

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ – ΓΙΟΚΑΡΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Περίληψη

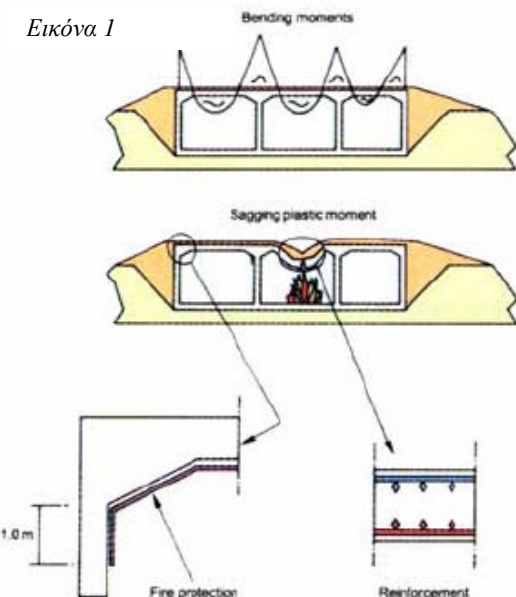
Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην συμπεριφορά των δομικών στοιχείων μιας σήραγγας έναντι πολύ υψηλών θερμοκρασιών και στις μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης της σήραγγας που έχει υποστεί βλάβη από πυρκαγιά. Αναλύεται το φαινόμενο της αποκόλλησης τμημάτων (spalling) από την επιφάνεια του σκυροδέματος το οποίο αποτελεί την σοβαρότερη βλάβη διότι η αποκάλυψη του οπλισμού και η έκθεσή του στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση μέρους ή ακόμα και ολόκληρης της κατασκευής. Στη συνέχεια, περιγράφεται με ποια κριτήρια γίνεται η επιλογή της σύνθεσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η διαδικασία εφαρμογής του, όπως επίσης και η εφαρμογή παθητικής πυροπροστασίας (μέθοδος και υλικά) κατά την επισκευή. Τέλος, παρουσιάζεται η επισκευή του TAUEREN TUNNEL μετά από πυρκαγιά.

.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στις σήραγγες διαφέρουν σημαντικά από τις επιπτώσεις της φωτιάς στα κτίρια. Κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών καύσης των οχημάτων και της διάρκειας της φωτιάς, όπου σε κτίρια είναι περίπου 2 ώρες ενώ στις σήραγγες στατιστικά η διάρκεια είναι πολύ μεγαλύτερη εξαιτίας της δυσκολίας κατάσβεσής της. Επίσης η στενότητα της οροφής μίας σήραγγας πάνω από την φωτιά (μονόπλευρης θέρμανσης) συνεπάγεται ότι το ζεστό σύννεφο καπνού ανάμεσα στη φωτιά και στην κορυφή της σήραγγας έχει λιγότερο ύψος μέσα από το οποίο μπορεί παρασυρθεί πιο κρύος αέρας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών σε αντίθεση με τα κτίρια. Εκτός από τις υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται συμβαίνει και γρήγορη άνοδος της θερμοκρασίας στην αρχή της πυρκαγιάς οδηγώντας σε εκρηκτική αποκόλληση (explosive spalling). Η σωστή μελέτη και εφαρμογή της επισκευής είναι πολύ σημαντική λόγω της ιδιαίτερης γεωπολιτικής σημασίας αυτών (οδική / σιδηροδρομική σύνδεση δύσβατων γεωγραφικά περιοχών).

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΗΝ ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ [1]

Η μορφή της σήραγγας μπορεί επίσης να επηρεάσει την ικανότητά της να αντιστέκεται στην φωτιά. Ορθογώνιας διατομής σήραγγες του τύπου cut and cover κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως κατασκευές οι οποίες καταπονούνται από εντάσεις



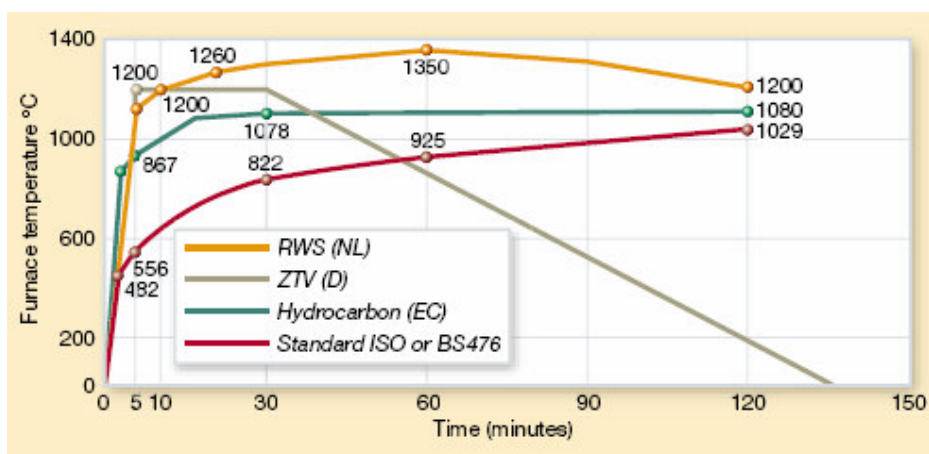
λόγω κάμψης. Κατά συνέπεια, η φωτιά σε μια τέτοια κατασκευή θα προκαλέσει αποκόλληση σκυροδέματος στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και σοβαρή μείωση της καμπτικής αντοχής του στοιχείου επηρεάζοντας σοβαρά τη σταθερότητα της κατασκευής (Εικόνα1). Οι κυκλικής διατομής σήραγγες συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις ορθογωνικές μιας και αυτές καταπονούνται από θλιπτικές τάσεις κατά μήκος του θόλου τους. Κατά την διάρκεια της φωτιάς οι τάσεις στον θόλο αυξάνονται εξαιτίας της εμποδιζόμενης διαστολής που αναπτύσσεται κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια. Η καταπόνηση των σήραγγων κυκλικής διατομής αυξάνει την πιθανότητα για εκδήλωση του φαινομένου αυτού

ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΙΔΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ [2], [3]

Η συμπεριφορά κάθε υλικού εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Για την εργαστηριακή προσομοίωση έχουν αναπτυχθεί διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου / θερμοκρασίας. Εθνικοί & Διεθνείς κανονισμοί έχουν θεσπίσει αντίστοιχες καμπύλες όπως παρακάτω:

1. ISO: Καμπύλη υπολογισμού θερμοκρασίας σε κανονικά αεριζόμενους χώρους που υπάρχουν καύσιμα. Η θερμοκρασία μετά από 30' φτάνει τους 822⁰C.
2. Καμπύλη υδρογονανθράκων. Σε κανονικά αεριζόμενους χώρους που υπάρχουν καύσιμα. Η θερμοκρασία μετά από 20' φτάνει τους 1068⁰C.
3. RABT. Καμπύλη προσομοίωσης θερμοκρασίας για σήραγγες (τούνελ) σύμφωνα με τα γερμανικά πρότυπα κατασκευών. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 1200⁰C και εφαρμόζεται για χρόνο ανάλογο της συγκεκριμένης χρήσης.
4. RWS. Καμπύλη σύμφωνα με τα Ολλανδικά πρότυπα, προσομοιάζοντας καύση λαδιών σε ελεγχόμενο κλειστό χώρο. Η θερμοκρασία μετά από 60' φτάνει τους 1350⁰C.

