκθεση, παραμένουσα αντοχή, μείωση δυσκαμψίας, πλαστιμότητας κ.λπ.).

Ο Ευρωκώδικας 2 [2004] θεωρεί ότι η πυρκαγιά είναι τυχηματική δράση η οποία απαιτείται να ελεγχθεί μόνο στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ): ως εκ τούτου, ισχύουν οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας και συνδυασμού με άλλα φορτία που αφορούν τυχηματικές καταστάσεις, οι δε αντοχές των δομικών στοιχείων υπολογίζονται με αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών (χαρακτηριστικές τιμές σχεδιασμού), αφού αυτές τροποποιηθούν κατάλληλα, ανάλογα με τη δρώσα θερμοκρασιακή κατανομή στα στοιχεία κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Ο έλεγχος σε πυρκαγιά γίνεται κατά βάση σε ΟΚΑ, όπως ήδη αναφέρθηκε. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται σχεδιασμός σε ΟΚΛ, άρα έλεγχος βελών (εκτός και αν οδηγούν σε εξάντληση της διαθέσιμης πλαστικής στροφής) ή άλλων παραμέτρων λειτουργίας (εύρος ρωγμών) σε πυρκαγιά. Αν και η συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς είναι μή γραμμική, τόσο σε καταστατικό επίπεδο των υλικών όσο και σε ό,τι αφορά τις μεγάλες παραμορφώσεις, ο Κανονισμός επιτρέπει τη χρήση γραμμικών μεθόδων επίλυσης, με ανακατανομή, για τον υπολογισμό των μεγεθών κατά τον έλεγχο της κατασκευής. Επιπλέον, και λόγω των προβλέψεων του Κανονισμού περί πυροδιαμερισματοποίησης, μή εξάπλωσης και μετάδοσης της πυρκαγιάς κ.λπ., επιτρέπεται έλεγχος επιμέρους φορέων και τμημάτων πλαισίων, και όχι του συνόλου του κτιρίου.

Όπως και στον σχεδιασμό έναντι συμβατικών δράσεων, ο σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς αφορά τον έλεγχο της ανίσωσης ασφαλείας της Εξ. 1:

$$S_d\,(\gamma_{fg}, \gamma_{fq}) \leq R_d\,(1/\gamma_{mc}, 1/\gamma_{ms})\,, \qquad (1)$$

με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές της παραπάνω ανίσωσης είναι συνάρτηση του χρόνου έκθεσης και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, ανάλογα και με το υλικό κατασκευής (σκυρόδεμα, χάλυβας, τοιχοποιία).

Η ιδιαιτερότητα της έκθεσης του δομικού συστήματος σε πυρκαγιά αφορά εν συντομία τα εξής:

- Οι δράσεις σε συνδυασμό με την πυρκαγιά (η οποία θεωρείται τυχηματική φόρτιση) είναι μειωμένες σε σχέση με τους συνδυασμούς μονίμων και κινητών φορτίων σε ΟΚΑ. Ενδεικτικά, ο Ευρωκώδικας 2 [2004] επιτρέπει τον συνδυασμό φορτίων $1.0G_k + 0.9Q_{1k} + 0.5Q_{jk}$, όπου G_k, Q_{1k} και Q_{jk} οι χαρακτηριστικές τιμές της μόνιμης, της κύριας κινητής και των ταυτόχρονων συνοδών κινητών δράσεων, αντίστοιχα. Όπως και στον σεισμό, οι δράσεις λόγω πυρκαγιάς εισάγονται με συντελεστή γ_f ίσο με 1.0. Ομοίως, οι αντοχές επίσης διαιρούνται με συντελεστή γ_m ίσο με 1.0 (σε αντίθεση με τον σεισμό).

- Η πυρκαγιά συνεπάγεται τη θερμοκρασιακή διαστολή της κατασκευής, έως και τη μή γραμμική απόκριση, και κατόπιν την μερική επαναφορά του ΦΟ, με ενδεχόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις. Η ύπαρξη αυτών των εσωτερικών συστολοδιαστολών δημιουργεί αυτεντατικές καταστάσεις στον ΦΟ, οι οποίες είναι περιορισμένες στο βαθμό που η κατασκευή είναι ισοστατικός φορέας και ελεύθερη έναντι μηκύνσεων/ βραχύνσεων.

- Η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες των δομικών στοιχείων (ή τμήματος αυτών), έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των δομικών υλικών στο εκτεθειμένο τμήμα του φορέα.

- Λόγω αποφλοίωσης και απολέπισης, ενδέχεται να υπάρξει απομείωση της μάζας (άρα της διατομής) των εκτεθειμένων στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση, λόγω της θερμοκρασιακής διάχυσης, παρατηρείται μεταφορά της υγρασίας εντός του δομικού στοιχείου προς τα άκρα.

- Το μέγεθος των παραμορφώσεων γενικώς αγνοείται, εκτός αν αυτές επηρεάζουν την αντοχή (φαινόμενα δευτέρας τάξεως), τις συνοριακές συνθήκες (αρμοί, βέλη παραμόρφωσης) ή τη λειτουργία κατά την πυρκαγιά (έξοδοι διαφυγής, διατήρηση της θερμομόνωσης μέσω χωρισμάτων μεταξύ πυροδιαμερισμάτων).

- Γενικά, οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας των υλικών έναντι ΟΚΑ αφορούν τυχηματικές δράσεις άρα είναι μικρότεροι των συμβατικών (πλην όπου απαιτείται ο καθορισμός των ικανοτικών αντοχών). Ο Ευρωκώδικας 2 [2004], επιτρέπει να λαμβάνεται υπόψη $\gamma_m = 1.00$ (σκυρόδεμα και χάλυβας, υλικά τοιχοποιιών), βλ. και αμέσως πριν.

- Η μορφή αστοχίας σε έκθεση σε πυρκαγιά διαφέρει από αυτές των λοιπών ΟΚΑ. Ενδεχομένως, η σταδιακή αλλαγή των χαρακτηριστικών των στοιχείων να οδηγήσει σε τροποποίηση της λειτουργίας τους και άρα της καταπόνησης των όμορων στοιχείων της κατασκευής (π.χ. σταδιακή απώλεια της καμπτικής λειτουργίας δοκού ή πλάκας και δράση μηχανισμού μεμβράνης).

  Λόγω των παραπάνω, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι κατάρρευσης των συνήθων δομικών στοιχείων σε πυρκαγιά (ειδικά εφόσον πρόκειται για φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα μελετημένα με απαιτήσεις πλαστιμότητας, π.χ. έναντι σεισμού) υπερβαίνει την τιμή του 2.0, γεγονός το οποίο καθιστά τη συνήθη σύγχρονη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα επαρκώς ανθεκτική έναντι έκθεσης σε συνήθη πυρκαγιά, ακόμη και ελλείψει εξειδικευμένου σχεδιασμού.

V.1.1 Στατική επίλυση και έλεγχος κατασκευών Ο.Σ. σε πυρκαγιά

Το πρόβλημα της αναλυτικής πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός δομικού συστήματος από Ο.Σ. σε πυρκαγιά είναι ένα συζευγμένο μή γραμμικό και χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα επίλυσης του φορέα υπό μόνιμες και χρονικά μεταβαλλόμενες εξωτερικές δράσεις και εσωτερικές παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων. Υπενθυμίζεται ότι τα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν χρονικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες και αντοχές των υλικών που τα απαρτίζουν και, μάλιστα, υπό θερμοκρασιακή διάχυση στα δομικά στοιχεία αυτά.

Απλοποιητικά, ανάλογα και με το είδος του δομικού συστήματος, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και έχουν υιοθετηθεί από τους Κανονισμούς απλοποιητικές μέθοδοι επίλυσης του παραπάνω μή γραμμικού προβλήματος:

- Αρχικά αποσυζευγνύεται η λύση σε δύο ανεξάρτητες παράλληλες επιλύσεις, α) αφενός τη θερμοκρασιακή διάχυση εν χρόνω στο φορέα, και β) αφετέρου τη στατική επίλυση για τα δρώντα στατικά μεγέθη, είτε πρόκειται για φορτίσεις είτε πρόκειται για θερμοκρασιακές δράσεις,
- Ακολούθως, απλοποιούνται οι μή γραμμικές στατικές επιλύσεις τις οποίες το πρόβλημα συνεπάγεται, είτε με γραμμικές ελαστικές λύσεις βάσει ισοδύναμων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών λόγω της έκθεσης στη φωτιά, είτε με διαδοχική βήμα προς βήμα επίλυση, με αντίστοιχη τροποποίηση των ιδιοτήτων στην αρχή κάθε βήματος (γραμμικοποίηση του μή γραμμικού προβλήματος), με ενδεχόμενη διόρθωση των σφαλμάτων ισορροπίας στο τέλος του βήματος.

Έτσι, η στατική επίλυση φορέων σε πυρκαγιά περιλαμβάνει:

1. <u>Το θερμοκρασιακό πρόβλημα</u>. Καθορίζεται η θερμοκρασική φόρτιση, και ακολούθως επιλύονται οι διατομές και τα δομικά στοιχεία ανεξάρτητα από τη φόρτιση, και ανάλογα με την αρχική θερμοκρασία (συνήθως θερμοκρασία περιβάλλοντος) για τον καθορισμό της διάχυσης της θερμοκρασίας στα παραπάνω στη διάρκεια του χρόνου.

2. <u>Το μηχανικό πρόβλημα</u>. Ανάλογα με τη θερμοκρασιακή διάχυση στον χρόνο, υιοθετείται μια διαδικασία στατικής επίλυσης είτε με άμεση επίλυση βάσει τροποποιημένων χαρακτηριστικών, είτε με μιά σταδιακή βήμα προς βήμα επίλυση διαδοχικά αυξανόμενων δράσεων, με παράλληλη τροποποίηση σε κάθε βήμα των ιδιοτήτων των υλικών (δυσκαμψίες, αντοχές). Κατά τη στατική επίλυση, υιοθετούνται συμβατικά προσομοιώματα επίλυσης διατομών και φορέων για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων της κατασκευής, αλλά με τροποποιημένες ιδιότητες.

V.1.1.1 Ισοστατικοί φορείς

Για την περίπτωση ισοστατικών φορέων, οιεσδήποτε θερμοκρασιακές μηκύνσεις και/ή καμπυλότητες στα εκτεθειμένα δομικά στοιχεία λόγω μηχανικών και θερμοκρασιακών μεταβολών, συνεπάγονται αντίστοιχες μεταβολές στο παραμορφωμένο σχήμα του φορέα. Στον βαθμό που αυτές δεν παρεμποδίζονται από τις συνοριακές συνθήκες και/ή δεν είναι τέτοιου μεγέθους ώστε να απαιτηθεί έλεγχος για φαινόμενα δευτέρας τάξεως, οι παραμορφώσεις αυτές δεν οδηγούν σε σημαντική τροποποίηση των εσωτερικών εντατικών μεγεθών του στατικού υπολογισμού.

Άρα, υιοθετείται απλοποιητικά η μή συζευγμένη στατική επίλυση υπό τις μειωμένες, λόγω τυχηματικότητας, δράσεις, ο δε έλεγχος αντοχής (η ανίσωση ασφαλείας της Εξ. 1) θα θεωρείται απλοποιητικά ότι ικανοποιείται απλώς με τον υπολογισμό των αντοχών N, M και V της κάθε εκτεθειμένης διατομής του στοιχείου, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του οπλισμού (ουσιαστικά των αντοχών σε θλίψη και σε εφελκυσμό, αντίστοιχα) λόγω της κατανεμημένης θερμοκρασίας εντός της διατομής.

Στην περίπτωση ισοστατικών φορέων, για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας είναι δυνατή απλοποιητικά η χρήση νομογραφημάτων (βλ. §V.2.2), απλοποιητικών μαθηματικών εκφράσεων θερμοκρασιακής διάχυσης (βλ. §V.2.1), ή πλέον εξελιγμένων μή συζευγμένων θερμικών επιλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (βλ. §V.2.3 και Παράρτημα Γ).

V.1.1.1.1 Αμφιέρειστες δοκοί και (δι, τρι)τετραέρειστες πλάκες εκτεθειμένες στο άνοιγμα

Για τον υπολογισμό αμφιέρειστων δοκών είτε δι,τρι,τετραέρειστων πλακών εκτεθειμένων σε πυρκαγιά στο άνοιγμα από την κάτω παρειά (Σχήμα V.1), εφόσον το θλιβόμενο σκυρόδεμα στο άνοιγμα είναι συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, άρα συμβατικής αντοχής, είναι αρκετό να θεωρηθεί η επιρροή της θερμοκρασίας στη θέση του εφελκυόμενου χάλυβα, με υπολογισμό της αντίστοιχης απομειωμένης αντοχής σε εφελκυσμό f_{ydT} (βλ. Κεφ. III).

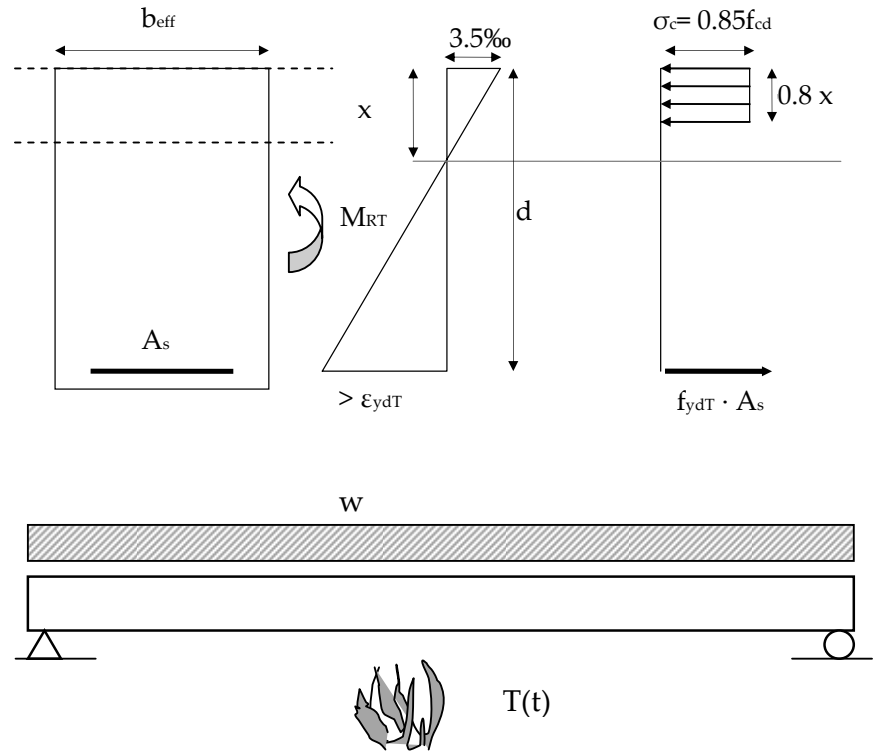
Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών ισχύει, οπότε, για συνήθη ποσοστά οπλισμού $\rho = A_s/bd$ υιοθετείται η εξίσωση συμβατικού υπολογισμού της καμπτικής αντοχής M_{RT} (Εξ. 2) λόγω θερμοκρασίας T, λόγω f_{ydT}.

Τυχόν καμπυλώσεις και βέλη της δοκού λόγω θερμοκρασίας αγνοούνται.

V.1.1.1.2 Έλεγχος υποστυλωμάτων με χρήση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης αντοχής N_T-M_T.

Η πιο πάνω μεθοδολογία αποτίμησης της αντοχής δύναται να επεκταθεί και στην περίπτωση στοιχείων υπό ταυτόχρονη κάμψη και αξονική δύναμη, υιοθετώντας τις εξισώσεις διάχυσης της θερμοκρασίας εν χρόνω σε ορθογωνικές διατομές με έκθεση σε πυρκαγιά κατά ISO 834, σε μία ή περισσότερες παρειές.

$$M_{RT} = A_s \cdot f_{ydT} \cdot \left[d - 0.4 \cdot \frac{A_s \cdot f_{ydT}}{0.68 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}} \right] \qquad (2)$$

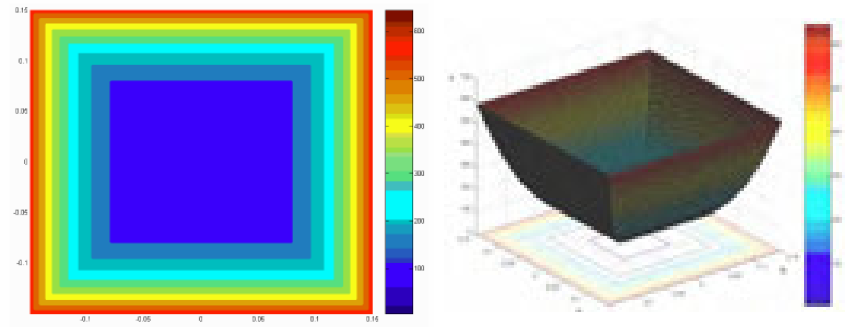


Σχήμα V.1 Ισοστατικός φορέας σε κάμψη, εκτεθειμένος σε πυρκαγιά στο άνοιγμα.

Με αυτόν τον τρόπο, θεωρώντας ότι η θερμοκρασία του οπλισμού είναι ίδια με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος σκυροδέματος, είναι δυνατόν να υπολογισθεί το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της διατομής μετά από δεδομένη χρονική έκθεση στην πυρκαγιά ISO 834, υπολογίζοντας σε κάθε περίπτωση την κατανομή της θερμοκρασίας εντός της διατομής (βλ. Κεφ. V.2), και κατόπιν τροποποιώντας τις ιδιότητες του χάλυβα και του σκυροδέματος (σύμφωνα με το Κεφ. III).

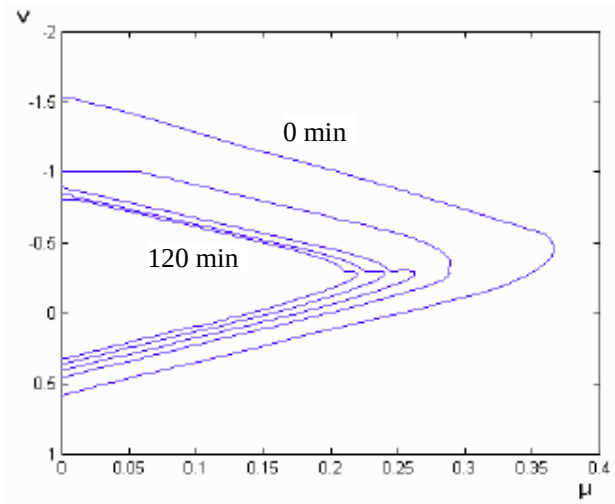
Τέλος, με βάση την παραδοχή ότι ισχύει η επιπεδότητα των διατομών, πριν και μετά την κάμψη, υπολογίζονται για σειρά θέσεων του ουδέτερου άξονα της διατομής (με τη βοήθεια π.χ. του λογισμικού MATLAB) τα μεγέθη αντοχής αξονική N_T και ροπή M_T, αντίστοιχα, σε ισορροπία με τις κατανομές τάσεων στη διατομή.

Ενδεικτικά, από την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας δίδεται το τυπικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης του Σχήματος V.2.β, για τετράγωνο υποστύλωμα 30/30 (σκυρόδεμα C20, οπλισμός 8Φ18 κατηγορίας S400 και επικάλυψη 2εκ.), εκτεθειμένο πανταχόθεν (βλ. Σχήμα V.2.α) σε πυρκαγιά ISO 834. Για τον υπολογισμό θεωρήθηκε θερμοκρασιακή απομείωση αντοχής των υλικών κατά Ευρωκώδικα 2 [2004] (βλ. Κεφ. I).



(α)

(β)



Σχήμα V.2 α) Κατανομή θερμοκρασίας σε χρόνο 60 min και β) Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ανηγμένων μεγεθών ($\nu=N_T/bhf_{cd}$, $\mu=M_T/bh^2f_{cd}$) τυπικού τετράγωνου υποστυλώματος 30/30 σε χρόνους έκθεσης σε πυρκαγιά ISO 834, 0,30, 60, 90 και 120min [Κούτσουρας και Μπουλαζέρης, 2005].

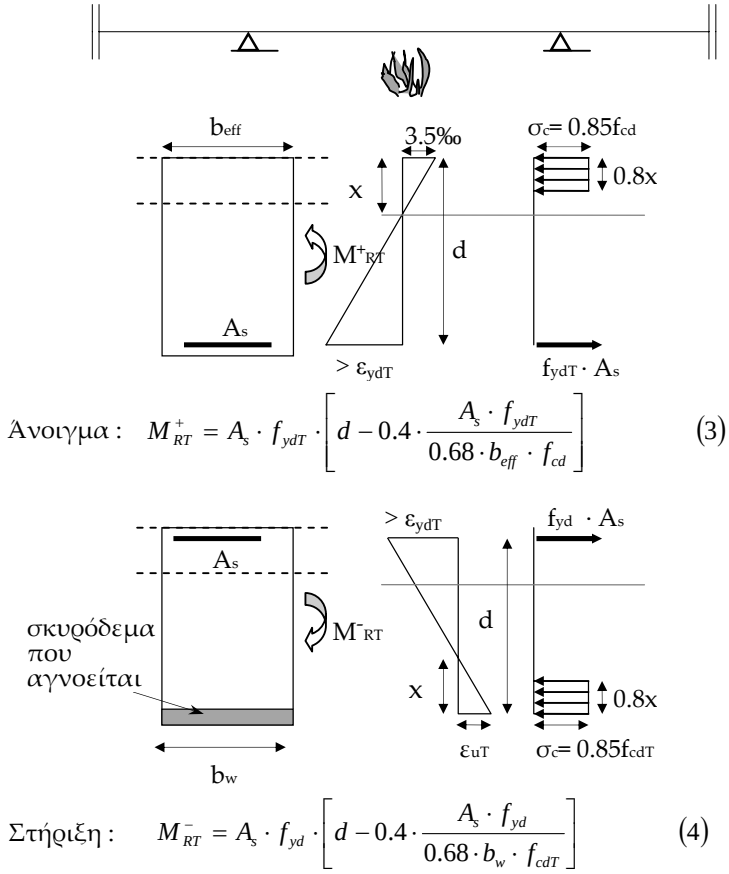
V.1.1.2 Υπερστατικοί φορείς

V.1.1.2.1 Συνεχείς δοκοί / πλάκες εκτεθειμένες κάτωθεν σε πυρκαγιά

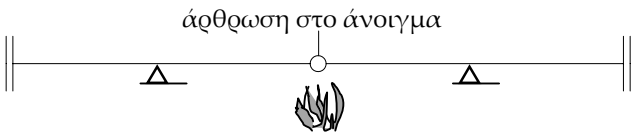
Στην περίπτωση συνεχών δοκών / πλακών εκτεθειμένων στο άνοιγμα από την κάτω παρειά, το πρόβλημα περιπλέκεται από το ότι το θλιβόμενο σκυρόδεμα στο άνοιγμα (πλακοδοκός) παραμένει συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και άρα συμβατικής αντοχής, το δε σκυρόδεμα στις στηρίξεις υφίσταται απομείωση της αντοχής του λόγω θερμοκρασιακής έκθεσης.

Αντίστοιχα, η επιρροή της θερμοκρασίας στη θέση του εφελκυόμενου χάλυβα, ισχύει μόνο στο άνοιγμα και όχι στις στηρίξεις, όπου ο χάλυβας (πάνω) είναι προστατευμένος λόγω του μεγάλου στατικού του ύψους. Για τον υπολογισμό της παραμένουσας αντοχής και μόνο, είναι επομένως δυνατόν να θεωρηθούν οι αντίστοιχες αντοχές M_{RT}^{-}, M_{RT}^{+} (βάσει f_{ydT}/f_{cd} και $f_{yd}/f_{cdT}/\varepsilon_{uT}$ αντίστοιχα – Κεφ. ΙΙΙ), και να ελεγχθεί με αυτόν τον τρόπο η φέρουσα ικανότητα της δοκού / πλάκας (Σχήμα V.3).

Ειδικότερα, για έναν συντηρητικό σχεδιασμό, ολόκληρος ο φορέας του Σχήματος V.3 μπορεί να θεωρηθεί σαν αμφιπρόβολος, θεωρώντας πλήρη απομείωση της φέρουσας ικανότητας σε κάμψη στα ανοίγματα (αρθρώσεις), αγνοώντας το τμήμα της θλιβόμενης διατομής σε έκθεση πέραν των 600°C.



Σχήμα V.3.α Συνεχής δοκός, πυρκαγιά σε ένα άνοιγμα, υπολογισμός διατομών σε κάμψη.



Σχήμα V.3.β Συντηρητικός σχεδιασμός της συνεχούς δοκού υπό έντονη πυρκαγιά.

V.1.1.2.2 Πλαίσια με ζυγώματα και κατακόρυφα στοιχεία εκτεθειμένα σε πυρκαγιά

Καί σε αυτή την περίπτωση, ο υπολογισμός των αντοχών των εκτεθειμένων διατομών γίνεται με βάση τη θερμοκρασιακή διάχυση και αντίστοιχα νομογραφήματα – εξισώσεις διάχυσης, όπως δίδονται στην §V.2.

Η απλοποιητική απευθείας στατική επίλυση του φορέα με τις αντίστοιχες απομειωμένες δυσκαμψίες και αντοχές των υλικών, θα δώσει μια ένδειξη της παραμένουσας αντοχής υπό τα σταθερά κατακόρυφα φορτία.

Σε αυτή την περίπτωση, όμως, για τον έλεγχο της κατασκευής κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών περιπλέκεται λόγω των σημαντικών θερμοκρασιακών παραμορφώσεων από την διαφορική διαστολή των επιμέρους στοιχείων, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την οριζόντια μήκυνση και στροφική κάμψη των ζυγωμάτων λόγω της πυρκαγιάς, με ταυτόχρονη επιβολή εγκάρσιων παραμορφώσεων στα κατακόρυφα στοιχεία, γεγονότα που συνεπάγονται σημαντική ανακατανομή της έντασης (M,V, N) σε πολλά στοιχεία του πλαισίου.

Ως εκ τούτου, σε αυτή την περίπτωση είναι αναγκαία η χρήση πλέον εξειδικευμένων μεθόδων και υπολογιστικών εργαλείων, όπως περιγράφονται στο Παράρτημα Γ.

V.1.2 Προσεγγιστική μέθοδος επίλυσης στοιχείων και κατασκευών σε πυρκαγιά μέσω απλοποιητικών παραδοχών

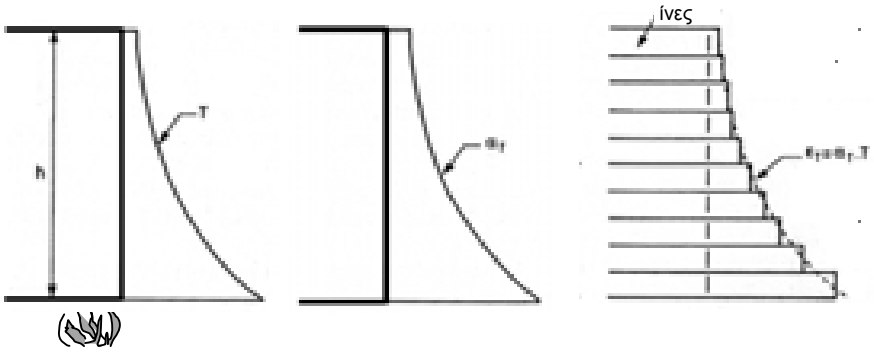
V.1.2.1 Ισοστατικοί φορείς

- Στην περίπτωση ισοστατικών φορέων, η μονόπλευρη θερμική δράση σε «ραβδόμορφο» δομικό στοιχείο από Ο.Σ. (δοκό, υποστύλωμα, λωρίδα πλάκας) συνεπάγεται:
  (i) Εξωτερικές παραμορφώσεις (επιμήκυνση, κύρτωση), και
  (ii) Εσωτερική εντατική κατάσταση ορθών τάσεων (αυτοϊσορροπουμένων, πάντως, μέσα σε κάθε διατομή – μιας και στο στοιχείο <u>δεν</u> επιβάλλονται πρόσθετα εξωτερικά <u>φορτία</u>).

- Άραγε, πόθεν προέρχεται αυτή η εσωτερική ένταση ;
  Απάντηση: Προέρχεται από την εσωτερική ασυμβατότητα των επιμηκύνσεων που θα ήθελε να εκδηλώσει η κάθε διαμήκης <u>ίνα</u> (λωρίδα) του στοιχείου «άν» ήταν ελεύθερη – αν δεν ήταν δηλαδή συνδεδεμένες μεταξύ τους οι διαμήκεις ίνες (λωρίδες) που απαρτίζουν το στοιχείο.

  Νά λοιπόν μια ιδιότυπη «εσωτερική υπερστατικότητα» , την οποία θα την επιλύσουμε με τη συνήθη μέθοδο: α) Θα κάνουμε διαμήκεις τομές, ελευθερώνοντας τις ίνες να εκδηλώσουν ολόκληρη τη θερμική τους παραμόρφωση ($\varepsilon_T = \alpha_T \cdot T$), και ύστερα, β) κατά μήκος των τομών αυτών, θα έπρεπε να εφαρμόσουμε διατμητικές τάσεις οι οποίες θα αναλάβουν να θυμίσουν στις ίνες την υποχρέωσή τους να σεβαστούν τις συνθήκες του ΣΥΝΟΛΟΥ στο οποίο ανήκουν. Μία δε μόνον τέτοια συνθήκη υπάρχει: Οι διατομές του στοιχείου οφείλουν να παραμένουν <u>επίπεδες</u> (εστραμμένες όσο και εάν χρειαστεί, αλλά επίπεδες).

- Ας αφήσουμε λοιπόν πρώτα ελεύθερες τις επιμέρους διαμήκεις ίνες μιας δοκού να επιμηκυνθούν όσο θα απαιτούσε η θερμοκρασία T (βλ. §II.5.2) της καθεμιάς, και ο αντίστοιχος συντελεστής θερμικής διαστολής της καθεμιάς (βλ. §III.3.2.3). (Σημειώνεται ότι για κάθε ίνα καθ' ύψος εφαρμόζεται η <u>μέση</u> τιμή των θερμοκρασιών κατά την έννοια του πλάτους της διατομής).



Σχήμα V.4 Για δεδομένη διανομή μέσων θερμοκρασιών και αντίστοιχων συντελεστών θερμικής διαστολής, καθ' ύψος της διατομής, αφήνουμε να εκδηλωθούν ελεύθερα οι θερμικές επιμηκύνσεις ε_T όλων των ινών (λωρίδων).

- Τώρα, ας θυμίσουμε σ' αυτές τις ίνες ότι τελικώς οφείλουν να σεβαστούν την <u>επιπεδότητα</u> των διατομών. Προς τούτο, θα εφαρμόσουμε ένα ΤΕΧΝΑΣΜΑ. Θα επιβάλουμε στη διατομή δύο κατάλληλες αλληλοαναιρούμενες εντάσεις, χάρις στις οποίες η διατομή θα μένει πάντα επίπεδη˙ κι επειδή είναι αλληλοαναιρούμενες, δεν εμποδίζουν τελικώς τα αποτελέσματα της θερμικής δράσης – απλώς τα προσαρμόζουν στις συνθήκες του δομικού στοιχείου :

  (i) Πρώτον, διανεμημένες ορθές θλιπτικές τάσεις $\sigma_T = \varepsilon_T \cdot E_T$, ικανές να «εξουδετερώσουν» τις ε_T – αποκαθιστώντας πάντως μια επίπεδη διατομή.

  (ii) Ετούτες όμως οι σ_T έχουν εισαγάγει στη διατομή μια αξονική δύναμη και μια ροπή :

  $$N_T = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_T(y) \cdot dA = -\int a_T \cdot T \cdot E_T \cdot dA,$$ (όπου dA = b · dy στην περίπτωση σταθερού πλάτους)

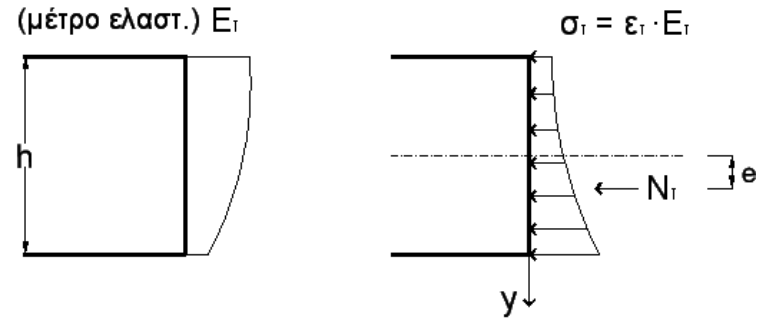
  $$M_T = N_T \cdot e = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_T(y) \cdot y \cdot dA = \int a_T \cdot T \cdot E_T \cdot y \cdot dA.$$

  Επομένως, για λόγους ισορροπίας, οφείλουμε τώρα να επιβάλουμε στη διατομή τα <u>αντίθετα</u> ισοδύναμα εντατικά μεγέθη - N_T και - M_T.

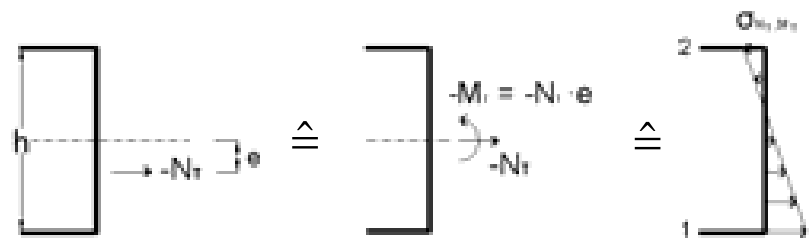
- Ας κάνουμε τώρα έναν απολογισμό της καταστάσεως:

  (i) <u>Τάσεις</u> που ασκούνται στη διατομή: Η διατομή δεν είχε εξωτερικές τάσεις. Έχει μόνο τις δύο αλληλοϊσορροπούμενες εντάσεις τις οποίες σκοπίμως της επιβάλαμε εμείς˙ αφενός τις σ_T (βλ. Σχήμα V.5) και αφετέρου τις σ_{N_T,M_T} (βλ. Σχήμα V.6), όπου:

  $$\sigma^{(1)}_{N_T,M_T} = \frac{(-N_T)}{A_c} - \frac{(-M_T)}{J_c} \cdot y_1 \quad \text{και} \quad \sigma^{(2)}_{N_T,M_T} = \frac{(-N_T)}{A_c} + \frac{(-M_T)}{J_c} \cdot y_2 .$$



Σχήμα V.5 Επιβάλλονται οι πλασματικές ορθές τάσεις σ_T.



Σχήμα V.6 Επιβάλλεται επίσης η αντίθετη (ισοδύναμη) εντατική κατάσταση - N_T και - M_T για λόγους ισορροπίας.

Προφανώς, το σύστημα τάσεων $[\sigma_T] + [\sigma_{N_T,M_T}]$ αυτοϊσορροπεί εξωτερικώς, αλλά παράγει εσωτερική εντατική κατάσταση («θερμική»), με ενδεχόμενον κίνδυνο εσωτερικής ρηγμάτωσης (βλ. Σχήμα V.7).

Έτσι, γνωρίζουμε την εσωτερική εντατική κατάσταση των διατομών για αυξανόμενη θερμοκρασία (για έναν ελεύθερο φορέα, μή-δεσμευμένο έναντι της επιβαλλόμενης διαστολής).

(ii) <u>Παραμορφώσεις</u> που παρουσιάζονται: Αναλόγως, οι τελικές παραμορφώσεις της διατομής θα είναι το άθροισμα των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν ώς τώρα, δηλ. :

- Οι ελεύθερες θερμικές παραμορφώσεις ε_T
- Οι παραμορφώσεις λόγω σ_T (ίσες με τις προηγούμενες)
- Οι παραμορφώσεις λόγω $-N_T$ και $-M_T$, όπως φαίνονται στο Σχήμα V.8
- Και βεβαίως η ανηγμένη επιμήκυνση του στοιχείου ε_T.

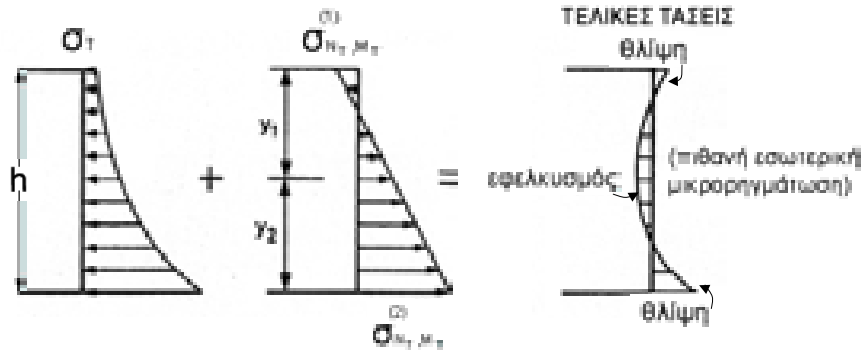
Έτσι, τελικά, εξαιτίας μονόπλευρης θερμικής έντασης του ισοστατικού στοιχείου, βρίσκουμε τις ακόλουθες παραμορφώσεις του:

- Καμπυλότητα

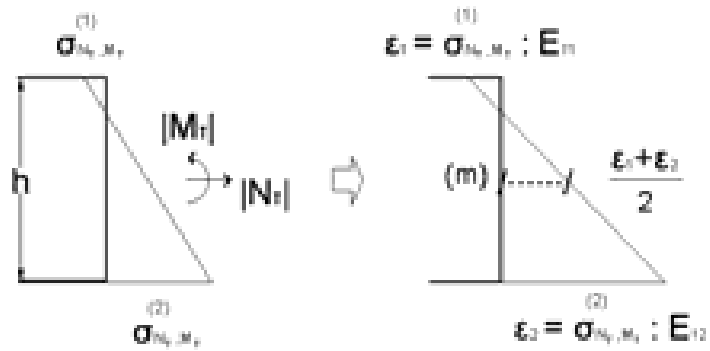
$$\left(\frac{1}{r}\right)_T = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{h} = \frac{|N_T|}{A_c \cdot h}\cdot\left(\frac{1}{E_{T2}} - \frac{1}{E_{T1}}\right) + \frac{|M_T|}{J_c \cdot h}\cdot\left(\frac{y_2}{E_{T2}} + \frac{y_1}{E_{T1}}\right),$$ A_c = διατομή

- Επιμήκυνση του μέσου άξονος του στοιχείου

$$(\varepsilon_T) = \frac{(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)}{2} = \frac{|N_T|}{2A_c}\cdot\left(\frac{1}{E_{T2}} + \frac{1}{E_{T1}}\right) + \frac{|M_T|}{2J_c}\cdot\left(\frac{y_2}{E_{T2}} - \frac{y_1}{E_{T1}}\right),$$ J_c = ροπή αδρανείας



Σχήμα V.7 Αυτοϊσορροπούμενη εσωτερική εντατική κατάσταση, λόγω της μονόπλευρης θερμικής καταπόνησης.



Σχήμα V.8 Οι τελικές παραμορφώσεις του ραβδωτού στοιχείου, λόγω θερμικής δράσης, είναι εκείνες που προκαλούνται απ' την «αντισταθμιστική» ένταση $-N_T$, $-M_T$ του Σχήματος V.6.

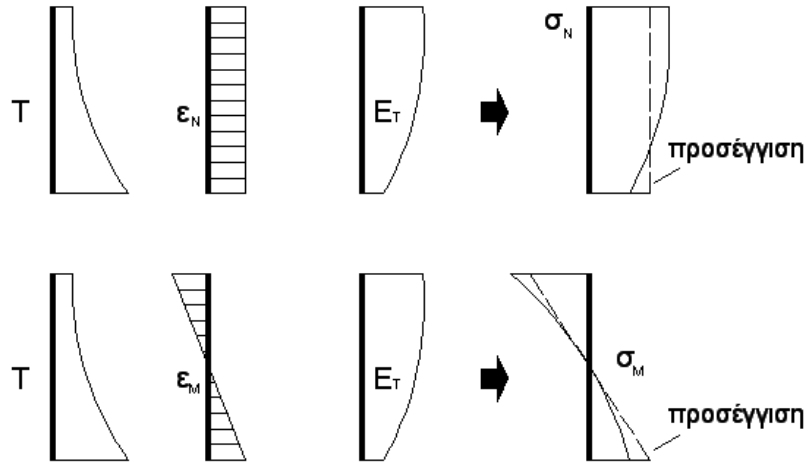
(iii) Ιδού λοιπόν ότι γνωρίζουμε τώρα την ένταση (Σχήμα V.7) και την παραμόρφωση του στοιχείου (ΣχήμαV.8). Έτσι, μπορούμε να ελέγξουμε την αντοχή και τις μετακινήσεις του (στροφές άκρων και βέλη κάμψεως). Αλλά και να επιλύσουμε και υπερστατικούς φορείς (βλ. §V.1.2.2).

- Ας κάνουμε όμως τώρα και την <u>αυτοκριτική</u> μας: Η περιγραφείσα απλή μέθοδος πάσχει πάρα ταύτα κατά το γεγονός ότι τα δομικά μέλη στα οποία εφαρμόζεται, ΔΕΝ αποτελούνται από ομογενείς ίνες (στρώσεις)˙ κάθε ίνα έχει και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας ! Επομένως, κάπου στο Σχήμα V.6 έχουμε εισαγάγει (κάπως επιπόλαια) ένα μικρό λάθος: Μεταφράσαμε τα συνοπτικά εντατικά μεγέθη N_T , M_T σε ισοδύναμες εσωτερικές τάσεις $\sigma_{N,M}$ με γραμμική κατανομή, υποθέτωντας (όπως στις περιπτώσεις των μή-θερμικών δράσεων) ότι θα είναι γραμμική και η κατανομή των παραμορφώσεων.

  Κι όμως, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα V.9, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει. (Μεταβάλλεται δε και η έννοια του «κέντρου βάρους» και της «ροπής αδρανείας»…).

  Παρά ταύτα, για τις ανάγκες της Πράξεως και για θερμοκρασίες παρειάς μικρότερες των 600°C, μπορούμε να θεωρήσουμε ανεκτή την επιτυγχανόμενη προσέγγιση:

  - Χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο σταθμισμένο μέτρο ελαστικότητας E_{eff} , και
  - Εφαρμόζοντας έναν κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας γ_{Sd} έναντι αβεβαιότητας αναλυτικού προσομοιώματος (λ.χ. γ_{Sd} ~ 1,2).



Σχήμα V.9 Γραμμικές κατανομές παραμορφώσεων δεν συνεπάγονται γραμμικές κατανομές τάσεων (και τανάπαλιν). Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η γραμμική προσέγγιση με τη χρήση ενός ενιαίου αντιπροσωπευτικού μέτρου ελαστικότητας E_{eff}.

Προς παρηγορίαν μας: Άλλωστε, ούτε και η επιπεδότητα των διατομών είναι μια γενική επιστημονική αρχή - ιδίως υπό θερμική ένταση...

- Έτσι, για έναν «ελεύθερο» ραβδόμορφο ισοστατικό φορέα υπό μονόπλευρη πυρκαγιά (π.χ. μια αμφιέρειστη δοκό, με πυρκαγιά από κάτω, στο μέσον του ανοίγματος), συμβαίνουν τα εξής :
  - Η μέση ανηγμένη θερμική επιμήκυνση ε_T προκαλεί απλώς διαστολή (και μεταβολή του μήκους) του στοιχείου, χωρίς καμπτικές παραμορφώσεις και χωρίς αλλαγή της έντασής του (σε όρους M και V), ενώ
  - Η επιβαλλόμενη θερμική καμπυλότητα $\left(\frac{1}{r}\right)_T$ προκαλεί σημαντικές πρόσθετες καμπτικές παραμορφώσεις (βέλη κάμψεως και στροφές στις στηρίξεις), και πάλι – όμως – χωρίς αλλαγή της έντασης του στοιχείου (όπως έχει λόγω των κατακόρυφων φορτίων λειτουργίας).

Όμως, ταυτοχρόνως, στο άνοιγμα δοκού φορτισμένης ήδη ($G + Q_0$), και όσο προοδευτικώς αυξάνει η θερμοκρασία στην στάθμη των διαμήκων οπλισμών ή/και συμβαίνει αποκόλληση των επιφανειακών στοιβάδων σκυροδέματος, απομειώνεται η ροπή αντοχής ($M_{R,T} < M_{R,0}$) και μπορεί να επέλθει αστοχία της δοκού, είτε από εξάντληση των περιθωρίων υπεραντοχής (σε όρους M) είτε από εξάντληση της διαθέσιμης πλαστιμότητας (σε όρους $\frac{1}{r}$) – δημιουργία αμφίπλευρης πλαστικής άρθρωσης/ μηχανισμού.

V.1.2.2 Υπερστατικοί φορείς

- Στην περίπτωση υπερστατικών φορέων, π.χ. συνεχών πλακολωρίδων ή δοκών, πλαισίων κ.λπ., η πυρκαγιά σε ένα τμήμα (μικρό ή μεγάλο) του συνολικού φορέα, συνεπάγεται γι' αυτό το τμήμα εσωτερικές τάσεις (θερμικές, αυτοϊσορροπούμενες) και παραμορφώσεις (επιμήκυνση και καμπυλότητα), ακριβώς όπως και για τους ισοστατικούς φορείς κατά την προηγούμενη παράγραφο (§V.1.2.1, Σχήματα V.7 και V.8).

  Τώρα, όμως, λόγω υπερστατικότητας, τόσο η επιμήκυνση όσο και – κυρίως – η καμπυλότητα προκαλεί ανακατανομή και μεταβολή της αρχικής έντασης του φορέα (M, V και N) υπό τα ταυτοχρόνως δρώντα κατακόρυφα φορτία λειτουργίας !

  Η άρση της υπερστατικότητας και η επίλυση των φορέων (κατά ή μετά την πυρκαγιά) μπορούν να γίνουν με μια από τις μεθόδους της Στατικής, π.χ. την μέθοδο των παραμορφώσεων, και έτσι μπορεί να εκτιμηθεί η σταδιακώς μεταβαλλόμενη (υπό την αύξηση της θερμοκρασίας) πρόσθετη θερμική και η τελική ένταση του φορέα, βήμα προς βήμα, για αύξηση (ή μείωση) της θερμοκρασίας π.χ. κατά 50 ^{o}C (ή το πολύ 100 ^{o}C).

- Για υπερστατικούς, όμως, φορείς από Ο.Σ. υπό πυρκαγιά, υπάρχουν πρόσθετα και σύνθετα προβλήματα:
  (i) Οι θερμικές επιμηκύνσεις, και η ανάπτυξη εντάσεως που οφείλεται σε αυτές, δεν μπορούν να αγνοηθούν. Βεβαίως, για κυρίως καμπτόμενους οριζόντιους φορείς (π.χ. συνεχείς πλάκες και δοκούς), η επιρροή αυτών των αξονικών συνεπειών της πυρκαγιάς θεωρείται αμελητέα, και εξετάζεται (συνήθως) μόνο το πρόβλημα των εγκάρσιων παραμορφώσεων και της ανακατανομής μόνο σε όρους M και V. Όμως, οι επιμηκύνσεις των πατωμάτων (πλακών και δοκών) οδηγούν σε παραμορφώσεις των κατακόρυφων φορέων (υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων) και σημαντική πρόσθετη καμπτοδιατμητική (κυρίως) έντασή τους, ασχέτως του αν και αυτά τα στοιχεία (υποστυλώματα, τοιχώματα) «καίγονται» – επηρεαζόμενα αμέσως από την πυρκαγιά.

  Έτσι, για πλαισιακούς φορείς, είτε επίπεδους είτε χωρικούς, υπό πυρκαγιά σε ένα ή περισσότερα στοιχεία (σε έναν ή περισσότερους ορόφους), οι θερμικές επιμηκύνσεις ενδέχεται να είναι σημαντικές και να επηρεάζουν μεγάλο τμήμα του φορέα, με σημαντική ανακατανομή της εντάσεως, σε όρους M και V αλλά και N. Σχετικώς, επισημαίνονται δύο ενδεχόμενα :
  - Ο, λόγω «δέσμευσης» των θερμικών επιμηκύνσεων καιόμενων ζυγωμάτων, κίνδυνος ψαθυρής (διατμητικής κυρίως) αστοχίας ακραίων ισχυρών και δύσκαμπτων τοιχωμάτων (βλ. τα «λακτίσματα» στα περί χαρακτηριστικών βλαβών υπό πυρκαγιά του Κεφαλαίου IV του παρόντος Πρακτικού Οδηγού), και
  - Ο κίνδυνος (ψαθυρής επίσης) αστοχίας υπό λυγισμό, για εσωτερικά υποστυλώματα (με ανεπαρκείς διατομές), εκτεθειμένα σε έντονη πυρκαγιά και με «δεσμεύσεις» κάτω-πάνω έναντι της σημαντικής επιβαλλόμενης επιμήκυνσης (αύξηση της N).

(ii) Οι θερμικές καμπυλότητες $\left(\frac{1}{r}\right)_T$, οι οποίες (όπως αναφέρθηκε) λόγω υπερστατικότητας οδηγούν σε ανακατανομή της εντάσεως, επιβάλλονται σε διατομές και τμήματα του φορέα με διαφορετικά και μεταβαλλόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά :

- Καί λόγω της πυρκαγιάς καθ' εαυτή και των συνεπειών της (απομείωση αντοχής, μέτρου ελαστικότητας κ.λπ.)
- Καί λόγω της αρχικής ρηγμάτωσης υπό τα κατακόρυφα φορτία και της πρόσθετης ρηγμάτωσης υπό την πυρκαγιά, με έντονη απομείωση της δυσκαμψίας, δυστμησίας κ.λπ.
- Καί λόγω του ότι, από την ανακατανομή της έντασης, κάποιες περιοχές του όλου φορέα (π.χ. οι στηρίξεις συνεχών συστημάτων) επιφορτίζονται (π.χ. με δυσκαμψία σταδίου ΙΙ, $K_{επιφ.} = K_{II}$) ενώ άλλες (π.χ. τα «καιόμενα» ανοίγματα) αποφορτίζονται (με δυσκαμψία σταδίου Ι, $K_{αποφ.} = K_{I}$).

Για την σωστή εκτίμηση των δυσκαμψιών των στοιχείων ενός φορέα, μεταβαλλόμενων εν χρόνω (λόγω της πυρκαγιάς) αλλά και από θέση σε θέση (λόγω της ρηγμάτωσης και της ανακατανομής – επιφόρτισης/ αποφόρτισης), απαιτείται η σύνταξη πλήθους διαγραμμάτων $M-\left(\frac{1}{r}\right)$ (υπό τις όποιες ταυτόχρονες Ν, ενδεχομένως μεταβαλλόμενες) για πλήθος χαρακτηριστικών διατομών των επιμέρους επηρεαζόμενων στοιχείων.

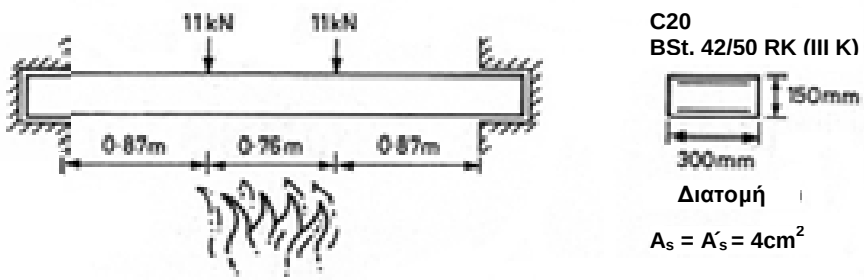
• Έτσι, είναι προφανής η δυσκολία και πολυπλοκότητα του θέματος της πυρκαγιάς (κατά τη διάρκειά της αλλά και μετά) για σύνθετους υπερστατικούς φορείς από Ο.Σ.. Σχετικώς, δεν είναι τυχαίο το ότι ακόμη και σήμερα δεν διατίθενται ισχυρά προγράμματα ΗΥ, κατάλληλα για τέτοια προβλήματα.

Στο ΕΩΣ/ ΕΜΠ, κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία των «θερμο-ινών» και της εσωτερικής αυτο-ισορροπούσας έντασης (προς αποκατάσταση της επιπεδότητας των διατομών στοιχείων Ο.Σ. υπό πυρκαγιά), καθώς και της σταδιακής βήμα προς βήμα ανάλυσης των ισοστατικών και υπερστατικών φορέων υπό πυρκαγιά, όπως π.χ. παρουσιάζεται στις σχετικές παραπομπές ή όπως αναπτύχθηκε σε ειδικά σεμινάρια ή ημερίδες, παλιότερες και πρόσφατες.

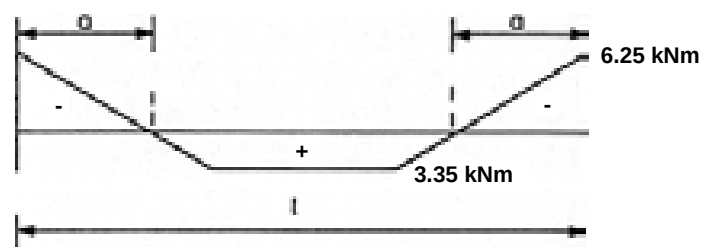
Αμέσως μετά, για λόγους πληρέστερης κατανόησης της μεθοδολογίας και της σταδιακής διαδικασίας ανακατανομής της εντάσεως υπό πυρκαγιά, δίνονται συνοπτικώς στοιχεία από ορισμένα απλούστερα αλλά διδακτικά παραδείγματα υπερστατικών φορέων υπό πυρκαγιά, όπως αναπτύχθηκαν στο ΕΩΣ/ ΕΜΠ.

Επισημαίνεται πως, για ορισμένα από αυτά τα παραδείγματα απλών υπερστατικών φορέων από Ο.Σ., έγιναν βαθμονομήσεις και συγκρίσεις προς αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τους ίδιους αυτούς φορείς υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO (σε φούρνο, K. Kordina/ Braunschweig/ 1977 και J. Dotreppe/ Liège/ 1980).

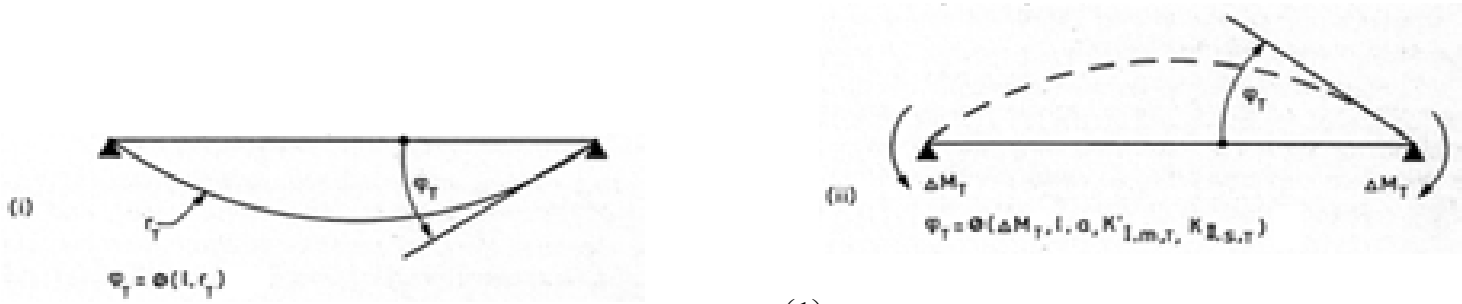
- <u>Το παράδειγμα μιας αμφίπακτης πλάκας</u>
  Αμφίπακτη (έναντι κατακορύφων φορτίων) αλλά ελεύθερη έναντι μηκύνσεων/ βραχύνσεων πλακολωρίδα/ δοκός, υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO στο κάτω πέλμα της, βλ. Σχήματα V.10 έως και V.15.



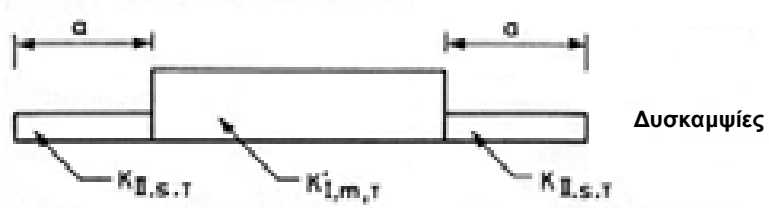
Σχήμα V.10 Τα χαρακτηριστικά της πλακολωρίδας/ δοκού υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO.



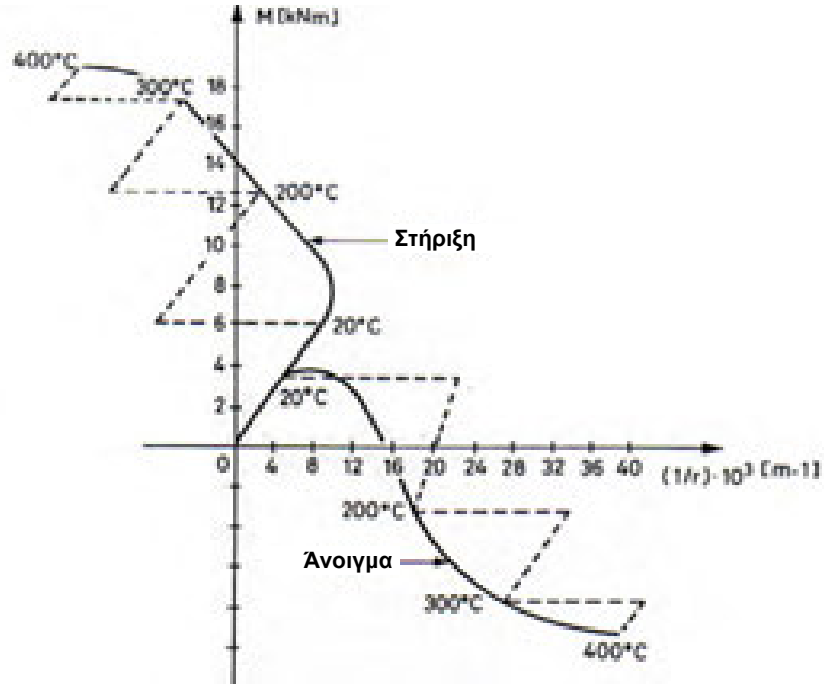
Σχήμα V.11 Το αρχικό (20 ^{o}C) διάγραμμα ροπών κάμψεως της δοκού. Τα ακραία και το μεσαίο τμήμα έχουν διαφορετική αρχική δυσκαμψία, αναλόγως της ρηγμάτωσης (βάσει του αρχικού διαγράμματος $M-\left(\frac{1}{r}\right)$ της διατομής).



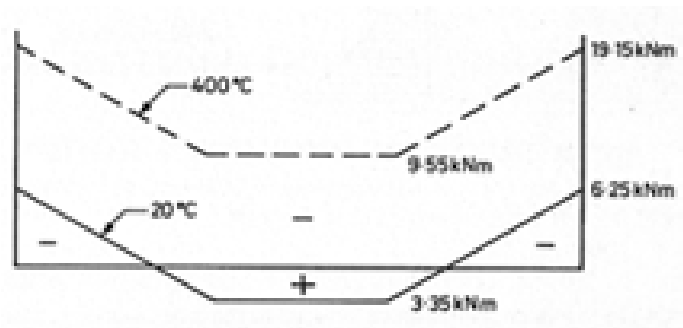
Σχήμα V.12.1 Υπό την πυρκαγιά, η επιβαλλόμενη καμπυλότητα $\left(\frac{1}{r}\right)_T$ θα προκαλούσε ακραίες στροφές ϕ_T , αν η δοκός ήταν ελεύθερη (i). Λόγω των πακτώσεων, αναπτύσσονται ακραίες πρόσθετες ροπές ΔM_T (ii), προς αντιστάθμιση των στροφών του συζυγούς ισοστατικού φορέα (αμφιέρειστη δοκός). Οι πρόσθετες αυτές ροπές, επιβαρύνουν τα στηρίγματα και ανακουφίζουν το άνοιγμα της δοκού, βλ. και επόμενο Σχήμα V.12.2.



Σχήμα V.12.2 Ακριβώς λόγω της ανακατανομής των ροπών κάμψεως, η ανάλυση και άρση της υπερστατικότητας (βλ. πριν) γίνεται για φορέα με μεταβλητή κατά μήκος δυσκαμψία (ρηγμάτωση ή μή, επιφόρτιση ή αποφόρτιση), η οποία – επι πλέον – μεταβάλλεται εν χρόνω υπό την αυξανόμενη T (και την μεταβολή των χαρακτηριστικών των υλικών).



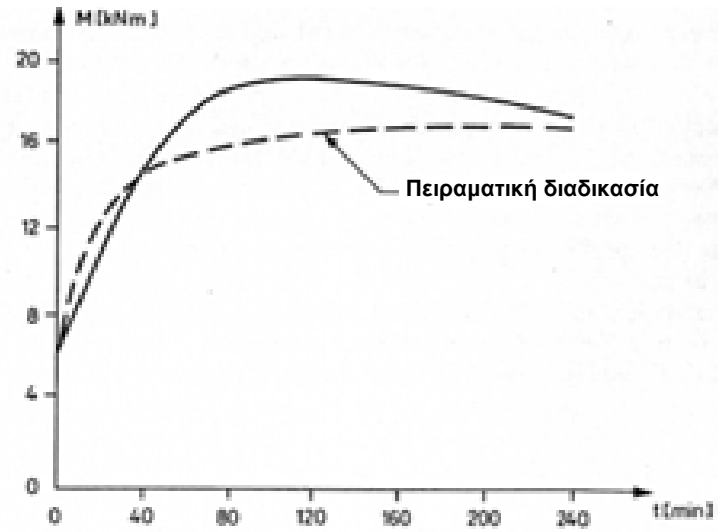
Σχήμα V.13 Με την αναλυτική διαδικασία που αναπτύχθηκε στο ΕΩΣ/ ΕΜΠ, όπως συνοπτικώς αναφέρθηκε στα προηγούμενα, για «βήματα» ΔT = 50 °C, έγινε δυνατή η σύνταξη των μεταβαλλόμενων διαγραμμάτων $M-\left(\frac{1}{r}\right)$ και της εκτίμησης της ανακατανομής των ροπών κάμψεως της δοκού (βλ. και στο επόμενο σχήμα).



Σχήμα V.14 Στους 400 °C (μόλις), και υπό αρνητικές ροπές κάμψεως σε όλο το μήκος της δοκού, διέρρευσαν οι οπλισμοί στα στηρίγματα και άρχισε η δημιουργία ακραίων πλαστικών αρθρώσεων. Τελικώς, μετά από αρκετό χρόνο (βλ. στο επόμενο σχήμα) εξαντλήθηκαν και τα περιθώρια πλαστιμότητας (σε όρους $\mu_{1/r}$) και η δοκός ουσιαστικώς κατέρρευσε.

<u>Παρατήρηση</u>

- 20 °C 6.25 kNm + 3.35 kNm = 9.60 kNm
- 400 °C 19.15 kNm – 9.55 kNm = 9.60 kNm
  (= 11 kN · 0.87m)

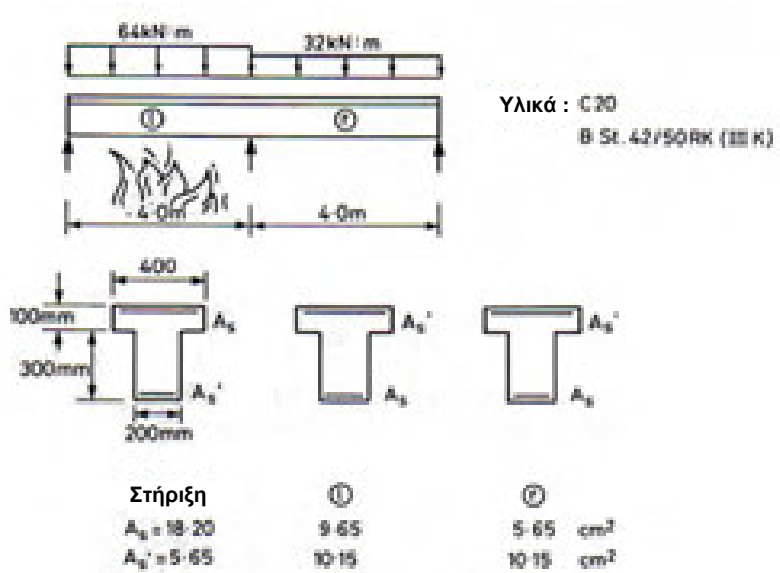


Σχήμα V.15 Η χρονο-ιστορία της ροπής κάμψεως των στηριγμάτων υπό την πυρκαγιά, με την τελική δημιουργία ακραίων πλαστικών αρθρώσεων, κατά την αναλυτική (ΕΩΣ/ ΕΜΠ) και την πειραματική διαδικασία.

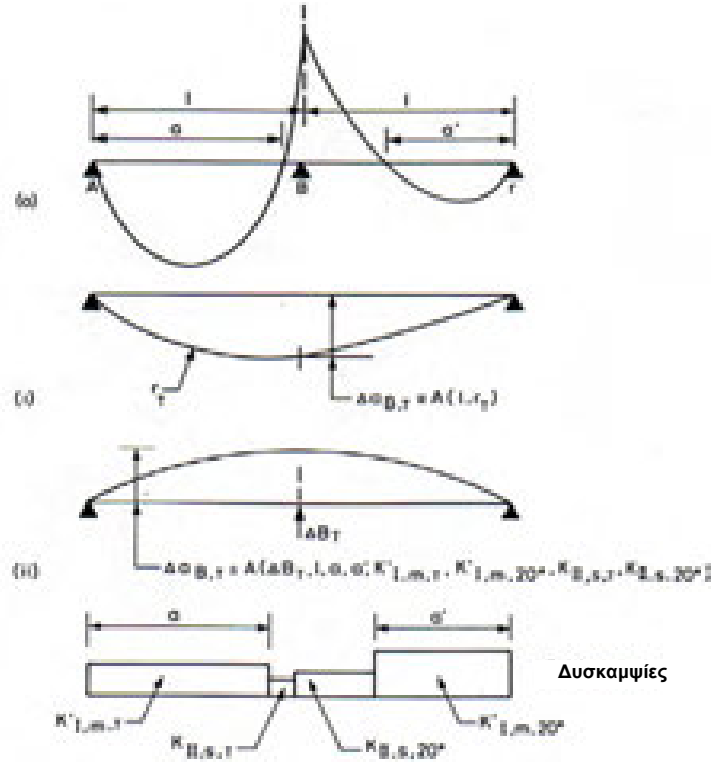
Για την πρότυπη πυρκαγιά ISO, διάρκεια t = 240 min συνεπάγεται θερμοκρασία φούρνου (μάλλον <u>καί</u> παρειάς δοκιμίου, για αυτή την περίπτωση) T ≅ 1200 °C.

- <u>Το παράδειγμα μιας συνεχούς δοκού δύο ανοιγμάτων</u>

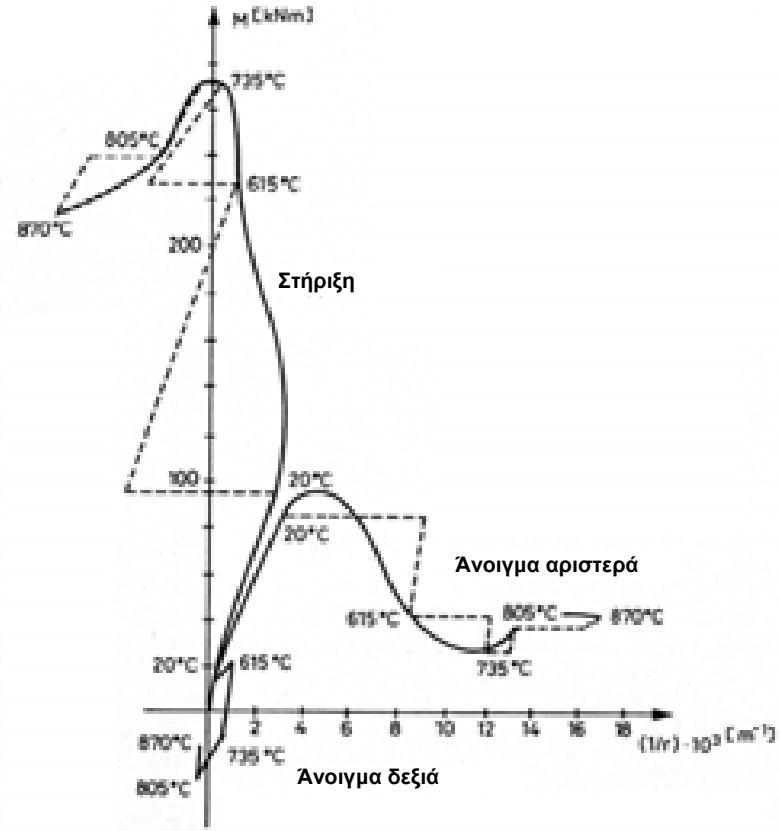
Συνεχής δοκός δύο ίσων ανοιγμάτων, ελεύθερη έναντι μήκυνσης/ βράχυνσης, υπό άνισα κατακόρυφα φορτία και υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO μόνο στο ένα άνοιγμα, βλ. Σχήματα V.16 έως και V.20.



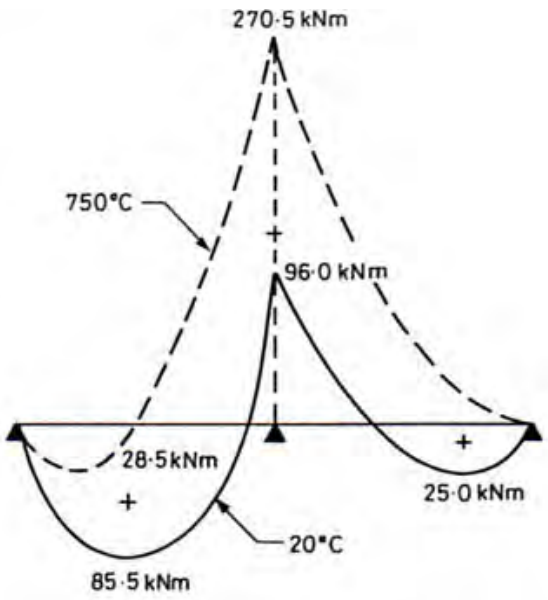
Σχήμα V.16 Η γεωμετρία και οι διατομές της δοκού υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO στο ένα άνοιγμα.
Για τις αρχικές ροπές κάμψεως, βλ. τα επόμενα Σχήματα V.17 και V.19.



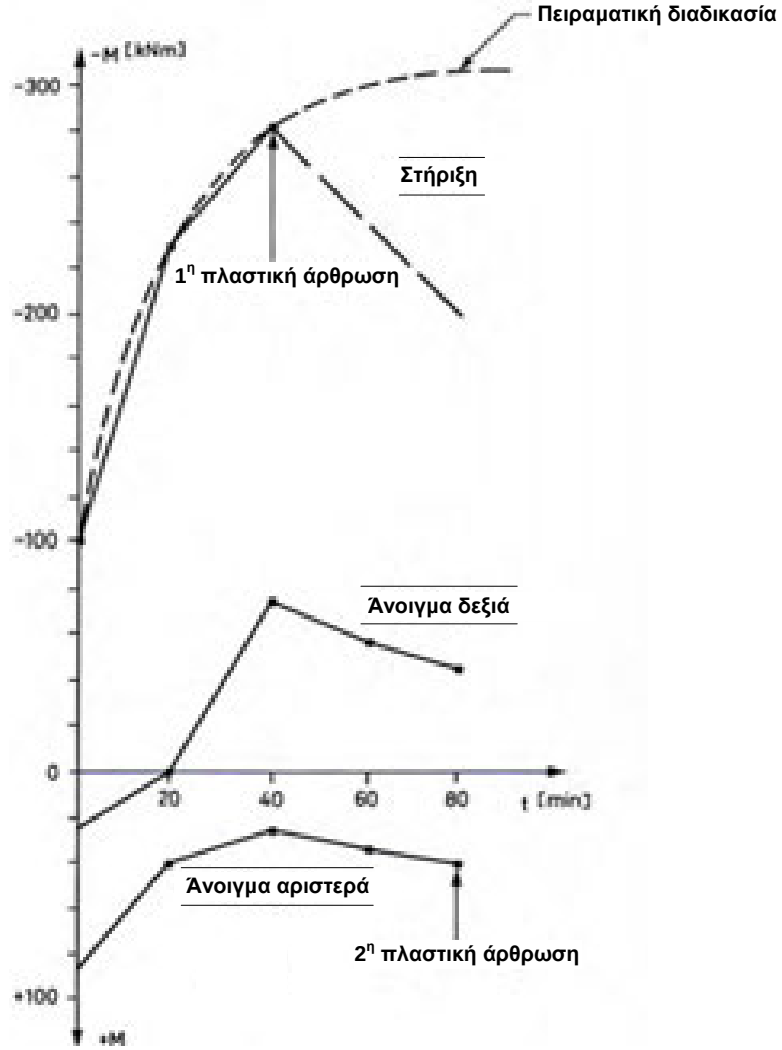
Σχήμα V.17 Συνοπτικώς, η διαδικασία βήμα προς βήμα επιβολής των θερμικών καμπυλοτήτων $\left(\frac{1}{r}\right)_T$ επί του συζυγούς αμφιέρειστου φορέα (i), και αναίρεσης του βέλους κάμψεως μέσω πρόσθετης αντιδράσεως στο μεσαίο στήριγμα (ii).
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση της αμφίπακτης πλάκας, οι δυσκαμψίες κατά μήκος του φορέα μεταβάλλονται εν χρόνω και κατά μήκος του φορέα, λόγω ρηγμάτωσης και επιφόρτισης/ αποφόρτισης.



Σχήμα V.18 Η εν θερμώ ανακατανομή της έντασης της δοκού, η εξέλιξη των ροπών κάμψεως (και των αντίστοιχων καμπυλοτήτων) στο στήριγμα και στα ανοίγματα.



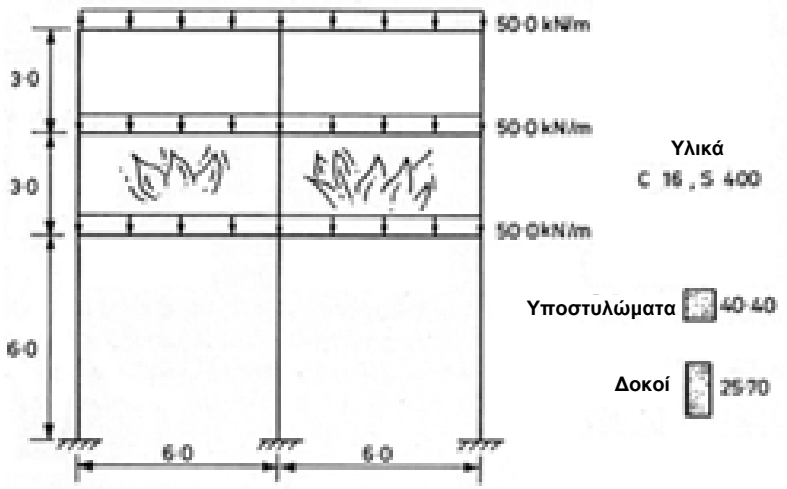
Σχήμα V.19 Στους 750 °C, σε σχέση με τους 20 °C, η ροπή κάμψεως στο στήριγμα έχει σχεδόν τριπλασιαστεί, ενώ τα ανοίγματα έχουν ανακουφιστεί σημαντικά.
Η πρώτη πλαστική άρθρωση δημιουργήθηκε στο στήριγμα, ενώ αργότερα αστόχησε και το καιόμενο άνοιγμα (βλ. επόμενο σχήμα).



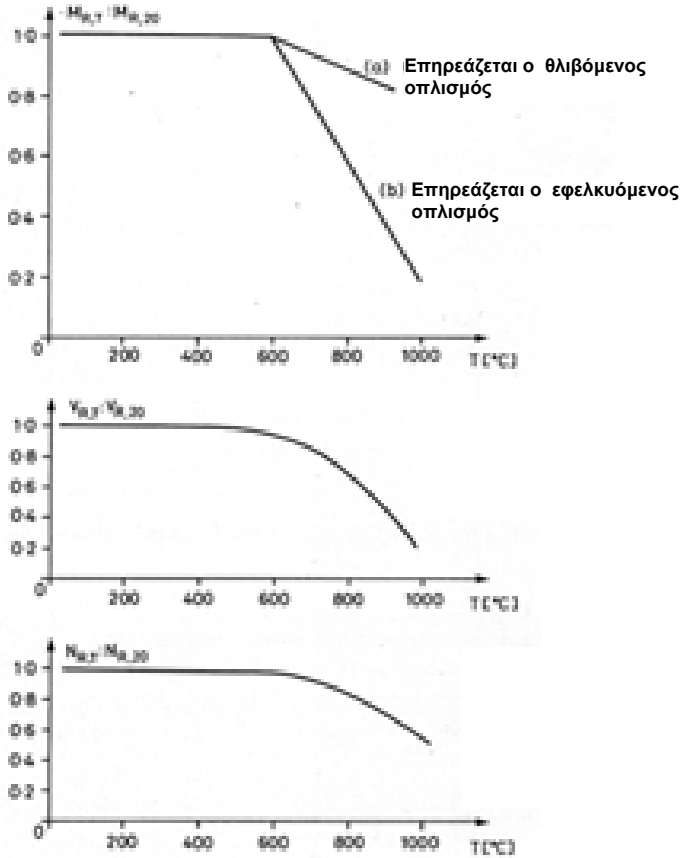
Σχήμα V.20 Η χρονο-ιστορία των ροπών κάμψεως και η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων, καθώς και η σύγκριση μεταξύ της αναλυτικής (ΕΩΣ/ ΕΜΠ) και της πειραματικής διαδικασίας. Για την πρότυπη πυρκαγιά ISO, διάρκεια t = 80 min συνεπάγεται θερμοκρασία φούρνου (μάλλον καί παρειάς δοκιμίου, για αυτή την περίπτωση) T ≅ 900 °C.

- <u>Το παράδειγμα ενός επίπεδου πλαισίου</u>

  Απλό επίπεδο πλαίσιο, τρίστυλο και τριώροφο, με πυρκαγιά (πρότυπη, κατά ISO) στον μεσαίο όροφο, λαμβάνοντας υπόψη και τις θερμικές επιμηκύνσεις, βλ. Σχήματα V.21 έως και V.23.

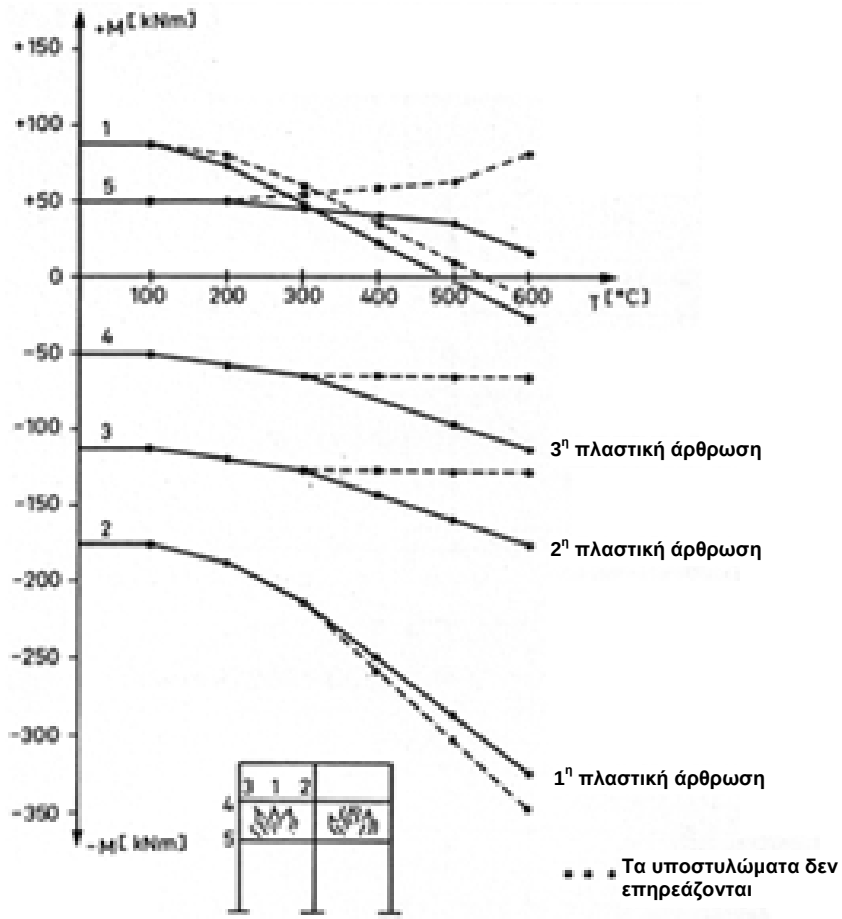


Σχήμα V.21 Η γεωμετρία και οι διατομές των στοιχείων του πλαισίου, υπό πρότυπη πυρκαγιά ISO στον μεσαίο όροφο.



Σχήμα V.22 Η μεταβολή των αντιστάσεων των καιγόμενων υποστυλωμάτων του πλαισίου, πιο έντονη σε όρους M και V από ό,τι σε όρους N, για την οποία ακόμη και για T ≈ 800 °C η απομείωση δεν είναι σημαντική.

Για τα ακραία υποστυλώματα, και για την M_R, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση αναλόγως του αν εκτίθεται και «καίγεται» ο θλιβόμενος ή ο εφελκυόμενος οπλισμός.



Σχήμα V.23 Η μεταβολή της ροπής κάμψεως σε πέντε (5) χαρακτηριστικές διατομές ζυγώματος και υποστυλώματος, συναρτήσει της θερμοκρασίας, και η διαδοχική δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων – μετατροπή του πλαισίου σε μηχανισμό.
Με διακεκομμένες γραμμές, παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή των M σε περίπτωση πλήρως πυρο-μονωμένων υποστυλωμάτων.
Παρά την, επίσης σημαντική, ανακατανομή της εντάσεως στα ζυγώματα, τα υποστυλώματα αντέχουν, η ανάπτυξη μηχανισμού καθυστερεί και τα περιθώρια έως την γενικευμένη αστοχία του πλαισίου μεγαλώνουν σημαντικά.

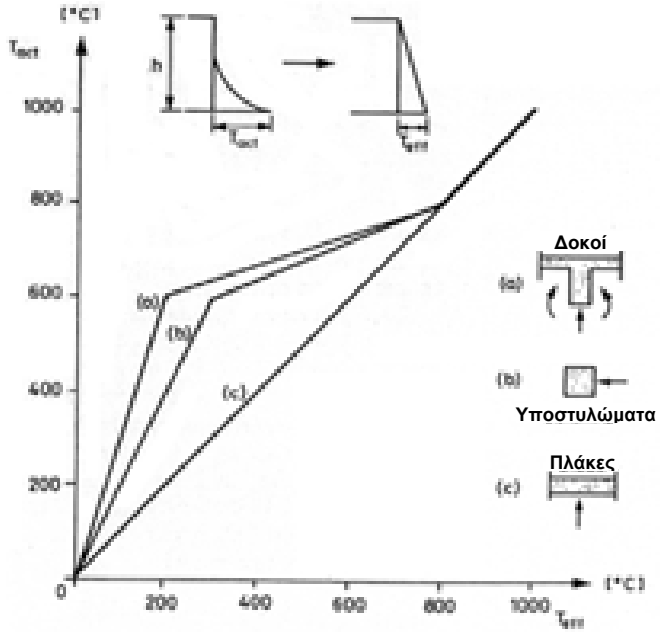
V.1.2.3 Δυνατές απλοποιήσεις

- Με βάση την μεθοδολογία των θερμο-ινών (θερμο-λωρίδων) του ΕΩΣ/ ΕΜΠ, έγιναν διάφορες παραμετρικές διερευνήσεις αρκετών απλών υπερστατικών φορέων από Ο.Σ. (συνεχών πλακολωρίδων και δοκών, απλών επίπεδων υποπλαισίων κ.λπ.), με στόχο την απλοποίηση (κατά το δυνατόν) της διαδικασίας και την αποφυγή των σταδιακών, βήμα προς βήμα (π.χ. της τάξεως των 50 ^{o}C ή, έστω, των 100 ^{o}C), αναλύσεων και ελέγχων, που είναι (ομολογουμένως) πολύπλοκες και κοπιώδεις.

- Έτσι, για συνήθεις περιπτώσεις της πράξεως ή/και για σκοπούς προμελέτης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα του επόμενου Σχήματος V.24 :

  Για δεδομένη πυρκαγιά, πρότυπη/ τυπική ή πραγματική (βλ. Κεφάλαιο Ι), η οποία οδηγεί σε θερμοκρασία παρειάς των δομικών στοιχείων (όχι αέρος) ίση με T_{act} , μπορεί να εκτιμηθεί <u>κατ' ευθείαν</u> μια ισοδύναμη, «ενεργή», θερμοκρασία παρειάς T_{eff}, με βάση την οποία να γίνει η τελική εκτίμηση των επιβαλλόμενων θερμικών επιμηκύνσεων και καμπυλοτήτων, προς ανάλυση του φορέα και υπολογισμό της ανακατανομής της έντασης (υπό τα σταθερά κατακόρυφα φορτία λειτουργίας) :

$$\varepsilon_T \cong \frac{1}{2} \cdot \alpha_T \cdot T_{eff} \ , \quad \kappa\alpha\iota \quad \left(\frac{1}{r}\right)_T \cong \frac{1}{h} \cdot \alpha_T \cdot T_{eff} \ .$$



Σχήμα V.24 Ισοδύναμη «ενεργή» θερμοκρασία παρειάς T_{eff}, για δεδομένη θερμοκρασία παρειάς των δομικών στοιχείων T_{act}.

- Με βάση το Σχήμα V.24, η ισοδύναμη ενεργή T_{eff} μπορεί να εκτιμηθεί από τις εξής σχέσεις :

  (i) Πλάκες (συνήθους πάχους):

  α) $T_{eff} = T_{act}$

  (ii) Πλακοδοκοί εκτεθειμένες στις κάτω τρεις παρειές:

  α) $T_{eff} = T_{act} / 3.0$, $T_{act} \leq 600^{o}$ C

  β) $T_{eff} = 3.0*T_{act} - 1600^{o}$ C , 600° C < $T_{act} \leq 800^{o}$ C

  γ) $T_{eff} = T_{act}$, $T_{act} > 800^{o}$ C

  (iii) Τετράγωνο υποστύλωμα εκτεθειμένο σε μια παρειά:

  α) $T_{eff} = T_{act} / 2.0$, $T_{act} \leq 600^{o}$ C

  β) $T_{eff} = 2.5*T_{act} - 1200^{o}$ C , 600° C < $T_{act} \leq 800^{o}$ C

  γ) $T_{eff} = T_{act}$, $T_{act} > 800^{o}$ C.

V.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ Ο.Σ.

V.2.1 Μαθηματικές εκφράσεις για τυπικές διατομές

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, διατίθενται στη βιβλιογραφία προσεγγιστικές μαθηματικές εξισώσεις, μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών στο εσωτερικό διατομών τυπικού σχήματος που απαντώνται συχνά στην πράξη, αποτελούμενων από ομοιογενή και ισότροπα υλικά. Η χρήση αυτών των εκφράσεων είναι ιδιαίτερα βοηθητική στην αυτοματοποιημένη είτε βήμα προς βήμα επίλυση φορέων υπό θερμοκρασιακή δράση, μέσω λογισμικών εφαρμογών ΗΥ.

Χρειάζεται, όμως, προσοχή και ενδεχόμενη βαθμονόμηση, διότι οι διατιθέμενες προσεγγίσεις, εξισώσεις, καμπύλες κ.λπ. αφορούν γενικώς σκυροδέματα με πυριτιακά αδρανή και όχι ασβεστολιθικά, που παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά (υπό πυρκαγιά).

Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι εξής δύο ομάδες εξισώσεων (η παρουσία του οπλισμού τυπικά αγνοείται):

i) Σχέσεις των Wickström (βλ. Buchanan [2002]), Hertz [1981]

1) Για πλάκες, με επιφανειακή θερμοκρασία T_f σε χρόνο έκθεσης t_h (ώρες), η θερμοκρασία του σκυροδέματος σε απόσταση x (m) από την εκτεθειμένη επιφάνεια, είναι ίση προς :

$$T_c\,(x,t_h,T_f) = \eta_x\,\eta_w\,T_f$$

όπου:

$$\eta_w = 1 - 0.0616\,t_h^{-0.88} \quad , \quad \eta_x = 0.18\,\ln(t_h/x^2) - 0.81.$$

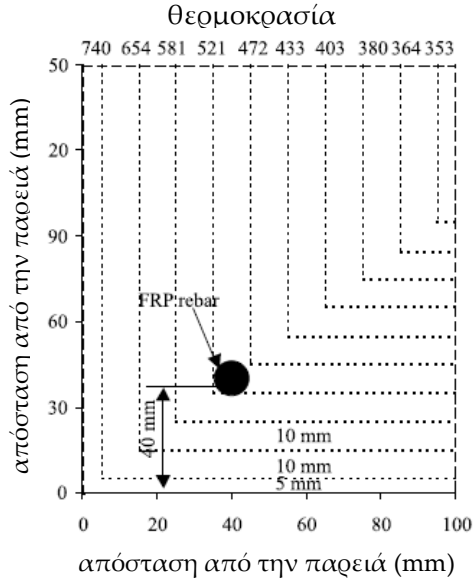
2) Για δοκούς, εκτεθειμένες σε τρεις παρειές σε επιφανειακή θερμοκρασία T_f και χρόνο έκθεσης t_h (ώρες), η παραπάνω σχέση επαναπροσδιορίζεται με αναθεωρημένους γεωμετρικούς συντελεστές η_x και η_y ανάλογα με την απόσταση x (m) και y(m) του σημείου αναφοράς όπου υπολογίζεται η θερμοκρασία, από τις εκτεθειμένες παρειές:

$$T_c\,(x,y,t_h,T_f) = [(\eta_w\,(\eta_x + \eta_y - 2\,\eta_x\,\eta_y\,) + \eta_x\,\eta_y]\,T_f$$

όπου:

$$\eta_x = 0.18\,\ln(t_h/x^2) - 0.81 \quad , \quad \eta_y = 0.18\,\ln(t_h/\,y^2) - 0.81.$$

ii) Σχέσεις του Desai [1998]



Σχήμα V.25 Τυπική κατανομή της θερμοκρασίας σε δοκό ορθογωνικής διατομής 200 / 300 σε χρόνο 90 min.