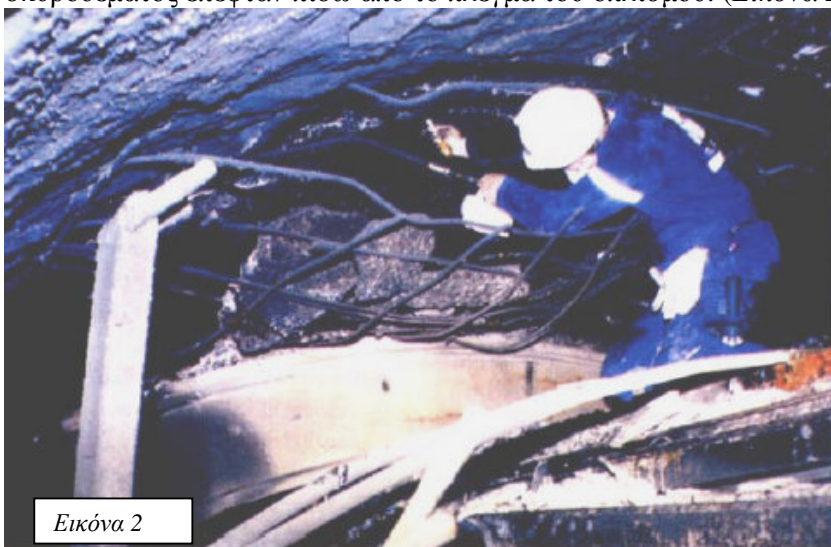
Ένας αριθμός από ονομαστικές καμπύλες φωτιάς έχουν προταθεί για τις σήραγγες από τις οποίες η αυστηρότερη είναι η ολλανδική καμπύλη υδρογονανθράκων RWS στην οποία η θερμοκρασία φτάνει τους 1100⁰C μετά από 5 λεπτά και τους 1350⁰C μετά από 60 λεπτά. Η ISO καμπύλη φωτιάς έχει προταθεί για μικρές φωτιές. Υπάρχουν άλλες δύο καμπύλες οι οποίες φαίνονται παρακάτω (Διάγραμμα 1)



ΤΙ ΕΧΕΙ ΣΥΜΒΕΙ

Είναι γεγονός ότι ανέκαθεν οι σήραγγες υπέφεραν από φωτιές. Πριν μια δεκαετία όμως ήταν το φαινόμενο της εκρηκτικής αποκόλλησης (explosive spalling) της επικάλυψης από σκυρόδεμα σε δύο περιπτώσεις, στο Great Belt Tunnel (Δανία 1994) και στο Channel Tunnel (1996 Γαλλία-Αγγλία), που έδωσαν το έναυσμα για σοβαρότερη μελέτη του φαινομένου και την εφεύρεση νέων μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης μιας σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα η οποία έχει υποστεί ζημιές. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις δεν είχε ληφθεί κανένα μέτρο παθητικής πυροπροστασίας σε σήραγγα και είχε χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Στο Great Belt Tunnel [24] διαρροή πετρελαίου από ένα μηχάνημα εκσκαφής, κατά την διάρκεια της κατασκευής, προκάλεσε την φωτιά δημιουργώντας θερμοκρασίες μέχρι 800 °C. Σχεδόν τα 2/3 της επικάλυψης από σκυρόδεμα καταστράφηκαν από το φαινόμενο της εκρηκτικής αποκόλλησης (explosive spalling). Ο οπλισμός είχε υποστεί μεγάλη ζημιά και μεγάλα κομμάτια σκυροδέματος έπεφταν πίσω από το πλέγμα του οπλισμού. (Εικόνα 2)



Στην πυρκαγιά στο Channel Tunnel η φωτιά κράτησε 9 ώρες και λόγω των υλικών που καιγόntonταν όπως βενζίνη, πολυστερίνη και ζωικό λίπος, η θερμοκρασία έφτασε την τιμή των 1100 °C. Η πυρκαγιά ήταν τόσο ισχυρή όπου σχεδόν το 100% της επικάλυψης από σκυρόδεμα καταστράφηκε από το φαινόμενο της αποκόλλησης, αποκαλύπτοντας το έδαφος από πίσω.

Πρέπει να αναφερθεί πως πέρα από τις κατασκευαστικές ζημιές και τα χαμένα οικονομικά οφέλη εξαιτίας της διακοπής της κυκλοφορίας, σε πολλές περιπτώσεις μεγάλος ήταν ο αριθμός των θυμάτων.

Η ζημιά στο σκυρόδεμα επεκτάθηκε για ένα αρκετά μεγάλο μήκος 500m στο Channel Tunnel (Εικόνα 3) και 900m στο Mont Blanc Tunnel, επειδή η φωτιά επεκτεινόταν από όχημα σε όχημα. Το μέγιστο βάθος ζημιάς στο σκυρόδεμα στις εσωτερικές επιστρώσεις έφτασε το ποσοστό 68% του συνολικού πάχους (270 mm από τα 400mm) στο Great Belt Tunnel και το 100% του συνολικού πάχους στο Channel Tunnel, εξαιτίας της αποκόλλησης του υψηλής αντοχής σκυροδέματος που είχε χρησιμοποιηθεί, ιδιαίτερα στις ελαφρώς οπλισμένες περιοχές.



Ευτυχώς στο Channel tunnel δεν είχε τρυπηθεί εσκεμμένα το στεγανό στρώμα ασβέστου μιας και η απώλεια της επικάλυψης από σκυρόδεμα θα είχε σαν αποτέλεσμα να πλημμυρίσει η σήραγγα, κάτι που θα είχε πολύ πιο σοβαρές επιπτώσεις.

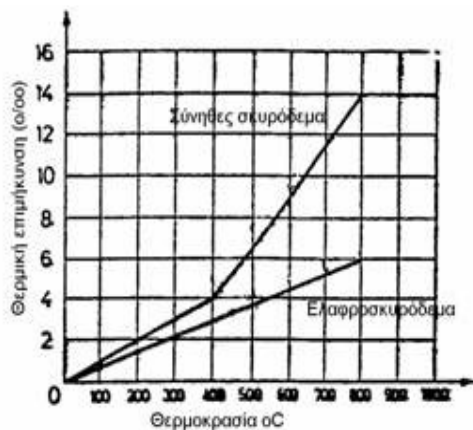
Το κόστος της επισκευής στο Channel Tunnel ήταν 85 εκατομμύρια ευρώ συμπεριλαμβάνοντας και απώλειες των επιχειρήσεων οι οποίες επηρεάστηκαν από το κλείσιμο της σήραγγας.

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

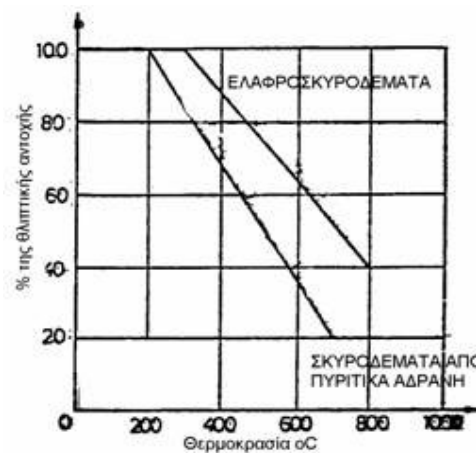
Κύρια δομικά στοιχεία των σηράγγων είναι το σκυρόδεμα (οπλισμένο ή προεντεταμένο) και ο αντίστοιχος οπλισμός.

ι. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

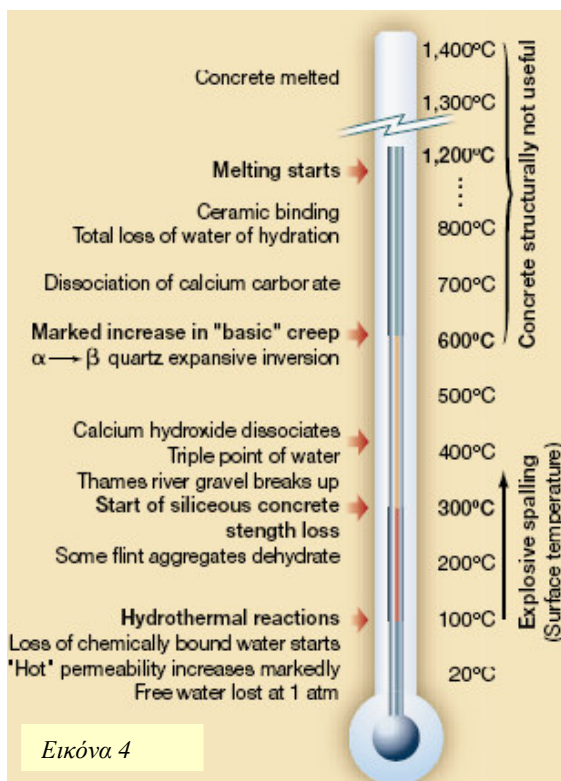
Στα επόμενα δύο διαγράμματα (Διάγραμμα 2 και 3) περιγράφεται η θερμική επιμήκυνση και η μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε σχέση με τη θερμοκρασία. [12]



Διάγραμμα 2



Διάγραμμα 3



Εικόνα 4

Είναι σαφές τόσο η απότομη επιμήκυνση όσο και η έντονη μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος μετά τους 200⁰C .

Στον πίνακα 1 και στην εικόνα 4 αναλύεται εξελικτικά η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε σχέση με τις θερμοκρασίες σε πυρκαγιά. [6],[4]

Θερμοκρασία	Φυσικές επεξεργασίες	Ιδιότητες του μπετόν
Έως 100 ⁰ C	Εξάτμιση ελεύθερου νερού και ενός ποσοστού του μηχανικά ενωμένου	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Μείωση του μέτρου E
100 ⁰ C έως 400 ⁰ C	Εξάτμιση του υπό μηχανική σύνδεση νερού. Επί συμπυκνωμένου μπετόν με πολύ νερό τριχοειδών, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξωθήσεις και χαλαρώσεις της δομής	Φθάσιμο της τελικής θλιπτικής αντοχής. Περαιτέρω μείωση του μέτρου E
400 ⁰ C έως 500 ⁰ C	Το συνδεδεμένο προς υδροξείδια ασβεστίου νερό ελευθερώνεται και μέσω πίεσης υδρατμών ενεργεί διαρρηκτικά (αποκόλληση). Σε όλα τα μπετόν συμβαίνουν χαλαρώσεις δομής και εξωθήσεις.	Ισχυρή πτώση αντοχής. Ισχυρή πτώση του μέτρου E.
Ανω των 500 ⁰ C	Τα περιέχοντα χαλαζία συστατικά του μπετόν (άμμος, χαλίκι) μεταβάλλουν αλματωδώς τον όγκο τους στους 575 ⁰ C (κονιορτοποίηση αυτών)	Μικρό υπόλοιπο αντοχής. Το μπετόν με περιεκτικότητα χαλαζία καταστρέφεται. Μόνον το πυρίμαχο μπετόν ανακτά αντοχή μεταξύ των 800 ⁰ C και 1000 ⁰ C.

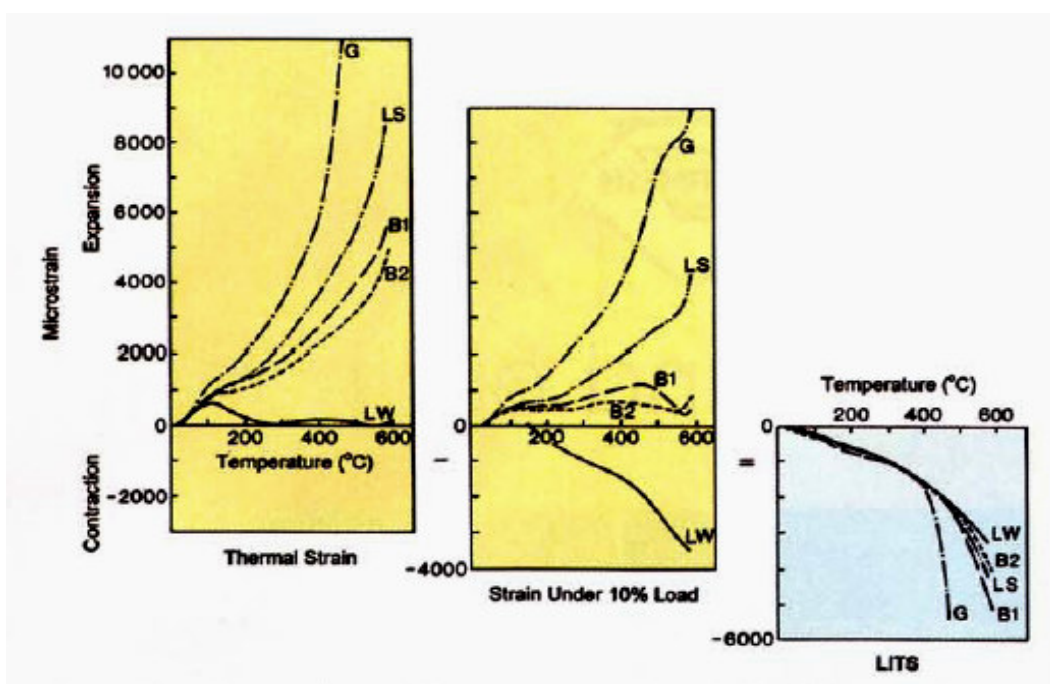
Πίνακας 1

Κατά προσέγγιση εκτιμάται ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια της κατασκευής (οδόστρωμα) είναι 100⁰C έως 150⁰C χαμηλότερη από την θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται στην εστία της φωτιάς. Το ίδιο δεν ισχύει για την «οροφή» στον θόλο μίας σήραγγας η οποία παραλαμβάνει το σύνολο της εκλυθείσας από τη φωτιά θερμότητας.