Για δοκούς ορθογωνικής διατομής εκτεθειμένες σε τρεις παρειές στην πρότυπη πυρκαγιά των Βρετανικών Προτύπων, ο Desai [1998] προτείνει την παρακάτω εξίσωση αύξησης της θερμοκρασίας, κατά μήκος μιας ισοϋψούς σε απόσταση x (mm) από την παρειά:

$T = (D - Ax + Bx^2 - Cx^3)/r^{0.25}$, με

$$A = 3.33\left(3 + 0.0033t + \frac{(100 - t)}{b}\right)$$

$B = 0.085$

$C = 0.000221$

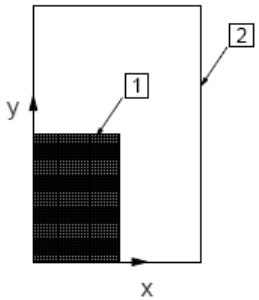
$D = 475\, r^{7/12} - (b - 105\, t^{1/3})$,

όπου t ο χρόνος έκθεσης (min), b το πλάτος της διατομής (mm) και r ο λόγος ύψους προς πλάτος.

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για εύρος τιμών $100 \le b \le 300$ και $1 \le r \le 3$ (βλέπε και τυπική κατανομή θερμοκρασίας στο Σχ. V.25, κατά Saafi [2002]).

V.2.2 Σχεδιασμός με χρήση νομογραφημάτων

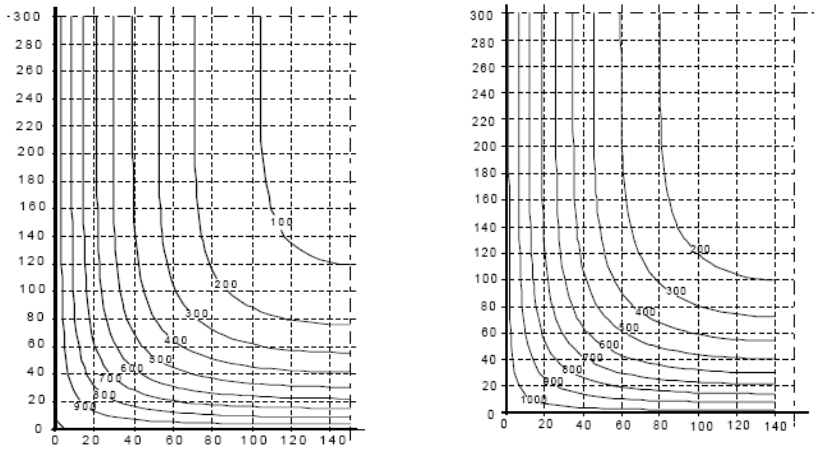
Ο Ευρωκώδικας 2 [EN 1992-1-2, 2004] παρέχει σειρά νομογραφημάτων για την εκτίμηση της διάχυσης της θερμοκρασίας σε τυπικές διατομές ορθογωνικού σχήματος πλακών και δοκών – υποστυλωμάτων, καθώς και κυκλικών υποστυλωμάτων (Σχ. V.26 έως V.28), μάλλον για σκυροδέματα με πυριτιακά αδρανή.



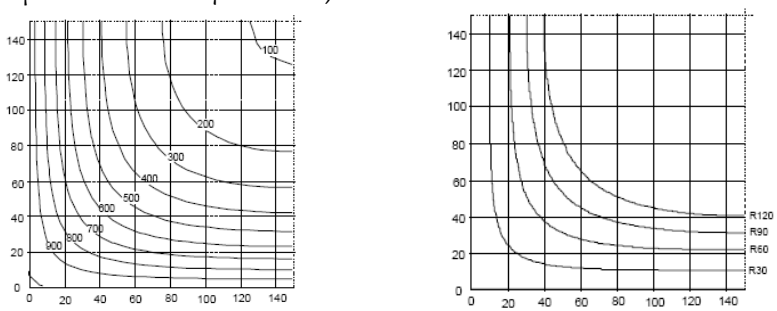
1 Εμβαδόν θερμοκρασιακής κατανομής

2 Διατομή

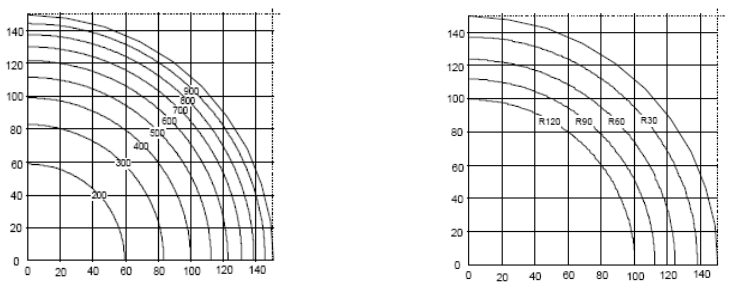
Όπως δείχνεται και στο παραπάνω σχήμα – κλειδί, η τυπική επίλυση παρέχεται για το ένα τεταρτημόριο, λόγω συμμετρίας των συνθηκών του προβλήματος (η παρουσία του οπλισμού τυπικά αγνοείται).



Σχήμα V.26 Κατανομή θερμοκρασιών θ (°C) σε δοκό με ύψος προς πλάτος 600/ 300 mm, για έκθεση 90 και 120 min.



Σχήμα V.27 Κατανομή θερμοκρασιών θ (°C) σε τετράγωνο υποστύλωμα 300 / 300 mm, για έκθεση 90 λεπτών και η ισοϋψής 500 °C ως προς το χρόνο έκθεσης (σε min).



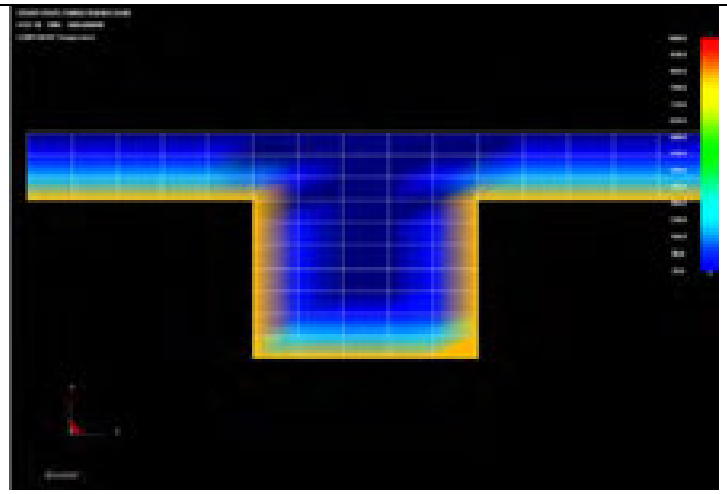
Σχήμα V.28 Κατανομή θερμοκρασιών θ (°C) σε κυκλικό υποστύλωμα διαμέτρου 300 mm, για έκθεση 90 λεπτών και η ισοϋψής 500 °C ως προς το χρόνο έκθεσης (σε min).

V.2.3 Αριθμητικές επιλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

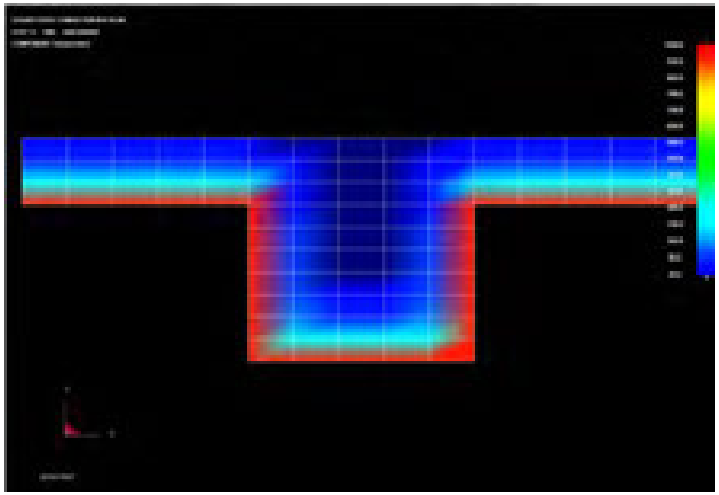
Για την αποτίμηση της εν χρόνω θερμοκρασιακής διάχυσης σε διατομές και δομικά στοιχεία πλέον σύνθετης γεωμετρίας ή οριακών συνθηκών, είτε αποτελούμενες από πέραν του ενός υλικά σε ποσοστό που δεν είναι δυνατόν να αγνοηθεί η παρουσία τους (πολλαπλές ράβδοι οπλισμού, σύμμικτες διατομές, οπές κ.λπ.), καθώς και σε περιπτώσεις μή γραμμικότητας των θερμοκρασιακών χαρακτηριστικών των υλικών, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές επιλύσεις του θερμοκρασιακού προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στην περίπτωση αυτή επιλύεται το θερμικό πρόβλημα ανεξάρτητα από τη στατική επίλυση, με σκοπό να αποτιμηθεί το πεδίο θερμοκρασίας σύμφωνα με την προδιαγεγραμμένη θερμική φόρτιση και τις συνοριακές συνθήκες, με σκοπό να εκτιμηθούν εν συνεχεία τα τροποποιημένα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι παραμορφώσεις της διατομής / του στοιχείου.

<u>Περιγραφή του προσομοιώματος:</u> Στο σχήμα, δίδεται η επίλυση μιας πλακοδοκού από σκυρόδεμα, διαστάσεων κορμού 50/50cm και πλάκας πάχους 15cm και συνεργαζόμενου πλάτους 150cm, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



t = 30min



t = 60min

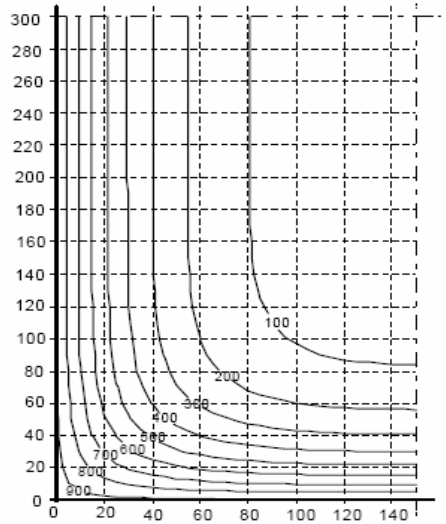
Σχήμα V.29 Κατανομή θερμοκρασιών σε πλακοδοκό 50/50 από σκυρόδεμα C20 σε έκθεση στην πρότυπη πυρκαγιά ISO, μετά από παρέλευση χρόνου 30 min Το εύρος τιμών στις ισοϋψείς κυμαίνεται μεταξύ 20 και 1000°C.

Η δοκός αποτελείται από ενιαίο ισοτροπικό ελαστικό υλικό σκυροδέματος με τα εξής χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας 28 GPa, πυκνότητα 2.35 t/m^3 . Η ειδική θερμότητα c_p και αγωγιμότητα λ_c του σκυροδέματος θεωρούνται ότι μεταβάλλονται μή γραμμικά με τη θερμοκρασία, όπως προδιαγράφεται στον Ευρωκώδικα 2 [EN 1992-1-2, 2004].

Η δοκός εκτίθεται στην καμπύλη αύξησης της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά ISO 834 από την κάτω παρειά (κορμός και πλάκα). Για την επίλυση του επίπεδου προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LSDYNA [2007], προσομοιώνοντας τη διατομή με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (των Belytschko-Tsay) με τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης σε κάτοψη και δύο κατά τη διεύθυνση του πάχους τους, σε επίπεδη καταπόνηση.

<u>Αποτελέσματα</u>: Στο Σχ. V.29 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό της διατομής λόγω έκθεσής της δοκού στην καμπύλη θερμοκρασίας ISO 834, μετά από παρέλευση χρόνου έκθεσης 30 min και 60 min.

Παρατηρείται ότι οι διαφορές διάχυσης θερμότητας λόγω σταθερών ή μεταβλητών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία είναι μικρές, είναι δε σε κάθε περίπτωση συγκρίσιμες με τις τιμές του νομογραφήματος σχεδιασμού για την τυπική δοκό 50/60 κατά EN 1992-1-2 [2004] του Σχ. V.30.



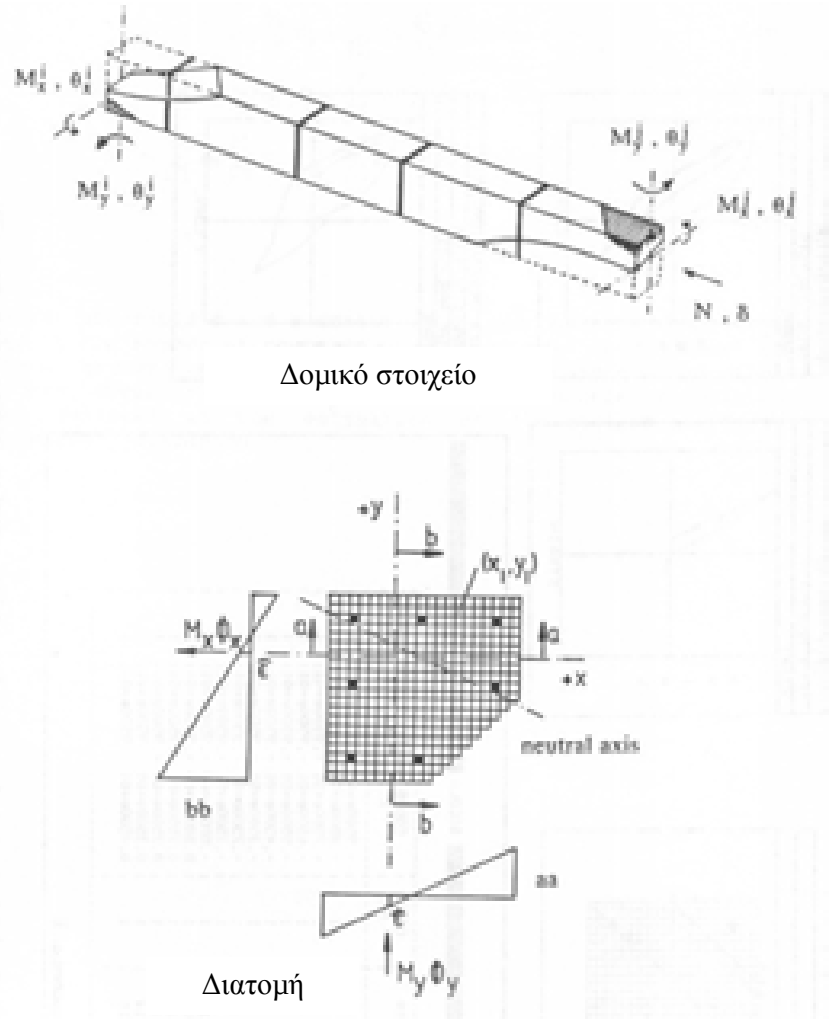
Σχήμα V.30 Ισοϋψείς σχεδιασμού σε έκθεση 60 min κατά EN 1992-1-2 [2004].

V.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΠΛΟΥ ΔΙΣΤΥΛΟΥ ΜΟΝΩΡΟΦΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Για την περίπτωση της απλής εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας ενός πλαισίου, χωρίς ταυτόχρονη εκτίμηση των παραμορφώσεων στην κατασκευή, γίνεται υπολογισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των κρισίμων διατομών ανάλογα με τη θερμοκρασιακή τους έκθεση, και επιλύεται ο φορέας με τα αντίστοιχα απομειωμένα χαρακτηριστικά.

Για την επίλυση του πλαισίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Opensees [McKenna et al., 2007]. Επελέγη το ραβδόμορφο πεπερασμένο στοιχείο κατανεμημένης βλάβης *nonlinearBeamColumn*. Το στοιχείο βασίζεται στην προσομοίωση των διατομών με τη μέθοδο των ινών, και είναι σε θέση να παρακολουθήσει την κατανομή της βλάβης κατά μήκος του με πολλαπλές διατομές ελέγχου, με την προϋπόθεση ότι η επιρροή της τέμνουσας είναι αμελητέα.

Το λογισμικό επεκτάθηκε ως προς τις βασικές του λειτουργίες, με βάση τη δυνατότητά του να προγραμματίζεται παραμετρικά η εισαγωγή των δεδομένων της επίλυσης. Με αυτό τον τρόπο, κατέστη δυνατόν να ληφθούν υπόψη τροποποιημένοι καταστατικοί νόμοι της κάθε ίνας χάλυβα ή σκυροδέματος στις διατομές ελέγχου του κάθε δομικού στοιχείου, ανάλογα με την θερμοκρασία έκθεσής του, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική θέση της ίνας στη διατομή, τον χρόνο έκθεσης του στοιχείου στην καμπύλη θερμοκρασίας ISO 834 και τη διάχυση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της διατομής κατά Saafi [2002] (βλ. §V.2.1).



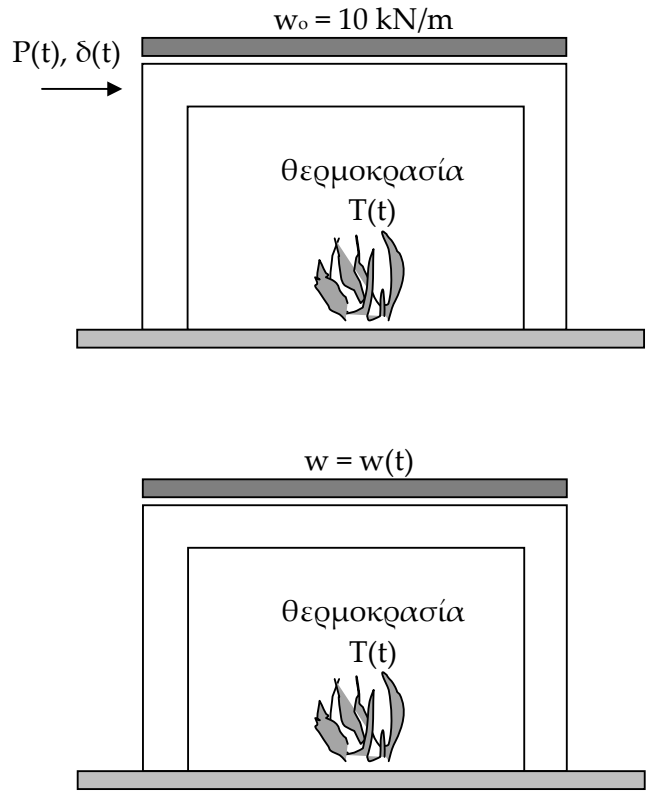
Σχήμα V.31 Προσομοίωμα ινών στοιχείου Ο.Σ. (Zeris [1992])

V.3.1 Φέρουσα ικανότητα πλαισίου υπό ταυτόχρονη θερμοκρασιακή έκθεση σε πυρκαγιά ISO 834

Το απλό δίστυλο πλαίσιο του Σχήματος V.32 φορτίζεται αρχικά με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο στη δοκό ίσο προς w_o = 10 kN/m, και ακολούθως επιλύεται σε σταδιακά αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση P(t) ή κατακόρυφη φόρτιση w(t), έως τη δημιουργία αντίστοιχου μηχανισμού αστοχίας, λόγω δεδομένου χρόνου έκθεσης στην πυρκαγιά κατά ISO 834.

Γεωμετρία:
Άνοιγμα δοκού: 6.0m (αξονικά).
Ύψος ορόφου: 3.0m (αξονικά).
Διαστάσεις δομικών στοιχείων:
Υποστυλώματα 30/30, οπλισμός 8Φ18 S500.
Δοκός: 25/50, οπλισμός 3Φ18 κάτω, 2Φ18 άνω, S500.
Σκυρόδεμα C20, επικάλυψη διαμήκους οπλισμού 3cm.

Προσομοίωση δοκού και υποστυλώματος:
Λόγω αδυναμίας του πεπερασμένου στοιχείου προσομοίωσης να παραλάβει εγκάρσια φορτία στο εσωτερικό του, η δοκός τεμαχίζεται σε έξη τμήματα ίσου μήκους, και τα κατανεμημένα φορτία (w_o και w(t)) εφαρμόζονται επικομβίως. Το κάθε στοιχείο δοκού προσομοιώνεται με τρεις διατομές ελέγχου κατά μήκος (δύο στα άκρα και μια στο μέσον του), ενώ κάθε διατομή είναι διακριτοποιημένη με τριάντα ίνες (χάλυβας και σκυρόδεμα). Το κάθε στοιχείο υποστυλώματος ορίζεται από επτά διατομές ελέγχου κατά μήκος, με τριάντα ίνες ανά διατομή.



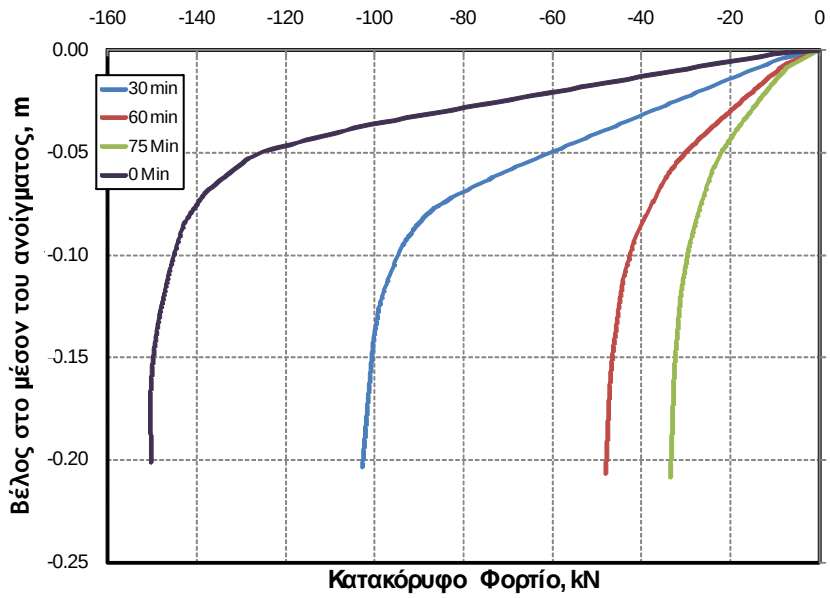
Σχ. V.32 Σχηματική παρουσίαση των δύο επιπέδων πλαισίων που επιλύονται:
α) Πλαίσιο υπό σταθερά αυξανόμενη εγκάρσια (π.χ. σεισμική) φόρτιση, μετά από θερμοκρασιακή έκθεση T(t), και
β) Πλαίσιο υπό σταθερά αυξανόμενη κατακόρυφη κατανεμημένη φόρτιση, μετά από θερμοκρασιακή έκθεση T(t), κατά ISO 834.

Σκυρόδεμα και χάλυβας:
Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται κατά Mander et al. [1988], ο δε χάλυβας προσομοιώνεται με διγραμμικά χαρακτηριστικά (με κράτυνση), λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της θερμοκρασίας στην αντοχή των υλικών.

V.3.2 Αποτελέσματα :

V.3.2.1 Φέρουσα ικανότητα υπό κατακόρυφη φόρτιση

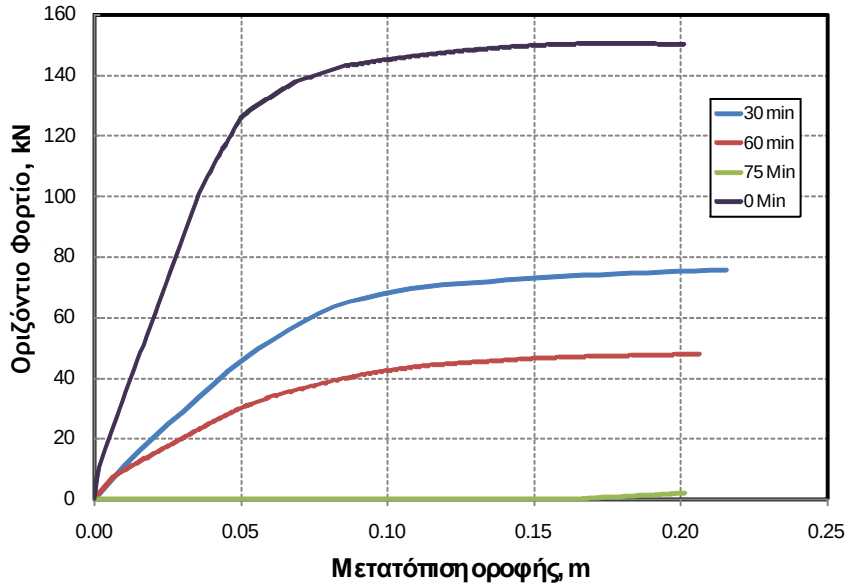
Υπολογίσθηκαν τα διαγράμματα αυξανόμενου κατακόρυφου φορτίου – βέλους στο άνοιγμα της δοκού, σε χρόνο έκθεσης t = 0, 30, 60 και 75 min, τα οποία και δίνονται στο Σχ. V.33.



Σχήμα V.33 Διαγράμματα κατακόρυφου (ομοιόμορφα κατανεμημένου) φορτίου – μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος της δοκού για χρόνο έκθεσης t = 0, 30, 60 και 75 min.

V.3.2.2 Φέρουσα ικανότητα υπό εγκάρσια φόρτιση

Επί πλέον, υπολογίσθηκαν τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου – μετατόπισης στην οροφή, μετά την εφαρμογή του κατακόρυφου φορτίου, για t = 0, 30, 60 και 75 min, τα οποία και δίνονται στο Σχ. V.34.



Σχήμα V.34 Διαγράμματα οριζόντιου φορτίου – μετατόπισης στην οροφή για χρόνο έκθεσης t = 0, 30, 60 και 75 min.

V.4 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EC2, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures", Part 1-2, EN 1992-1-2, 2004.

[2] Becker J. and B. Bresler, FIRES-RC, "A Computer program for the fire response of structures – reinforced concrete frames".

[3] Desai S., "Design of Reinforced Concrete Beams under Fire Conditions", Magazine of Concrete Research, **50**, 1, σελ. 75-83, 1998.

[4] Saafi M., "Effect of fire on FRP reinforced concrete members", Composite Structures, **58**, σελ. 11–20, 2002.

[5] Buchanan A., "Structural Design for Fire Safety", Jon Wiley & Sons., Hoboken, USA, 2002, σελ. 421.

[6] Livermore Software Technology Corp., "LS_DYNA Theory Manual", 2006.

[7] Livermore Software Technology Corp., LS_DYNA, Έκδοση 971.R3, California, 2007.

[8] McKenna F., G. L. Fenves, B. Jeremic, and M. H. Scott, Open system for earthquake engineering simulation, OpenSees, Version 1.7, 2007. (*http://opensees.berkeley.edu*).

[9] Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of the Structures Division, ASCE, **114**, No 8, σελ. 1804–1826, 1988.

[10] Hertz K., "Sample Temperature Calculations of Fire Exposed Concrete Constructions, Institute of Building Design", Technical University of Denmark, Report No 159, 1981.

[11] Zeris C., Mahin S., "Analysis of Reinforced Concrete Beam-Columns Under Uniaxial Excitations", Journal of the Structures Division, ASCE, **114**, No 4, 1988.

[12] Κούτσουρας Δ. και Μπουλαζέρης Ι., "Μελέτη συμπεριφοράς κατασκευής από ΩΣ έναντι πυρκαγιάς", Διπλωματική Διατριβή, Εργ. ΩΣ, ΕΜΠ, 2005.

[13] The Mathworks Inc, "MATLAB User's Manual for Version 7.0", 2004.

[14] Θ.Π. Τάσιος, Μ.Π. Χρονόπουλος, "Υπερστατικοί Φορείς Ω.Σ. έναντι Πυρκαγιάς", 6ο Συνέδριο ΕΤΣ/ ΤΕΕ, Γιάννενα, 1983.

[15] Θ.Π. Τάσιος, Μ.Π. Χρονόπουλος, "Υπερστατικοί Φορείς Ω.Σ. έναντι Πυρκαγιάς", 7ο Συνέδριο ΕΤΣ/ ΤΕΕ, Πάτρα, 1985.

[16] Θ.Π. Τάσιος, Γ. Δεοδάτης, "Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα έναντι Πυρκαγιάς", Εργαστήριο Ω.Σ./ Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1984.

[17] T.P. Tassios, M.P. Chronopoulos, "Structural Response of RC Elements under Fire", The Structural Engineer, Vol. 69, No 15, Aug. 1991.

VI. ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ-ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΛΑΒΩΝ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται αντιστοίχιση των βλαβών λόγω πυρκαγιάς με προτεινόμενες μεθόδους επισκευών-ενισχύσεων. Σημειώνεται ότι, σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι και τα υλικά επέμβασης είναι ίδια ή παρόμοια με αυτά που εφαρμόζονται και σε άλλες περιπτώσεις βλαβών (π.χ. λόγω σεισμού). Γι' αυτόν τον λόγο, στο κείμενο που ακολουθεί, παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή των μεθόδων, και ακολουθεί η παραπομπή στα αντίστοιχα κεφάλαια της υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας («Συστάσεις για τις επισκευές κτιρίων βλαμμένων από σεισμό», ΕΜΠ 1978 [1], «Άρση επικινδυνοτήτων, προσωρινές υποστυλώσεις - αντιστηρίξεις», ΟΑΣΠ 2000 [2], «Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια», ΟΑΣΠ 2001 [3], «Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές», ΙΟΚ 2008 [4]).

VI.1 ΓΕΝΙΚΑ

Παραλλήλως με τις δομητικές επεμβάσεις, κατά τις επόμενες παραγράφους, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα καί για τα εξής :

(α) Βελτίωση της πυραντίστασης (δομικής), κατά τα προτεινόμενα στο Κεφάλαιο VII του παρόντος Πρακτικού Οδηγού

(β) Βελτίωση της ανθεκτικότητας στον χρόνο, ιδίως αν παρατηρούνται σχετικές έντονες φθορές από φυσικοχημικά αίτια, και

(γ) Βελτίωση της αντίστασης στον σεισμό, στο μέτρο του αναγκαίου και εφικτού (π.χ. άρση μή-κανονικότητας, όχι «βαριές» ή/και «ασύμμετρες» επεμβάσεις, όχι υπερβολές, ιδιαίτερη μέριμνα για κτίρια σε παραδοσιακούς οικισμούς). Σημειώνεται ότι ορισμένες από τις τεχνικές ενδεχομένως δεν είναι αποδεκτές ή θεωρούνται «δραστικές» και συνιστάται να αποφεύγονται στην περίπτωση ιστορικών κτιρίων.

Βεβαίως, σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αγνοείται το υπέδαφος και η θεμελίωση, τα διπλανά κτίρια, και οι ενδεχόμενες άλλες αιτίες φθορών / βλαβών.

VI.2 ΑΜΕΣΑ ΜΕΤΡΑ

Για λόγους άρσης της επικινδυνότητας μετά από μια έντονη πυρκαγιά, ενδέχεται να είναι αναγκαία η εφαρμογή ορισμένων μέτρων άμεσης επέμβασης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τον τύπο και την χρήση του δομήματος, τις βλάβες που παρουσιάζονται, τον διαθέσιμο εξοπλισμό κ.λπ..

Τα κυριότερα άμεσα μέτρα επέμβασης μετά από πυρκαγιά είναι τα ακόλουθα:

• Υποστυλώσεις (πολύ συχνά υποχρεωτικώς).

• Αντιστηρίξεις (ενδεχομένως).

• Καθαιρέσεις στοιχείων (μισο-καμμένων, επικρεμάμενων, επικίνδυνων), φυσικά μετά την επείγουσα καταγραφή και αποτύπωσή τους.

Ακόμη, ενδέχεται να χρειαστεί η προσωρινή κάλυψη δωμάτων, στεγών κ.λπ. που κάηκαν, έτσι ώστε να περιοριστούν οι πιθανές δευτερογενείς βλάβες και οι πρόσθετες φθορές, από βροχές κ.λπ..

VI.2.1 Υποστυλώσεις

Υποστύλωση συνιστάται σε δομήματα τα οποία έχουν υποστεί σοβαρές βλάβες στα κατακόρυφα κυρίως στοιχεία τους (θραύση υποστυλωμάτων, σοβαρή ρηγμάτωση φερόντων τοίχων κ.λπ.), αλλά και σε οριζόντια στοιχεία (δοκοί, πλάκες, στέγες κ.λπ.), σε τέτοιο βαθμό ώστε να υπάρχει κίνδυνος τοπικής κατάρρευσης ή μή-ασφαλούς εκτέλεσης των σκοπούμενων επεμβάσεων.

Βλ. αναλυτικότερα στην ενότητα §Α3.1 του [1], και στην Εισαγωγή του [2] .

Με την υποστύλωση επιτυγχάνεται :

• Ανακούφιση των βλαμμένων κατακόρυφων φερόντων στοιχείων από τα φορτία τους, μέσω κατάλληλα τοποθετημένων πρόσθετων προσωρινών στοιχείων.

• Μείωση του κινδύνου κατάρρευσης του κτιρίου, έστω τοπικής.

• Προφύλαξη των βλαμμένων στοιχείων του δομήματος από φαινόμενα ερπυσμού, στο διάστημα που μεσολαβεί από την πυρκαγιά μέχρι την οριστική επέμβαση.

• Μερική μεταφορά φορτίων σε άλλα στοιχεία του δομήματος που δεν έχουν αστοχήσει.

VI.2.1.1 Βασικές απαιτήσεις υποστυλώσεων

• Η υποστύλωση πρέπει να γίνεται σε όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση (20-30cm) από το βλαμμένο κατακόρυφο στοιχείο, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν θα δημιουργεί προβλήματα στην μεταγενέστερη εκτέλεση της εργασίας επισκευής, ενίσχυσης ή αντικατάστασης του στοιχείου.

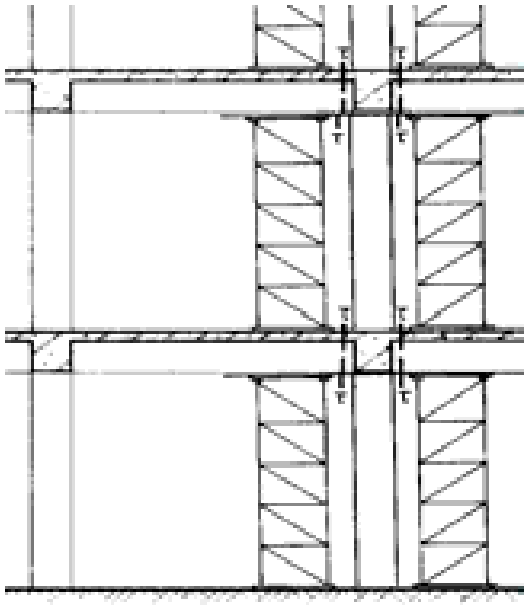
• Δίνεται προτεραιότητα στην υποστύλωση των κατακόρυφων στοιχείων του φορέα που υπέστησαν βλάβη, καθώς και στην υποστύλωση στεγών, πλακών, δοκών κ.λπ. με έντονα βέλη κάμψεως.

• Η υποστύλωση πρέπει να γίνεται κατ' αρχήν στον όροφο όπου βρίσκονται τα βλαμμένα κατακόρυφα στοιχεία. Πάντως, συνιστάται ιδιαίτερα η υποστύλωση σε περισσότερους ή και σε όλους τους ορόφους, καθώς αφενός οδηγεί σε ευνοϊκότερη κατανομή των φορτίων του βλαμμένου στοιχείου, και αφετέρου μετριάζει την διατμητική καταπόνηση στις διατομές τ-τ εκατέρωθεν του στοιχείου.

• Η καλή σφήνωση είναι απαραίτητη προϋπόθεση μιας αποτελεσματικής υποστύλωσης. Οι σφήνες (συνήθως ξύλινες) πρέπει να στερεώνονται ισχυρώς, και να εξασφαλίζεται η μή-χαλάρωσή τους.

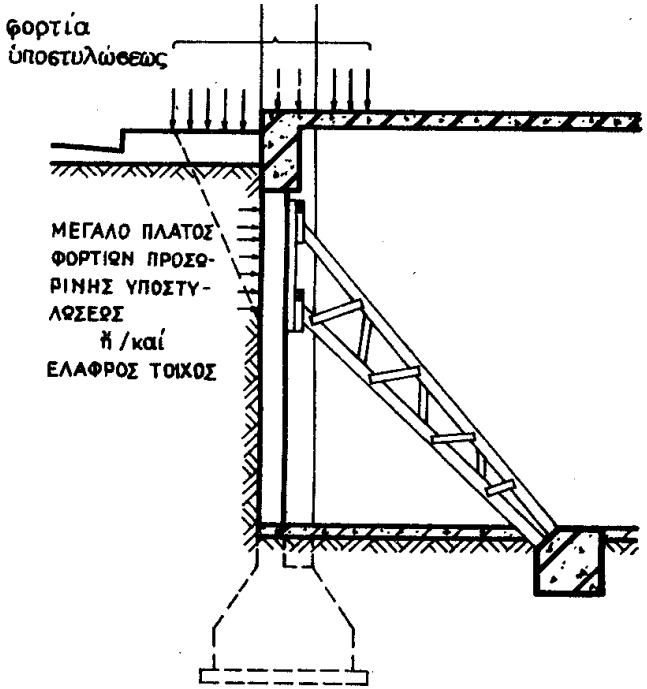
• Στην περίπτωση που απαιτούνται επεμβάσεις σε περισσότερα από ένα στοιχεία, πρέπει να ακολουθείται η εξής διαδικασία: κατάλληλη υποστύλωση όλων των βλαμμένων στοιχείων, επισκευή/ενίσχυση ενός στοιχείου, απομάκρυνση της προσωρινής υποστύλωσής του και (μετά από έλεγχο) σταδιακή επισκευή/ενίσχυση του επόμενου στοιχείου κ.ο.κ..

Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α3.1 του [1] και §IV του [2].



Σχήμα VI.1 Υποστύλωμα ή φέρουσα τοιχοποιία για επισκευή/ενίσχυση ή για αντικατάσταση (υποστύλωση σε πολλούς ορόφους). [1]

• Στην περίπτωση που υπάρχει υπόγειο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην μεταφορά των φορτίων της προσωρινής υποστυλώσεως στο έδαφος (πιθανώς είναι αναγκαία η λήψη πρόσθετων μέτρων ασφαλείας).



Σχήμα VI.2 Λήψη πρόσθετων μέτρων ασφαλείας, εξαιτίας των οριζόντιων ωθήσεων στην κατακόρυφη παρειά του υπογείου. [1]

VI.2.1.2 Μέθοδοι υποστυλώσεως

Ανάλογα με τα διατιθέμενα μέσα, την σοβαρότητα της βλάβης και το μέγεθος του έργου, επιλέγεται μία από τις ακόλουθες μεθόδους υποστυλώσεως:

(α) Υποστύλωση με την βοήθεια βιομηχανικών ικριωμάτων:

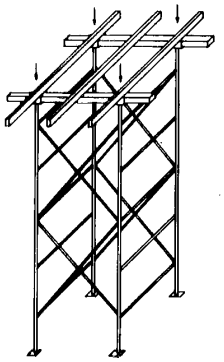
Εφαρμόζεται μόνο σε περίπτωση ελαφρών βλαβών και για παραλαβή μικρών κατακόρυφων φορτίων, ή σε περίπτωση ανακουφίσεως καμπτόμενων στοιχείων (δοκών ή πλακών, στεγών κ.λπ.). Τα χαλύβδινα αυτά ικριώματα συναρμολογούνται ανά δύο σε πύργους με την χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων (με τρόπο απλό και γρήγορο από ανειδίκευτο εργατικό προσωπικό), και σε συνδυασμό με ξύλινα λατάκια χρησιμοποιούνται σαν τυποποιημένα στοιχεία στις υποστυλώσεις.

(β) Υποστύλωση με την βοήθεια κορμών δέντρων:

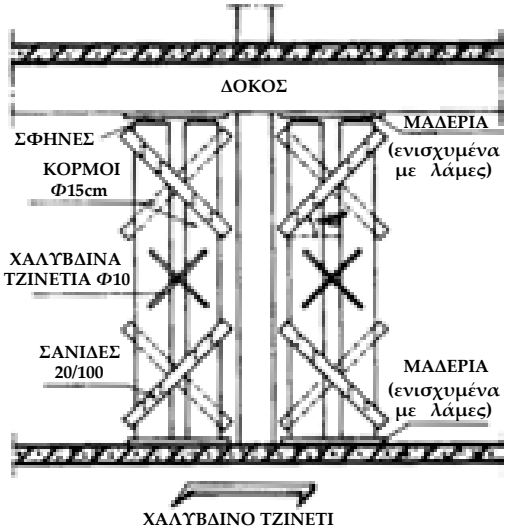
Πρόκειται για μια εύκολη και ταχεία μέθοδο υποστύλωσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και από μή ειδικευμένα άτομα. Απαιτούνται τουλάχιστον δύο κορμοί διαμέτρου min. 15cm εκατέρωθεν του βλαμμένου κατακόρυφου στοιχείου. Οι κορμοί κάθε ομάδας συνδέονται μεταξύ τους με 4 τουλάχιστον σανίδες (πάχους 2cm και πλάτους 10 cm) που καρφώνονται υπό γωνία 45° περίπου στους κορμούς, και με τζινέτια (τουλάχιστον Φ10), τοποθετούμενα κατά προτίμηση ανά δύο χιαστί. Στη βάση των κορμών τοποθετούνται μαδέρια ελάχιστου πάχους 4cm, ικανά να εξασφαλίσουν το ανένδοτο της βάσεως της υποστυλώσεως. Ίδια μαδέρια τοποθετούνται και στο άνω μέρος της υποστυλώσεως.

• Για τις μεθόδους υποστυλώσεως βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α3.2 και §Α3.5 του [1], καθώς και §V.1 του [2].

• Για τις μεθόδους σφηνώσεως βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α3.3 του [1] και §VI του [2].



Σχήμα VI.3
Βιομηχανικά χαλύβδινα ικριώματα. [1]



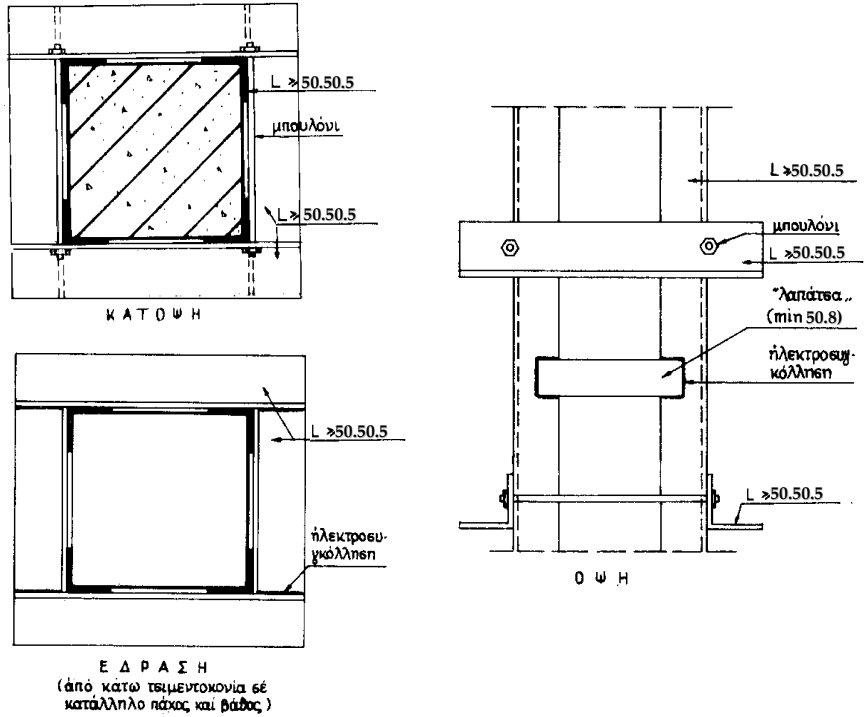
Σχήμα VI.4
Υποστύλωση με την βοήθεια κορμών δέντρων εκατέρωθεν βλαμμένου υποστυλώματος. [1]

(γ) <u>Υποστύλωση με την βοήθεια τυποποιημένων χαλύβδινων στοιχείων:</u>

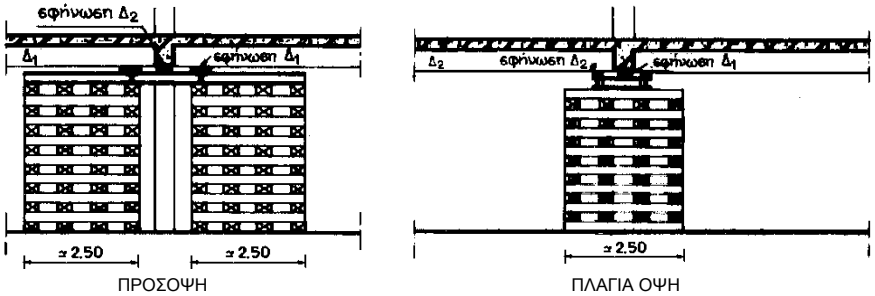
Η προσωρινή υποστύλωση με εξωτερική σιδηροκατασκευή και περίσφιγξη μπορεί να εφαρμοστεί όταν παρίσταται ανάγκη παραλαβής ενός τμήματος του αξονικού φορτίου του βλαμμένου υποστυλώματος, ή όταν υπάρχουν ελαφρές βλάβες στο υποστύλωμα που μπορούν να επισκευαστούν με ενέσεις εποξειδικής κόλλας. Σπανίως, η τεχνική αυτή εφαρμόζεται και όταν απαιτείται αύξηση της πλαστιμότητας του υποστυλώματος. Τοποθετούνται τέσσερα γωνιακά ελάσματα, τουλάχιστον 50.50.5, στις γωνίες του βλαμμένου υποστυλώματος καθ' όλο του το ύψος. Έξω από αυτά τα γωνιακά και ανά 50cm, τοποθετούνται ζευγάρια από εγκάρσιες γωνίες (ίδιας διατομής) κατά τη μία και την άλλη διεύθυνση του υποστυλώματος εναλλάξ. Τα ζευγάρια των γωνιακών συσφίγγονται μεταξύ τους με ντίζες και μπουλόνια, και στη συνέχεια συγκολλούνται λαπάτσες πάνω στα κατακόρυφα γωνιακά (ανά 50cm), και ξανασφίγγονται τα μπουλόνια. Η προσωρινή αυτή υποστύλωση μπορεί να ενσωματωθεί στην σκυροδέτηση της μόνιμης επισκευής/ενίσχυσης του βλαμμένου υποστυλώματος.