Για να εξηγήσει κανείς τις βλάβες και να σχεδιάσει τις κατάλληλες λύσεις, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η σύνθετη φύση του σκυροδέματος. Ουσιαστικά, η θέρμανση προκαλεί μια σειρά φυσικών και χημικών διεργασιών από την στερεή μορφή μέχρι την τήξη του στις θερμοκρασίες επάνω από 1000 ⁰C (Εικόνα 2). Μερικά συστατικά του σκυροδέματος αρχίζουν να λιώνουν περίπου στους 1060 ⁰C , και το συνηθισμένο τσιμέντο τύπου Portland ξεκινάει να λιώνει στους 1350 ⁰C . Η φύση αυτών των διεργασιών εξαρτάται από τα συστατικά , τις αναλογίες των μιγμάτων και από τις συνθήκες κατά την διάρκεια της θέρμανσης. Παραδείγματος χάριν , η θερμική τάση του σκυροδέματος εξαρτάται πολύ από το τύπο των αδρανών που χρησιμοποιούνται. Επομένως, η επιλογή των αδρανών θα επηρεάσει το επίπεδο των θερμικών εντάσεων που θα αναπτυχθούν μέσα σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα που βρίσκεται υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να ποικίλει στους 300 ⁰C από το 60% έως το 130% της θλιπτικής αντοχής σε κανονική θερμοκρασία, ανάλογα με την σύνθεσή του. Επομένως, θα ήταν λανθασμένο να υποτεθεί ότι μια και μόνο είναι η 'χαρακτηριστική' καμπύλη που απεικονίζει την αντοχή του σκυροδέματος ανάλογα με την θερμοκρασία.

Η θερμική σταθερότητα του σκυροδέματος εξαρτάται ακόμα και από την θερμική σταθερότητα των αδρανών. Μια μοναδική ιδιότητα που παρουσιάζει μόνο το σκυρόδεμα μεταξύ των δομικών υλικών, είναι η LITS (Load-Induced Thermal Strain) δηλαδή η θερμική παραμόρφωση στοιχείου υπό φόρτιση [6]. Αυτή είναι μια μη ανακτήσιμη παραμόρφωση η οποία παρουσιάζεται κατά την διάρκεια μόνο της πρώτης θέρμανσης υπό φορτίο και όχι κατά την ψύξη ή την επαναθέρμανση του υπόψη στοιχείου. Αυτή η ιδιότητα βοηθάει στην ανακούφιση του στοιχείου από τις θερμικές τάσεις. Έχει ενδιαφέρον ότι ενώ η θερμική παραμόρφωση ενός αφόρτιστου στοιχείου σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των αδρανών του , ενός φορτισμένου δεν εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών του (Διάγραμμα 4). Αυτή η ιδιότητα ουσιαστικά είναι συνάρτηση του θλιπτικού φορτίου και του επιπέδου της θερμοκρασίας. Οποιαδήποτε δομική ανάλυση για το σκυρόδεμα υπό θλιπτικό φορτίο σε πυρκαγιά που αγνοεί αυτή την ιδιότητα θα παραγάγει λανθασμένα αποτελέσματα.

Οι έρευνες έχουν δείξει ότι όλα τα σκυροδέματα που βασίζονται στο τσιμέντο τύπου Portland δεν μπορούν να φέρουν συνεχές φορτίο σε θερμοκρασίες επάνω από 600 ⁰C. Ευτυχώς, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος , μόνο οι επιφανειακές περιοχές θα εκτεθούν σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, εάν το σκυρόδεμα δεν αποκολληθεί θα συνεχίσει να παρέχει καλή θερμική μόνωση. Στην πραγματικότητα η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται περίπου στο ήμισυ για θερμοκρασίες κάτω από τους 600 ⁰C. Επομένως το σκυρόδεμα είναι ένα ευπροσάρμοστο υλικό. Αυτό έχει οδηγήσει στην αναζήτηση προσμίξεων στο σκυρόδεμα ανάλογα με τις απαιτήσεις ενάντια στην πυρκαγιά.



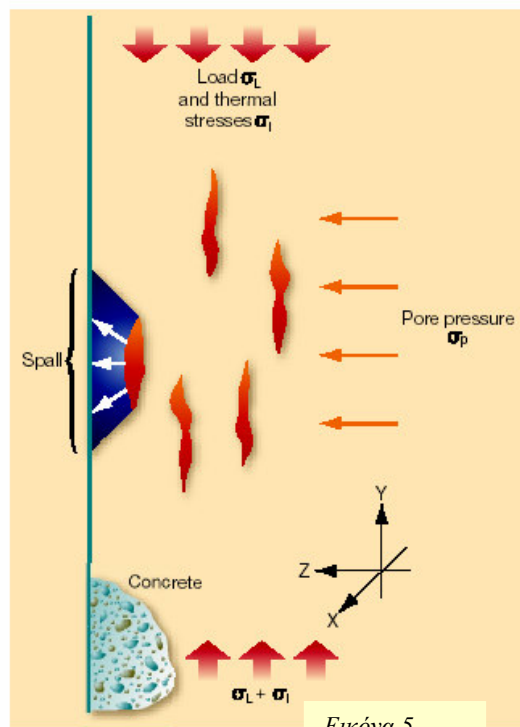
Διάγραμμα 4 .Θερμική παραμόρφωση ,χωρίς φόρτιση και υπό φόρτιση, σκυροδεμάτων ανάλογα με τον τύπο των αδρανών για ρυθμό θέρμανσης 1°C /λεπτό

ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ (SPALLING)

Αποκόλληση (spalling) είναι η βίαιη ή μη βίαιη διακοπή στρωμάτων ή κομματιών του σκυροδέματος από την επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου όταν αυτό εκτίθεται σε πολύ γρήγορα αυξανόμενες θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει στις πυρκαγιές.[8],[6]Συνήθως, εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των πρώτων 20-30 λεπτών. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται με τέσσερις μορφές [5]:

- Α)αποκόλληση αδρανών
- Β)εκρηκτική αποκόλληση
- Γ)Επιφανειακή αποκόλληση
- Δ)Γωνιακή αποκόλληση

Οι τρεις πρώτες παρουσιάζονται στα πρώτα 20-30 min μιας πυρκαγιάς και επηρεάζονται από τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας, ενώ η τέταρτη εκδηλώνεται στα 30-60 min από την αρχή της φωτιάς και επηρεάζεται από την μέγιστη θερμοκρασία. Η επιφανειακή και η εκρηκτική αποκόλληση είναι βίαιες μορφές αποκόλλησης ενώ η γωνιακή δεν είναι. Πρέπει να τονιστεί πως η επιφανειακή και η εκρηκτική είναι οι σοβαρότερες μορφές αποκόλλησης



Εικόνα 5

Είναι σημαντική: α) η καλύτερη κατανόηση των θεμελιωδών μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για την εκρηκτική αποκόλληση του σκυροδέματος, β) η βελτιστοποίηση (από την άποψη του κόστους και της αποτελεσματικότητας) των μεθόδων εξουδετέρωσης της εκρηκτικής αποκόλλησης στην πράξη.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Οι μηχανισμοί οι οποίοι εξηγούν την αποκόλληση σκυροδέματος είναι οι εξής [5]:

A) η πίεσης των πόρων

B) οι θερμικές τάσεις

Γ) συνδυασμός των δύο παραπάνω.

A) Αποκόλληση λόγω της πίεσης των πόρων.

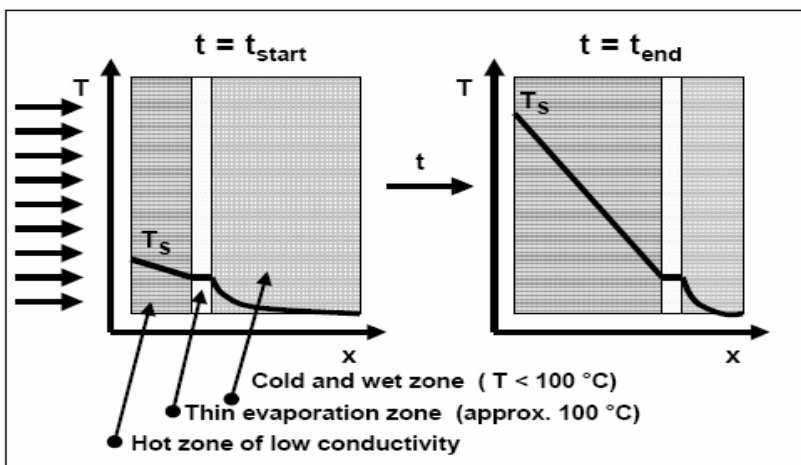
Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποκόλληση αυτή είναι η διαπερατότητα του σκυροδέματος, το αρχικό επίπεδο κορεσμού των πόρων και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας. Η τιμή της πίεσης πόρων στο υπό θέρμανση σκυρόδεμα είναι δύσκολο να προβλεφθεί αξιόπιστα. Η πλειοψηφία των μοντέλων που υπάρχουν για τον υπολογισμό αυτής της τιμής δίνουν τιμές πίεσης πόρων μικρότερες από την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Άρα ο μηχανισμός αυτός από μόνος του δεν οδηγεί σε αποκόλληση. Ένα μέτωπο εξάτμισης διαπερνά τη διατομή από την επιφάνεια προς τα μέσα. Το ελεύθερο νερό εξάτμιζεται στην ζώνη που δημιουργείται από το μέτωπο εξάτμισης. Ένα μέρος του μεταφέρεται στην επιφάνεια της διατομής και το υπόλοιπο εισχωρεί σε βαθύτερα και ψυχρότερα σημεία της διατομής όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται. Αυτό ο μηχανισμός προκαλεί μια ακόμα περισσότερη υγρή ζώνη στην άκρη του μετώπου εξάτμισης που οδηγεί σε μια έκρηξη ατμού. (διαγράμματα 5 και 6) [10]

B) Αποκόλληση λόγω θερμικών τάσεων

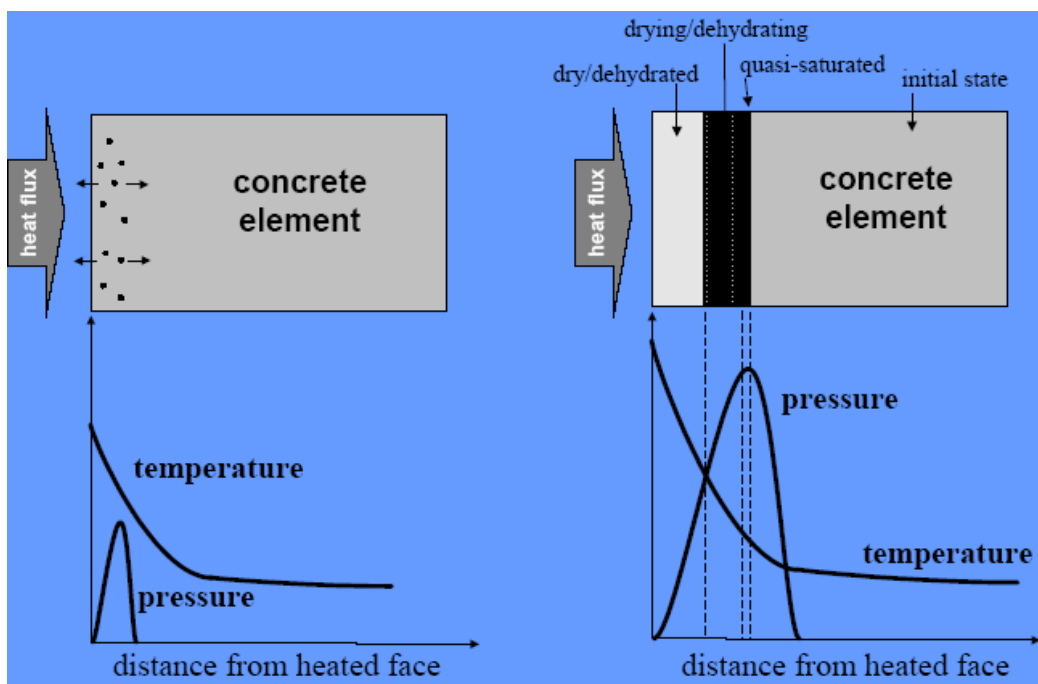
Όταν το σκυρόδεμα υποστεί γρήγορη αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να παρουσιάσει εκρηκτική αποκόλληση. Αυτό οφείλεται σε υπερβολικές θερμικές τάσεις οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας. Καθώς το σκυρόδεμα θερμαίνεται αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις κοντά στην εξωτερική επιφάνεια λόγω περιορισμού θερμικής διαστολής, και εφελκυστικές τάσεις στα ενδότερα του σκυροδέματος όπου επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι θλιπτικές τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια είναι δυνατό να αυξηθούν λόγω πιθανής εξωτερικής φόρτισης. Όμως πολύ λίγες κατασκευές σκυροδέματος φορτίζονται σε τέτοιο επίπεδο που να πλησιάζει το όριο αντοχής τους. Αυτό κάνει το φαινόμενο αποκόλλησης λόγω θερμικών τάσεων και μόνο σχετικά σπάνιο, αλλά όχι αδύνατο να συμβεί.