(δ) <u>Υποστύλωση με τακαρία:</u>

Εφόσον είναι διαθέσιμοι πολυπληθείς ξύλινοι στρωτήρες σιδηροδρόμων ή άλλα ανάλογα είδη ξυλείας, η υποστύλωση μπορεί να γίνει με τακαρία (χρονοβόρα και υψηλού κόστους μέθοδος). Οι στρωτήρες τοποθετούνται σε στρώσεις εναλλάξ και εκατέρωθεν του βλαμμένου υποστυλώματος, ενώ στο πάνω μέρος της τακαρίας εδράζονται και σφηνώνονται πλατύπελμα χαλύβδινα I.



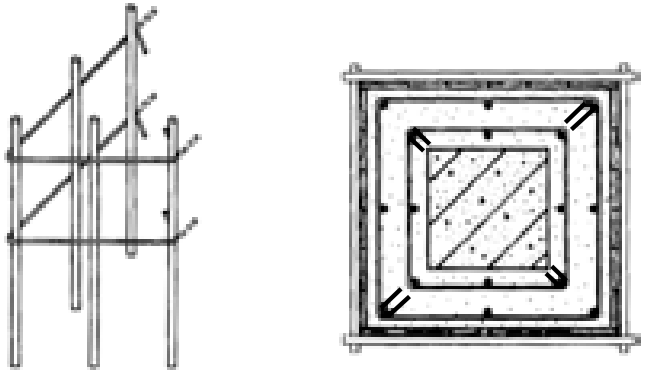
Σχήμα VI.5 Υποστύλωση και περίσφιγξη υποστυλώματος με γωνιακά. [1]



Σχήμα VI.6 Υποστύλωση με τακαρία εκατέρωθεν βλαμμένου υποστυλώματος. [1]

(ε) Άμεσος μανδύας «σπασμένου» υποστυλώματος:

Εφαρμόζεται είτε όταν η έκταση των βλαβών είναι τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργεί προβλήματα στην ευστάθεια του κτιρίου, είτε σε περίπτωση που η εργασία σφήνωσης με την κρουστική επιβολή φορτίων θα δημιουργούσε προβλήματα ασφαλείας. Η μέθοδος συνίσταται στην χύτευση ενός μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος γύρω από το υποστύλωμα, με τσιμέντα ταχείας πήξεως ή έτοιμα τσιμεντοκονιάματα. Για τον οπλισμό του μανδύα χρησιμοποιούνται δύο κλωβοί οπλισμού, ένας εσωτερικός παρά την περίμετρο του υποστυλώματος και ένας εξωτερικός. Μεταξύ των τμημάτων του κάθε κλωβού δένονται (και ηλεκτροσυγκολλούνται) εναλλάξ ισχυροί και πυκνοί συνδετήρες.



Σχήμα VI.7 Αρχική σύνθεση κλωβού από δύο τμήματα σχήματος ορθής γωνίας, και κάτοψη του άμεσου μανδύα «σπασμένου» υποστυλώματος. [1]

VI.2.2 Αντιστηρίξεις

Αντιστήριξη συνιστάται σε δομήματα τα οποία παρουσιάζουν προβλήματα πλευρικής ευστάθειας, λόγω έντονων και αισθητών οριζόντιων μετακινήσεων.

Με την αντιστήριξη επιτυγχάνεται :

- Μείωση του κινδύνου περαιτέρω απόκλισης του δομήματος από την κατακόρυφο.
- Μείωση του κινδύνου μερικής ή ολικής κατάρρευσης του κτιρίου.
- Παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων, των φαινομένων ερπυσμού κ.λπ..
- Εξασφάλιση προσωρινής ευστάθειας της κατασκευής έναντι οριζόντιων δράσεων.

Βλ. αναλυτικότερα στην Εισαγωγή του [2] .

Η εξασφάλιση μιας βλαμμένης κατασκευής έναντι οριζόντιων φορτίων είναι αναγκαία, ιδιαίτερα σε κατασκευές με εύκαμπτους ορόφους, λόγω μικρού αριθμού ή απουσίας τοιχωμάτων από Ο.Σ., σε συνδυασμό με την απουσία τοίχων πληρώσεως. Η αντιστήριξη μπορεί να γίνει με μία από τις ακόλουθες **μεθόδους** :

(α) Αντιστήριξη με αντηρίδες (λοξή):

Είναι η πιο συνηθισμένη προσωρινή μέθοδος παραλαβής οριζόντιων δυνάμεων, οι οποίες αναπτύσσονται λόγω απόκλισης του κτιρίου από την κατακόρυφο, λόγω θραύσης κατακόρυφων στοιχείων ή λόγω υποχώρησης της θεμελίωσης. Ως υλικό χρησιμοποιείται συνήθως χονδροξυλεία, σπανιότερα δε και χαλύβδινα στοιχεία.

(β) Αντιστήριξη με διαγώνιους συνδέσμους:

Εφαρμόζεται όταν δεν είναι δυνατή η εξωτερική αντιστήριξη με αντηρίδες λόγω ελλείψεως χώρου. Η μέθοδος συνίσταται στην κατασκευή πλαισίου σχήματος Π ή □ , του οποίου οι κατακόρυφοι στύλοι συνδέονται με χιαστί διαγώνιους συνδέσμους. Τα πλαίσια και οι διαγώνιοι αυτοί σύνδεσμοι είναι συνήθως από χονδροξυλεία ή χάλυβα.

(γ) Αντιστήριξη με εσωτερικούς ελκυστήρες:

Εφαρμόζεται για την συγκράτηση τοίχων που αποκλίνουν από την κατακόρυφο, ή εξωτερικών τοίχων που έχουν αποκολληθεί. Χρησιμοποιούνται κατάλληλοι ελκυστήρες (με ακραίες αγκυρώσεις) και προεντείνονται με αρμοκλείδες (συνήθως).

Για τις μεθόδους αντιστηρίξεως βλ. αναλυτικότερα στην ενότητα §V.2 του [2].

Σχήμα VI.8 Λοξή αντιστήριξη με βιομηχανική ξυλεία. [2]

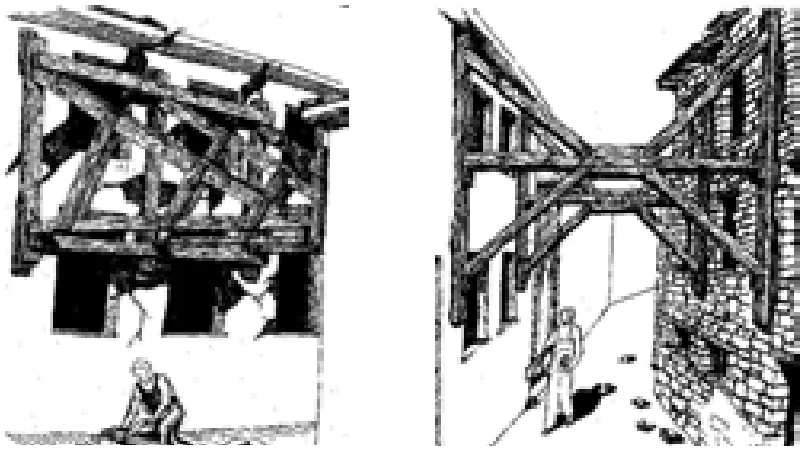
Σχήμα VI.9 Αντιστήριξη με διαγώνιους συνδέσμους στα πλαίσια μεταξύ των περιμετρικών υποστυλωμάτων της πιλοτής. [2]

(δ) Αντιστήριξη με εξωτερικούς δακτυλίους:

Εφαρμόζεται για την εξωτερική περίδεση μικρών κτιρίων, για τρούλους, θόλους κ.λπ.. Συνήθως χρησιμοποιούνται ελκυστήρες ή χαλύβδινες ταινίες, με κατάλληλα στοιχεία αγκύρωσης, εκτροπής κ.λπ..

(ε) Οριζόντια αντιστήριξη («αιωρούμενη»):

Εφαρμόζεται όταν είναι αδύνατη η κατασκευή λοξής αντιστήριξης λόγω ελλείψεως χώρου, ή όταν απαιτείται η δημιουργία στοάς για διέλευση πεζών ή συνεργείων κ.λπ.. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η δυνατότητα στερέωσης των σανιδωμάτων και των αντηρίδων σε ένα ασφαλές απέναντι κτίριο (σε μικρή απόσταση).



Σχήμα VI.10 Παραδείγματα οριζόντιας αντιστήριξης. [2]

VI.2.3 Καθαιρέσεις

Πολλές φορές απαιτείται η άμεση καθαίρεση/ απομάκρυνση των μισο-καμμένων και επικρεμάμενων δομικών στοιχείων τα οποία είναι πιθανόν να αποκολληθούν από προσόψεις κτιρίων, ή στο εσωτερικό τους. Παραλλήλως, επιδιώκεται η εξασφάλιση της ασφαλούς και απρόσκοπτης διακίνησης πεζών και οχημάτων, μέσω της οποίας επιταχύνεται η επαναφορά του κανονικού ρυθμού ζωής στην περιοχή.

VI.3 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη κατηγορία επεμβάσεων αφορά τόσο στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσο και από φέρουσα τοιχοποιία.

VI.3.1 Ρηγμάτωση επιχρισμάτων:

Εφαρμόζεται συνήθως απλή σφράγιση των ρωγμών (τσιμεντοκονία με ψιλό μυστρί). Για πολλές ρωγμές, ίσως έντονες, μπορεί να εφαρμοστεί αντικατάσταση επιχρισμάτων, κατά την §VI.3.2.

VI.3.2 Αποκόλληση και πτώση επιχρισμάτων:

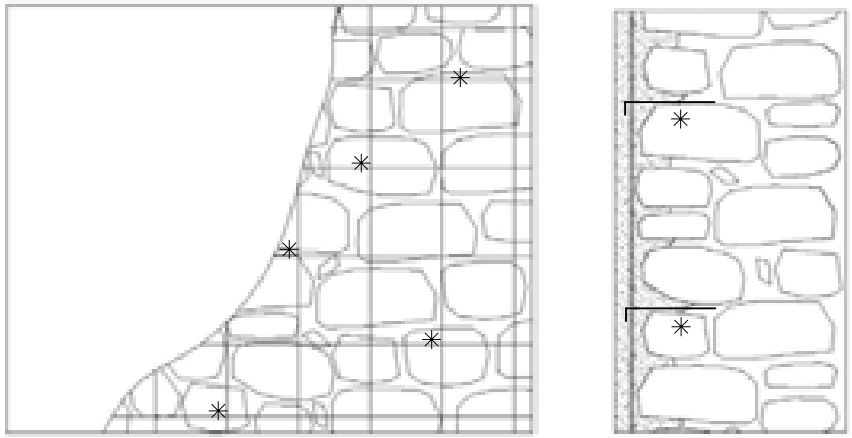
Εφαρμόζεται αντικατάσταση των επιχρισμάτων, με φροντίδα για την εξασφάλιση καλής πρόσφυσης (π.χ. μέσω τραχύτητας, ασταρώματος, χρήσης ινών κ.λπ.).

Σε περίπτωση που το πάχος του επιχρίσματος υπερβαίνει τα 15mm ÷ 20mm, υποχρεωτικά ενισχύεται/οπλίζεται με :

(α) Ελαφρά πλέγματα (τα οποία στερεώνονται με μηχανικά μέσα στα φέροντα στοιχεία), από χάλυβα (κοτετσόσυρμα, κουνελόσυρμα) ή γυαλί, και

(β) Ίνες (σε κατάλληλη δόση), από χάλυβα ή πολυπροπυλένιο.

Βλ. αναλυτικότερα στην ενότητα §6.5.2 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-02-07-00 του [4].



Σχήμα VI.11 Οπλισμένο επίχρισμα (✳: πυκνή στερέωση, π.χ. καρφίδες 4/m² όψεως). [3]

VI.4 ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

VI.4.1 Τοιχοπληρώσεις

VI.4.1.1 Βλάβη (ή και φθορά) διαζωμάτων, κυρίως διαμπερείς ρωγμές:

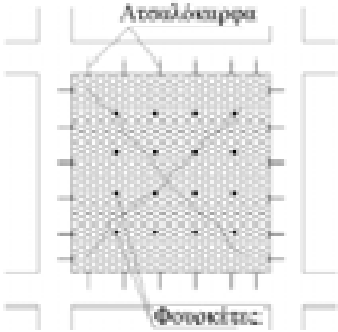
Εφαρμογή απλών τεχνικών επισκευής όπως είναι η σφράγιση ή/και πλήρωση των ρωγμών, με εποξειδική κόλλα κατάλληλου ιξώδους. Σημειώνεται ότι ενδέχεται οι ρωγμές αυτές να είναι δηλωτικές ανάγκης ενίσχυσης (π.χ. μέσω μεθόδων για δοκούς Ο.Σ.) και όχι απλής επισκευής.

Για πληροφορίες για τις εποξειδικές κόλλες και την τεχνική επισκευής ρωγμών με την βοήθειά τους, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α4.4 του [1] και §3 του Παραρτήματος του [3], καθώς και στις ΠΕΤΕΠ: 14-01-07-01 και 14-01-07-02 του [4].

VI.4.1.2 Ρωγμές στα σώματα των τοίχων (γενικώς διαμπερείς):

Εφαρμογή συμβατικών τεχνικών όπως είναι η απλή σφράγιση ή/και συρραφή των ρωγμών, μέσα στο σώμα του τοίχου ή στα επιχρίσματα, με λωρίδες πλεγμάτων.

- Για απλή ρηγμάτωση τοίχων (άνοιγμα ρωγμών <5mm) βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β2.2 του [1] και §7.5 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-03-02-00 του [4].
- Για έντονη ρηγμάτωση τοίχων βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β2.3 του [1] και §7.6 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-03-02-00 του [4].



Σχήμα VI.12 Σε περίπτωση έντονης και εκτεταμένης ρηγμάτωσης, καρφώνεται κοτετσόσυρμα ή κουνελόσυρμα στον σκελετό και τον τοίχο. [3]

VI.4.1.3 Αποσύνδεση τοιχοπληρώσεων και σκελετού:

(α) Σε περίπτωση ελαφρών ρωγμών αποκόλλησης (t < 5mm) εφαρμόζεται η τεχνική της απλής σφράγισης με ψιλό μυστρί.

(β) Σε περίπτωση έντονων ρωγμών αποκόλλησης (t > 5mm) εφαρμόζεται η τεχνική της συρραφής, με χαλύβδινα στοιχεία.

(γ) Σε περίπτωση καί μετακίνησης του τοίχου εκτός επιπέδου (μεγαλύτερης π.χ. των 15mm) επιβάλλεται η καθαίρεση/ ανακατασκευή.

• Για την επιρροή των τοιχοπληρώσεων στην συμπεριφορά του σκελετού, καθώς και για την ανάγκη σύνδεσης ή απότμησης, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §4.1.7.1 και §4.2.2 του ΕΑΚ 2000 [5].

• Για την τεχνική της επισκευής, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β2.4 του [1] και §7.7 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-03-02-00 του [4].

VI.4.1.4 Αποδιοργάνωση της πλινθοδομής:

Είναι αναγκαία η καθαίρεση/ ανακατασκευή του «καμμένου» τοίχου, εάν παρατηρείται έντονη αποσύνθεση του κονιάματος των αρμών και θραύση των φλοιών των τοιχοσωμάτων.

Αλλιώτικα, όταν βεβαιωμένα μόνο το κονίαμα έχει φθαρεί, θα αποκαθίσταται με μεθόδους και υλικά αρμολόγησης.

VI.4.2 Σκελετός Ο.Σ.

VI.4.2.1 Ρωγμές σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος:

Εφαρμογή απλών τεχνικών επισκευής όπως είναι η σφράγιση ή/και πλήρωση των ρωγμών, με εποξειδική κόλλα κατάλληλου ιξώδους. Σημειώνεται ότι ενδέχεται οι ρωγμές αυτές να είναι δηλωτικές ανάγκης ενίσχυσης και όχι απλής επισκευής.

• Για πληροφορίες για τις εποξειδικές κόλλες και την τεχνική επισκευή ρωγμών με την βοήθειά τους, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α4.4 του [1] και §3 του Παραρτήματος του [3], καθώς και στις ΠΕΤΕΠ: 14-01-07-01 και 14-01-07-02 του [4].

• Για την τεχνική επισκευής απλών ρηγματώσεων με την βοήθεια εποξειδικής κόλλας σε υποστυλώματα, τοιχώματα, πλάκες-δοκούς, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §5.4.1.1.1 , §5.4.2.1 και §5.4.3.1 του [3] αντίστοιχα.

VI.4.2.2 Κάτω καμμένες πλάκες/δοκοί (σε ανοίγματα), εκτινάξεις σκυροδέματος (τοπικές ή μή) χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα:

Επισκευή με την βοήθεια εκτοξευόμενου λεπτοσκυροδέματος (shotcrete), με ή χωρίς ελαφρά πλέγματα.

• Για την τεχνική επισκευής πλακών, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β1.2.2.(β) του [1] και §5.4.3.2.1 του [3].

• Για την τεχνική επισκευής δοκών, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β1.2.1.(γ) του [1], §5.4.3.2.1 και §5.4.3.2.4 του [3].

Σχήμα VI.13 Επισκευή πλάκας με πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (✳: πυκνή στερέωση, βλήτρα/αγκύρια, 4/m^2).

VI.4.2.3 Αστοχίες υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων:

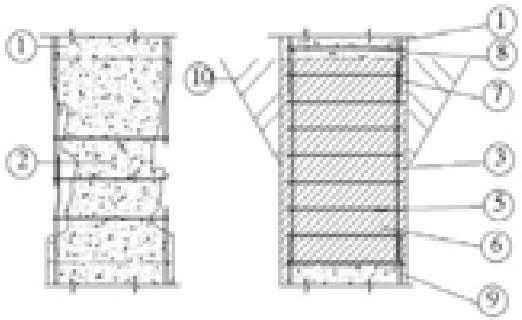
(α) Σε περίπτωση βαθιών εκτινάξεων σκυροδέματος σε υποστυλώματα ή τοιχώματα, με εκτεθειμένους/λυγισμένους ή και κομμένους οπλισμούς και προβλήματα συνδετήρων, ενδέχεται να είναι αναγκαία η προσθήκη μανδύα Ο.Σ..

(β) Σε περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών (ίσως έντονων) ρωγμών σε υποστυλώματα ή τοιχώματα, σε συνδυασμό πάντα με προβλήματα οπλισμού και αποδιοργάνωση σκυροδέματος, ενδέχεται να είναι αναγκαία η προσθήκη μανδύα Ο.Σ.

Σημειώνεται ότι πριν από την ενίσχυση του στοιχείου με μανδύα Ο.Σ., προηγείται η τοπική αποκατάσταση στην περιοχή της βλάβης (π.χ. ενέσεις ή/και εφαρμογή της μεθόδου «ίσης διατομής»).

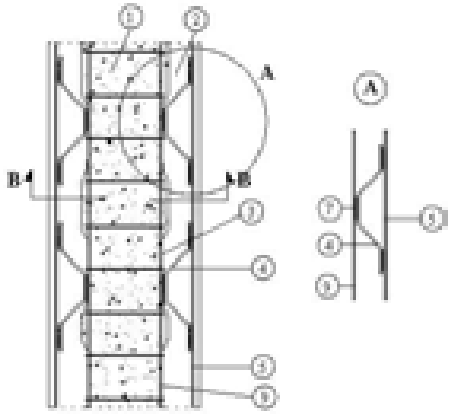
• Για την τεχνική τοπικής αποκατάστασης στην περιοχή της βλάβης, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β1.3.1 του [1], §5.4.1.1.2 του [3] για υποστυλώματα, και §Β1.4 του [1], §5.4.2.1 του [3] για τοιχώματα αντίστοιχα, καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-01-06-00 του [4].

• Για την τεχνική προσθήκης μανδύα Ο.Σ., βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β1.3.1 του [1], §5.4.1.2.2 του [3] για υποστυλώματα, και §Β1.4 του [1], §5.4.2.2.2 του [3] για τοιχώματα αντίστοιχα.

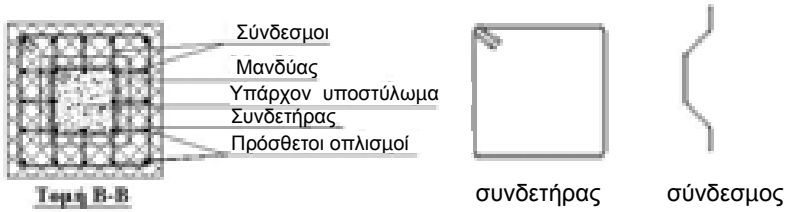


1. Παλιό σκυρόδεμα
2. Παλιό αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα
3. Νέο σκυρόδεμα
4. Παλιός λυγισμένος οπλισμός
5. Νέος οπλισμός
6. Νέοι συνδετήρες
7. Συγκόλληση
8. Παλιοί συνδετήρες
9. Παλιός οπλισμός
10. Προσωρινός ξυλότυπος

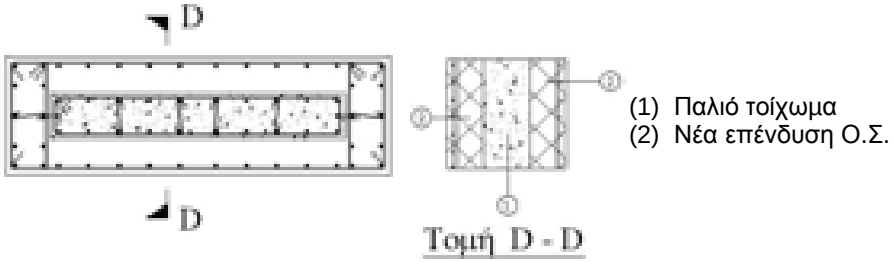
Σχήμα VI.14 Τοπική αποκατάσταση ίσης διατομής υποστυλώματος, σε περίπτωση πλήρους αποδιοργάνωσης της βλαβείσας περιοχής. [3]



1. Παλιό υποστύλωμα
2. Μανδύας
3. Χάντρωμα
4. Σύνδεσμοι
5. Πρόσθετος οπλισμός
6. Συνδετήρες
7. Συγκολλήσεις
8. Οκταγωνικοί συνδετήρες
9. Παλιοί οπλισμοί



Σχήμα VI.15 Ενίσχυση υποστυλώματος με προσθήκη μανδύα Ο.Σ.. [3]



Σχήμα VI.16 Ενίσχυση τοιχώματος με προσθήκη μανδύα Ο.Σ.. [3]

VI.4.2.4 Ιδιαίτερα προβλήματα πλακών/δοκών

VI.4.2.4.1 Μεγάλα παραμένοντα βέλη κάμψης (έως και ℓ/25) σε πλάκες και δοκούς:

Είναι αναγκαία είτε η καθαίρεση/ανακατασκευή των στοιχείων (όχι εύκολη, λόγω αναπόφευκτων πληγών στους παλιούς οπλισμούς), είτε η τοποθέτηση στρώσεων οπλισμένου λεπτοσκυροδέματος πάνω/κάτω, οπότε όμως τα πρόσθετα βάρη ενδέχεται να είναι σημαντικά.

VI.4.2.4.2 Εκτεθειμένοι/λυγισμένοι ή και κομμένοι οπλισμοί, μάλλον τοπικώς:

Εφαρμόζεται κοπή / ηλεκτροσυγκόλληση καί κάρφωμα των ράβδων οπλισμού (με βλήτρα/αγκύρια), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η σύνδεσή τους με το σκυρόδεμα.

Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Α4.3 του [1] και §7 του Παραρτήματος του [3], καθώς και στις ΠΕΤΕΠ: 14-01-10-01, 14-01-10-02 και 14-01-11-00 του [4].

Για τις ηλεκτροσυγκολλήσεις εφαρμόζεται ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων (ΚΤΧ 2008) [6], ενώ για την καλή συνάφεια του οπλισμού και του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κατάλληλα αστάρια και ειδικές κονίες (π.χ. με βάση το τσιμέντο).

VI.4.2.4.3 Πλάκες με νευρώσεις, μέ ή χωρίς κάτω πλάκα:

Τέτοιες καμμένες πλάκες με νευρώσεις, είναι πιο εύτρωτες στην πυρκαγιά, ενώ καί η επισκευή ή ενίσχυσή τους είναι πιο δύσκολη.

Συνήθως, εφαρμόζονται καθολικοί μανδύες στο κάτω πέλμα τους, αφού προηγηθεί η διάταξη (εμφάτνωση) και στερέωση νέων ελαφροσωμάτων πλήρωσης (από πολυστερίνη).

VI.5 ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

VI.5.1 Καμμένα βοηθητικά στοιχεία (κυρίως ξύλινα)

Είναι αναγκαία η αντικατάσταση ή υποκατάσταση υπερθύρων/ ξυλοδεσιών/ διαζωμάτων καμμένων ή με μεγάλες φθορές από φωτιά.

Σε πολλές περιπτώσεις ενσωματωμένων τέτοιων στοιχείων, η αντικατάσταση τους είναι δυσχερής, και απαιτεί ευρύτερες επεμβάσεις και ανακατασκευές σε σημαντικής έκτασης τμήματα των τοίχων.

• Για την τεχνική επισκευής ή κατασκευής διαζωμάτων, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §B3.6 του [1] και §6.5.6 του [3].

• Για την τεχνική επισκευής ή κατασκευής υπερθύρων, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §B3.6 του [1] και §6.5.7 του [3].

VI.5.2 Τοίχοι

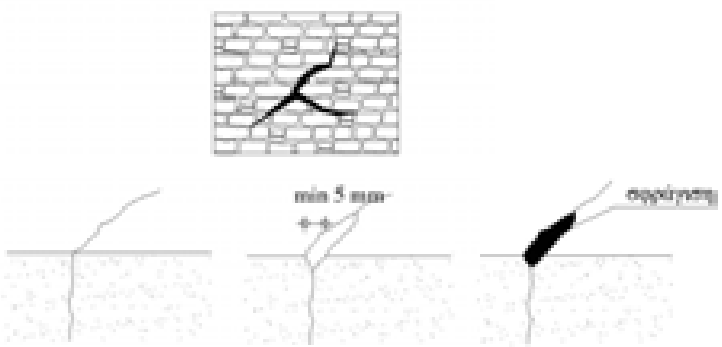
VI.5.2.1 Ρωγμές τοίχων:

Πραγματοποιείται σφράγιση ή/και πλήρωση (με ενέσεις), ή συρραφή των ρωγμών μέσα στο σώμα του τοίχου ή στα επιχρίσματα (αν υπάρχουν).

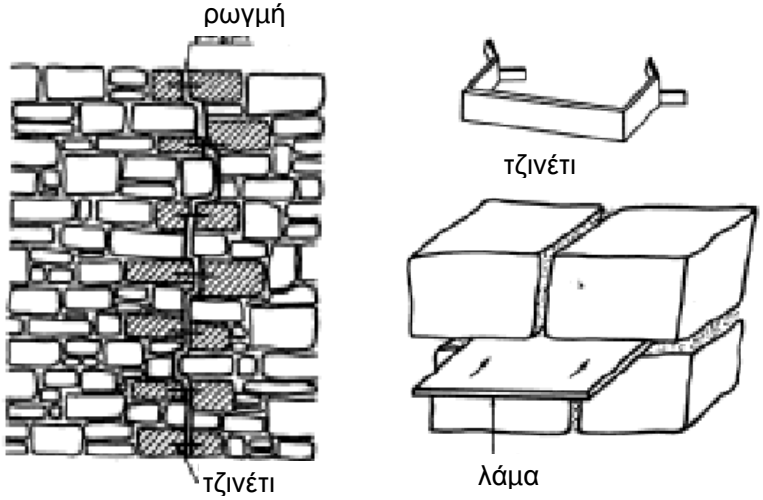
Η συρραφή μπορεί να γίνει είτε με υγιείς λίθους (που «γεφυρώνουν» την ρωγμή) είτε με κατάλληλα χαλύβδινα στοιχεία.

• Για απλή ρηγμάτωση τοίχων (άνοιγμα ρωγμών <5mm), βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §B3.2 του [1] και §6.6.1 του [3].

• Για έντονη ρηγμάτωση τοίχων, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §B3.3 του [1] και §6.5.3 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-02-05-02 του [4].



Σχήμα VI.17 Η τεχνική των τσιμεντενέσεων, η οποία εφαρμόζεται για απλή ρηγμάτωση τοίχων. [3]

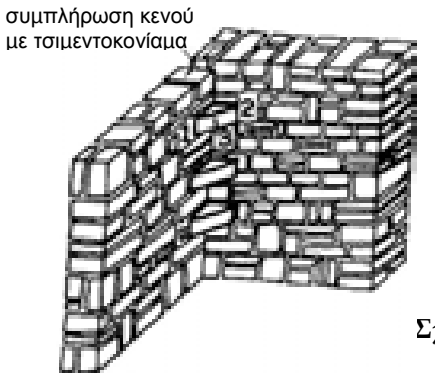


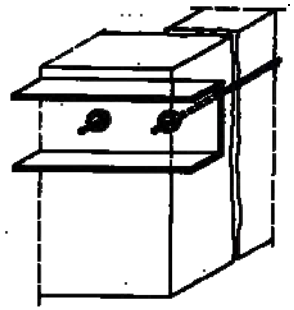
Σχήμα VI.18 Συρραφή ρωγμής με χαλύβδινα στοιχεία. [1]

VI.5.2.2 Αποσύνδεση εγκάρσιων τοίχων:

Είναι αναγκαία η «τυφλή» συρραφή (με εγκιβωτισμένα χαλύβδινα εμβόλια) των ρωγμών αποσύνδεσης, ίσως επιπλέον και η διάταξη ελκυστήρων (μέσα στο κτίριο) ή στοιχείων περίδεσης (απ' έξω, δίκην στεφανών).

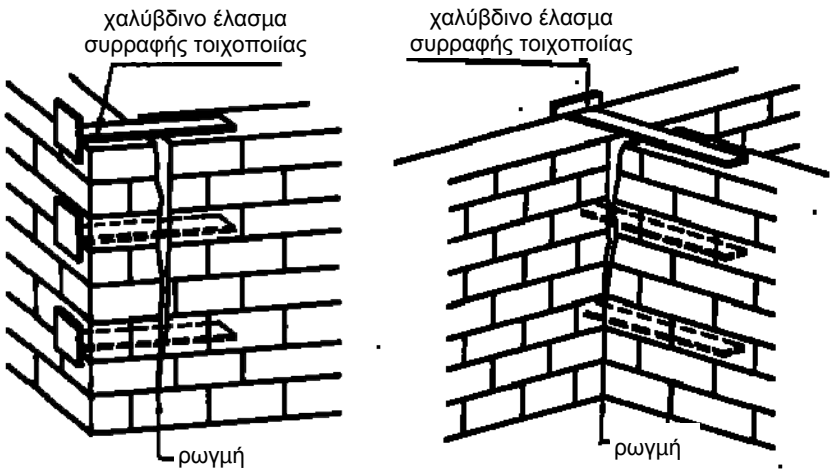
Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.5.2 του [1] και §6.5.5 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-02-05-01 του [4].





Σχήμα VI.21 Διάταξη ελκυστήρων.[1]

Σχήμα VI.19 Λιθοσυρραφή στη γωνία τοίχου. [1]



Σχήμα VI.20 Τοποθέτηση χαλύβδινων ελασμάτων στις γωνίες. [1]

VI.5.2.3 Πολλαπλές ή/και έντονες ρωγμές, βαριές βλάβες (αποδιοργάνωση της τοιχοποιίας):

(α) Τοποθέτηση ελαφρομανδυών (μέσα ή/και έξω) ή πλέγματος/εσχάρας «ζωνών ραφής» με συνδέσεις προς τους τοίχους, ίσως σε συνδυασμό με νέες λεπτές πλάκες από Ο.Σ..

(β) Τοποθέτηση εσωτερικού ελαφροσκελετού (Ο.Σ.) με συνδέσεις προς τους τοίχους, ίσως σε συνδυασμό με νέες λεπτές πλάκες από Ο.Σ..

(γ) Καθαίρεση/ανακατασκευή με ισχυρές συνδέσεις γύρω-γύρω (προς τους παραμένοντες τοίχους).

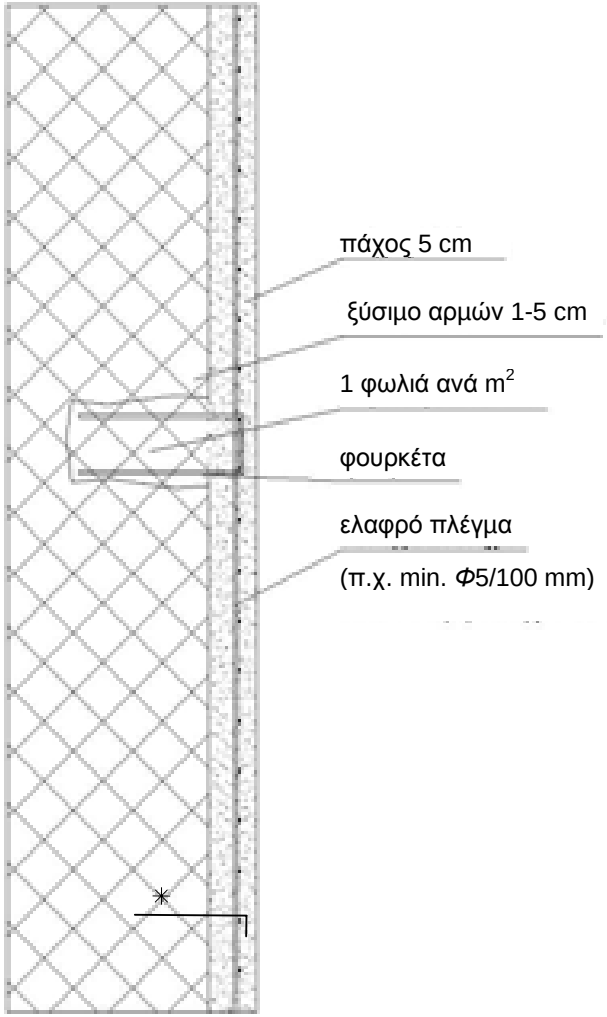
Για τις τεχνικές (α) και (β) ίσως είναι αναγκαία και η ομογενοποίηση της μάζας των τοίχων μέσω ενέσεων (τσιμέντου), κατά την σχετική τεχνική.

• Για την τεχνική της ενίσχυσης της τοιχοποιίας με μανδύες, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.7 του [1] και §6.5.8 του [3], καθώς και στις ΠΕΤΕΠ: 14-02-09-01 και 14-02-09-02 του [4].

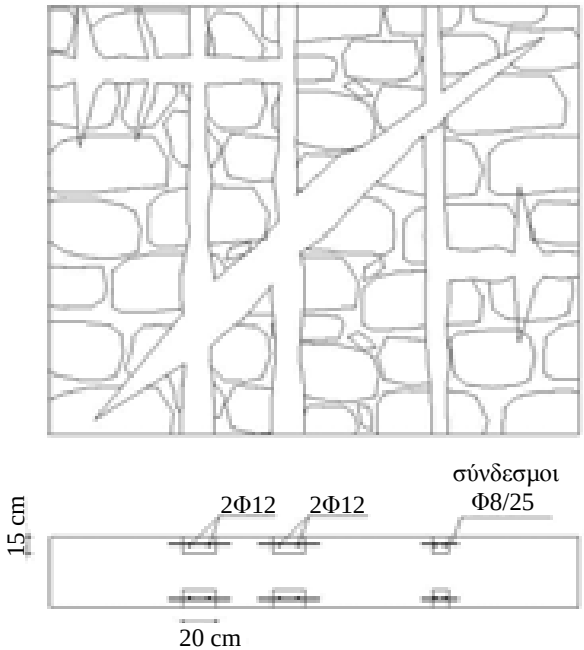
• Για την τεχνική των «ζωνών ραφής», βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.3 του [1] και §6.5.3 του [3], καθώς και στην ΠΕΤΕΠ: 14-02-05-02 του [4].

• Για την τεχνική της κατασκευής εσωτερικού σκελετού, βλ. αναλυτικότερα στην ενότητα §Β3.8 του [1].

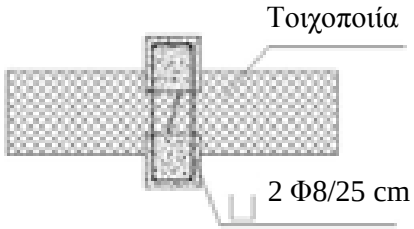
• Για την τεχνική των τσιμεντενέσεων σε τοίχους, βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β3.2 του [1] και §6.6.1 του [3].



Σχήμα VI.21 Ενίσχυση με ελαφρά οπλισμένο μανδύα από εκτοξευόμενο τσιμεντοκονίαμα (✳: πυκνή στερέωση, π.χ. καρφίδες 4/m² όψεως). [3]



Σχήμα VI.22 Οριζόντιες και κατακόρυφες ζώνες ραφής.[3]

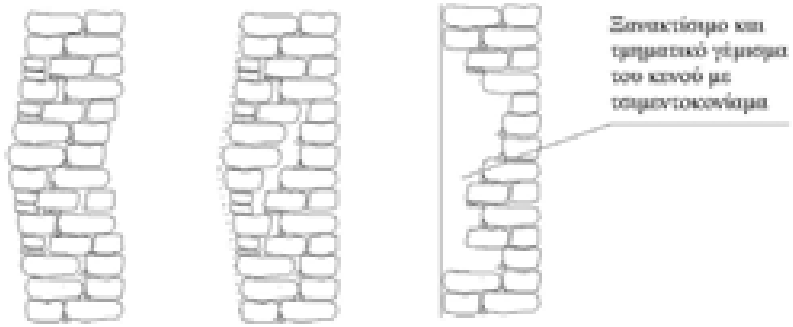


Σχήμα VI.23 Εξέχουσες ζώνες ραφής με ενδιάμεσες διαμπερείς συνδέσεις ανά αποστάσεις, π.χ. ανά 1m καθ' ύψος. [3]

VI.5.2.4 Εκτός επιπέδου μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις τοίχων (>75mm):

Είναι αναγκαία η καθαίρεση/ανακατασκευή, σπανίως δε και η διάταξη μόνιμων αντηρίδων (από λιθοδομή, σταθερής ή μεταβλητής καθ' ύψος διατομής).

Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.4 του [1] και §6.5.4 του [3].



Σχήμα VI.24 Τοπικό «καμπούριασμα» της τοιχοποιίας. [3]

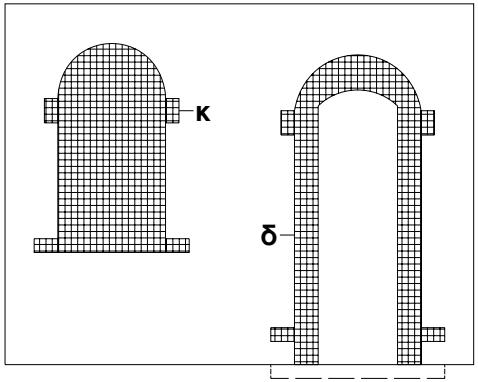
VI.5.2.5 Ιδιαίτερες περιπτώσεις και τοπικές επεμβάσεις:

(α) Για «τρίστρωτους» τοίχους, με έντονα «καμπουριάσματα», απαιτείται συνήθως καθαίρεση και ανακατασκευή.

(β) Πολλές φορές, απαιτείται κτίσιμο ανοιγμάτων, πλήρες ή μόνο προς ενίσχυση των ακμών.

(γ) Τέλος, στα ανοίγματα μπορεί να εφαρμοστεί και διάταξη κλειστών κατακόρυφων πλαισιωμάτων από Ο.Σ., με ισχυρή μόρφωση «κόμβων» στις γωνίες και ισχυρή σύνδεση προς τους τοίχους.

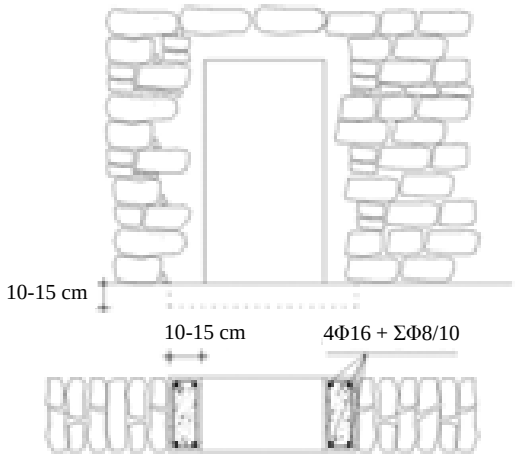
Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.6.(γ) του [1] και §6.5.7 του [3].



κ : κλειδιά (λίθινα ή χαλύβδινα), που «γεφυρώνουν»την διεπιφάνεια

δ : στη διεπιφάνεια, ίσως καί τυφλά εμβόλια ή/και τσιμεντένεση (στο τέλος)

Σχήμα VI.25 Κτίσιμο μεγάλων κουφωμάτων και εσοχών στο σώμα των τοίχων.



Σχήμα VI.26 Διάταξη κλειστών κατακόρυφων πλαισιωμάτων από Ο.Σ.. [3]

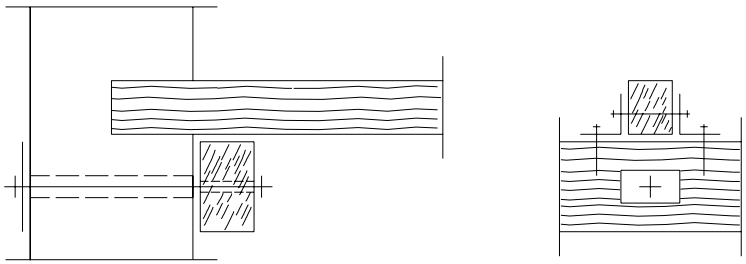
VI.5.3 Στέγες και πατώματα (βλάβες των ιδίων ή μόνο των στηρίξεών τους)

VI.5.3.1 Επεμβάσεις σε στοιχεία ξύλινα ή χαλύβδινα που δεν κάηκαν:

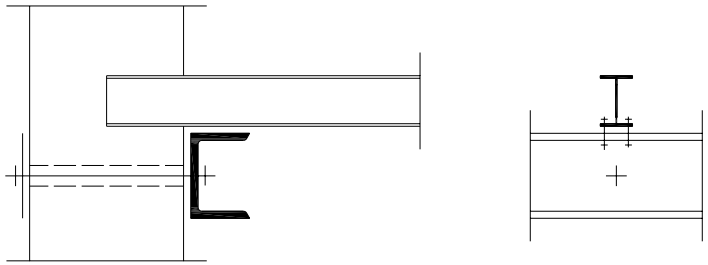
(α) Αναίρεση μέρους του βέλους κάμψης, μέσω υποστύλωσης και σφήνωσης.

(β) Αμμοβολή, συστηματικός καθαρισμός.

(γ) Εφαρμογή ενισχύσεων «κλασικών», όπως είναι οι ηλώσεις ή κοχλιώσεις νέων ξύλινων στοιχείων, οι ηλεκτροσυγκολλήσεις νέων χαλύβδινων στοιχείων κ.λπ..



Σχήμα VI.27 Ενίσχυση υγιών ξύλινων στοιχείων με πρόσθετα ξύλινα στοιχεία, αγκυρωμένα στους τοίχους. Δυνατότητα βελτίωσης της διαφραγματικής λειτουργίας.



Σχήμα VI.28 Ενίσχυση υγιών χαλύβδινων στοιχείων με πρόσθετα χαλύβδινα στοιχεία, αγκυρωμένα στους τοίχους. Δυνατότητα βελτίωσης της διαφραγματικής λειτουργίας.