Γ) Αποκόλληση λόγω συνδυασμού θερμικών τάσεων και πίεσης των πόρων (Εικόνα 5)

Συνήθως η αποκόλληση λαμβάνει χώρα υπό την συνδυασμένη δράση της πίεσης των πόρων, των θλιπτικών τάσεων που δρουν στην επιφάνεια του σκυροδέματος που εκτίθεται στην φωτιά (οι οποίες προκαλούνται από θερμικές τάσεις και από εξωτερικά φορτία) και την ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών. Ρωγμές αναπτύσσονται παράλληλα στην επιφάνεια του σκυροδέματος όταν το άθροισμα των τάσεων υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του. Έπειτα παρουσιάζεται ξαφνική έκλυση ενέργειας και βίαιη αστοχία της επιφάνειας. Η αποκόλληση λόγω της πίεσης των πόρων και αυτή λόγω των θερμικών τάσεων (η κάθε μια τους σε συνδυασμό με το εξωτερικό φορτίο) δρουν σε συνδυασμό ή μόνες τους ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, τον τύπο του σκυροδέματος και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Στο συνηθισμένο καθώς και στο υψηλής αντοχής σκυρόδεμα ισχυρότερος παράγων από τους δύο για την δημιουργία αποκόλλησης είναι η πίεση των πόρων.



Διάγραμμα 5. Μοντέλο ενός τμήματος επένδυσης (protection layer) όταν αυτό θερμαίνεται



Διάγραμμα 6. Κατανομή θερμοκρασίας, πίεσης πόρων και υγρασίας ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια θέρμανσης.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ [11]

- A) Ασήμαντη. Μέχρι 12 mm (½ in) βάθους.
 - B) Προχωρημένη. Από 12 mm (½ in) μέχρι 25 mm (1 in) βάθους
 - Γ) Σοβαρή. Περισσότερο από 25 mm (1 in) βάθος ή περίπτωση όπου αποκαλύπτεται ο οπλισμός.
- (Εικόνα 6)



ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στα συνηθισμένα σκυροδέματα το φαινόμενο της αποκόλλησης εμφανίζεται, όπως έχουμε αναφέρει, στα πρώτα 20 λεπτά της πυρκαγιάς . Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες αιτίες που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό [9] :

- (1) Διαστολή χαλαζιακών αδρανών
- (2) Αποκόλληση αδρανών
- (3) Χαμηλή εφελκυστική αντοχή
- (4) Πυκνή ενίσχυση
- (5) Ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας
- (6) Ασύμμετρη θέρμανση
- (7) Λεπτά μέρη των διατομών
- (8) Σταθερά άκρα
- (9) Θερμικές τάσεις
- (10) Ελεύθερο νερό και ποσοστό υγρασίας στο σκυρόδεμα
- (11) Χαμηλή διαπερατότητα
- (12) Κλειστοί πόροι με νερό
- (13) Ηλικία Σκυροδέματος

- (1) Η διαστολή του κρυστάλλου του χαλαζία, που συμβαίνει στους 570 °C, αυξάνει τις μικρορωγμές γύρω από τα αδρανή συμβάλλοντας στην αποδόμηση του σκυροδέματος.
- (2) Αποκόλληση των αδρανών είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ξεχωριστά κομμάτια αδρανών εκρήγνυνται με αποτέλεσμα μικροί κρατήρες να δημιουργούνται στην επιφάνεια χωρίς συνέπειες στην φέρουσα ικανότητα. Ο λόγος μπορεί να είναι η ύπαρξη νερού στα ψαμμολιθικά αδρανή.
- (3) Η χαμηλή εφελκυστική αντοχή αυξάνει τον κίνδυνο αποκόλλησης επειδή μειώνει την απαραίτητη ενέργεια και πίεση για την έκρηξη του σκυροδέματος. Πορώδη αδρανή μειώνουν ακόμα περισσότερο την εφελκυστική αντοχή, και μπορούν επίσης να περιέχουν περισσότερο

νερό. Αυτό μπορεί να είναι ένας πρόσθετος λόγος για αύξηση του κινδύνου αποκόλλησης (βλέπε (14)). Για μερικά πυκνά υλικά η χαμηλή εφελκυστική αντοχή μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό θερμικών ρωγμών, οι οποίες μπορούν σε μερικές περιπτώσεις να αποτρέψουν την αποκόλληση.

(4) Ο πυκνός οπλισμός σε συνδυασμό με μεγάλα αδρανή μπορεί να αυξήσει τις εφελκυστικές τάσεις λόγω μεγάλης θερμικής διαστολής.

(5) Είναι γνωστό ότι η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας είναι απαραίτητη για αποκόλληση του συνηθισμένου σκυροδέματος. Η υγρασία που υπάρχει στο σκυρόδεμα μετατρέπεται σε ατμό ο οποίος μη μπορώντας να βρει διέξοδο αναπτύσσει μεγάλες εφελκυστικές τάσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Υπενθυμίζουμε πως ο λόγος όγκων νερού προς ατμό είναι 1/1700.

(6) η ασύμμετρη θέρμανση αυξάνει τις θερμικές τάσεις (βλ. (10)) και την διαφορά υγρασίας εξωτερικής και εσωτερικής επιφάνειας στην διατομή του σκυροδέματος .

(7) Σε λεπτές διατομές απότομες αυξήσεις της θερμοκρασίας και μεγάλες διαφορές στην διαβάθμιση της υγρασίας στην διατομή μπορούν να αναπτυχθούν.

(8) Τα σταθερά άκρα μπορούν να εμποδίσουν τη θερμική διαστολή και να αυξήσουν τις θερμικές τάσεις και πρόσθετα φορτία ανάλογα με τα άλλα μέλη της κατασκευής (δείτε (11) για η επιρροή αποκόλλησης)

(9) Οι θερμικές τάσεις προκύπτουν από τις διαφορές θερμοκρασίας οι οποίες μπορούν να αυξηθούν από την ασύμμετρη θέρμανση, από μεταβλητού πάχους διατομή και από τα σταθερά άκρα.

(10) Το ελεύθερο νερό και η διαφορά της υγρασίας μεταξύ των μερών της διατομής του σκυροδέματος πρέπει να θεωρηθούν ο κύριος λόγος για την εκρηκτική αποκόλληση. Το συνηθισμένο σκυρόδεμα δεν θα παρουσιάσει αποκόλληση εάν δεν έχει υγρασία. Όλοι οι άλλοι παράγοντες που αναφέρθηκαν μπορούν να συμβάλουν στο φαινόμενο αλλά δεν μπορούν να το προκαλέσουν χωρίς την ύπαρξη της υγρασίας. Έχει παρατηρηθεί ότι μόνο σκυρόδεμα ορισμένης υγρασίας μπορεί να υποστεί αποκόλληση καθώς και ότι σκυρόδεμα που αρχικά ήταν ευαίσθητο για αποκόλληση δεν παρουσίασε βλάβη όταν υποβλήθηκε σε ξήρανση της επιφάνειάς του μέχρι 20-30mm βάθος.