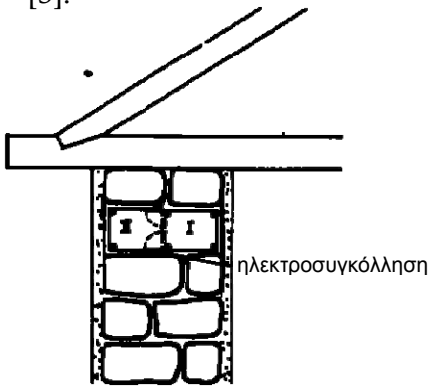
VI.5.3.2 Κατασκευή νέων «κύριων» διαζωμάτων (κλειστά οριζόντια πλαισιώματα):

Γενικώς, συνιστάται να είναι από Ο.Σ., και να διαθέτουν «κανονικές» (όχι υπερβολικές) διατομές σκυροδέματος και σιδηροπλισμών.

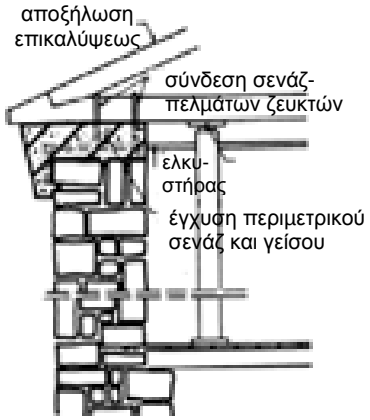
Στο πάνω μέρος των τοίχων (στη στέψη), συνιστάται να διατάσσονται διαζώματα με πάχος ίσο με το πλήρες πάχος των τοίχων, ενώ σε ενδιάμεσες στάθμες μπορούν να διαταχθούν κατά το ήμισυ (ή το όλο) πάχος τους, στο εσωτερικό (συνδεόμενα με τα πατώματα) ή στο εξωτερικό (δίκην κλειστού δακτυλίου).

Στο κάτω μέρος των τοίχων, στα θεμέλια, συνιστάται η διάταξη κλειστών πλαισιωμάτων δίκην «χαλινών», ίσως και με «όνυχες», ανά πυκνές αποστάσεις (π.χ. κάθε 2m).

Βλ. αναλυτικότερα στις ενότητες §Β.3.6 του [1] και §6.5.6 του [3].

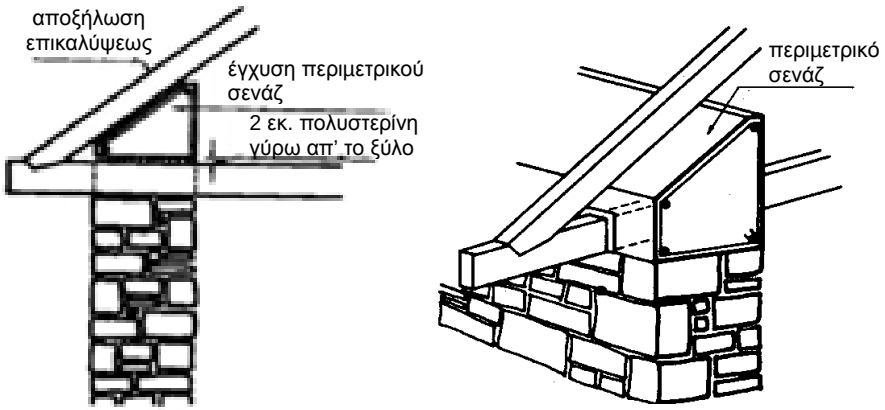


Σχήμα VI.29 Κατασκευή διαζώματος σε δύο φάσεις. [1]



Σχήμα VI.30 Σύνδεση ελκυστήρα στέγης με το διάζωμα. [1]

Σε όλες τις γωνίες των διαζωμάτων, επιβάλλεται η ισχυρή μόρφωση «κόμβου», με κατάλληλη όπλιση, ίσως με ηλεκτροσυγκολλήσεις (κατά ΚΤΧ 2008 [6]).



Σχήμα VI.31 Κατασκευή διαζώματος στο εσωτερικό της στέγης. [1]

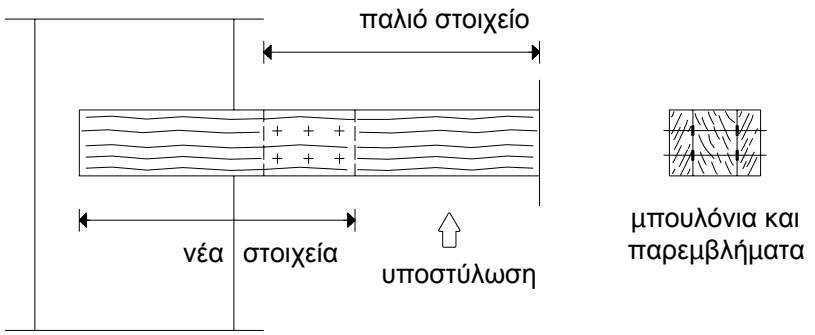
VI.5.3.3 Πλήρης καύση και κατάρρευση στέγης:

Είναι αναγκαία η πλήρης ανακατασκευή της στέγης, κατά τις προτάσεις για πυρομονωμένη στέγη της §VII.7 του παρόντος Πρακτικού Οδηγού.

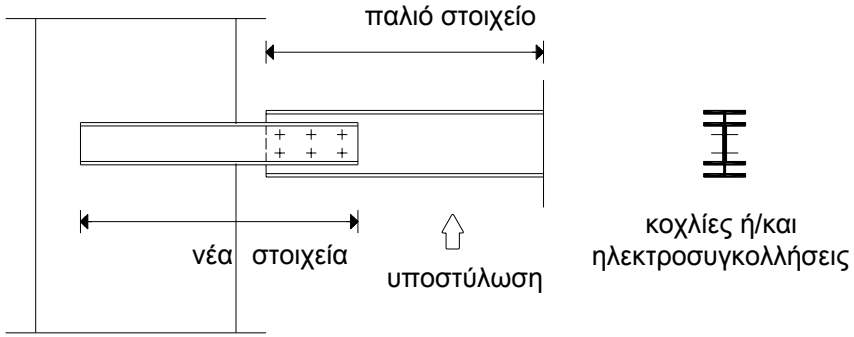
VI.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΞΥΛΟ Ή ΧΑΛΥΒΑ (δοκοί, σενάζ κ.λπ.)

VI.6.1 Βελτίωση εδράσεων/ αγκυρώσεων:

(α) Καθαίρεση και αντικατάσταση των βλαμμένων στηρίξεων: Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην εξασφάλιση των νέων στηρίξεων (προστασία, εξασφάλιση μονιμότητας και ανθεκτικότητας, υλοποίηση ισχυρού δεσμού με την τοιχοδομή). Η εξασφάλιση αυτή των συνδέσεων με τους τοίχους γίνεται με ειδικά ανοξείδωτα άγκιστρα ή με «φωλιές», «μουστάκια» και ειδικά έγχυτα κονιάματα.



Σχήμα VI.32 Καθαίρεση-αντικατάσταση βλαμμένων στηρίξεων από ξύλο.

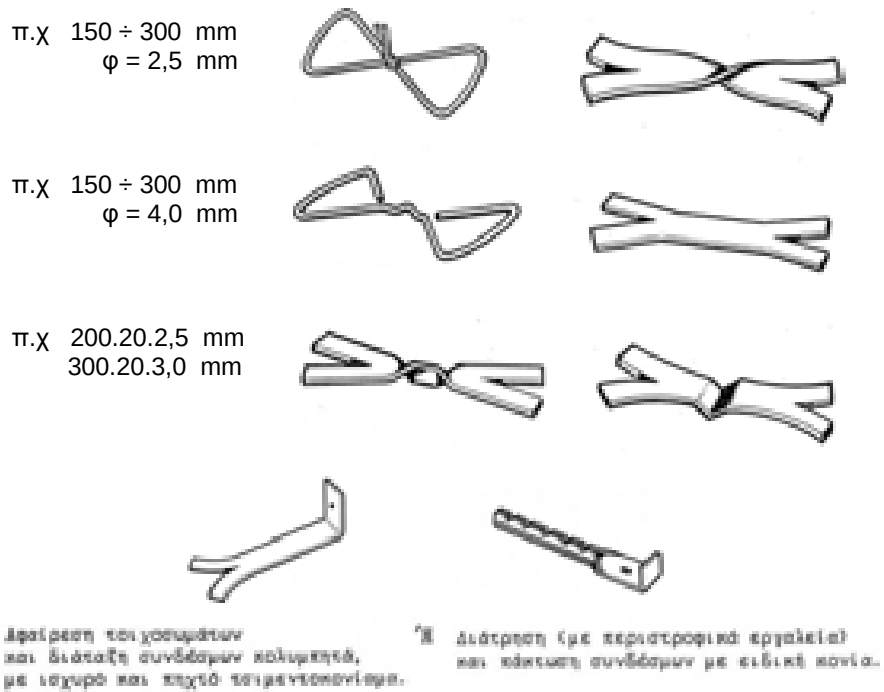


Σχήμα VI.33 Καθαίρεση-αντικατάσταση βλαμμένων στηρίξεων από χάλυβα.

(β) <u>Ενίσχυση υγιών στηρίξεων με πρόσθετα στοιχεία:</u>
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην εξασφάλιση των νέων στοιχείων (προστασία, εξασφάλιση μονιμότητας και ανθεκτικότητας, υλοποίηση δεσμού με την τοιχοδομή με διαμπερείς συνδέσεις κατ' αποστάσεις και σφίγξιμο μέχρις αρνήσεως) και στην σύνδεσή τους με τα παλιά στοιχεία.

Εναλλακτικά, τα νέα στοιχεία (ξυλοδοκοί ή σιδεροδοκοί) μπορούν να συνδεθούν με την τοιχοδομή, σε περίπτωση τοίχων με καλή δόμηση και σε καλή κατάσταση, μέσω ειδικών ανοξείδωτων συνδέσμων.

Τα σχήματα που αφορούν την μέθοδο ενίσχυσης υγιών στηρίξεων με πρόσθετα στοιχεία, έχουν ήδη παρατεθεί στην §VI.5.3.1 (βλ. Σχήμα VI.27 και VI.28).



Σχήμα VI.34 Ειδικοί ανοξείδωτοι σύνδεσμοι (ενσωμάτωση στις τοιχοδομές).

VI.6.2 Προστασία με πυράντοχες επιχρίσεις - βαφές:

Τα ξύλινα και χαλύβδινα στοιχεία μπορούν να προστατευθούν έναντι πυρκαγιάς με ειδικές διογκούμενες πυράντοχες επιχρίσεις και βαφές (πάχους π.χ. 0,1mm έως και 2,5mm).

Η αποτελεσματικότητα τέτοιων υλικών είναι αμφιλεγόμενη, και έτσι οι λεπτομέρειες εφαρμογής τους και ο προσφερόμενος βαθμός πυροπροστασίας πρέπει, κατά περίπτωση, να εξετάζονται και να αποφασίζονται με την βοήθεια υπεύθυνου ειδικού.

VI.7 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΕΜΠ, "Συστάσεις για τις επισκευές κτιρίων βλαμμένων από σεισμό", Αθήνα, 1978.

[2] ΟΑΣΠ, "Άρση επικινδυνοτήτων, προσωρινές υποστυλώσεις - αντιστηρίξεις", Αθήνα, 2000.

[3] ΟΑΣΠ, "Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια", Αθήνα, 2001.

[4] ΙΟΚ, "Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)", Ενότητα 14: Έργα αποκατάστασης ζημιών κατασκευών, 2008.

[5] ΟΑΣΠ - ΣΠΜΕ, "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 (ΕΑΚ)".

[6] ΚΕΔΕ, "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ)", 2008.

VII. ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΟΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ, ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ, ΔΟΜΙΚΗΣ) ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

VII.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όσα ακολουθούν σε αυτό Κεφάλαιο, αφορούν κυρίως νέα μικρά κτίρια σε οικισμούς ή πλήρεις ανακατασκευές μετά από πυρκαγιά.

Πολλά, όμως, από τα θέματα που παρουσιάζονται στα επόμενα, μπορούν να ληφθούν υπόψη καί κατά τις διαδικασίες επισκευής και ενίσχυσης μετά από πυρκαγιά, έτσι ώστε να βελτιωθεί η πυραντίσταση των κτιρίων και να μειωθεί η πυροτρωτότητά τους, τόσο έναντι εξωτερικής όσο και έναντι εσωτερικής πυρκαγιάς.

VII.1.1 Πυραντίσταση

Ως «πυραντίσταση» ορίζεται ο χρόνος σε πρώτα λεπτά (min) «αντίστασης» στις συνέπειες της πυρκαγιάς, η οποία χαρακτηρίζεται από καμπύλη T – t (π.χ. κατά ISO, DIN κ.λπ.).

Ο υπόψη χρόνος αντίστασης, ορίζεται ως δείκτης πυραντίστασης (ΔΠ, π.χ. F30).

Σχετικώς, κατά την πυρκαγιά, πρέπει να ικανοποιούνται τρία (3) κριτήρια :

1. Φέρουσα ικανότητα (ή «ευστάθεια»), "R„ , μή-κατάρρευση, μή-υπέρβαση οριακής κατάστασης αστοχίας ή λειτουργικότητας.

2. Πυρο- (ή θερμο-) μονωτική ικανότητα (ή «μόνωση»), "I„ , αντίσταση στη διάβαση θερμότητας (ανάπτυξη θερμοκρασίας στην μή - εκτεθειμένη πλευρά $T < 140$ ή $180 \div 220$ ^{o}C).

3. Ακεραιότητα, "E„, αντίσταση στη διάβαση φλόγας, καπνού, καυσαερίου κ.λπ. μέσα από ρωγμές, αρμούς, διάκενα κ.λπ..

Το Κριτήριο 1 (R) εξασφαλίζει αυτά καθ' εαυτά τα προσβαλλόμενα στοιχεία, ενώ τα Κριτήρια 2 και 3 (I + E) διασφαλίζουν τη μή-μετάδοση και μή-εξάπλωση της πυρκαγιάς (λειτουργία διαχωρισμού), σε άλλους χώρους ή άλλα πυροδιαμερίσματα (ΠΔ).

Απαιτούνται διάφορες δοκιμές λύσεων για την εξασφάλιση της πυραντίστασης υλικών, στοιχείων, προϊόντων κ.λπ., έτσι ώστε τα κριτήρια να ικανοποιούνται ταυτοχρόνως, στο μέτρο του εφικτού.

VII.1.2 Άκαυστα υλικά

Ως άκαυστα ορίζονται τα υλικά που πληρούν τα κριτήρια της δοκιμασίας ακαυστότητας (κατά τους Κανονισμούς), ή αυτά που δεν καίγονται και δεν αποδίδουν εύφλεκτα αέρια σε ποσότητα αρκετή για αυτανάφλεξη, ακόμη και όταν θερμανθούν σε θερμοκρασία περίπου 750 ^{o}C.

Συνήθη άκαυστα υλικά είναι τα εξής :

- Αδρανή (άμμος, χαλίκια, σκύρα κ.λπ.), κίσσηρις, πηλός, άργιλος, φυσικές ποζολάνες (π.χ. θηραϊκή γη)
- Υλικά από πετρώματα ή ορυκτά, με όπτηση ή διόγκωση, τσιμέντο, ασβέστης, γύψος, περλίτης, μπεντονίτης, βερμικουλίτης, σκωρίες, τεχνητές ποζολάνες (π.χ. ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη)
- Κονιάματα και σκυροδέματα, φυσικοί (ή τεχνητοί) λίθοι, πλάκες κ.λπ.
- Πετροβάμβακας, υαλοβάμβακας, με ανόργανα συγκολλητικά υλικά
- Κεραμικά, πλίνθοι και τούβλα, γυαλί
- Μέταλλα και κράματα, όχι σε λεπτό καταμερισμό (βλ. τα περί σκόνης μετάλλων στην §VII.1.3).

VII.1.3 Καύσιμες σκόνες (κόνεις) μετάλλων (κ.ά.)

Σκόνες διαφόρων μετάλλων (και άλλων υλικών), σε νέφος (αιωρούμενα σωματίδια) ή σε στρώμα (πάνω σε στερεά υλικά), παρουσιάζουν κίνδυνο ανάφλεξης καί έκρηξης, υπό υψηλές θερμοκρασίες.

Ως πλέον επικίνδυνες κόνεις, με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ανάφλεξης (σε νέφος ή σε στρώμα), αναφέρονται αυτές που φαίνονται στον Πίνακα VII.1.

Πίνακας VII.1 Θερμοκρασίες ανάφλεξης κόνεων μετάλλων.

ΥΛΙΚΟ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ, ^{o}C
Κασσίτερος	250 (÷ 20)
Μαγνήσιο	550 ÷ 450
Αλουμίνιο	650 ÷ 750
Ζάχαρη (άχνη)	375 ÷ 400
Άμυλα δημητριακών	400 ÷ 425

VII.1.4 Πυραντίσταση μικρών κτιρίων-κατοικιών

Όσα αναφέρονται στα επόμενα, αφορούν κυρίως μικρά κτίρια κατοικιών, με κάτοψη < 150 m^2 και 1 ή 2 ορόφους. Γι' αυτά τα κτίρια, προτείνονται οι επόμενοι δείκτες πυραντίστασης, αναλόγως του είδους των στοιχείων ή των χώρων τους (ΠΔ = πυροδιαμέρισμα) :

- Φέροντα στοιχεία και στοιχεία του κελύφους (ΠΔ) : min. F30
- Στοιχεία και τοίχοι που διαχωρίζουν ιδιοκτησίες ή χρήσεις : min. F60
- Υπόγειο (αν υπάρχει) : min. F60, και ξεχωριστό ΠΔ (!)
- Επικίνδυνοι χώροι (αν υπάρχουν) : min. F60, και ξεχωριστό ΠΔ (!)

Ως επικίνδυνοι χώροι, ή χώροι υψηλού βαθμού κινδύνου πυρκαγιάς, μπορούν να ορισθούν οι εξής :

- Χώροι με πυκνότητα καύσιμου φορτίου ΙΒΚΞ > 100 kg/m^2 ή q_f > 2000 MJ/m^2 (περίπου).
- Χώροι με υλικά με υψηλή αναφλεξιμότητα ή/και υψηλή ταχύτητα επιφανειακής εξάπλωσης της φλόγας
- Ή και κίνδυνο έκρηξης.

Έτσι, για τα υπόψη μικρά κτίρια, ο ελάχιστος προτεινόμενος δείκτης πυραντίστασης είναι F30 (30 min).

VII.2 ΠΥΡΟΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ (ΠΔ), ΠΥΡΟΦΡΑΓΜΟΙ (ΠΦ)

Βασική τους λειτουργία είναι η μή-μετάδοση φωτιάς από χώρο σε χώρο, καθώς και η μή-μετάδοση έξω/μέσα ή μέσα/έξω, η μή-εξάπλωση ή γενίκευση της πυρκαγιάς. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζονται, οι ακόλουθοι ορισμοί:

ΠΔ : Τμήμα κτιρίου (ή ολόκληρο κτίριο), που περικλείεται από δομικά στοιχεία κάθε είδους, με ελάχιστο απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης, κατά περίπτωση.

ΠΦ : Φραγή αρμών, διακένων κ.λπ. ή ειδική κατασκευή, με άκαυστα υλικά, προς διασφάλιση της «ακεραιότητας» έναντι φωτιάς δηλ. της μή-διάβασης φλόγας, καπνού, καυσαερίων κ.λπ..

Στα επόμενα, δίνονται σχετικές προβλέψεις κατά τους Κανονισμούς (π.χ. Π.Δ. 71/1988 [1] και DIN 4102/1977 - 1981 [2]), γενικώς και ειδικώς για στέγες/δώματα.

i) Εξωτερικοί τοίχοι κτιρίων (βλ. Άρθρο 3 του [1])

Ο Πίνακας VII.2 ισχύει για κανονικά κτίρια, ενώ για «επικίνδυνα» από άποψη πυρκαγιάς κτίρια η απόσταση διπλασιάζεται.

- Η κατηγορία υλικών και τελειωμάτων ορίζεται με βάση τη δοκιμασία επιφανειακής εξάπλωσης της φλόγας (βλ. Π.Δ. 71/1988 [1]).
- Κουφώματα με δείκτη πυραντίστασης min. F15 (15 min), υπολογίζονται με τη μισή επιφάνειά τους (για το επιτρεπόμενο ποσοστό).
- Ως «πλήρης» πυραντίσταση θεωρείται η απαιτούμενη για τοίχο ΠΔ, κατά περίπτωση.

Πίνακας VII.2 Απαιτήσεις πυρασφάλειας εξωτερικών τοίχων κανονικού κτιρίου. [1]

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΟΙΧΟΥ ΑΠΟ ΔΙΠΛΑΝΟ ΚΤΙΡΙΟ Ή ΑΠΟ ΟΡΙΟ ΟΙΚΟΠΕΔΟΥ			
	≤ 3 m	3 ÷ 5 m	5 ÷ 10 m	≥ 10 m
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΕΞΩΤ. ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	Άκαυστα	1,2	3	3
ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΟ (%) ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ	≤ 15	≤ 25	≤ 50	≤ 80
ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΞΩΤ. ΤΟΙΧΟΥ	Πλήρης	Πλήρης	Μισή	—

ii) **<u>Εξωτερικοί τοίχοι ομόρων κτιρίων</u>** (βλ. Άρθρο 3 του [1])

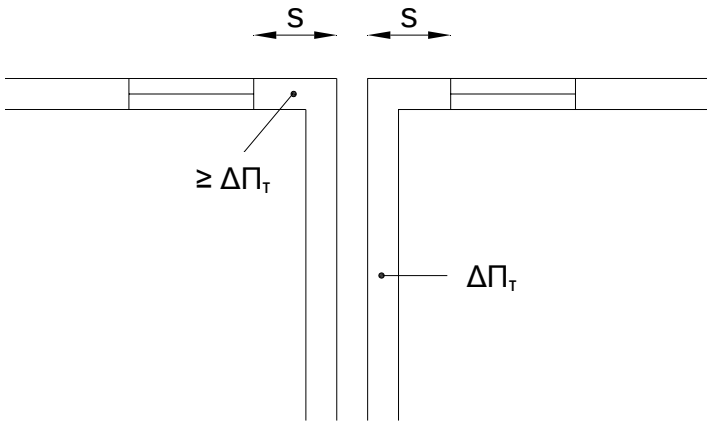
ii.1) Για γωνία = 180°, απαιτείται $s \geq 0{,}7$ m.

Καθένας από τους δύο σε επαφή τοίχους ομόρων κτιρίων πρέπει να έχει δείκτη πυραντίστασης τον απαιτούμενο για το πυροδιαμέρισμα του κτιρίου στο οποίο ανήκει.

Οι εξωτερικοί τοίχοι από τη μια και την άλλη μεριά ενός διαχωριστικού τοίχου ομόρων κτιρίων και σε μήκος 0,7m (συμπεριλαμβανομένου και του πάχους του διαχωριστικού τοίχου) πρέπει:

α) Να μην έχουν κανένα άνοιγμα

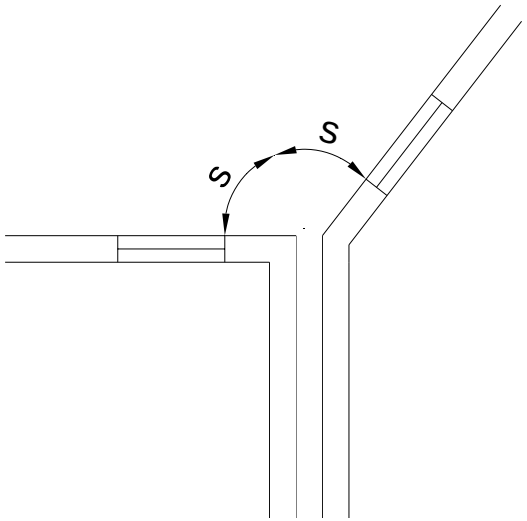
β) Να έχουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον ίσο προς τον απαιτούμενο για τον αντίστοιχο διαχωριστικό τοίχο.



Σχήμα VII.1 Εξωτερικοί τοίχοι ομόρων κτιρίων, με γωνία = 180°.

ii.2) Για γωνία ≠ 180°, απαιτείται $s \geq 1{,}1$ m.

Στην περίπτωση που η γωνία των εξωτερικών τοίχων ομόρων σε επαφή κτιρίων είναι διάφορη των 180° (κοίλη ή κυρτή), το μήκος τόξου κύκλου με κέντρο την κορυφή της γωνίας και ακτίνα οριζόμενη από το πλησιέστερο σημείο κουφώματος μέχρι τη διχοτόμο της γωνίας, πρέπει να μην είναι μικρότερο του 1,1m.



Σχήμα VII.2 Εξωτερικοί τοίχοι ομόρων κτιρίων, με γωνία ≠ 180°.

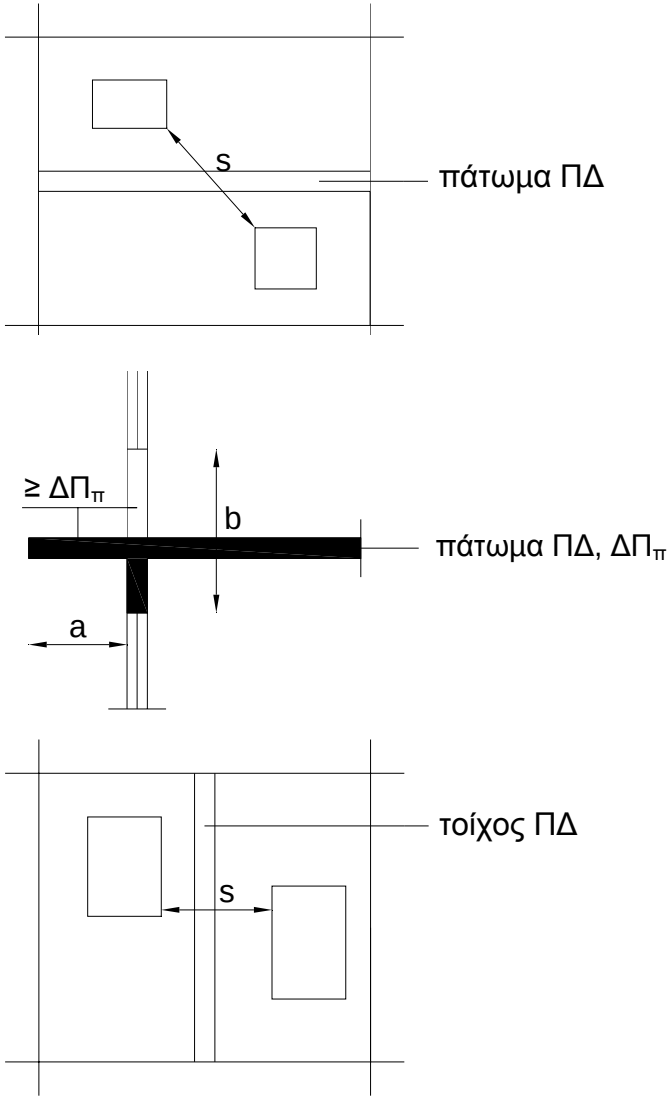
iii) <u>Εξωτερικοί τοίχοι διαφορετικών ΠΔ</u> (βλ. Άρθρο 3 του [1])

Στο ίδιο κτίριο, απαιτείται $s \geq 1{,}4$ m ή $a + b \geq 1{,}4$ m.

Η απόσταση (s) ανοιγμάτων σε εξωτερικές τοιχοποιίες, που ανήκουν σε διαφορετικά πυροδιαμερίσματα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,4m.

Η ίδια ελάχιστη απόσταση ισχύει και για την περίπτωση υπερκειμένων πυροδιαμερισμάτων, μεταξύ του ανώτερου σημείου του κάτω ανοίγματος και του κατώτερου σημείου του επάνω ανοίγματος, προσμετρούμενης και της προεξοχής που παρεμβάλλεται (δηλαδή πρέπει: $a+b \geq 1{,}4$m).

Στην τελευταία περίπτωση, ο τοίχος που παρεμβάλλεται καθώς και η προεξοχή πρέπει να έχουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον ίσο με τον απαιτούμενο για το πάτωμα του πυροδιαμερίσματος.



Σχήμα VII.3 Εξωτερικοί τοίχοι διαφορετικών ΠΔ, στο ίδιο κτίριο. [1]

iv) <u>Δυνατότητες μετάδοσης πυρκαγιάς σε γειτονικά κτίρια, απ' τις στέγες</u>

α : Μεταφορά θερμότητας, ακτινοβολία

β : Σπίθες και καιόμενα υλικά που παρασύρονται απ' τον άνεμο

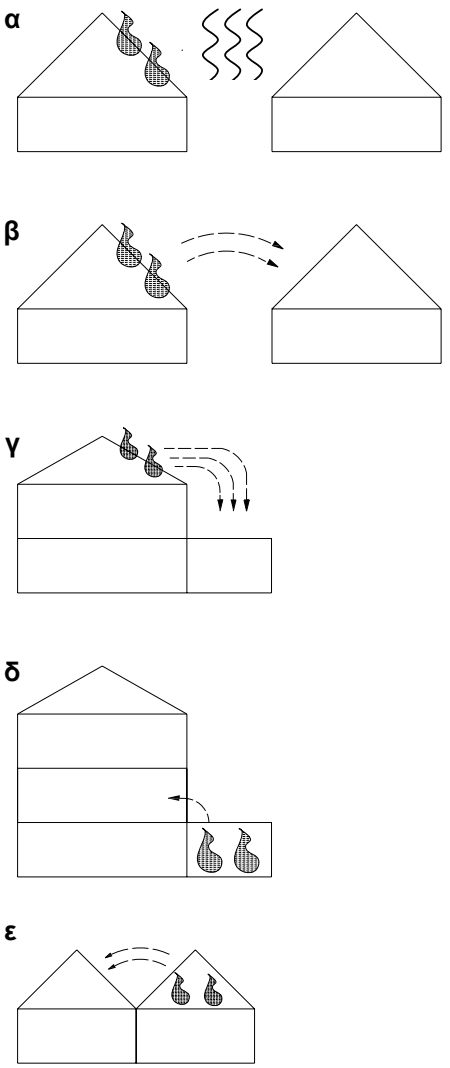
γ : Σπίθες και καιόμενα υλικά που εκτινάσσονται και πέφτουν

δ : Μετάδοση προς (ή από) διπλανούς τοίχους με ανοίγματα

ε : Μετάδοση τύπου α ÷ δ, σε διπλανά κτίρια με στέγες

Έναντι αυτών των φαινομένων (α÷ε), γενικώς απαιτούνται «σκληρές» (όπως αναφέρονται) επικαλύψεις στεγών και δωμάτων.

Μόνο για «απομονωμένα» κτίρια, σε ικανή απόσταση από τα όρια του οικοπέδου και τα διπλανά κτίρια, επιτρέπονται «μαλακές» επικαλύψεις.

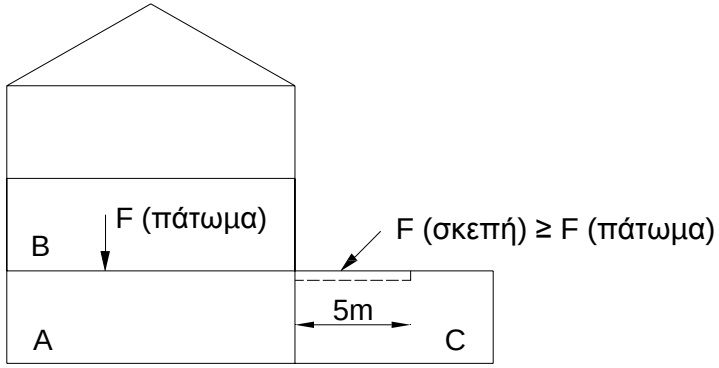


Σχήμα VII.4 Δυνατότητες μετάδοσης πυρκαγιάς σε γειτονικά κτίρια, απ' τις στέγες.

Έναντι του φαινομένου «δ» (βλ. πριν, κατά DIN)

Απαίτηση ελάχιστης πυροπροστασίας στεγών/δωμάτων χαμηλών κτιρίων, δίπλα σε υψηλά κτίρια, με τοίχους και παράθυρα.

Ο δείκτης πυραντίστασης μεταξύ των χώρων C και B πρέπει να είναι μεγαλύτερος του δείκτη πυραντίστασης μεταξύ των χώρων A και B.



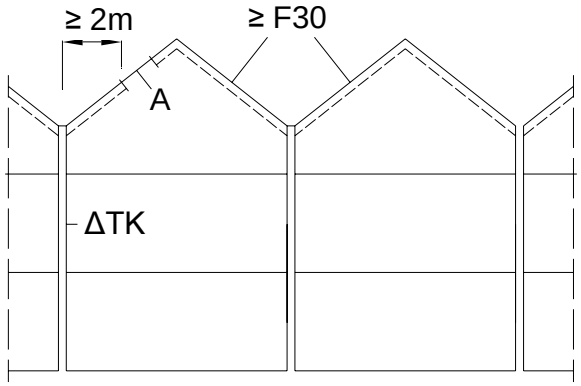
Σχήμα VII.5 Μέτρα έναντι του φαινομένου «δ».

Έναντι του φαινομένου «ε» (βλ. πριν, κατά DIN)

Απαίτηση ελάχιστης πυροπροστασίας μεταξύ διαδοχικών κεκλιμένων στεγών (ή και δωμάτων) διπλανών κτιρίων.
Μή-πρόωρη ανάφλεξη διπλανών στεγών, μή-εξάπλωση της φωτιάς.

ΔΤΚ : Διαχωριστικοί τοίχοι κτιρίων ή μεσοτοιχίες

Α : Άνοιγμα στέγης, π.χ. φεγγίτης σοφίτας



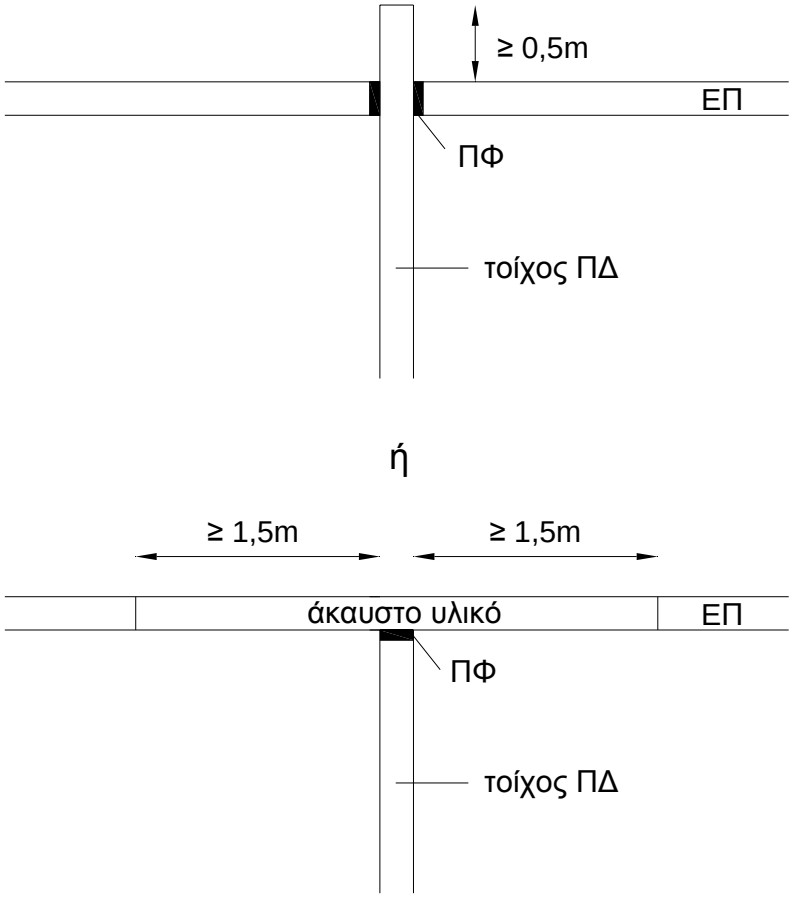
Σχήμα VII.6 Μέτρα έναντι του φαινομένου «ε».

ν) Μή-μετάδοση / εξάπλωση φωτιάς σε στέγες/δώματα
(σε εξωτερικά ή εσωτερικά ΠΔ)

Απαιτείται η λήψη μέτρων κατά το Σχήμα VII.7, όπου:

ΕΠ : Επικάλυψη στέγης/δώματος,

ΠΦ : Πυροφραγμός.



Σχήμα VII.7 Μέτρα έναντι της μετάδοσης/εξάπλωσης φωτιάς σε στέγες/δώματα.

VII.3 ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Κατά την πυρκαγιά (εξωτερική ή εσωτερική), όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα και η θερμοχωρητικότητα (θερμική ικανότητα) των τοίχων και των λοιπών στοιχείων του κελύφους των κτιρίων, τόσο καλύτερη είναι η απόκρισή τους.

Έτσι, συνιστώνται αυξημένα πάχη και αυξημένες διατομές των δομικών στοιχείων, καθώς και περιορισμός των κάθε είδους ανοιγμάτων των τοίχων, των στεγών, των δωμάτων κ.λπ., κατά το Σχήμα VII.8.

Γενικώς, για εξωτερικούς τοίχους, καθώς και για τοίχους πυροδιαμερισμάτων, τα απαιτούμενα πάχη για επαρκή θερμοχωρητικότητα είναι αρκετά μεγαλύτερα απ' αυτά που ορίζονται ως ελάχιστα για την επίτευξη συγκεκριμένου δείκτη πυραντίστασης, π.χ. κατά το Παράρτημα Α του Κανονισμού Πυροπροστασίας (Π.Δ. 71/1988) [1].

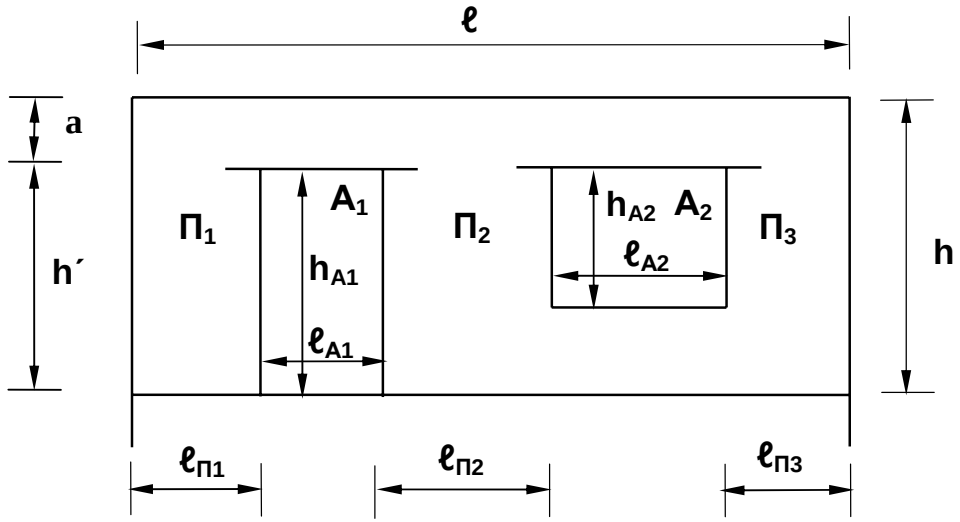
<u>Γεωμετρία τοίχων κελύφους</u> (φερόντων ή μή)

α) **<u>Πάχος τοίχου</u>** (βλ. και Σημειώσεις στην σελίδα 239)
Αναλόγως και των «ενεργών» περιμετρικών στηρίξεων
$t > \sqrt{h \cdot \ell} / 30$ και $t > \ell / 45$

β) **<u>Ανώφλια</u>**
$a > 0{,}50\,m$ και $a > 3/8\,(\ell_{A1} + \ell_{A2})$

γ) **<u>Μήκη πεσσών</u>**
$\ell_{\Pi i} > 0{,}75\,m$ και $\ell_{\Pi 2} > 1/2\,(h_{A1} + h_{A2})$

δ) **<u>Ανοίγματα</u>** (βλ. και Σημειώσεις στην σελίδα 239)
$A_i < 0{,}10\,(h \cdot \ell)$ και $\Sigma A_i < 0{,}25\,(h \cdot \ell)$



Σχήμα VII.8 Γεωμετρία τοίχων κελύφους.

<u>Σημειώσεις</u> :

(i) Για το ελάχιστο πάχος πλινθοδομών, φερουσών ή μή, ισχύουν καί οι σχετικές διατάξεις του Κανονισμού Πυροπροστασίας (Παράρτημα Α, δείκτης πυραντίστασης δομικών στοιχείων) [1], για F30 ή F60, αναλόγως του τύπου των τοιχοποιιών και της ύπαρξης ή μή επιχρίσματος (~ 15 mm), με εξασφαλισμένη πρόσφυση (βλ. §VII.4).

(ii) Για κάθε πυροδιαμέρισμα (ΠΔ), ορίζεται ο «συντελεστής» ανοιγμάτων («συντελεστής» αερισμού, f), ως εξής :

$$f = \Sigma A_i \sqrt{h_{Ai}} \quad \left(m^{5/2}\right),$$

όπου το άθροισμα περιλαμβάνει όλα τα ανοίγματα, με εμβαδό A_i και ύψος h_{Ai} (βλ. Σχήμα VII.8).

Ο «συντελεστής» αυτός, συνδέεται αμέσως με την εισροή αέρα/οξυγόνου και την καύση των υλικών εντός του πυροδιαμερίσματος.

Σχετικώς, έχει αποδειχθεί ότι για το ενδιάμεσο στάδιο της ανάπτυξης των (εσωτερικών) αερο-ελεγχόμενων πυρκαγιών, οπότε εμπειρικώς καίγεται περίπου το 60 % των καύσιμων υλικών, ο ρυθμός / η ταχύτητα καύσεως εξαρτάται από τον «συντελεστή» αερισμού, ως εξής :

$$\upsilon\left(\text{kg/min}\right) \approx 5 \div 6\, f \left(m^{5/2}\right).$$

Αναφέρεται πως, για την καύση 1 kg ξύλου απαιτούνται περίπου 4 m^3 αέρα, ενώ από την καύση 1 kg ξύλου παράγονται περίπου 5 m^3 αερίων.

Ο συντελεστής αερισμού, μπορεί να ορισθεί και ως εξής :

$A_o = \Sigma A_i$, $h_o = \Sigma A_i \,.\, h_{Ai} : A_o$ («μέσο» ύψος), οπότε $f = A_o \sqrt{h_o} \quad \left(m^{5/2}\right)$.

Κατά περίπτωση, μπορεί να ορισθεί και ο ανηγμένος συντελεστής αερισμού, ως :

$$f_n = A_o \sqrt{h_o} \;:\; A_t \quad \left(m^{1/2}\right),$$

όπου A_t είναι το συνολικό εμβαδό του εσωτερικού του πυροδιαμερίσματος.

VII.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ (ΦΟ) ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΠΛΗΡΩΣΕΩΣ (ΟΠ)

Για τον δείκτη πυραντίστασης (ΔΠ, π.χ. F30) διαφόρων δομικών στοιχείων, φερόντων ή μή, από Ο.Σ. ή τοιχοποιία (κυρίως πλινθοδομές), με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πάχη, διατομές, επικαλύψεις, επιχρίσματα κ.λπ.), βλ. και τις διατάξεις του Κανονισμού Πυροπροστασίας (Παράρτημα Α) [1].

Σχετικώς, ιδιαιτέρως θετικός είναι ο ρόλος των κάθε είδους επιχρισμάτων, γενικώς μικρού πάχους και με εξασφαλισμένη πρόσφυση (όχι πρόωρη αποκόλληση και κατάπτωση).

Αρκετά καλή συμπεριφορά στην πυρκαγιά έχουν διάφορα γυψοκονιάματα ή σύγχρονα έτοιμα ελαφροκονιάματα (π.χ. από διογκωμένο περλίτη ή περλίτη και γύψο, με πυκνότητα 500÷1000 kg/m^3), ακόμη και σε μια μόνον στρώση (για πορώδεις επιφάνειες), που «ισοδυναμούν» με καλό σκυρόδεμα.

Για μεγαλύτερα πάχη επιχρισμάτων (> 15÷20 mm), συνιστάται διάταξη οπλισμού, επιδερμικού, από γαλβανισμένο κοτετσόσυρμα ή κουνελόσυρμα (και όχι από υαλοϋφάσματα και πλέγματα ή πλαστικές ίνες κ.λπ.), τεντωμένο και καρφωμένο με μηχανικά μέσα.

Για την <u>πυραντίσταση των στοιχείων από Ο.Σ.</u>, ιδιαίτερη σημασία έχει η επικάλυψη των κάθε είδους οπλισμών, των εγκαρσίων και – κυρίως – των διαμήκων.

Σχετικώς, επιτρέπεται να συνυπολογίζεται στην επικάλυψη (με σκυρόδεμα) το πάχος λεπτών επιχρισμάτων (< 15 mm) ή παχύτερων οπλισμένων επιχρισμάτων (> 20 mm), με μηχανική στερέωση, κατά τα προηγούμενα.