(11) η χαμηλή διαπερατότητα αυξάνει τον κίνδυνο της εκδήλωσης του φαινομένου αποκόλλησης διότι οι ατμοί δυσκολεύονται να εξέλθουν από το σκυρόδεμα οπότε αυξάνονται οι εφελκυστικές τάσεις.

(12) Οι πόροι του σκυροδέματος χωρίζονται χονδροειδώς σε ανοιχτούς και κλειστούς. Σε μια ζώνη πίσω από την εξελισσόμενη εξάτμιση οι κλειστοί πόροι περιέχουν νερό και ατμούς ,που θερμαίνονται συνεχώς. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η πίεση στους κλειστούς πόρους και η διαφορά πίεσης που υπάρχει μεταξύ των ανοιχτών και των κλειστών πόρων προκαλεί ρήξη των διαχωριστικών τους τοιχωμάτων. Η ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας του νερού οδηγεί σε βρασμό άρα και σε σημαντική αύξηση του όγκου. Επίσης, η ταυτόχρονη αύξηση φορτίου στα τοιχώματα των υπόλοιπων πόρων, οι οποίοι καλούνται να φέρουν πέρα από τις θερμικές και τις στατικές πιέσεις, ξεκινούν μια προοδευτική κατάρρευση της μικροδομής.

(13) Καθώς αυξάνεται η ηλικία του σκυροδέματος, αυτό χάνει μέρος της υγρασίας του (βλέπε (10)).

Type of spalling	Time of occurrence (min)	Nature	Sound	Influence	Main influences
Aggregate	7-30	Splitting	Popping	Superficial	H, A, S, D, W
Corner	30-90	Non-violent	None	Can be serious	T, A, Ft, R
Surface	7-30	Violent	Cracking	Can be serious	H, W, P, F _t
Explosive	7-30	Violent	Loud bang	Serious	H, A, S, F _t , G, L, O, P, Q, R, S, W, Z

Table 2: Characteristics of the different spalling forms.

KEY		
A = aggregate thermal expansion	H = heating rate	R = reinforcement
D = aggregate thermal diffusivity	L = loading/restraint	S = aggregate size
F _t = shear strength of concrete	O = heating profile	T = maximum temperature
F _t = tensile strength of concrete	P = permeability	W = moisture content
G = age of concrete	Q = section shape	Z = section size

Πίνακας 2. Παράγοντες που επηρεάζουν κάθε τύπο αποκόλλησης[6].

Συμπεράσματα

1. Οι εφελκυστικές τάσεις που δημιουργούνται από τους ατμούς που ρέουν προς την επιφάνεια είναι ο κυριότερος λόγος για αποκόλληση και οι θερμικές θλιπτικές τάσεις μαζί με τις θλιπτικές τάσεις λόγω στατικής φόρτισης που δρουν παράλληλα με την επιφάνεια αυξάνουν τον κίνδυνο εκρηκτικής αποκόλλησης.
2. Κατασκευές από συνηθισμένο σκυρόδεμα με λιγότερο από 3% κατά βάρος υγρασία δεν έχουν τάση για να παρουσιάσουν το φαινόμενο της αποκόλλησης.

ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης (HPC), [5] το οποίο έχει χαμηλή διαπερατότητα και θλιπτική αντοχή 60-100 Μpa, είναι πιθανότερο να εμφανίσει αποκόλληση κατά τρόπο εκρηκτικό (explosive spalling) και σε πιο πολλά σημεία (multiple spalling) σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα παρά την υψηλότερη εφελκυστική αντοχή του. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τη διάρκεια της θέρμανσης αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις μέσα στους πόρους εξαιτίας της χαμηλότερης διαπερατότητας του υλικού. Επίσης η μέγιστη τιμή της πίεσης πόρων εμφανίζεται πλησιέστερα στην επιφάνεια γι' αυτό παρουσιάζεται επανειλημμένη αποκόλληση λεπτότερων τμημάτων σκυροδέματος.

ii. ΟΠΛΙΣΜΟΣ

Κρίσιμο στοιχείο αποτελεί ο χρόνος εντός του οποίου η θερμότητα μεταφέρεται στο σκυρόδεμα και αυξάνει την θερμοκρασία του περιεχόμενου οπλισμού. Σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο το πάχος της επικάλυψης (πόσο απέχει ο

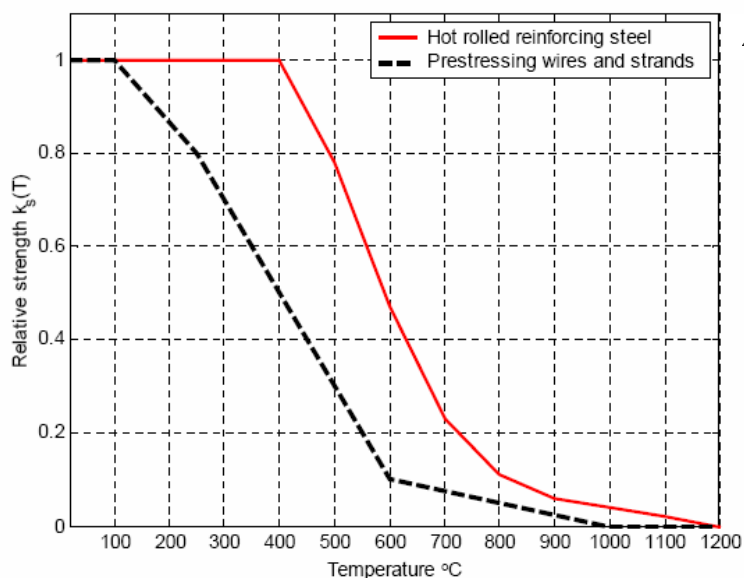


της επικάλυψης (πόσο απέχει ο χάλυβας οπλισμού από την επιφάνεια), όσο και το ίδιο το υλικό της επιφάνειας. [13]

Το σημείο ελαστικότητας του χάλυβα μειώνεται περίπου κατά το ήμισυ στους 550 °C. Στους 1000 °C το σημείο ελαστικότητας είναι κοντά στο 10 % και λιγότερο. Για

θερμοκρασίες μικρότερες των 800 °C και υποθέτοντας ότι δεν έχουμε στρέβλωση (Εικόνα 7) ο ζεστής έλασης χάλυβας επανακτά τις αρχικές του ιδιότητες όταν η θερμοκρασία του επανέλθει σε κανονικά επίπεδα ενώ ο ψυχρής έλασης χάλυβας υφίσταται κάποιες μόνιμες απώλειες.