Για την <u>πυραντίσταση των στοιχείων του ΟΠ ή των στοιχείων από τοιχοποιία</u>, ιδιαίτερη σημασία έχει το είδος των λιθοσωμάτων, τα κάθε είδους επιχρίσματα (κατά τα προηγούμενα), καθώς και τα διάφορα ενσωματωμένα στοιχεία, τα διαζώματα, τα πρέκια, οι στρωτήρες κ.λπ..

Σχετικώς, οι σκληροί/συμπαγείς λίθοι έχουν καλύτερη συμπεριφορά απ' τους πορώλιθους, όπως τα συμπαγή τούβλα έχουν καλύτερη συμπεριφορά απ' τα διάτρητα ή τους τσιμεντόλιθους.

Η συμπεριφορά των διάτρητων τούβλων, εξαρτάται απ' το αν είναι καλοφτιαγμένα/καλοψημένα, καθώς και απ' το πάχος των εξωτερικών φλοιών και το συνολικό ποσοστό κενών (κο). Δυστυχώς, τα διάτρητα τούβλα της ελληνικής αγοράς, με φλοιούς λεπτότερους από 12 mm (έως και 8 mm) και ποσοστό κενών μεγάλο, μεγαλύτερο από 30 % (έως και 50 %), δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά στην πυρκαγιά.

Ως διαζώματα, πρέκια κ.λπ. συνιστώνται στοιχεία από Ο.Σ., κανονικού ύψους (της τάξεως των 15÷20 cm), ή σύγχρονα υλικά και στοιχεία, όπως π.χ. ειδικά λεπτά χαλύβδινα πρέκια (⊔) ή λωρίδες ειδικών χαλύβδινων πλεγμάτων αντί οριζοντίων διαζωμάτων. Δυστυχώς, η συμπεριφορά στην πυρκαγιά συνήθων ενσωματωμένων στοιχείων από ξύλο ή χάλυβα έχει αποδειχθεί τουλάχιστον προβληματική.

Τέλος, καί οι διάφορες διογκούμενες πυράντοχες βαφές (ή πυρο-επιχρίσεις), έχουν συχνά αποδειχθεί ανεπαρκείς υπό πραγματικές συνθήκες, πέραν του αυξημένου κόστους αλλά καί των προβλημάτων κατά τη λειτουργία των κτιρίων (λόγω φθορών και πληγών, υγρασίας, ανάγκης συντήρησης και προστασίας κ.λπ.).

Αντίστοιχα προβλήματα παρουσιάζουν και οι διάφορες θερμο-διογκούμενες ταινίες, προς σφράγιση και διασφάλιση «ακεραιότητας», π.χ. για πυροφραγμούς, πυράντοχα κουφώματα (βλ. §VII.5) κ.λπ..

Σημείωση :

Για τους «ψαθωτούς» τοίχους, δηλ. τους διπλούς – με διάκενο (γεμάτο ή όχι με οποιοδήποτε καυστό μονωτικό υλικό), που αποτελούν στοιχεία του κελύφους ενός ΠΔ, ισχύουν τα εξής :

(i) Το διάκενο πρέπει να σφραγίζεται προσεκτικά και συστηματικά με πυροφραγμό (π.χ. από άοπλο σκυρόδεμα ή πυκνό κονίαμα ή συμπαγή πλινθοδομή), πάχους τουλάχιστον όσο το πλάτος του διάκενου (και > 5 cm), σε όλες τις θέσεις συνάντησης με τους υπόλοιπους διπλούς τοίχους ή τα κάθε είδους κουφώματα.

(ii) Ως δείκτης πυραντίστασης του συνόλου, θεωρείται ο δείκτης πυραντίστασης του προσβαλλόμενου μονού τοίχου, ενώ σε περίπτωση μή-φέρουσας τοιχοποιίας ή φέρουσας που αποτελείται από δύο όμοιους επιμέρους τοίχους (ικανούς να φέρουν ο καθένας μόνος του το μέγιστο «επιτρεπόμενο φορτίο») ο δείκτης πυραντίστασης αυξάνεται κατά 50 %.

Σημειώνεται, τέλος, ότι για το «ισοδύναμο» πάχος τοίχου από πλίνθους με οπές, για θέματα πυρκαγιάς, προστίθενται τα πάχη των «φλοιών» κατά την έννοια του πάχους του τοίχου.

VII.5 ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά των κουφωμάτων, εξαρτάται απ' τους υαλοπίνακες (για τα παράθυρα), τις κάσες, τα πλαίσια και τα παραθυρόφυλλα (μέσα-έξω) ή πορτόφυλλα, από διάφορα υλικά (π.χ. ξύλο, χάλυβας ή αλουμίνιο, πλαστικά κ.λπ.).

Για τις λίγες εξώπορτες (χωρίς ή με ειδικούς υαλοπίνακες, με μικρή ή πολύ μικρή επιφάνεια), είναι ευχερέστερη η ικανοποίηση των απαιτήσεων πυροπροστασίας (π.χ. F30 ή F60), ενώ διατίθενται και πυρασφαλή συστήματα, με αποδεδειγμένη και πιστοποιημένη συμπεριφορά.

Για τα πολλά παράθυρα ή τις μεγάλες μπαλκονόπορτες, τα συνήθως εφαρμοζόμενα υλικά και συστήματα, είναι ιδιαιτέρως προβληματικά υπό πυρκαγιά, ακόμη και για θερμοκρασίες μικρότερες των 500 ^{o}C :

- Τα πλαστικά και το ξύλο καίγονται στους 150 ÷ 300 ^{o}C
- Το αλουμίνιο (σε κράμα) λειώνει στους 500 ÷ 600 ^{o}C, ενώ
- Το γυαλί θραύεται πρόωρα (π.χ. 150 ^{o}C) και εκτινάσσεται (ή λειώνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, π.χ. 750 ^{o}C).

Σημειώνεται, τέλος, ότι για ειδικά πυράντοχα κουφώματα, χρησιμοποιούνται και ειδικοί «εύτηκτοι σύνδεσμοι» (fusible links), από κράματα βισμουθίου-αντιμονίου, με τήξη στους 70 ^{o}C (περίπου).

VII.6 ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Βλ. ιδιαίτερη Σημείωση 2 της §II.4.2.

VII.7 ΣΤΕΓΕΣ (ΞΥΛΙΝΕΣ)

Γενικώς, οι ξύλινες στέγες μπορούν να διακριθούν σε :

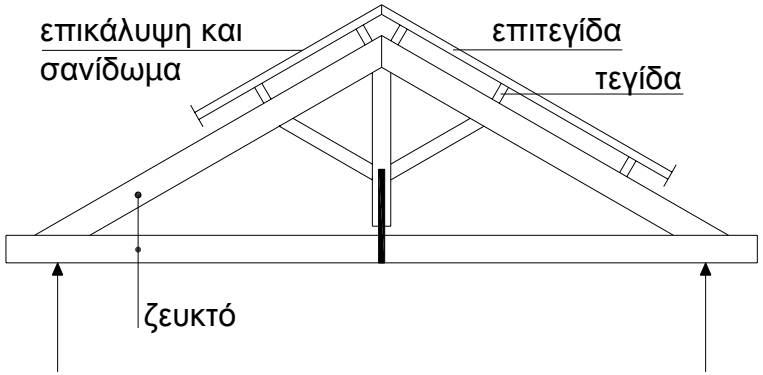
- Εδραζόμενες ή αιωρούμενες
- Με φέροντα οργανισμό πλήρη ή ημιτελή
- Πλακοσκεπείς ή κεραμοσκεπείς
- Με επικάλυψη εν ξηρώ ή ημι-κολυμπητή/κολυμπητή
- Αεριζόμενες ή όχι (συνήθως).

Συνήθως, μια απλή «αιωρούμενη» στέγη με πλήρη φέροντα οργανισμό, περιλαμβάνει (κατά το Σχήμα VII.9) :

- Ζευκτά (πολλών μορφών, απλής ή σύνθετης δικτύωσης, έως υποτυπώδη)
  ή
  Αμείβοντες επί μηκίδων (συνήθως μόνο κορυφομηκίδων)

- Δοκίδες (δευτερεύοντα ΦΟ), τεγίδες και επιτεγίδες.

Αντιθέτως, στις στέγες με ημιτελή φέροντα οργανισμό, λείπουν τελείως οι δοκίδες, ενώ το σανίδωμα (πέτσωμα) καρφώνεται σε μάλλον πυκνούς αμείβοντες (ζευκτών ή όχι).



Σχήμα VII.9 Απλή αιωρούμενη στέγη με πλήρη ΦΟ.

α) Αιωρούμενες ξύλινες στέγες

Κατασκευάζονται, γενικώς, ως μή-αεριζόμενες, ισοκλινείς, δίριχτες, τετράριχτες κ.λπ..

Τα κύρια στοιχεία τους, για πλήρεις στέγες, είναι τα εξής (κατά το Σχήμα VII.10) :

1 : Διάζωμα (Ο.Σ.), υποχρεωτικώς

2 : Στρωτήρας

3 : Κάτω πέλμα ζευκτού, ελκυστήρας, «φτέρνα»

4 : Πάνω πέλμα ζευκτού, αμείβοντες, «ψαλίδια»

5 : Κεντρικός ορθοστάτης, «μπαμπάς»

6 : Ορθοστάτης

7 : Διαγώνιες ράβδοι, αντηρίδες, «ντεστέκια»

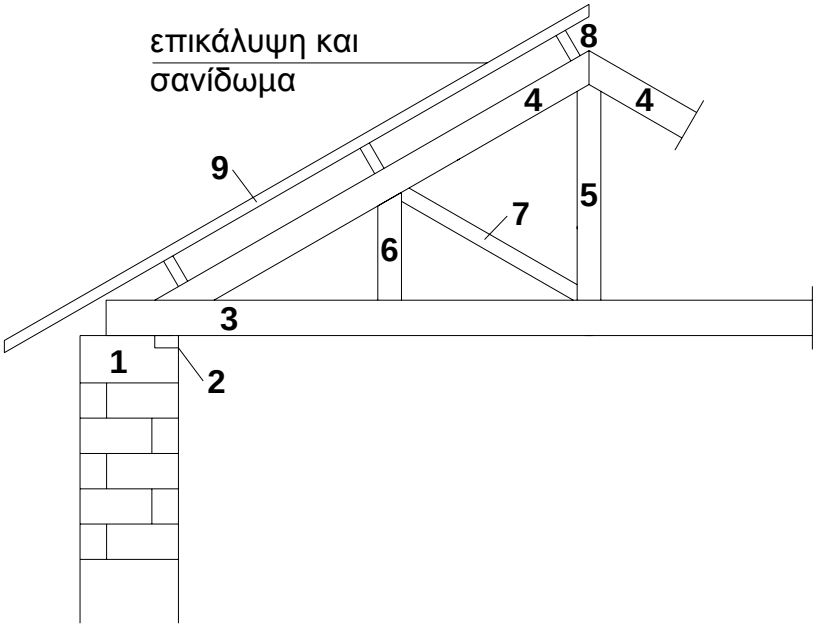
8 : Δίδυμες κεντρικές τεγίδες κορφιά, κορυφοτεγίδες

9 : Επιτεγίδες

10 : Σύνδεσμοι στέγης (δεν δείχνονται)

Στις αλληλοτομές των κεκλιμένων επιπέδων της στέγης, διαμορφώνονται:

- Ράχες, οριζόντιες (κορφιάδες) ή κεκλιμένες (μαχιάδες), και
- Αυλάκια, κεκλιμένα λούκια, «ντερέδες».



Σχήμα VII.10 Πλήρης αιωρούμενη ξύλινη στέγη.

Σχετικώς με τις επικαλύψεις των στεγών, στο Κεφάλαιο Α του Κανονισμού Πυροπροστασίας Κτιρίων (ΠΔ 71/1988, ΦΕΚ 32/Α/17.02.1988) [1], αναφέρονται ρητώς τα εξής :

§3.2.8 Μέχρι τη δημοσίευση ελληνικής πρότυπης δοκιμασίας ή την υιοθέτηση αντίστοιχης ξένης για την κατάταξη διαφόρων υλικών επικάλυψης επιστεγάσεων, αναλόγως με τη συμπεριφορά τους στη φωτιά, δεν πρέπει στις επικαλύψεις χαμηλών κτιρίων να χρησιμοποιούνται εύφλεκτα υλικά (εκτός εξαιρέσεων, μετά από έγκριση της ελέγχουσας αρχής), ιδιαίτερα όταν το κτίριο είναι κοντά σε δασική περιοχή ή σε πυκνοδομημένο οικισμό.

§3.3.4 Μέχρι την υιοθέτηση ελληνικών προδιαγραφών για τον χαρακτηρισμό των επικαλύψεων στεγών, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται εύφλεκτα υλικά, ειδικότερα όταν η στέγη βρίσκεται κοντά σε άλλα υψηλότερα κτίρια (εκτός εξαιρέσεων, μετά από έγκριση της ελέγχουσας αρχής).

Όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο, παρατηρείται δυστυχώς η καταστρατήγηση αυτών των διατάξεων, με τη χρήση διάφορων ευφλέκτων υλικών στις επικαλύψεις των στεγών.

β) Συνήθεις, ανεπαρκείς ή/και κακότεχνες, κεραμοσκεπείς στέγες (μή-αεριζόμενες)

Μια τυπική στέγη, προβληματική καί από άποψη πυρκαγιάς, περιλαμβάνει συνήθως τα εξής (κατά το Σχήμα VII.11) :

1 : Κολυμπητά κεραμίδια (π.χ. ρωμαϊκά), με μεγάλο πορώδες (> 20%), ραγισμένα (λόγω κακοτεχνιών ή/και παγετού) και αποφλοιωμένα (λόγω ενυδάτωσης του CaO)

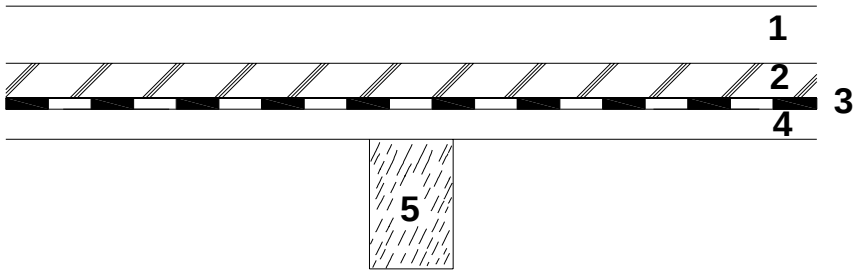
2 : Άοπλο ασβεστοτσιμεντοκονίαμα, με πλημμελή πρόσφυση, σε ανομοιόμορφη στρώση, με μεγάλο πάχος, ρηγματωμένο και κομματιασμένο (βλ. Σημείωση για κατανάλωση κονιάματος και βάρη επικαλύψεων)

3 : Υγρομόνωση/στεγάνωση (π.χ. μεμβράνη οξειδωμένης ασφάλτου), με ανεπαρκείς ενώσεις και επικαλύψεις, πληγωμένη (και αναποτελεσματική)

Ενδιαμέσως, ή από κάτω, με διάφορες τεχνικές, διατάσσεται καύσιμη θερμομόνωση (π.χ. πολυστερίνη, διογκωμένη ή εξελασμένη), ανεπαρκής (με «γέφυρες»).

4 : Σανίδωμα (πέτσωμα), με ανεπαρκή ή πλημμελή διαφραγματική λειτουργία, κακοκαρφωμένο και με ανεπαρκές πάχος (π.χ. λεπτοσανίδες, 10÷12 mm, ή κόντρα-πλακέ, 10mm)

5 : Δευτερεύοντες ή κύριοι ξύλινοι φορείς, δοκίδες (κάθε είδους) ή αμείβοντες (υποτυπωδών) ζευκτών ή επί μηκίδων, με ανεπαρκείς διατομές και ανεπαρκείς εδράσεις, συνδέσεις κ.λπ., με μηδενική (πρακτικώς) πυραντίσταση.



Σχήμα VII.11 Συνήθης, ανεπαρκής ή/και κακότεχνη, κεραμοσκεπής στέγη (μή-αεριζόμενη).

<u>Σημείωση</u> :

(i) Κατανάλωση κονιάματος

- Πλήρης στρώση κονιάματος ~ 4,0÷5,0 cm/m^2
- Κονίαμα κατά γραμμές ~ 2,0÷2,5 cm/m^2
- Εν ξηρώ ~ 0,5÷1,0 cm/m^2
  (κονίαμα μόνο στα άκρα, στα κορυφοκέραμα, ακροκέραμα κ.λπ.)

(ii) Είδη και βάρη επικαλύψεων

Συνήθως, ισχύουν οι τιμές του Πίνακα VII.3.

Πίνακας VII.3 Είδη και βάρη επικαλύψεων.

Α/α	**ΥΛΙΚΟ**	**ΚΛΙΣΕΙΣ**	**ΒΑΡΟΣ Kg/m^2 ΚΕΚΛ. ΕΠΙΦ.**
1	Κοίλα κεραμίδια, με το σανίδωμα 1.α Κολυμπητά 1.β Ημι-κολυμπητά	1/3 ÷ 2/3 18° ÷ 35° (20° ÷ 24°)	 120 ÷ 150 80 ÷ 100
2	Πτυχωτά (γαλλικά), εν ξηρώ, με τις δοκίδες	1/3 ÷ 1/1 18° ÷ 45° (≥ 20°)	50 ÷ 60
3	Σχιστολιθικές πλάκες τ. Πηλίου, 2 ÷ 3 cm, με το σανίδωμα	≤ 30°	130 ÷ 160
4	Κυματοειδή φύλλα (χάλυβα, αλουμινίου), με τα πισσόχαρτα και το σανίδωμα	≥ 1/7 (≈ 8°) (10° ÷ 30°)	10 ÷ 20

γ) Πρόταση για πυρομονωμένη και αεριζόμενη στέγη
(από πάνω ή <u>και</u> από κάτω, στο κεκλιμένο ή <u>και</u> στο οριζόντιο επίπεδο)

Για μια επαρκή στέγη, καί από άποψη πυρκαγιάς, προτείνονται τα εξής (κατά το Σχήμα VII.12) :

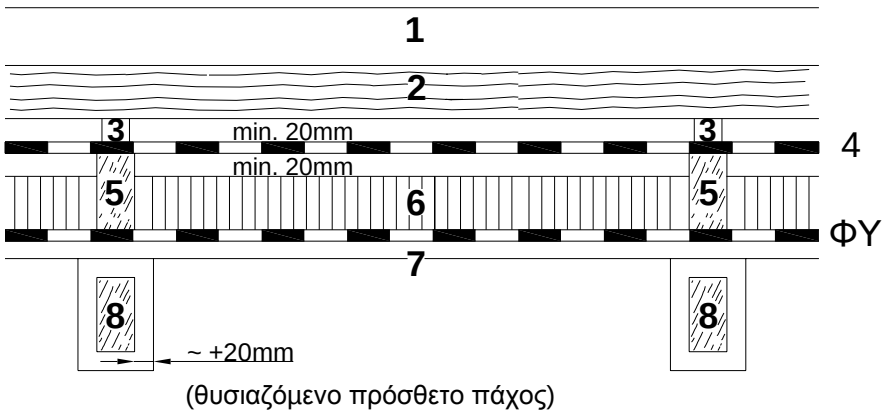
1 : Επικεράμωση, με κοίλα ή πτυχωτά καλοφτιαγμένα κεραμίδια, με ανεκτό πορώδες (< 16%), στερεωμένα και δεμένα με γαλβανισμένα καρφιά και άγκιστρα, ελάσματα κ.λπ.
(και όχι με ξυλόβιδες / με ηλεκτρικό κατσαβίδι)

2 : Δοκίδες/τεγίδες, επαρκούς διατομής (π.χ. 50/100 ή 60/120 mm), ίσως εμποτισμένες/ασηπτοποιημένες

3 : Πηχίσκοι/μισόταβλες ή τάβλες, π.χ. 40/20 ή 50/25 mm, ασυνεχείς, ίσως εμποτισμένες/ασηπτοποιημένες

4 : Τεντωμένη ασφαλτική μεμβράνη (χωρίς «κοιλιές), σύγχρονη, οπλισμένη με πλέγμα ή ύφασμα (πλαστικό ή γυάλινο) ή/και ίνες, ίσως με φύλλο αλουμινίου ή ασφαλτική βαφή αλουμινίου, πάνω, για λόγους ανάκλασης της ακτινοβολίας, διαπνέουσα και αυτοθεραπευόμενη (έναντι των ηλώσεων), βάρους π.χ. > 450 gr/m^2

5 : Αποστατήρες/δοκίδες, επί των κυρίων ξύλινων φορέων, ασυνεχείς, μικρής διατομής (π.χ. 40/70 ή 50/90 mm)



Σχήμα VII.12 Πρόταση για πυρομονωμένη και αεριζόμενη στέγη.

6 : Πυρομόνωση/θερμομόνωση (άκαυστη), πλάκες ή παπλώματα ορυκτών ινών, πετροβάμβακας (όχι υαλοβάμβακας), min. πάχους 50 mm και min. βάρους 100 kg/m^3, με (ή χωρίς) φράγμα υδρατμών (ΦΥ), κάτω – συνεχώς

7 : Πέτσωμα πυράντοχο (όχι σανίδωμα), τσιμεντοσανίδες ή πυράντοχες γυψοσανίδες, με πυροφραγμούς, σε μία ή δύο στρώσεις, συνολικού πάχους min. 18 mm

(Σανίδωμα : Μισόταβλες (18÷20 mm) ή τάβλες/σανίδες (25 mm), ραμποτέ, ή κόντρα-πλακέ θαλάσσης min. 18 mm, με I)

8 : Κύριοι ξύλινοι φορείς στέγης, επαρκούς διατομής για πυρκαγιά τουλάχιστον 30 min (F30), δηλ. με πάχος (γύρω-γύρω) μεγαλύτερο κατά ~ 20 mm απ' το απαιτούμενο για λόγους παραμόρφωσης και έντασης, ίσως από συγκολλητή ξυλεία (σύνθετες δοκοί, glulam)

9 : Επαρκή ανοίγματα αερισμού (δεν δείχνονται), min. 200 cm^2/m^2

<u>Σημείωση</u> : Τα υλικά (και οι στρώσεις) 1, 2, 3, 4 και 5 (εν μέρει) είναι «θυσιαζόμενα» υπό έντονη εξωτερική πυρκαγιά.

Παρατηρήσεις :

α. Δεν συνιστώνται μή-αεριζόμενες ξύλινες (ή άλλες) στέγες. Κάτω από την επικεράμωση, παρατηρούνται ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, με θερμοκρασίες + 60÷80 ^{o}C / - 10÷20 ^{o}C (με ημερήσιες ΔΤ της τάξεως των 30÷50 ^{o}C) και συγκεντρώσεις νερού ή υγρασίας (με RH > 75%).

β. Ο πετροβάμβακας/λιθοβάμβακας, με «ορυκτές» ίνες και διάφορα συγκολλητικά, παρουσιάζει αλλοίωση και έναρξη τήξεως περίπου στους 1000 ^{o}C, ενώ ο υαλοβάμβακας παρουσιάζει αντίστοιχα φαινόμενα περίπου στους 750 ^{o}C και το ξυλόμαλλο (με παρασχίδες ξύλου και τσιμέντο) περίπου στους 650 ^{o}C.

Τα ινοπαγή υλικά ορυκτών ινών (ορυκτόμαλλα), με ελάχιστη πυκνότητα περίπου 20 kg/m^3, είναι άκαυστα και πυράντοχα (για μεγάλες πυκνότητες), δεν εκλύουν τοξικά αέρια, δεν απορροφούν νερό και (γενικώς) δεν χρειάζονται φράγμα υδρατμών.

Αρκετά καλή συμπεριφορά σε φωτιά παρουσιάζουν και οι πυράντοχες (ή <u>καί</u> ανθυγρές) γυψοσανίδες (με γύψο + περλίτη, καθώς και με ίνες γυαλιού ή υαλοϋφάσματα), με βάρος περίπου 1000 kg/m^3, ενώ υπάρχουν και ειδικά panels με γυψοσανίδες και πυρήνα πετροβάμβακα ή υαλοβάμβακα.

γ. Συνιστάται επαρκής «εγκιβωτισμός» (με άκαυστα στοιχεία) και περιμετρική προστασία των στεγών, κατά το δυνατόν χωρίς ξύλινες προεξοχές, μετόπες, γείσα κ.λπ.

δ. Συνιστάται εσωτερική πυροδιαμερισματοποίηση της στέγης, για υψηλό βαθμό κινδύνου πυρκαγιάς ή/και μεγάλες στέγες (> 500 m^2), με απαίτηση για πυρκαγιά τουλάχιστον 30 min ή 60 min.

ε. Για συνήθεις μικρές στέγες, με «άνοιγμα» έως 12 m, το βάρος του ξύλου είναι της τάξεως των 20 έως και 30 kg/m^2 οριζόντιας προβολής της στέγης, αναλόγως του φέροντος οργανισμού της (ημιτελής έως και πλήρης), συν 10÷15 kg/m^2 για το σανίδωμα.

Σε περίπτωση οροφοπήχεων (μπαγδαντί), προστίθεται ξύλο, βάρους της τάξεως των 5÷10 kg/m^2.

στ. <u>Φράγμα Υδρατμών</u> (ΦΥ)

- Λεπτά φύλλα πολυαιθυλενίου, υψηλής πυκνότητας (HDPE). Για πάχη t = 0,1/0,2 mm, τα αντίστοιχα πάχη ισοδύναμου στρώματος αέρα είναι S_d = 10/20 m. (Για συντελεστή αντίστασης διαπίδυσης υδρατμών μ ≈ 100.000)
- Πιλήματα ορυκτών ή άλλων ινών, επιστρωμένα με αλουμινόχαρτα, ή με ασφαλτικές βαφές αλουμινίου, με S_d = 50÷100 m !

ζ. <u>Ξύλο ή Χάλυβας</u>

Τα («πυράντοχα») ξύλινα στοιχεία της στέγης μπορούν (βεβαίως) να αντικατασταθούν από αντίστοιχα χαλύβδινα ή και αλουμινένια (για τα μη φέροντα, δευτερεύοντα στοιχεία), με κατάλληλη πρόβλεψη έναντι της διμεταλλικής επαφής και γαλβανικής διάβρωσης.

Για τα χαλύβδινα (ή άλλα) στοιχεία της στέγης, απαιτούνται επαρκή πάχη και διατομές, καθώς και αντίστοιχες και κατάλληλες προβλέψεις για την προστασία τους από την υγρασία/διάβρωση αλλά και την φωτιά, κατά τους Κανονισμούς, αναλόγως του «συντελεστή διατομής» (section factor, A : V, με A την εκτεθειμένη επιφάνεια και V τον όγκο μετάλλου).

η. Για «σκληρές» επικαλύψεις στεγών και δωμάτων, με προστασία από θερμική ακτινοβολία και από σπίθες ή καιόμενα υλικά (που παρασύρονται απ' τον άνεμο), καθώς και για στέγες που «αντέχουν» σε εσωτερική φωτιά 30 min (F30), βλ. και DIN 4102, Μέρος 4 (1981) και Μέρος 7 (1977) [2].

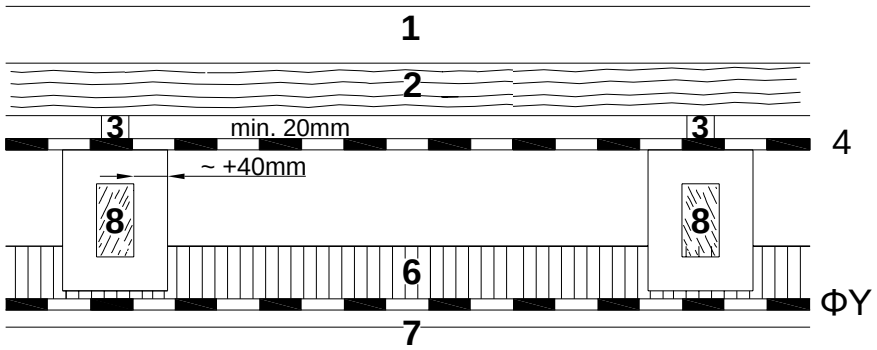
δ) Εναλλακτική λύση πυρομονωμένης στέγης (λιγότερο αποτελεσματική)

Σχετικώς, προτείνεται κάτω πέτσωμα, ενοποίηση των ξύλινων στοιχείων 5 και 8, καθώς και :

8 : Για εσωτερική ή/και εξωτερική πυρκαγιά τουλάχιστον 60 min (F60), πρόσθετο πάχος (γύρω-γύρω) ~ 40 mm, ίσως από συγκολλητή ξυλεία (σύνθετες δοκοί, glulam)

9 : Πολύ γερή μηχανική στερέωση πάνω στους ξύλινους φορείς, τόσο του πετσώματος όσο και του πετροβάμβακα (ίσως και με ειδική κόλλα), εξασφάλιση έναντι χαλαρώσεως και καταπτώσεως

<u>Σημείωση</u> : Τα υλικά (και οι στρώσεις) 1, 2, 3, 4 και 8 (εν μέρει) είναι «θυσιαζόμενα» υπό έντονη εξωτερική ή/και εσωτερική πυρκαγιά.



Σχήμα VII.13 Εναλλακτική λύση πυρομονωμένης στέγης (λιγότερο αποτελεσματική).

ε) Επίπεδα (πρακτικώς) ξύλινα δώματα (μή-βατά)

Απαιτείται πλήρης στρώση χοντρών χαλίκων και σκύρων (16/32 mm), min. πάχους 50 mm (βάρους ~100 kg/m^2), πάνω σε (i) μεμβράνη υγρομόνωσης/στεγάνωσης και πέτσωμα κάθε είδους ή (ii) μικρού ύψους και λεπτά μεταλλικά φύλλα (γαλβανισμένα χαλυβδόφυλλα ή φύλλα αλουμινίου), αντί της επικεράμωσης (στρώση/υλικό 1), κατά τα προηγούμενα Σχήματα.

Κατά τα λοιπά : Στρώσεις/υλικά 2÷10, κατά τα προηγούμενα σκαριφήματα, με κενά αερισμού min. 50 (αντί 20) mm, για μικρές κλίσεις (≤ 10°).

VII.8 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Αρχηγείο Πυροσβεστικού Σώματος, Διεύθυνση Ι Προληπτικής Πυροπροστασίας, "Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων (Π.Δ. 71/1988)".

[2] DIN 4102, "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen", Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, 1981 και Teil 7: Bedachungen, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1977.

[3] Proceedings of the International Conference on "Fire Protection of Cultural Heritage", K. Papaioannoy (ed.), Aristotle University, Thessaloniki 2000.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΑΜΕΣΩΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Περιεχόμενα παραρτήματος Α :

Α.1 Εισαγωγή

Α.2 Συνοπτική περιγραφή της πυρκαγιάς

Α.3 Εκτίμηση των αναπτυχθεισών θερμοκρασιών

Α.3.1 Θερμοκρασία αέρα

Α.3.2 Θερμοκρασία δομικών στοιχείων

Α.4 Εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων μετά την επαναφορά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος

Α.5 Απογραφή βλαβών

Α.6 Υπόδειξη τυχόν αναγκαίων άμεσων μέτρων ασφαλείας

Α.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός των διαγνωστικών αποστολών Μηχανικών αμέσως μετά την πυρκαγιά είναι κυρίως η συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με:

- την πυρκαγιά
- τις αναπτυχθείσες θερμοκρασίες
- τις αλλοιώσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής
- τις βλάβες στον φέροντα οργανισμό και στα λοιπά στοιχεία της κατασκευής

Η πρώτη διαγνωστική αποστολή πρέπει να ξεκινήσει ευθύς μόλις είναι δυνατή η είσοδος στο κτίριο, και κανονικά πριν από την απομάκρυνση των καμμένων υπολειμμάτων.

Πριν από κάθε είσοδο στο κτίριο πρέπει να διασφαλισθεί ότι το κτίριο είναι ασφαλές για την σύντομη επίσκεψη των Μηχανικών.

Σημειώνεται ότι η κατασκευή, κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, συμπεριφέρεται τελείως διαφορετικά από ό,τι σχεδιάσθηκε, καθώς και ότι μετά την πυρκαγιά ενδεχομένως να έχουν συμβεί σημαντικές ανακατανομές της εντάσεως.

Α.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Περιγράφονται συνοπτικότατα οι συνθήκες και τα δεδομένα της τοπικής πυρκαγιάς (στην περιοχή του κτιρίου, καί μέσα του), με κύριον σκοπόν να εκτιμηθεί :

- Η ένταση του φαινομένου, και
- Η κρίσιμη διάρκειά του,

προκειμένου να χρησιμεύσουν για την αδρομερή εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν στα δομικά στοιχεία.

Προς τούτο, αρκεί να συμπληρωθούν (κατά το δυνατόν) οι Πίνακες ΙΙ.1 και ΙΙ.2 του Κεφαλαίου ΙΙ.

Α.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΙΣΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Στοιχεία για την εκτίμηση των αναπτυχθεισών θερμοκρασιών τόσο στον αέρα όσο και στα δομικά στοιχεία δίνονται στο Κεφάλαιο ΙΙ.

Α.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Για το θέμα αυτό βλέπε:

- Παράρτημα Β: «Επιτόπου έλεγχος υλικών», και
- Κεφάλαιο ΙΙΙ: «Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στις ιδιότητες των υλικών».

Α.5 ΑΠΟΓΡΑΦΗ ΒΛΑΒΩΝ

Η πρώτη επιτόπου ενέργεια είναι η οπτική επιθεώρηση, κατά την οποία θα καταγραφούν ενδεχόμενες καταρρεύσεις, μεγάλες παραμορφώσεις, αποφλοιώσεις, ρηγματώσεις κ.λπ..

Οι χρωματικές αλλοιώσεις είναι ενδεικτικές της υποβάθμισης των μηχανικών χαρακτηριστικών καθώς και του βαθμού της υποβάθμισης αυτής (ο βαθμός της χρωματικής αλλαγής εξαρτάται από το είδος των αδρανών και είναι πιο έντονος στα πυριτικά αδρανή).

Η οπτική επιθεώρηση μπορεί να υποβοηθηθεί από έναν μεγεθυντικό φακό χειρός (Χ10) ή από ένα εργοταξιακό μικροσκόπιο (Χ50).

Ένα μικρό σφυρί είναι απαραίτητο για την ακουστική επιθεώρηση των καμμένων επιφανειών και της ύπαρξης αποφλοιώσεων.

Ενόργανες μη καταστροφικές μέθοδοί: θερμογραφία, ραντάρ, υπέρηχοι, ακουστική εκπομπή, αντίσταση διεισδύσεως ηλεκτρικού δράπανου. Το κρουσίμετρο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε επιφάνειες σκυροδέματος που έχουν υποστεί πυρκαγιά (μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον επικουρικώς στις μή προσβεβλημένες επιφάνειες και με προσοχή ως προς τα συμπεράσματα).

Ημικαταστροφικές μέθοδοι: πυρηνοληψία (για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν ρωγμές στο εσωτερικό του εξεταζόμενου στοιχείου).

Θερμοχημικές μέθοδοι (diffractometry, scanning electron microscope SEM) για την διαπίστωση των μεγίστων αναπτυχθεισών θερμοκρασιών.

Α.6 ΥΠΟΔΕΙΞΗ ΤΥΧΟΝ ΑΝΑΓΚΑΙΩΝ ΑΜΕΣΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Τα τυχόν αναγκαία μέτρα και προφυλάξεις ασφαλείας εξαρτώνται από την έκταση των ζημιών που προκάλεσε η πυρκαγιά. Ενδεικτικώς αναφέρονται τα εξής:

- Οι εισερχόμενοι πρέπει να φέρουν ατομικά μέσα προστασίας (κράνος, ενισχυμένα υποδήματα, γάντια κ.λπ.)
- Πρέπει να ελέγχεται ότι έχει διακοπεί η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και ότι δεν υπάρχει κίνδυνος από επιβλαβή αέρια.
- Πρέπει να ελέγχεται η σταθερότητα των δαπέδων για την αποφυγή κινδύνου υποχώρησης υπό το βάρος των ανθρώπων.
- Πρέπει να δίνεται προσοχή στα ετοιμόρροπα τμήματα (οροφής και τοίχων) για την αποφυγή τραυματισμών από πτώση αντικειμένων.
- Κατά την διενέργεια των διαγνωστικών δραστηριοτήτων, θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρώς υπόψη το ενδεχόμενο καταρρεύσεων ετοιμόρροπων τμημάτων του έργου (π.χ. κραδασμοί από μηχανή πυρηνοληψίας, κρουστικές δράσεις κ.λπ.).
- Ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση προσωρινών ικριωμάτων για την στήριξη μεμονωμένων μελών ή και της κατασκευής ως συνόλου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ

Β.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τον έλεγχο των υλικών επιτόπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- Οπτικός έλεγχος
- Υπέρηχοι
- Πυρηνοληψία
- Ορυκτολογικές εξετάσεις
- Λήψη δειγμάτων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.

Β.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο οπτικός έλεγχος είναι απαραίτητος για:

- τον εντοπισμό των πλέον θερμικά επηρεασμένων περιοχών,
- την έκταση των αποφλοιώσεων, ρηγματώσεων και αποδιοργανώσεων
- την ύπαρξη τυχόν παραμενουσών παραμορφώσεων-μετατοπίσεων
- την κατάσταση της κατασκευής γενικώς (διάβρωση, κατασκευαστικά σφάλματα, κατάσταση αρμών διαστολής κ.λπ.)

Β.3 ΥΠΕΡΗΧΟΙ

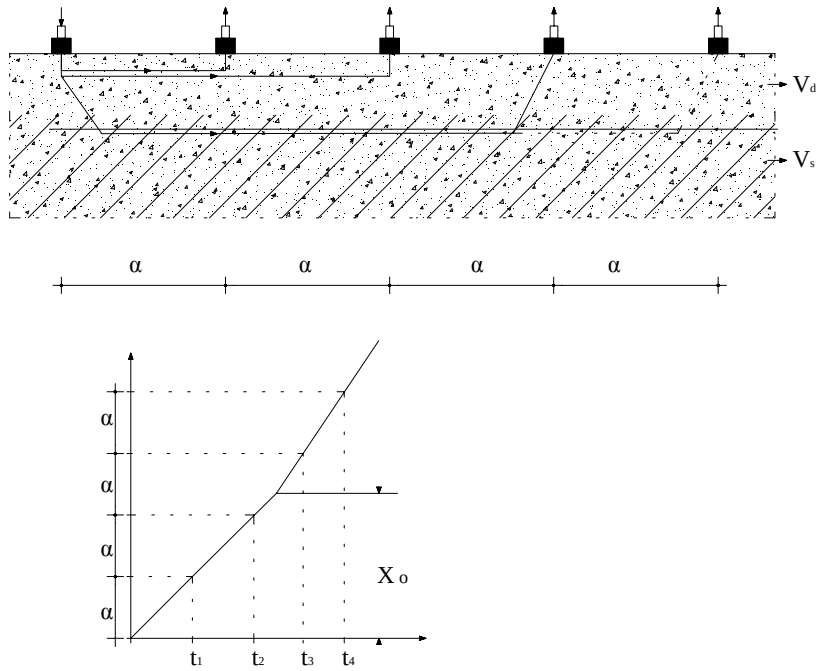
Η μέθοδος είναι κατ' εξοχήν κατάλληλη για την εκτίμηση της έκτασης των επιφανειακών αλλοιώσεων μέσω της διαφοροποιήσεως της ταχύτητας των υπερήχων στις διάφορες θέσεις.

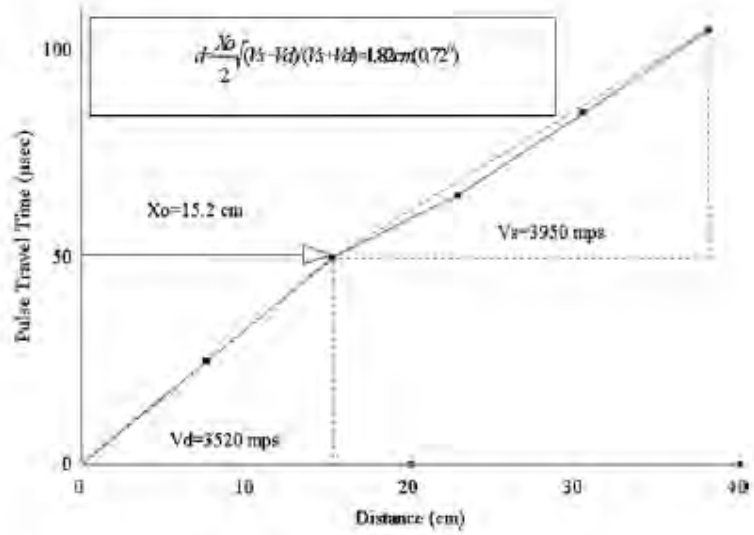
Με την μέθοδο των υπερήχων μπορεί επίσης να εκτιμηθεί και το πάχος του θερμικώς επηρεασμένου επιφανειακού σκυροδέματος. Η μέθοδος βασίζεται στο ότι η ταχύτητα των υπερήχων στο θερμικώς επηρεασμένο σκυρόδεμα, v_d, είναι μικρότερη από την ταχύτητα στο μή επηρεασμένο σκυρόδεμα, v_s. Γίνεται η υπόθεση ότι τα κύματα μπορούν να φθάσουν στον δέκτη κατά μήκος δύο διαδρομών: η διαδρομή 1 είναι ευθεία κατά μήκος του κατεστραμμένου σκυροδέματος και η διαδρομή 2 είναι τεθλασμένη η οποία ξεκινά από το κατεστραμμένο στρώμα, εισέρχεται στο υγιές και ξανά στο κατεστραμμένο. Για μικρές αποστάσεις μεταξύ των δύο κρυστάλλων, συντομότερη είναι η διαδρομή 1, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις συντομότερη είναι η διαδρομή 2 (Σχήμα Β.1).

Η διαδικασία έχει ως εξής: Γίνονται μετρήσεις των χρόνων διαδόσεως σε διαδοχικώς αυξανόμενες αποστάσεις και συντάσσεται η γραφική παράσταση του χρόνου συναρτήσει της αποστάσεως των κρυστάλλων. Αν η ταχύτητα των υπερήχων είναι σταθερή, τότε όλα τα σημεία θα βρεθούν σε μία ευθεία η κλίση της οποίας είναι η ταχύτητα των υπερήχων. Η ύπαρξη κατεστραμμένης επιφάνειας φαίνεται από την αλλαγή της κλίσεως των δεδομένων (Σχ.Β.2). Η απόσταση x_o όπου οι χρόνοι διαδόσεως των δύο διαδρομών είναι ίσοι βρίσκεται από την τομή των δύο ευθειών όπως φαίνεται στο Σχ. Β.2. Από τις κλίσεις των ευθειών υπολογίζονται οι ταχύτητες των υπερήχων στο κατεστραμμένο και στο υγιές σκυρόδεμα, v_d και v_s αντίστοιχα. Το πάχος του κατεστραμμένου στρώματος βρίσκεται από την σχέση (Chung και Law, 1985): $d = \frac{x_o}{2}\sqrt{\frac{v_s - v_d}{v_s + v_d}}$.

α.

β.





Σχήμα Β.2 Μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων για των προσδιορισμό του βάθους του κατεστραμένου στρώματος. (Από το [42] του Κεφ. ΙΙΙ, Σχήμα 7).

Σχήμα Β.1

Επειδή η μείωση της ταχύτητας των υπερήχων σε σκυρόδεμα το οποίο έχει υποστεί πυρκαγιά είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της αντοχής, οι υπέρηχοι μετά από πυρκαγιά υποεκτιμούν την αντοχή του σκυροδέματος. Ωστόσο, η μέθοδος των υπερήχων πλεονεκτεί έναντι της μεθόδου του κρουσιμέτρου, διότι με τους υπέρηχους ελέγχεται το εσωτερικό της διατομής και όχι μόνον η επιφανειακή στρώση όπως συμβαίνει με το κρουσίμετρο.

Β.4 ΠΥΡΗΝΟΛΗΨΙΑ

Συνήθως λαμβάνονται πυρήνες διαμέτρου 10cm.

Η εκτίμηση του βάθους που επηρεάσθηκε από την πυρκαγιά μπορεί να γίνει ως εξής: από μία εξεταζόμενη περιοχή λαμβάνονται 3 πυρήνες σε κοντινές αποστάσεις (περίπου 15cm, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι οι 3 αυτές θέσεις βρέθηκαν σε ίδιες συνθήκες πυρκαγιάς). Από τον 1ο πυρήνα αποκόπτεται και εξετάζεται το πλησιέστερο προς την πυρκαγιά τμήμα (μήκους περίπου ίσο με το 1/3 του μήκους του πυρήνα), από τον 2ο πυρήνα εξετάζεται το μεσαίο τρίτο του μήκους του πυρήνα και τέλος από τον 3ο πυρήνα εξετάζεται το εξώτερο 1/3 του μήκους του. Κατά την αξιολόγηση της διαφοράς των πυρήνων, να λαμβάνεται υπόψη και η εγγενής αυξημένη διασπορά αντοχών που παρουσιάζουν οι πυρήνες. Προϋπόθεση βεβαίως για την εφαρμογή της μεθόδου είναι το στοιχείο να έχει επαρκές πάχος και να είναι δυνατή η λήψη πυρήνων σε κοντινές αποστάσεις.

Β.5 ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟ

Το κρουσίμετρο μπορεί μόνον να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές που δεν έχουν υποστεί βλάβες από την πυρκαγιά. Η κρουσιμέτρηση σε επιφάνειες που έχουν υποστεί πυρκαγιά δεν δίνει αξιόπιστες τιμές της αντοχής του σκυροδέματος και γενικώς υπερεκτιμά την αντοχή (οι αντίστοιχες καμπύλες της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της ενδείξεως του κρουσιμέτρου θα έπρεπε να μετατοπισθούν.)

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, ότι δηλαδή μετρά τοπικά την επιφανειακή σκληρότητα του σκυροδέματος σε μια μικρή περιοχή, γίνεται ακόμη πιο έντονο στην περίπτωση της πυρκαγιάς, μιας και η προκαλούμενη από την πυρκαγιά αλλοίωση συμβαίνει κατεξοχήν στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Γι᾽ αυτό η μέθοδος δεν προσφέρεται για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδεμάτων που έχουν υποστεί πυρκαγιά.

Β.6 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ

Μελέτη των μη αναστρέψιμων θερμοχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν σε ορισμένες θερμοκρασίες με σάρωση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Β.7 ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ

Σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, χρήσιμη είναι η λήψη δοκιμίων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος (τόσο από θερμικώς επηρεασμένες περιοχές όσο και από ανέπαφες περιοχές) προκειμένου να διαπιστωθεί η κατάσταση του οπλισμού από μηχανικής απόψεως αλλά και η συγκολλησιμότητά του.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕΣΩ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο Κεφάλαιο V του παρόντος Πρακτικού Οδηγού παρουσιάστηκαν προσεγγιστικές βήμα προς βήμα επιλύσεις που δύνανται να χρησιμοποιηθούν με επαρκή ακρίβεια στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς (βλ. και EN 1992-1-2 [2004], για την δυνατότητα εφαρμογής τους). Για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται ακριβέστερη εκτίμηση της μή γραμμικής απόκρισης του φορέα υπό ταυτόχρονη δράση μηχανικών φορτίων και θερμοκρασίας στο χρόνο λόγω έκθεσης σε πυρκαγιά, είναι αναγκαία η μή γραμμική επίλυση του φορέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων του συζευγμένου προβλήματος μηχανικών και θερμικών δράσεων. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν σύνθετες κατασκευές, συνεργασία περισσοτέρων υλικών και/ή θερμοκρασιακές δράσεις οι οποίες δεν καλύπτονται από τις τυποποιημένες δράσεις πυρκαγιάς που υιοθετούν οι Κανονισμοί (βλ. και EN 1992-1-2, 2004).

Σε αυτές τις περιπτώσεις ο φορέας απαιτείται να προσομοιωθεί με ένα κατάλληλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων το οποίο να είναι σε θέση να περιγράψει:

- Τον τρόπο παραλαβής του μηχανικού φορτίου με ραβδόμορφα, επιφανειακά ή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, τις συνοριακές συνθήκες του έργου τόσο σε μηχανικές (δεσμεύσεις μετατοπίσεων) όσο και σε θερμικές συνθήκες (συνθήκες προδιαγεγραμμένης θερμοκρασίας, συνθήκες μόνωσης και παραγόμενη θερμική ενέργεια στη μάζα λόγω καύσης),
- Την τροποποίηση της μάζας των υλικών (μεταφορά υγρασίας),
- Τους καταστατικούς νόμους των υλικών (σκυρόδεμα και χάλυβας οπλισμού) και, ταυτόχρονα,
- Να λύνει και το πρόβλημα θερμοκρασιακής διάχυσης.

Ενίοτε, ανάλογα με το ύψος της θερμοκρασιακής έκθεσης και τα υλικά (π.χ. εποξειδικές κόλλες, υγρασία, χάλυβας), το λογισμικό απαιτείται να διαθέτει και πλέον προχωρημένα προσομοιώματα που είναι σε θέση να περιγράψουν μέσα από εξισώσεις φάσεως και την μεταβολή των καταστατικών νόμων των υλικών λόγω αλλαγής των θερμοδυναμικών μεγεθών. Η βήμα προς βήμα επίλυση του προβλήματος προϋποθέτει ότι, σε κάθε βήμα, γίνεται ο υπολογισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών στις κρίσιμες διατομές ανάλογα με τη θερμοκρασιακή έκθεση και επιλύεται ο φορέας με αντίστοιχα απομειωμένα χαρακτηριστικά.

Στην ενότητα §Γ.1, λοιπόν, παρατίθενται τα αποτελέσματα επίλυσης μιας τέτοιας συζευγμένης θερμο-μηχανικής λύσης, για ένα απλό δίστυλο πλαίσιο υπό στατική φόρτιση και έκθεση σε πυρκαγιά κατά ISO 834.

Παράλληλα, για την απόκριση των συνήθων τυπικών κτιρίων από τοιχοποιία που απαντώνται σε πλήθος ημιαστικών και αγροτικών οικισμών που επλήγησαν από τις πρόσφατες πυρκαγιές, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μια αποτίμηση της συμπεριφοράς τυπικών μονώροφων κατασκευών, υπό εναλλακτικά σενάρια θερμοκρασιακών δράσεων, τα οποία θεωρήθηκε ότι υπέστησαν τα κτίρια κατά τις πρόσφατες πυρκαγιές.

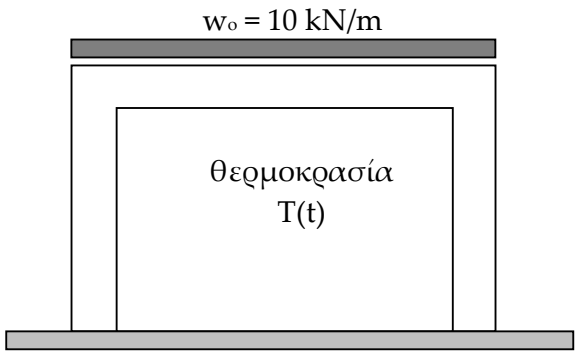
Έτσι, στην ενότητα §Γ.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα επίλυσης μονώροφων κτισμάτων από λιθοδομή, υπό θερμοκρασιακή φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται υπό μορφή νομογραφημάτων τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν κτίρια με ή χωρίς πλάκα επικάλυψης από Ο.Σ. (βλ. §Γ.2.2), καθώς και κτίρια χωρίς και με ανοίγματα, μετά από κατάρρευση της στέγης από ξυλοκατασκευή (βλ. §Γ.2.3).

Γ.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΔΙΣΤΥΛΟΥ ΜΟΝΩΡΟΦΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ (ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ)

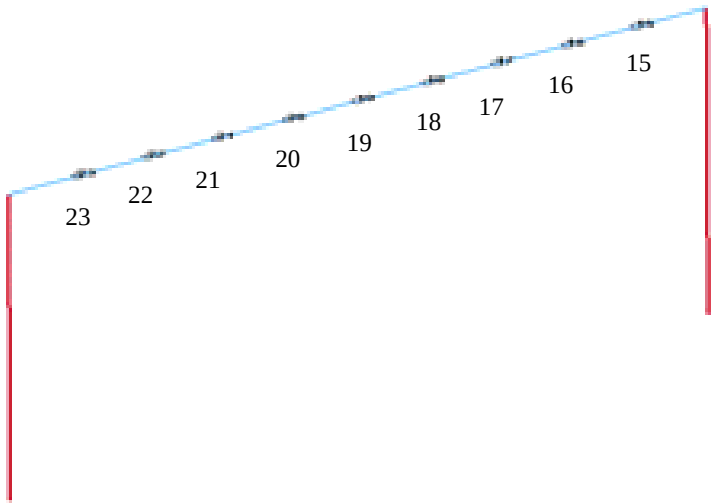
Περιγραφή του λογισμικού και του προσομοιώματος

Για την εν λόγω επίλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LS-DYNA [2007] με χρήση του πεπερασμένου στοιχείου δοκού. Η διατομή προσομοιώνεται με τη μέθοδο των ινών για έλεγχο της κατανεμημένης βλάβης κατά μήκος του στοιχείου και κατά πλάτος της διατομής. Για περισσότερη ακρίβεια του προσομοιώματος επίλυσης αλλά και λόγω αδυναμίας του στοιχείου να παραλάβει εγκάρσια φορτία (πλην φορτίων λόγω μάζας), τόσο η δοκός όσο και τα υποστυλώματα διακριτοποιούνται με πολλαπλά πεπερασμένα στοιχεία σταθερού μήκους. Με αυτό τον τρόπο το προσομοίωμα είναι σε θέση να παρακολουθήσει την κατανεμημένη βλάβη κατά μήκος του φορέα, εφόσον οι διατμητικές παραμορφώσεις και η επιρροή της τέμνουσας είναι αμελητέες.

Το πλαίσιο που αναλύθηκε έχει άνοιγμα 5.0m και ύψος ορόφου 3.0m (Σχήμα Γ.1.α, β). Το κάθε δομικό στοιχείο διακριτοποιείται σε υποστοιχεία μήκους 0.5m. Η δοκός είναι διαστάσεων 30/60cm και τα υποστυλώματα 30/30cm, οπλισμένα με ποσοστό οπλισμού 1.10% του συνολικού εμβαδού σε κάθε παρειά και ποιότητα υλικών: σκυρόδεμα C25 και χάλυβας οπλισμού S500.



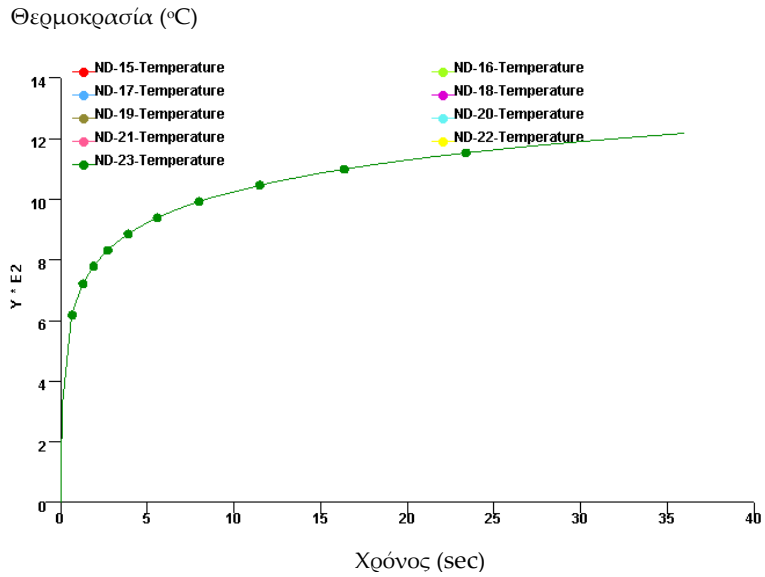
Σχήμα Γ.1.α Προσομοίωμα του επιπέδου πλαισίου που επιλύεται.



Σχήμα Γ.1.β Απεικόνιση του πλαισίου και προσομοίωμα ΗΥ.

Το πλαίσιο αρχικά φορτίζεται από κατανεμημένο φορτίο w_o = 10 kN/m, το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, επιβάλλεται στα αρχικά 5.0 sec της χρονικής φόρτισης στους κόμβους του ανοίγματος της δοκού και έκτοτε παραμένει σταθερό. Σύμφωνα και με τη δυνατότητα επίλυσης του λογισμικού, η κατασκευή επιλύεται στο χρόνο αρχικά υπό σταδιακά αυξανόμενο και κατόπιν σταθερό κατακόρυφο φορτίο και, μετά την εφαρμογή του φορτίου, υπό αυξανόμενη θερμοκρασιακή δράση στο εσωτερικό του πλαισίου, για χρόνο έκθεσης σε πυρκαγιά ISO 834 μίας ώρας (3600 sec), όπως δίδεται στο Σχ. Γ.2.

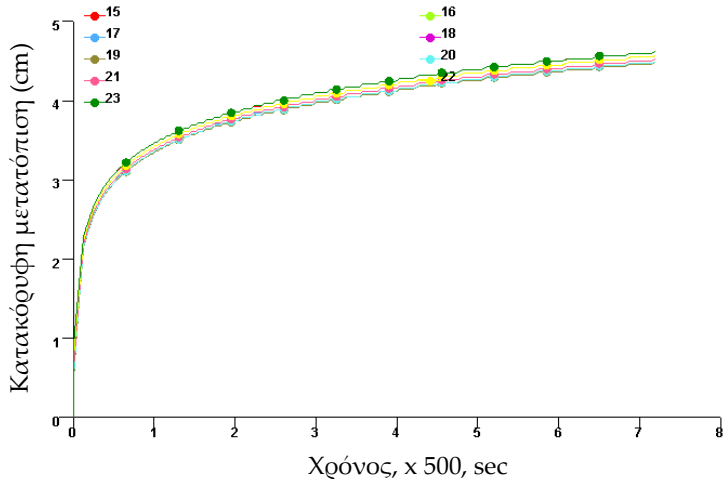
Η διαδικασία επίλυσης ακολουθεί τη μέθοδο ολοκλήρωσης των πεπερασμένων διαφορών στο χρόνο, με αποτέλεσμα - για λόγους ευστάθειας και ακρίβειας της λύσης - το βήμα ολοκλήρωσης να είναι ίσο προς 10^{-5} sec. Σύμφωνα με την πάγια τακτική επίλυσης προβλημάτων στατικής φόρτισης με αλγορίθμους επίλυσης δυναμικής συμπεριφοράς, στο αρχικό στάδιο της κατακόρυφης οιονεί στατικής φόρτισης καθορίζεται πλασματικός συντελεστής υπερκρίσιμης απόσβεσης στο σύνολο της κατασκευής για την αποφυγή τυχόν δυναμικών χαρακτηριστικών.



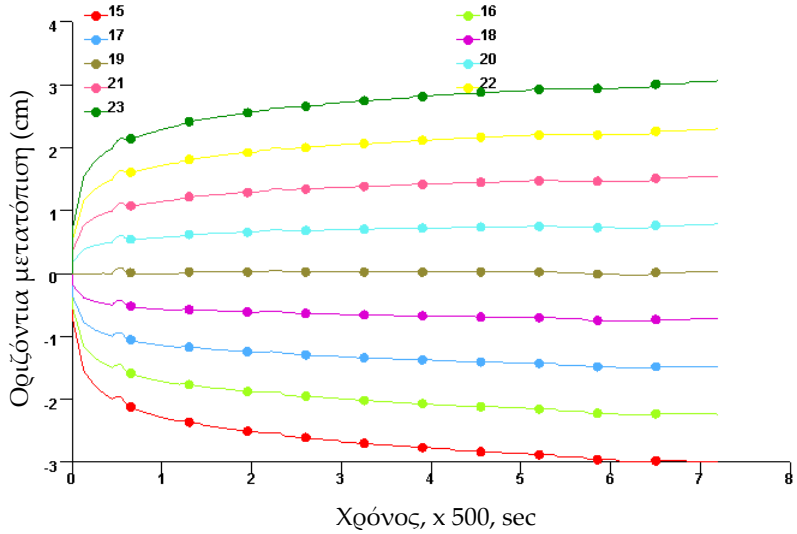
Σχήμα Γ.2 Καμπύλη έκθεσης σε θερμοκρασία του πλαισίου κατά ISO 834.

Αποτελέσματα:

Τα διαγράμματα μετατόπισης των κόμβων της οροφής με το χρόνο καθ' όλη τη διάρκεια της δράσης της πυρκαγιάς δίνονται στα Σχήματα Γ.3 και Γ.4.

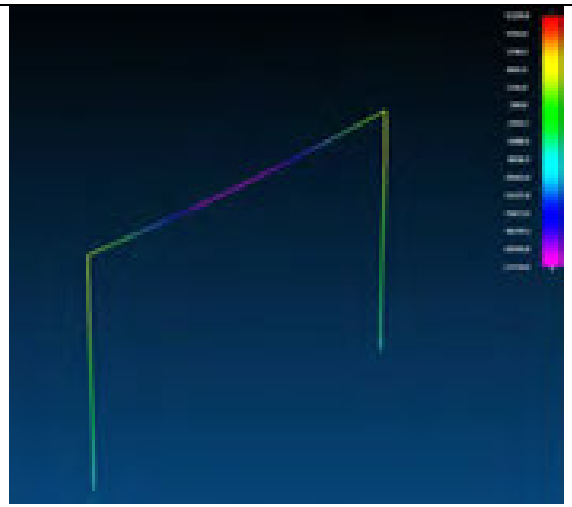


Σχήμα Γ.3 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης στην οροφή.

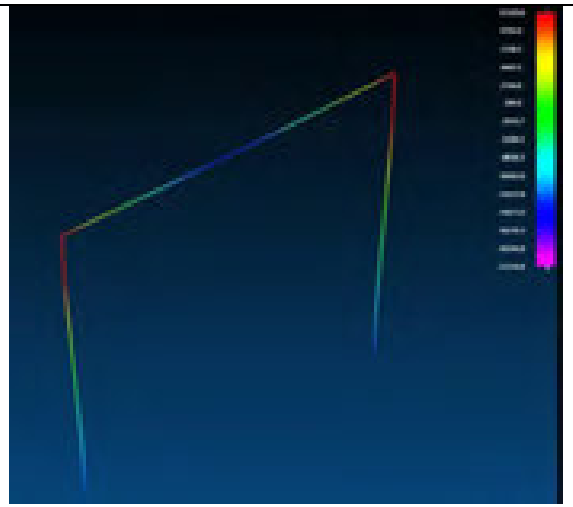


Σχήμα Γ.4 Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης στην οροφή.

Παρατηρείται ότι από την έκθεση του πλαισίου σε πυρκαγιά διάρκειας μίας ώρας, υπό μόνιμα στατικά φορτία, το βέλος στο άνοιγμα αυξάνεται από 1.0 σε 4.4 cm (δηλ. υπερτετραπλασιάζεται) ενώ η οριζόντια παραμόρφωση της δοκού (εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας) αυξάνεται λόγω μέσης αξονικής θερμοκρασιακής διαστολής στα 3.0 cm, σε συνδυασμό με την παρεμποδιστική δράση των υποστυλωμάτων, φορτίζοντας τα τελευταία με σημαντικά εγκάρσια (οριζόντια) φορτία.



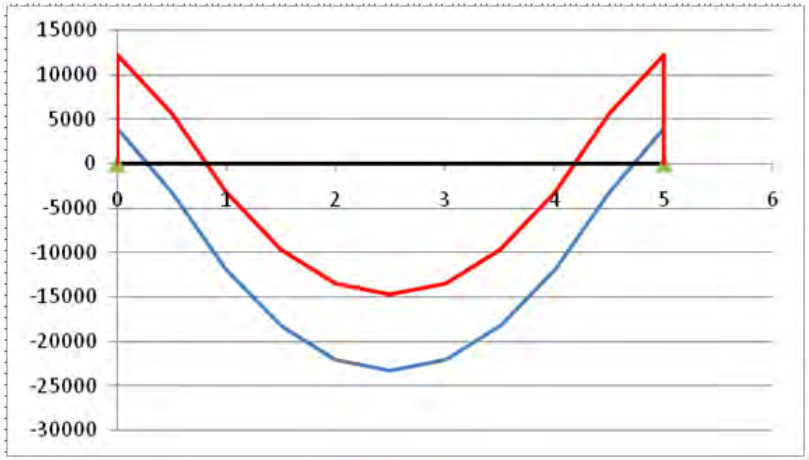
Σχήμα Γ.5 Κατανομή ροπών κάμψης σε χρόνο t = 0.



Σχήμα Γ.6 Κατανομή ροπών κάμψης σε χρόνο t = 60 min, επί του παραμορφωμένου σχήματος του πλαισίου.

Οι αντίστοιχες κατανομές ροπών κάμψης στους στύλους και στο ζύγωμα για t = 0 και t = 60 min, δείχνονται στα Σχ. Γ.5 και Γ.6, ενώ το διάγραμμα ροπών κατά μήκος της δοκού στην αρχική φόρτιση και μετά την πάροδο μιας ώρας δίδεται στο Σχ. Γ.7 όπου φαίνεται η τάση αύξησης των αρνητικών ροπών λόγω της θερμοκρασιακής διαστολής. Σημειώνεται ότι στην παρούσα επίλυση δεν έχει ληφθεί υπόψη η πλάκα, η οποία περιπλέκει περαιτέρω το πρόβλημα.

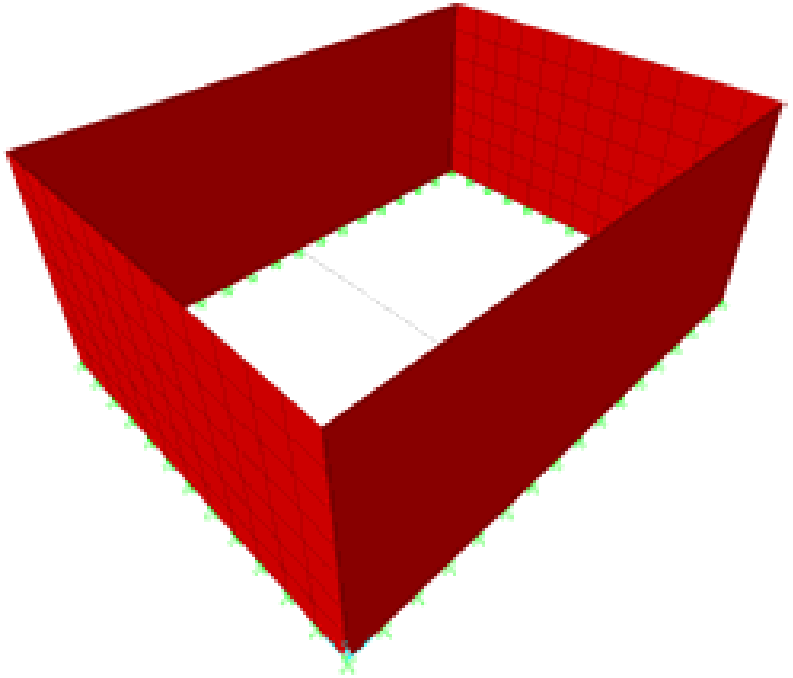
Είναι προφανές ότι σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχει περίσσεια άνω οπλισμού, η λειτουργία αυτή θα οδηγούσε σε κατάρρευση.



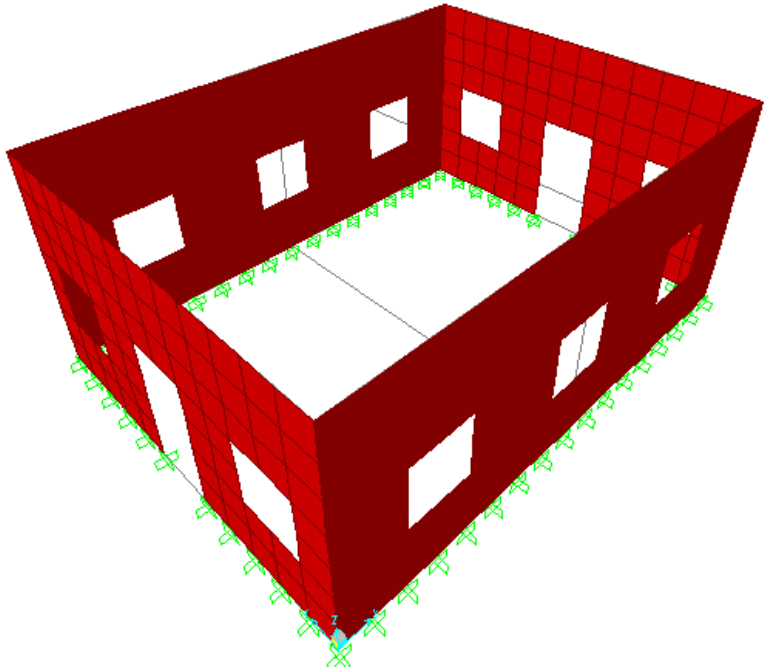
Σχήμα Γ.7 Κατανομή ροπών κάμψης (Nm) σε χρόνο t = 0 και 60 min, επί του παραμορφωμένου σχήματος του πλαισίου.

Γ.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΟΝΩΡΟΦΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΠΟ ΛΙΘΟΔΟΜΗ ΥΠΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στην παρούσα ενότητα μελετήθηκε η απόκριση και τα εντατικά μεγέθη τα οποία προκύπτουν λόγω της έκθεσης τυπικού μονώροφου κτίσματος από λιθοδομή, σε πυρκαγιά στο εσωτερικό του. Επιλέχθηκε ένα τυπικό κτίριο με κάτοψη 6.0 x 8.0 m και ύψος 3.5 m, με ή χωρίς ανοίγματα, όπως δείχνεται στα Σχ. Γ.8 και Γ.9. Το κτίριο αποτελείται από λιθοδομή πάχους 0.50 m.



Σχήμα Γ.8 Προσομοίωμα μονώροφου κτιρίου από λιθοδομή χωρίς ανοίγματα.



Σχήμα Γ.9 Προσομοίωμα μονώροφου κτιρίου από λιθοδομή με ανοίγματα.

Γ.2.1 Περιγραφή των επιλύσεων

Τα κτίσματα επιλύθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σε χωρική προσομοίωση. Για τις επιλύσεις των κτιρίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAP 2000 v.9 [2004]. Η τοιχοποιία προσομοιώθηκε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία σταθερού πάχους 50cm με δυνατότητα παραλαβής φορτίων τόσο μέσω καμπτικής (εκτός επιπέδου) όσο και μέσω μεμβρανικής λειτουργίας (εντός επιπέδου). Το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας ελήφθη ίσο προς E_m = 2 GPa. Η θερμοκρασία επιβλήθηκε στο εσωτερικό τους και κυμάνθηκε μεταξύ 100 και 600 ˚C. Για το κάθε κτίσμα που μελετήθηκε, θεωρήθηκαν οι παρακάτω κατανομές της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας:

(α) Ομοιόμορφη κατανομή.
(β) Γραμμική κατανομή, με μέγιστη θερμοκρασία στη βάση των τοίχων (100% της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας στην βάση και 20% της θερμοκρασίας στην οροφή).
(γ) Γραμμική κατανομή, με μέγιστη θερμοκρασία στην κορυφή των τοίχων (20% της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας στην βάση και 100% της θερμοκρασίας στην οροφή).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν το συνδυασμό φόρτισης 1.0 g + 1.0 T, όπου g οι μόνιμες δράσεις (ίδιο βάρος) και T η θερμοκρασιακή κατανομή. Πλην της περίπτωσης του κτίσματος με πλάκα από Ο.Σ., θεωρήθηκε κατά την επίλυση ότι η στέγη έχει καταρρεύσει. Συνολικά, αναλύθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις κτιρίων και θερμοκρασιακών δράσεων :

α) Κτίριο χωρίς ανοίγματα και χωρίς στέγη (περίπτωση ξυλοκατασκευής η οποία κατέρρευσε)

(1) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 100 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(2) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(3) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(4) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(5) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 300 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(6) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(7) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(8) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(9) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 500 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(10) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(11) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 ˚C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(12) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 ˚C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας.

β) Κτίριο χωρίς ανοίγματα με πλάκα από σκυρόδεμα (περίπτωση εναλλακτικής στέγασης)

(13) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 100 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(14) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(15) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(16) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(17) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 300 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(18) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(19) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(20) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(21) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 500 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(22) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(23) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(24) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας

γ) Κτίριο με ανοίγματα και χωρίς στέγη

(25) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(26) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(27) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 200 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(28) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(29) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(30) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(31) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%
(32) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με κατανομή θερμοκρασίας 20-100%
(33) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 600 °C – με ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
(34) Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C σε τμήμα του κτιρίου – με κατανομή θερμοκρασίας 100-20%

δ) Ανάλυση Ευαισθησίας.

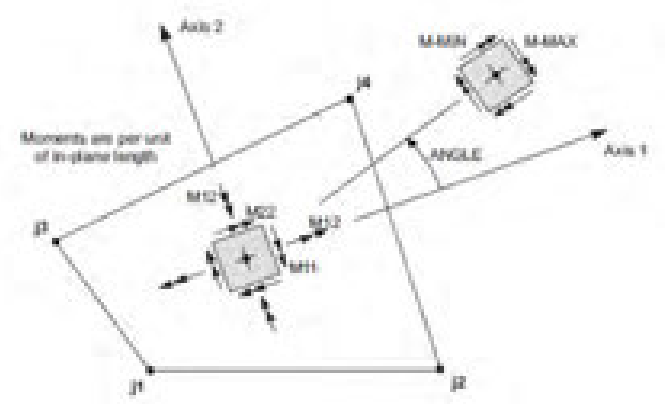
Πέραν των παραπάνω αναλύσεων, έγινε και σειρά επιλύσεων για την ανάλυση της ευαισθησίας του προβλήματος στις παραμέτρους της θερμοκρασιακής φόρτισης.

(35) Επιρροή της τιμής του θερμοκρασιακού φορτίου – Επιβαλλόμενη θερμοκρασία 100, 200, 300, 400, 500 και 600 °C.
(36) Επιρροή της στέγης (διάφραγμα) – Μονώροφο κτίριο με ή χωρίς στέγη
(37) Επιρροή των ανοιγμάτων στην τοιχοποιία – Μονώροφο κτίριο με ή χωρίς ανοίγματα
(38) Φωτιά επιβαλλόμενη σε όλο το κτίριο ή τμήμα του κτιρίου
(39) Επιρροή κατανομής του θερμοκρασιακού φορτίου – (α) Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας, (β) μέγιστη θερμοκρασία στη βάση του κτιρίου με μείωση καθ' ύψος (100% στην βάση και 20% στην οροφή), (γ) ελάχιστη θερμοκρασία στην βάση του κτιρίου και αύξηση καθ' ύψος (20% στην βάση και 100% στην οροφή).

Τα αποτελέσματα από τις επιλύσεις των παραπάνω τυπικών κτιρίων, παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων, επί του παραμορφωμένου σχήματος του κτιρίου, των παρακάτω παραμέτρων σχεδιασμού:

i) Της μέσης μεμβρανικής τάσης σ_{11} (σε MPa),
ii) Της μέσης μεμβρανικής τάσης σ_{22} (σε MPa), και
iii) Της ροπής M_{11} (σε kNm/m),

οι οποίες, σύμφωνα με τη σήμανση των κυρίων αξόνων 1 και 2 στο παραπλεύρως Σχ. Γ.10, ορίζονται ως η μέση τάση κατά τη διαμήκη διεύθυνση των τοιχοφατνωμάτων, η μέση τάση κατά τον κατακόρυφο άξονα και η ροπή στην πάκτωση του τοίχου, αντίστοιχα.

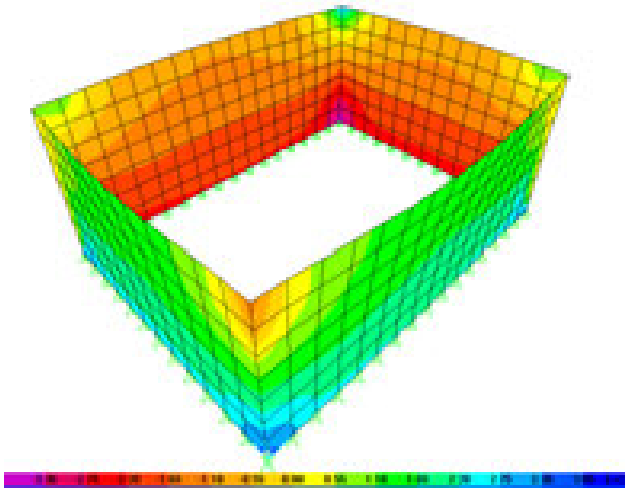


Σχήμα Γ.10 Σήμανση των κυρίων αξόνων του προσομοιώματος και ορισμός των ροπών M_{11} (κατά SAP 9).

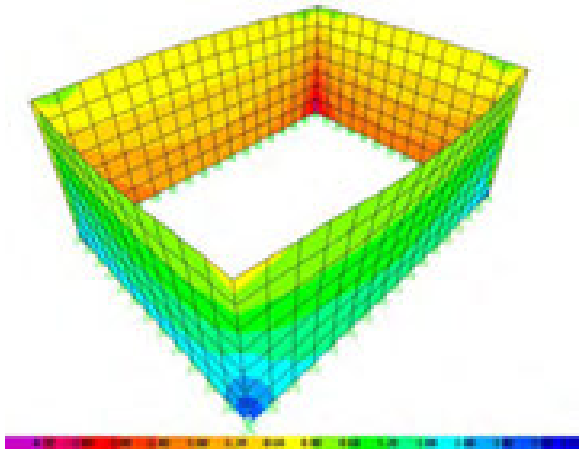
Αρχικά παρατίθενται <u>ενδεικτικά</u> τα αποτελέσματα τριών τυπικών επιλύσεων: i) Του κτιρίου χωρίς πλάκα από σκυρόδεμα, ii) Με πλάκα από σκυρόδεμα, και iii) Με ανοίγματα στη λιθοδομή, ακολουθούμενο από συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπό μορφή νομογραφημάτων για όλα τα κτίρια και όλες τις θερμοκρασιακές δράσεις που επιλύθηκαν.

Κτίριο χωρίς ανοίγματα και χωρίς στέγη (περίπτωση αρ. 6)

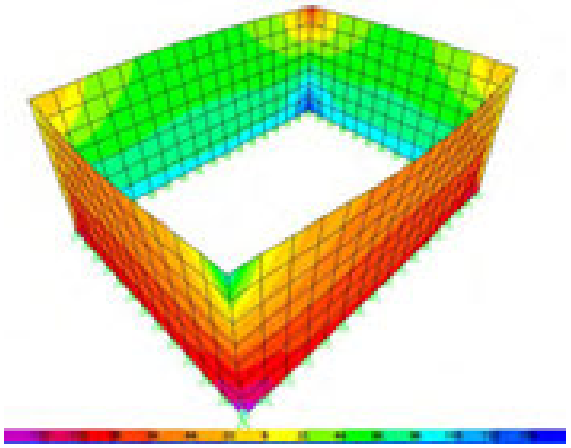
Κτίριο χωρίς στέγη και χωρίς ανοίγματα, εσωτερικά επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400°C και κατανομή θερμοκρασίας 100-20%.



Σχήμα Γ.11 Τάσεις σ_{11}



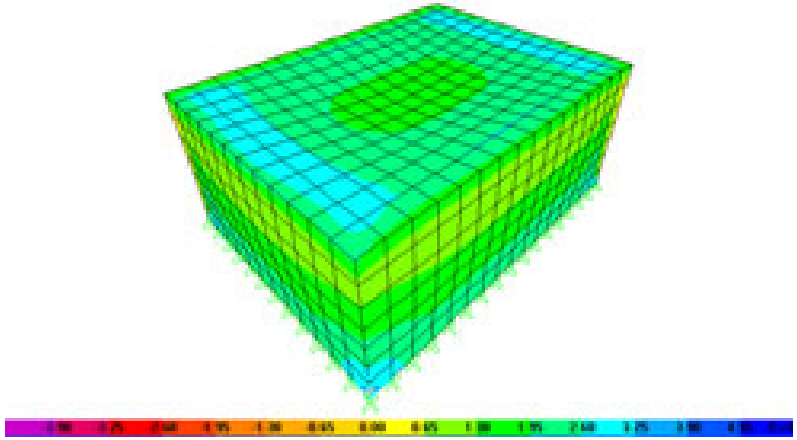
Σχήμα Γ.12 Τάσεις σ_{22}



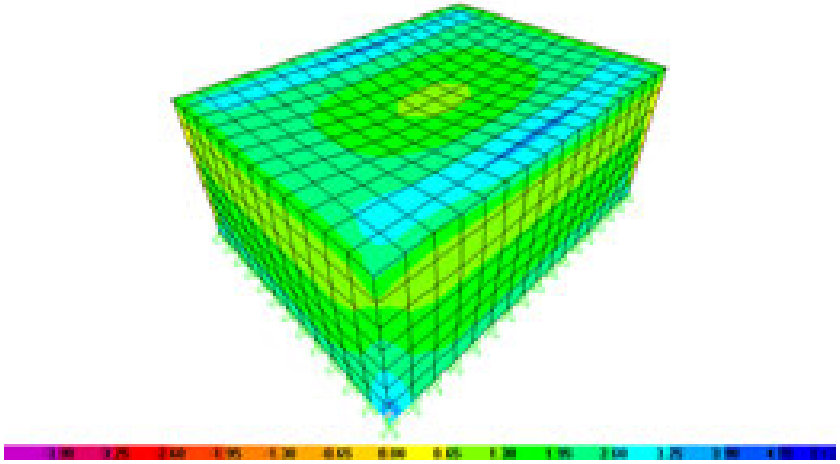
Σχήμα Γ.13 Ροπές M_{11}

Κτίριο χωρίς ανοίγματα με πλάκα από Ο.Σ.
(περίπτωση αρ. 18)

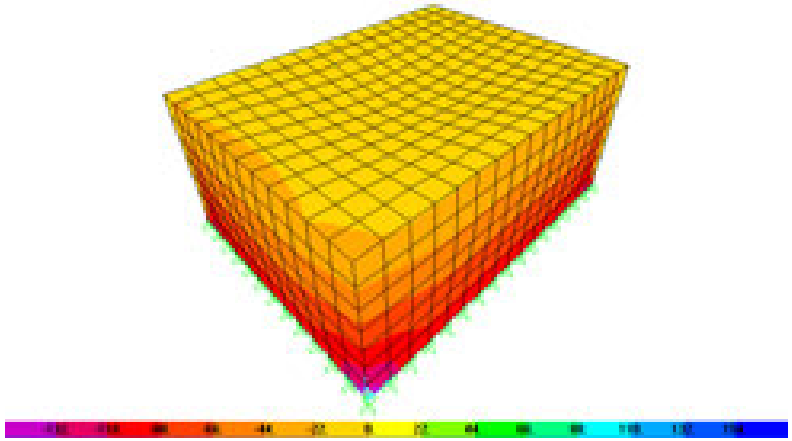
Κτίριο με πλάκα επικάλυψης από οπλισμένο σκυρόδεμα και χωρίς ανοίγματα, εσωτερικά επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C και κατανομή θερμοκρασίας 100-20%.



Σχήμα Γ.14 Τάσεις σ_{11}



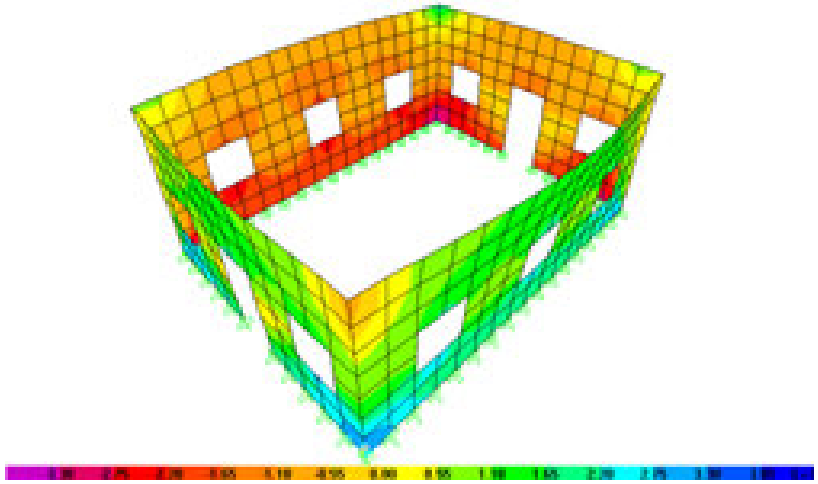
Σχήμα Γ.15 Τάσεις σ_{22}



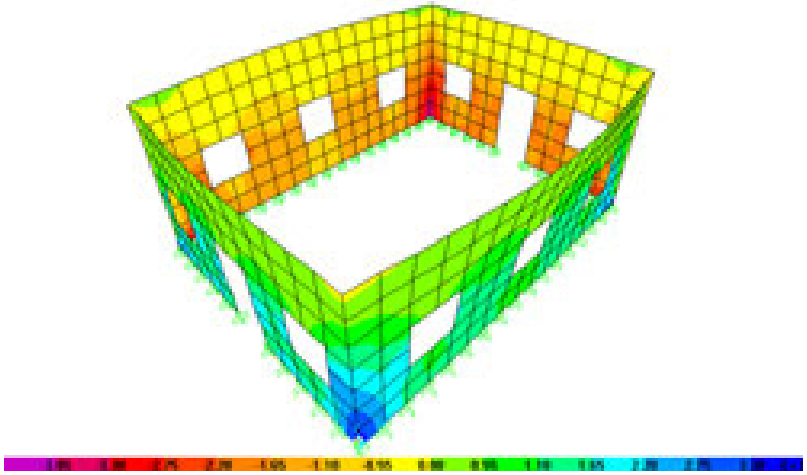
Σχήμα Γ.16 Ροπές M_{11}

Κτίριο με ανοίγματα και χωρίς στέγη
(περίπτωση αρ. 28)

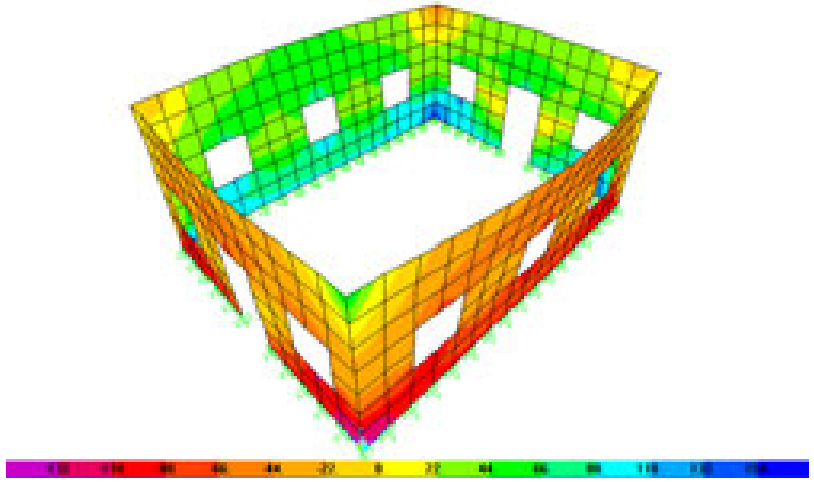
Κτίριο χωρίς στέγη, με ανοίγματα, εσωτερικά επιβαλλόμενη θερμοκρασία 400 °C και κατανομή θερμοκρασίας 100-20%.



Σχήμα Γ.17 Τάσεις σ_{11}



Σχήμα Γ.18 Τάσεις σ_{22}

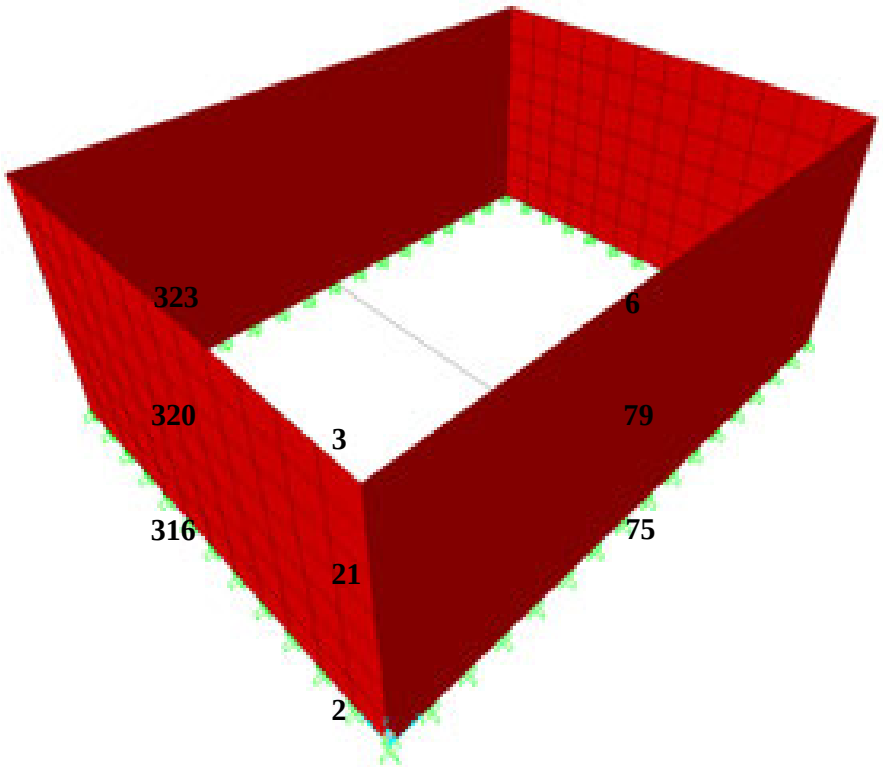


Σχήμα Γ.19 Ροπές M_{11}

Γ.2.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα, κτιρίων με ή χωρίς πλάκα επικάλυψης από οπλισμένο σκυρόδεμα

Στο Σχ. Γ.20 φαίνονται οι κόμβοι στους οποίους ελέγχονται τα εντατικά μεγέθη που παρουσιάζονται παρακάτω, για τη συνοπτική παρουσίαση των νομογραφημάτων (δείχνεται ενδεικτικά το κτίριο χωρίς ανοίγματα).

Ακολούθως, συγκρίνονται στην ίδια θέση τα αντίστοιχα μεγέθη σχεδιασμού για τα δύο κτίρια, αρχικά χωρίς και ακολούθως με επικάλυψη από οπλισμένο σκυρόδεμα.

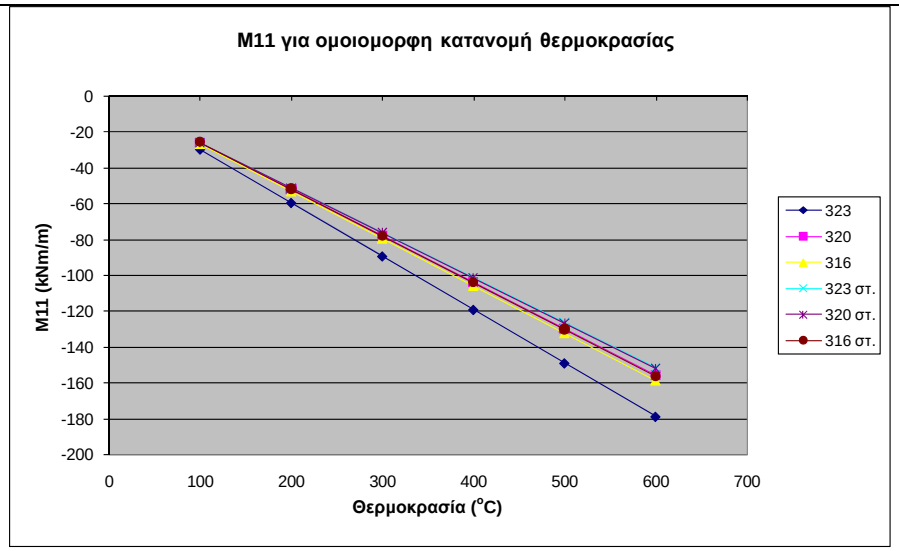


Σχήμα Γ.20 Αρίθμηση κόμβων, κτίριο χωρίς ανοίγματα (η αρίθμηση είναι όμοια και για το κτίριο με πλάκα επικάλυψης).

Στο Σχήμα Γ.21 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{11} περί τον οριζόντιο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η ροπή είναι μέγιστη στην κορυφή του τοίχου (κόμβος 323) και μειώνεται στην μέση και στην βάση του τοίχου (κόμβοι 320 και 316 αντίστοιχα).

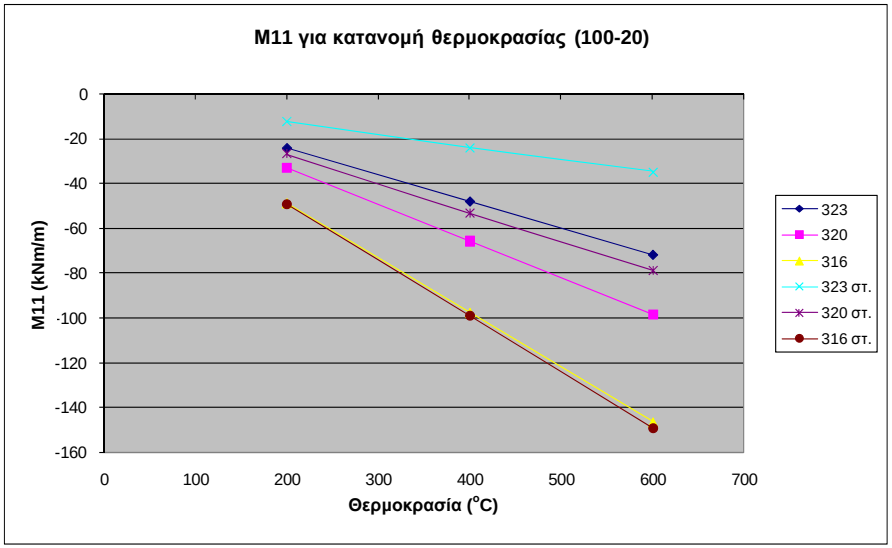
Η ροπή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ παρατηρείται ότι η ροπή είναι εν γένει μεγαλύτερη στην περίπτωση που το κτίριο δεν έχει στέγη.



Σχήμα Γ.21 Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στη μέση.

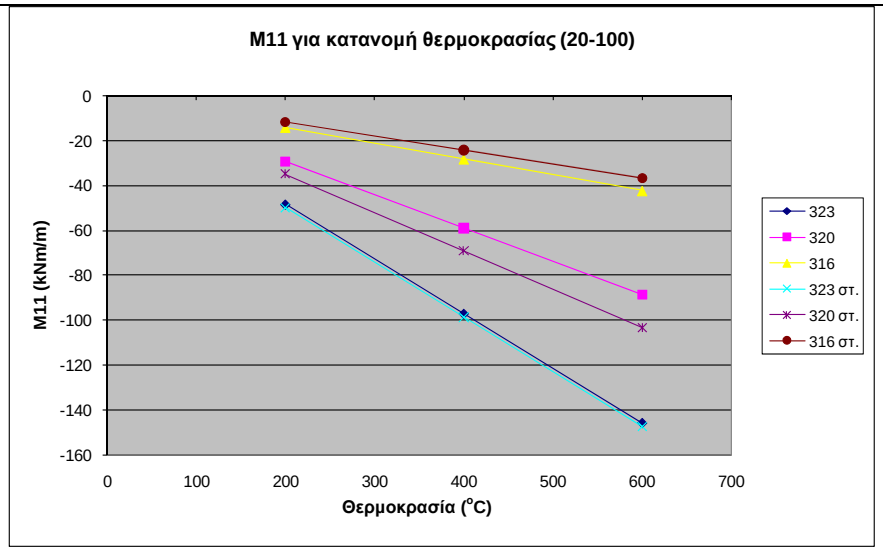
Στο Σχήμα Γ.22 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου, για κατανομή θερμοκρασίας 100 – 20%, δηλαδή μέγιστη θερμοκρασία στην βάση του κτιρίου και ελάχιστη στην οροφή. Οι τιμές της ροπής είναι μειωμένες σε σχέση με την περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας.

Επίσης, στην βάση του τοίχου η ροπή είναι μικρότερη από την ροπή στην οροφή του τοίχου.



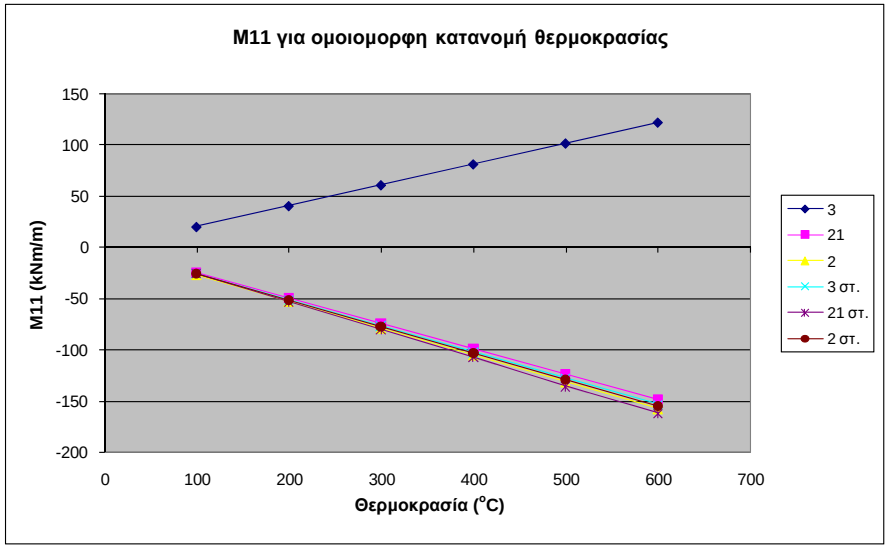
Σχήμα Γ.22Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, γραμμική Τ, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.23 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου, για την κατανομή θερμοκρασίας 20 – 100%, δηλαδή μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή του κτιρίου και ελάχιστη στην βάση. Οι τιμές της ροπής είναι μειωμένες στην βάση του κτιρίου και αυξημένες στην οροφή όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα Γ.23 Εναλλαγή ροπής M_{11}, ανεστρ. γραμμική Τ, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.24 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην άκρη της μικρής πλευράς του τοίχου, για ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας καθ' ύψος του κτιρίου. Η ροπή στη βάση και στην μέση του τοίχου έχει παρόμοιες τιμές, ενώ στην οροφή του τοίχου αλλάζει πρόσημο.

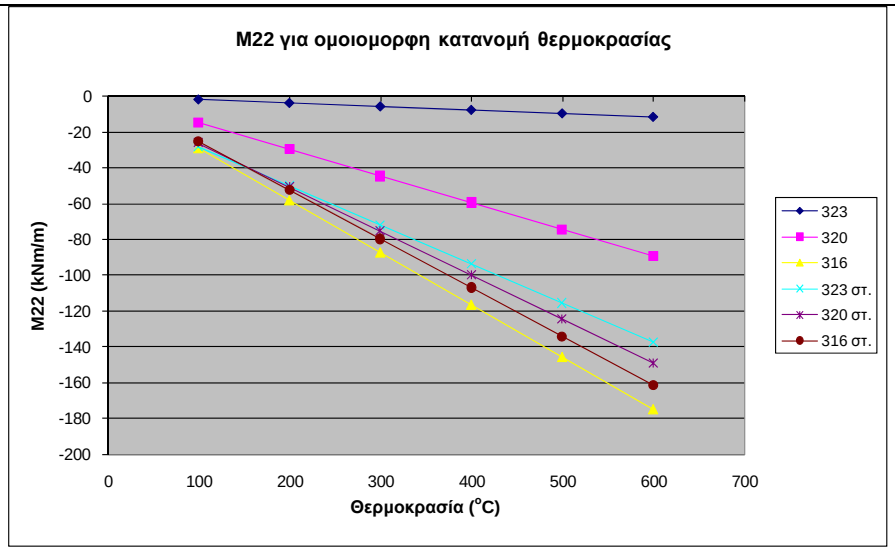


Σχήμα Γ.24 Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στην άκρη.

Στο Σχ. Γ.25 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{22} περί τον κατακόρυφο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η τιμή της ροπής είναι μέγιστη στην βάση του τοίχου (κόμβος 316) και μειώνεται στην μέση και στην οροφή του τοίχου (κόμβοι 320 και 323 αντίστοιχα).

Η τιμή της ροπής M_{22} αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

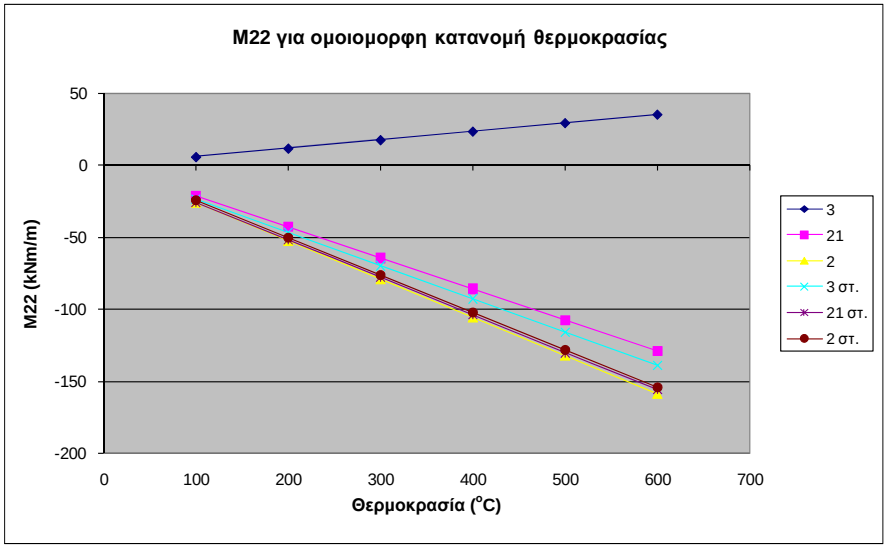


Σχήμα Γ.25 Ροπή M_{22} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.26 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{22} περί τον κατακόρυφο άξονα, για τρία σημεία στην άκρη της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η τιμή της ροπής είναι μέγιστη στην βάση του τοίχου (κόμβος 316) και μειώνεται στην μέση (κόμβος 21), ενώ στην οροφή του τοίχου αλλάζει πρόσημο (κόμβος 3).

Η τιμή της ροπής M_{22} αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

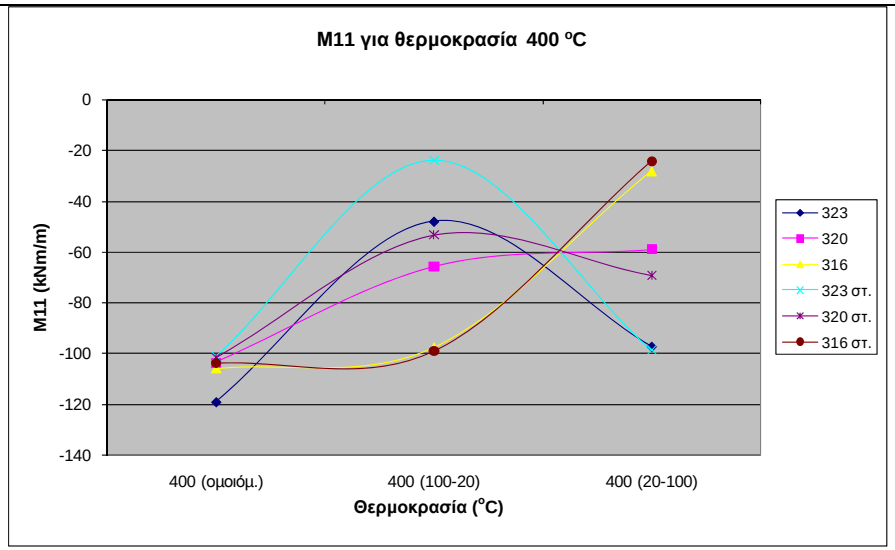


Σχήμα Γ.26Ροπή M_{22} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στην άκρη.

Στο Σχ. Γ.27 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{11} περί τον οριζόντιο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Για την οροφή του τοίχου, η ροπή είναι μέγιστη για την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας, μειώνεται στην περίπτωση που η θερμοκρασία είναι μέγιστη στην οροφή του τοίχου, και μειώνεται περαιτέρω όταν η θερμοκρασία είναι ελάχιστη στην οροφή του τοίχου.

Αντίθετα, για την βάση του τοίχου, η ροπή είναι μέγιστη όταν η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη, μειώνεται λίγο όταν η επιβαλλόμενη θερμοκρασία είναι μέγιστη στην βάση, ενώ μειώνεται σημαντικά όταν η θερμοκρασία είναι ελάχιστη στην βάση.

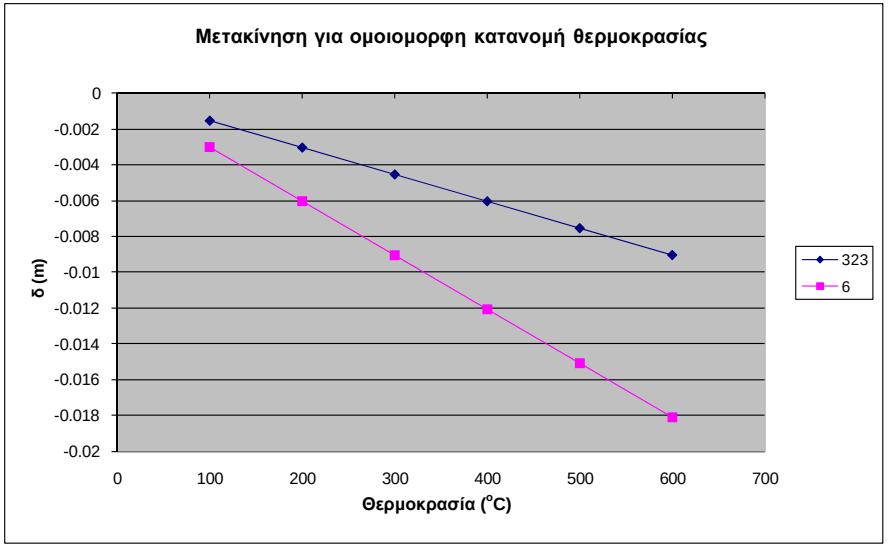


Σχήμα Γ.27 Επιρροή της κατανομής της Τ, ροπή M_{11}, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.28 φαίνεται η μετακίνηση για δύο σημεία στην οροφή του τοίχου, στην μέση της μικρής πλευράς και στην μέση της μεγάλης πλευράς.

Η μετακίνηση στην μεγάλη πλευρά του τοίχου είναι μεγαλύτερη, όπως αναμένεται. Η μετακίνηση είναι μέγιστη όταν η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κτιρίου, μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι μέγιστη στη βάση, και λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η επιβαλλόμενη θερμοκρασία είναι μέγιστη στην οροφή.

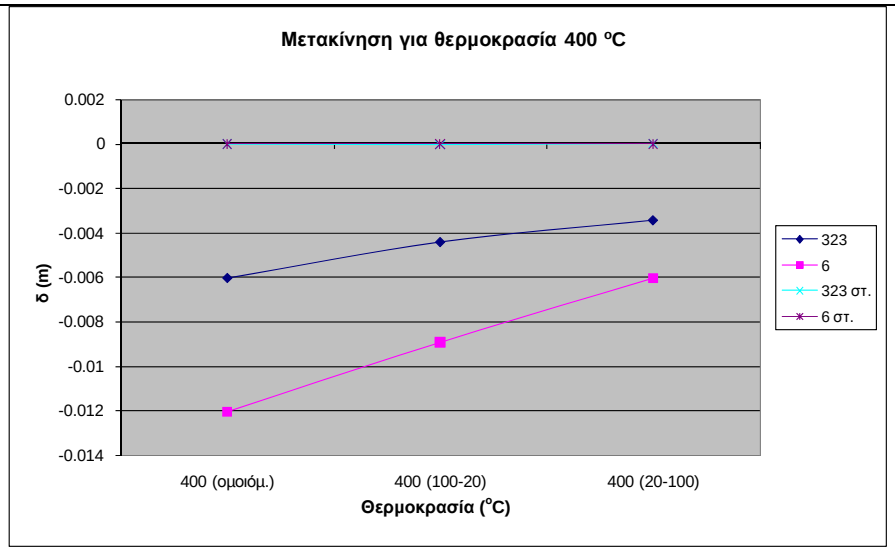
Σημειώνεται ότι στο κτίριο με διάφραγμα δεν μετακινείται η οροφή.



Σχήμα Γ.28Επιρροή της Τ στη μετακίνηση οροφής.

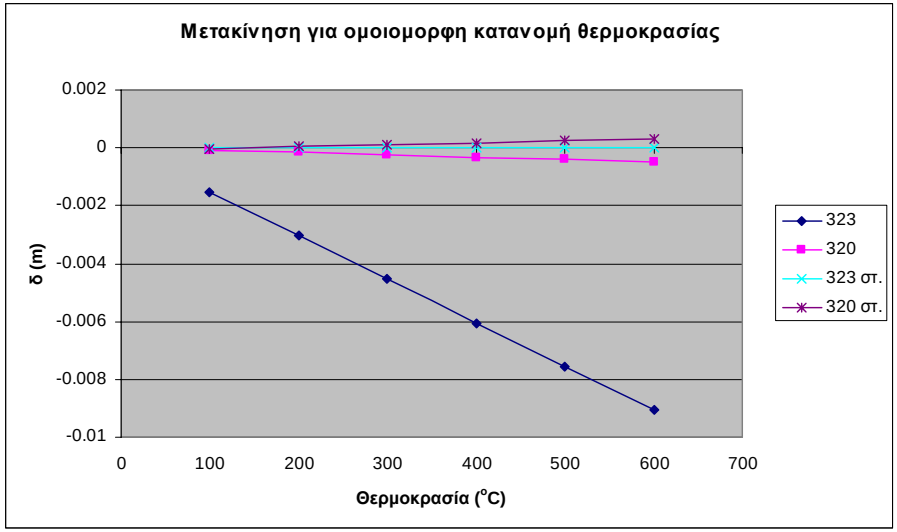
Στο Σχ. Γ.29 φαίνεται η μετακίνηση για δύο σημεία στην οροφή του τοίχου, στην μέση της μικρής πλευράς και στην μέση της μεγάλης πλευράς.

Η μετακίνηση στην μεγάλη πλευρά του τοίχου είναι μεγαλύτερη, όπως αναμένεται. Η μετακίνηση είναι μέγιστη όταν η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κτιρίου, μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι μέγιστη στην βάση, και λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η επιβαλλόμενη θερμοκρασία είναι μέγιστη στην οροφή. Σημειώνεται ότι στο κτίριο με διάφραγμα δεν μετακινείται η οροφή.



Σχήμα Γ.29 Επιρροή της κατανομής της Τ στη μετακίνηση.

Στο Σχ. Γ.30 φαίνεται η μετακίνηση δύο κόμβων, στην οροφή (κόμβος 323) και στην μέση (κόμβος 320) της μικρής πλευράς του κτιρίου. Η μετακίνηση της οροφής είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην περίπτωση που το κτίριο δεν έχει στέγη, σε σχέση με το κτίριο στο οποίο υπάρχει πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος στην οροφή.



Σχήμα Γ.30 Επιρροή του διαφράγματος στη μετακίνηση οροφής.

Από τα παραπάνω είναι προφανής η καλύτερη συμπεριφορά του κτιρίου στο οποίο υπάρχει πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος στην οροφή, σε σχέση με εκείνο χωρίς στέγη (άρα στέγη από ξύλο που έχει καταστραφεί από την πυρκαγιά).

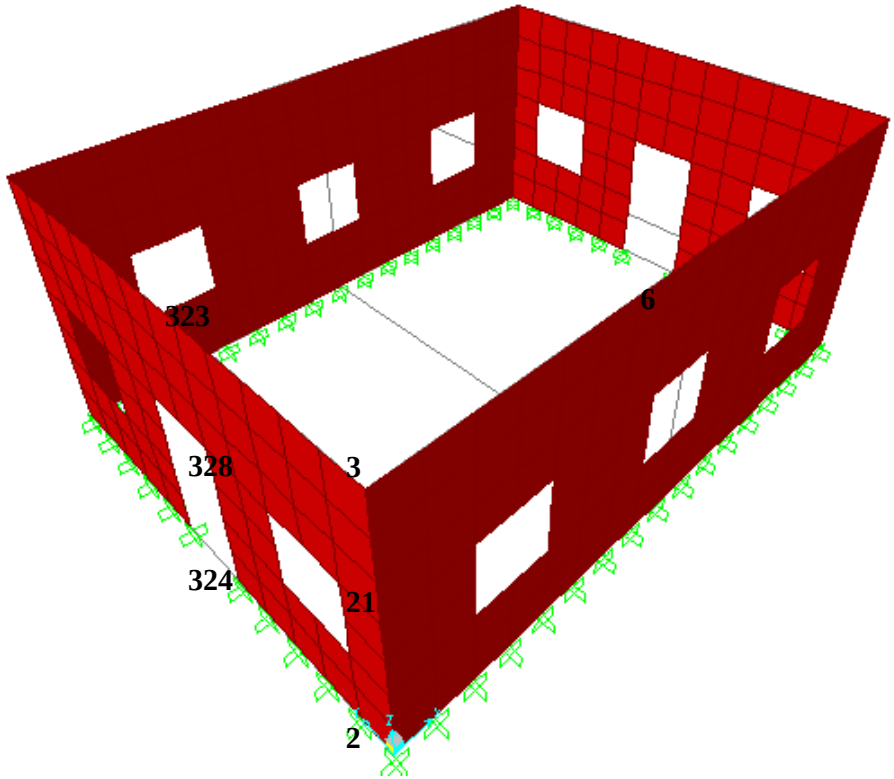
Το κτίριο με την πλάκα οροφής παρουσιάζει μικρότερες μετακινήσεις, καθώς και μικρότερες τιμές εντατικών μεγεθών.

Έτσι, από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η κατασκευή διαφράγματος στην οροφή του κτιρίου βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά του, καί υπό πυρκαγιά !

Γ.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα, κτιρίων χωρίς και με ανοίγματα (μετά από κατάρρευση της στέγης από ξυλοκατασκευή)

Στο Σχ. Γ.31 φαίνονται οι κόμβοι στους οποίους ελέγχονται τα εντατικά μεγέθη για την παρουσίαση των νομογραφημάτων του κτιρίου με ανοίγματα.

Ακολούθως, συγκρίνονται στην ίδια θέση τα μεγέθη για τα δύο κτίρια χωρίς επικάλυψη, αρχικά χωρίς και ακολούθως με ανοίγματα στην πρόσοψη.

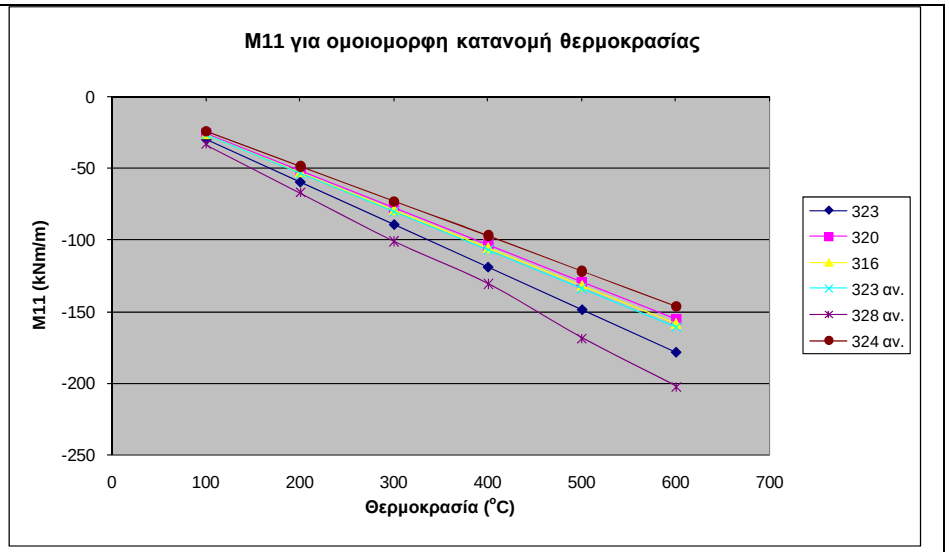


Σχήμα Γ.31 Αρίθμηση κόμβων, κτίριο με ανοίγματα.

Στο Σχήμα Γ.32 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{11} περί τον οριζόντιο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η ροπή είναι μέγιστη στην κορυφή του τοίχου (κόμβος 323) και μειώνεται στην μέση και στην βάση του τοίχου (κόμβοι 320 και 316 αντίστοιχα).

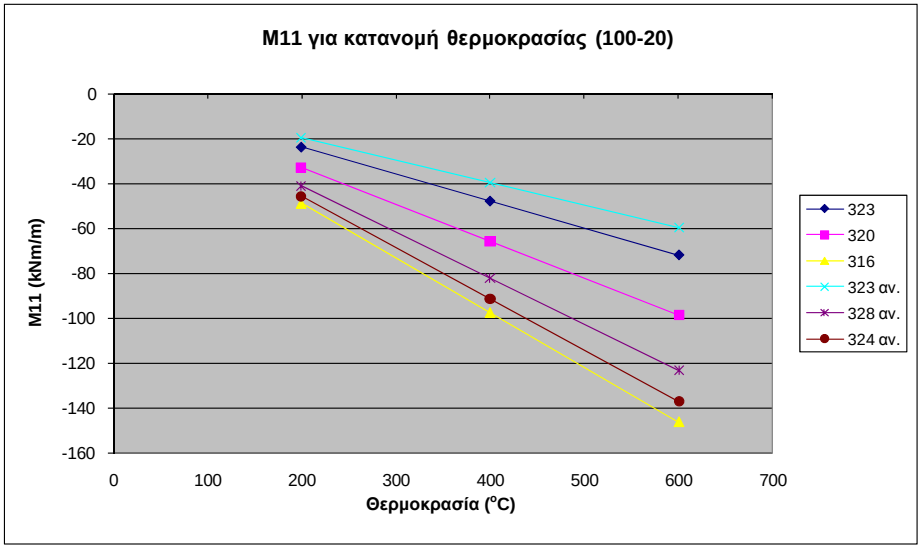
Η ροπή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ παρατηρείται ότι η ροπή είναι εν γένει μικρότερη στην περίπτωση που το κτίριο έχει ανοίγματα.



Σχήμα Γ.32 Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στη μέση.

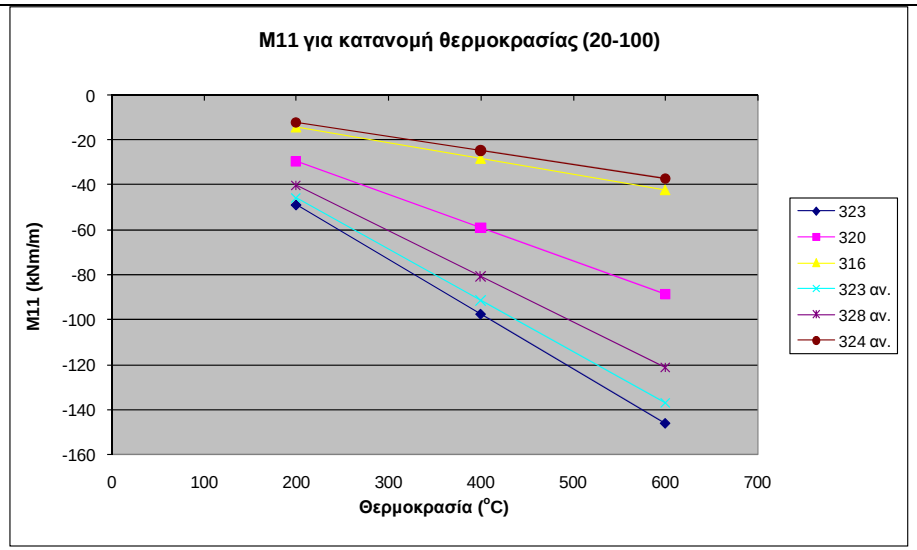
Στο Σχήμα Γ.33 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου, για κατανομή θερμοκρασίας 100 – 20%, δηλαδή μέγιστη θερμοκρασία στην βάση του κτιρίου και ελάχιστη στην οροφή. Οι τιμές της ροπής είναι μειωμένες σε σχέση με την περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας.

Επίσης, στην βάση του τοίχου η ροπή είναι μικρότερη από την ροπή στην οροφή του τοίχου. Η ύπαρξη ανοιγμάτων μειώνει τις ροπές.



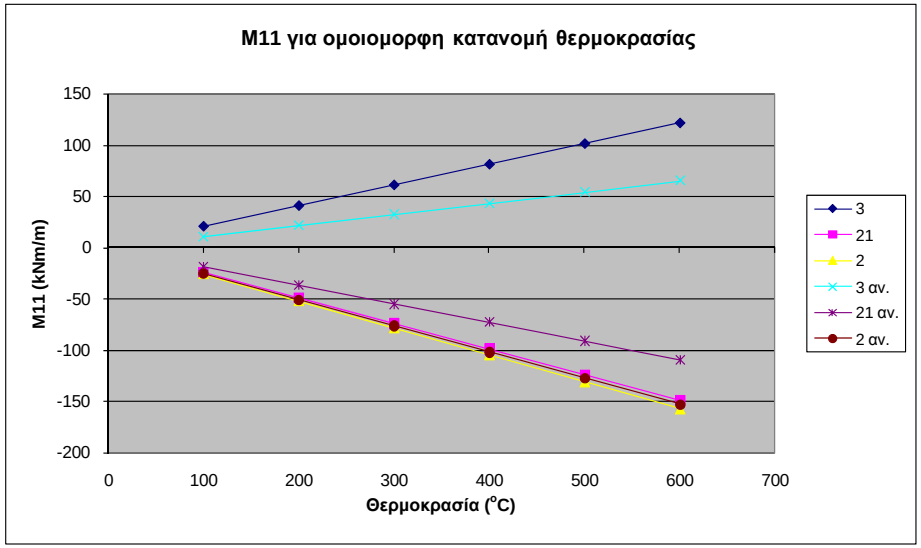
Σχήμα Γ.33 Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, γραμμική Τ, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.34 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου, για την κατανομή θερμοκρασίας 20 – 100%, δηλαδή μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή του κτιρίου και ελάχιστη στην βάση. Οι τιμές της ροπής είναι μειωμένες στην βάση του κτιρίου και αυξημένες στην οροφή όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη. Η ύπαρξη ανοιγμάτων μειώνει τις ροπές.



Σχήμα Γ.34 Εναλλαγή ροπής M_{11}, ανεστρ. γραμμική Τ, στη μέση.

Στο Σχ. Γ.35 φαίνεται η ροπή M_{11} σε τρία σημεία στην άκρη της μικρής πλευράς του τοίχου, για ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας καθ' ύψος του κτιρίου. Η ροπή στη βάση και στην μέση του τοίχου έχει παρόμοιες τιμές, ενώ στην οροφή του τοίχου αλλάζει πρόσημο.

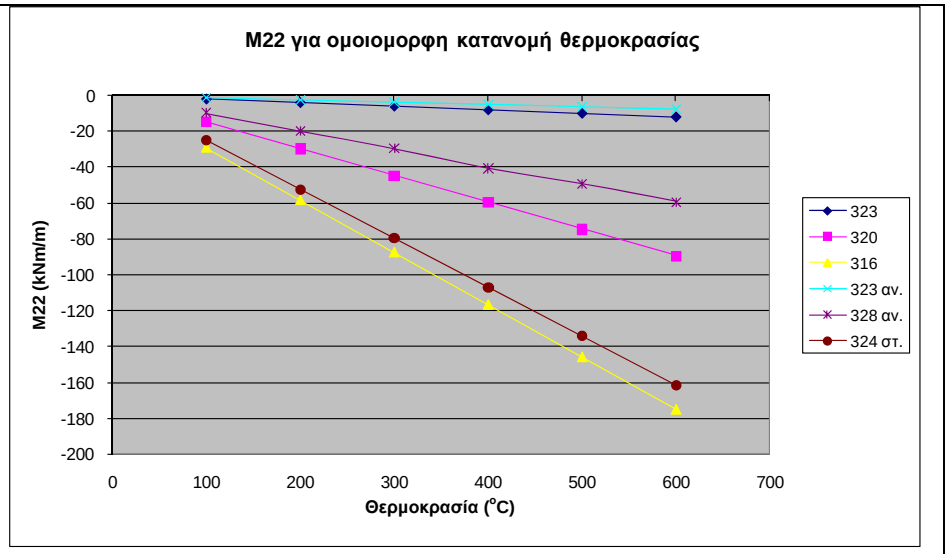


Σχήμα Γ.35 Ροπή M_{11} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στην άκρη.

Στο Σχ. Γ.36 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{22} περί τον κατακόρυφο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η τιμή της ροπής είναι μέγιστη στην βάση του τοίχου (κόμβος 316) και μειώνεται στην μέση και στην οροφή του τοίχου (κόμβοι 320 και 323 αντίστοιχα).

Η τιμή της ροπής M_{22} αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η ύπαρξη ανοιγμάτων μειώνει τις ροπές.

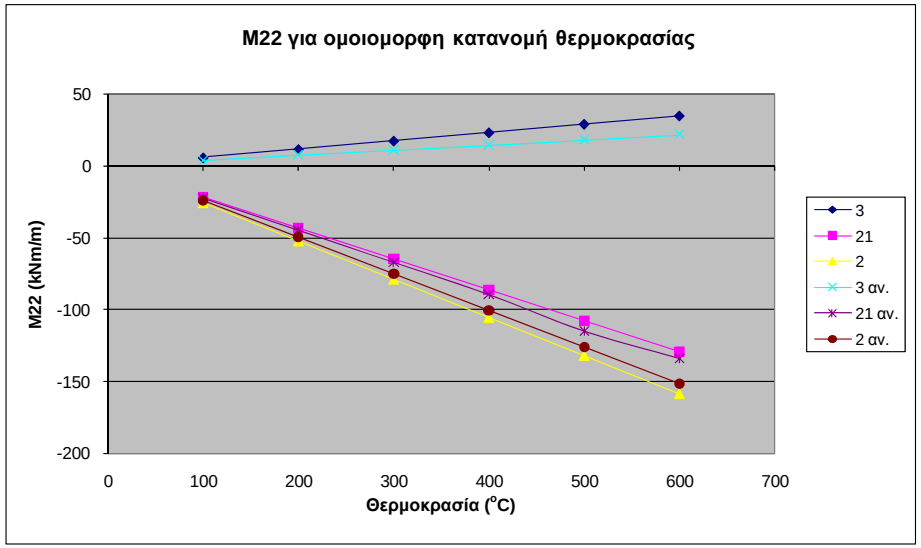


Σχήμα Γ.36 Ροπή M_{22} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στημέση.

Στο Σχ. Γ.37 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{22} περί τον κατακόρυφο άξονα, για τρία σημεία στην άκρη της μικρής πλευράς του τοίχου.

Η τιμή της ροπής είναι μέγιστη στην βάση του τοίχου (κόμβος 316) και μειώνεται στην μέση (κόμβος 21), ενώ στην οροφή του τοίχου αλλάζει πρόσημο (κόμβος 3).

Η τιμή της ροπής M_{22} αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

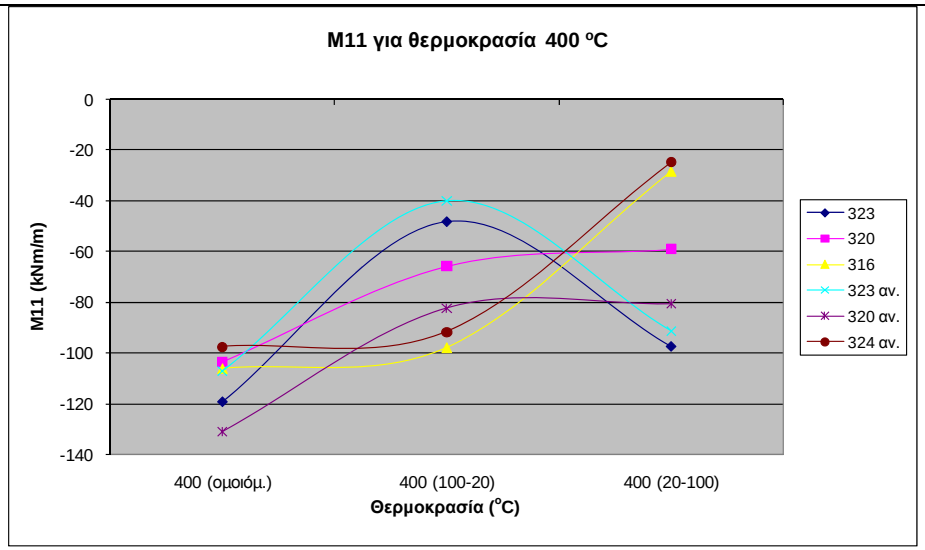


Σχήμα Γ.37 Ροπή M_{22} με τη θερμοκρασία, ομοιόμορφη Τ, στην άκρη.

Στο Σχ. Γ.38 φαίνεται η εκτός επιπέδου ροπή M_{11} περί τον οριζόντιο άξονα, για τρία σημεία στην μέση της μικρής πλευράς του τοίχου.

Για την οροφή του τοίχου, η ροπή είναι μέγιστη για την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής της επιβαλλόμενης θερμοκρασίας, μειώνεται στην περίπτωση που η θερμοκρασία είναι μέγιστη στην οροφή του τοίχου, και μειώνεται περαιτέρω όταν η θερμοκρασία είναι ελάχιστη στην οροφή του τοίχου.

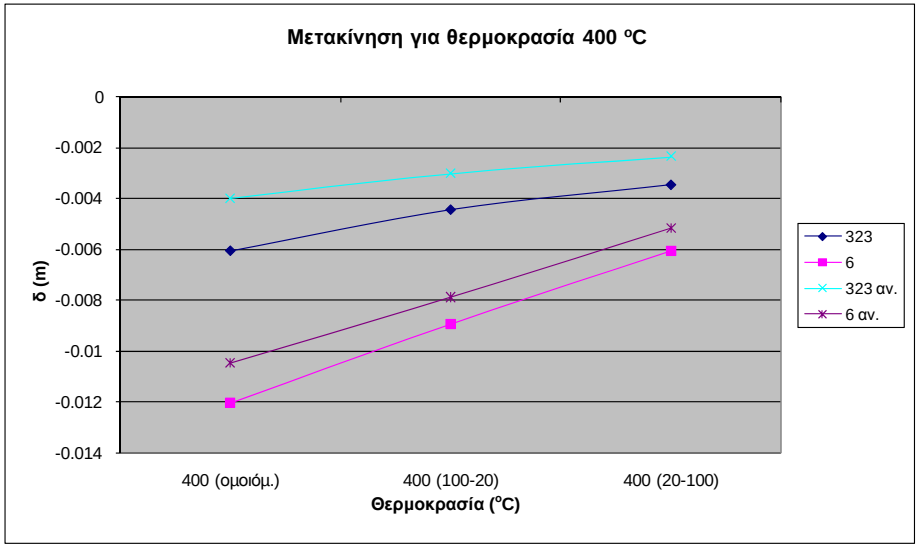
Αντίθετα, για την βάση του τοίχου, η ροπή είναι μέγιστη όταν η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη και μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι μέγιστη στη βάση, ενώ μειώνεται σημαντικά όταν η θερμοκρασία είναι ελάχιστη στη βάση. Η ύπαρξη ανοιγμάτων μειώνει τις ροπές.



Σχήμα Γ.38 Επιρροή της κατανομής της Τ, ροπή M_{11}, στη μέση.

Στα Σχ. Γ.39 και Γ.40 φαίνεται η μετακίνηση για τρία σημεία στην οροφή του τοίχου, στην μέση της μικρής πλευράς, στη μέση της μεγάλης πλευράς και στη μέση (κόμβος 320) της μικρής πλευράς του κτιρίου.

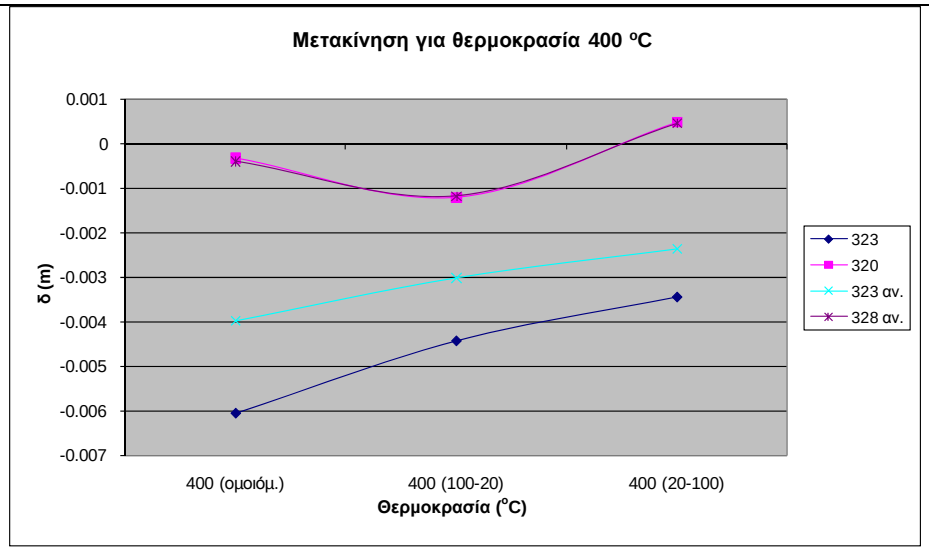
Η μετακίνηση στην μεγάλη πλευρά του τοίχου είναι μεγαλύτερη, όπως αναμένεται. Η μετακίνηση είναι μέγιστη όταν η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη καθ' ύψος του κτιρίου, μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι μέγιστη στην βάση, και λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η επιβαλλόμενη θερμοκρασία είναι μέγιστη στην οροφή. Παρατηρείται ότι το κτίριο με ανοίγματα έχει μικρότερες μετακινήσεις.



Σχήμα Γ.39 Επιρροή της κατανομής της Τ στη μετακίνηση.

Γενικά, από τις αναλύσεις που παρατίθενται προκύπτει ότι στο κτίριο με ανοίγματα τα εντατικά μεγέθη για δεδομένη θερμοκρασιακή δράση μειώνονται.

Όμως, τα κτίρια με ανοίγματα είναι σαφώς πιό ευάλωτα στην πυρκαγιά, και έτσι η θερμοκρασιακή τους δράση (εξωτερικώς και εσωτερικώς) είναι σαφώς μεγαλύτερη εκείνης κτιρίου με λιγότερα ανοίγματα.



Σχήμα Γ.40 Επιροή του διαφράγματος στη μετακίνηση οροφής.

Γ.3 ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EC2, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures", Part 1-2, EN 1992-1-2, 2004.

[2] Livermore Software Technology Corp., "LS_DYNA Theory Manual", 2006.

[3] Livermore Software Technology Corp., LS_DYNA, Έκδοση 971.R3, California, 2007.

[4] Computers and Structures, Inc., SAP 2000, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, v.9, Berkeley, 2004.