Στο διάγραμμα 7 φαίνεται η μείωση των αντοχών του χάλυβα θερμής έλασης και του προεντεταμένου χάλυβα σε σχέση με τη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 7

Με βάση τα παραπάνω, πρέπει να αναλυθούν και να αξιολογηθούν οι συνέπειες της αύξησης της θερμοκρασίας του χάλυβα οπλισμού. Στον πίνακα 3 [14] φαίνονται συναρτήσεις της θερμοκρασίας πυρκαγιάς οι μεταβολές των ιδιοτήτων διαφόρων ποιοτήτων χαλύβων.

Χάλυβας			Όρια θερμοκρασίας σε °C και επιδράσεις			
Είδος	Ποιότητα	Τάση Λειτουργίας N/mm ²	Το όριο επιμηκύνσεως υποβιβάζεται έντονα	Η αντοχή υποβιβάζεται έντονα	T _{κρισ.}	Υπόλοιπο από την απώλεια αντοχής
Χάλυβες μπετόν	BSt 220/340	126	200	300	570	Κανένα
	420/500	240	200	100	500	300
	500/550	286	200	100	500	300
Χάλυβες Προεντάσεως	St 600/900 Έως 900/1000	605	300	300	500	Κανένα
	St 1100/1250 Έως 1450/1600	880	100	100	450	450
Σύρματα ή Καλώδια Προεντάσεως	St 1400/1600 Έως 1600/1800	990	100	100	350	300

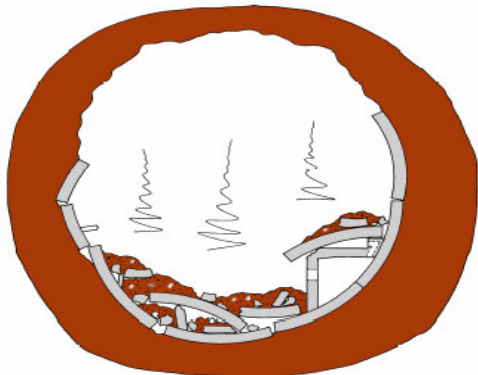
Πίνακας 3

Η ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας στο οπλισμένο σκυρόδεμα μειώνει την αντοχή της συνάφειας μεταξύ των ράβδων και του σκυροδέματος λόγω της μεγάλης διαστολής του χάλυβα. Συγκεκριμένα μέχρι τους 250 °C η συνάφεια δεν επηρεάζεται, ενώ στους 450 °C η αντοχή της συνάφειας μειώνεται κατά 66 % ..

Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός πως οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα φτάνουν την ελάχιστη τιμή της φέρουσας ικανότητάς τους όχι όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι μέγιστη αλλά όταν η θερμοκρασία του οπλισμού φτάνει την μέγιστη τιμή της το οποίο μπορεί να συμβεί κάποιο χρονικό διάστημα αργότερα. Άρα, είναι πολύ σημαντικό ο οπλισμός να προστατεύεται επαρκώς έναντι υψηλής θερμοκρασίας..

ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ

Μετά την απόσβεση της πυρκαγιάς σε μια σήραγγα είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τις βλάβες. Το πρώτο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι αν η σήραγγα είναι επισκευάσιμη ή όχι. Οι επιπτώσεις της φωτιάς σε μια σήραγγα εμφανίζονται κυρίως στην επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η πιθανότητα κατάρρευσης εξαρτάται από την αστοχία της επένδυσης, οπότε και χάνει την ικανότητα να φέρει τα εξωτερικά φορτία, σε συνδυασμό με τον τύπο του εδάφους γύρω από την σήραγγα. Για παράδειγμα μια σήραγγα σε βράχο (mountain tunnel) ή cut and cover τύπου σήραγγα, η ευστάθεια της δεν θα βλαφτεί σοβαρά από την πυρκαγιά αν και η επένδυση της σήραγγας μπορεί να έχει υποστεί σοβαρή ζημία. Εντούτοις, μια σήραγγα με σιδερένιο πλαίσιο (shield tunnel) για την υποστήριξη του εδάφους ή μια καταδύομενη σήραγγα (submerged tunnel) έχει υψηλή πιθανότητα να καταρρεύσει από την πυρκαγιά.



Για την επισκευή σηράγγων που έχουν υποστεί βλάβη σε τμήματα της επένδυσης λόγω πυρκαγιάς χρησιμοποιείται η τεχνική του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Οι λόγοι που το καθιστούν σαν την καλύτερη λύση για επισκευή σήραγγας είναι τα παρακάτω χαρακτηριστικά του [21] :

- 1) υψηλή θλιπτική αντοχή (50-70 MPa)
- 2) πολύ καλή πρόσφυση με το υλικό βάσης
- 3) δεν απαιτείται ξυλότυπος (αυτοστηρίζεται)
- 4) κινητή εγκατάσταση (εξοπλισμός)

Στην πράξη χρησιμοποιούνται δυο διαδικασίες ανάμειξης : η *ξηρά* και η *υγρά* ανάμειξη. Η διαφοροποίηση ανάμεσα

στις δύο τεχνικές έχει να κάνει με το σημείο στο οποίο προστίθεται το νερό. Στην *ξηρά* ανάμειξη αρχικά αναμειγνύονται το τσιμέντο με τα αδρανή και το νερό εισάγεται με πίεση στο ακροφύσιο όπου ελέγχεται από τον χειριστή, ενώ στην *υγρά* το νερό προστίθεται στον αναμικτήρα οπότε μπορεί να μετράται επακριβώς και υπάρχει μεγαλύτερη εγγύηση για την πλήρη ανάμειξη του με τα άλλα συστατικά. Στην περίπτωση επισκευής σε σήραγγα, όπου ο χώρος που αερίζεται επαρκώς ,προτιμάται η *υγρά* διαδικασία (*wet mix*) επειδή η σκόνη και το τσιμέντο που διαφεύγουν προς τον περιβάλλοντα χώρο είναι σημαντικά μειωμένα σε σχέση με την *ξηρά* διαδικασία. Επίσης, το κόστος παραγωγής ενός κυβικού μέτρου εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντικά μικρότερο στην περίπτωση *υγρά* διαδικασίας επειδή το ανακλώμενο υλικό είναι λιγότερο. Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως η μέθοδος επισκευής που θα επιλεγεί σε μια σήραγγα πρέπει να εγγυάται την γρήγορη περάτωση του έργου της επισκευής μιας και στις περισσότερες των περιπτώσεων πρέπει να παραδοθεί το ταχύτερο στην κυκλοφορία.

Ο εξοπλισμός που συνίσταται να χρησιμοποιηθεί σε σήραγγες με μεγάλα τμήματα για επισκευή (>30m²), με την μέθοδο της εκτόξευσης, είναι τα **spray robots**, τα οποία αντικαθιστούν τον χειριστή του ακροφυσίου [17]. Τα μηχανήματα αυτά βελτιώνουν σημαντικά τα επίπεδα υγιεινής και ασφάλειας του προσωπικού που πραγματοποιεί την επισκευή. Η χρήση των ρομπότ αυτών αποτρέπει την ανάγκη χρήσης εξοπλισμού ανύψωσης (πλατφόρμα ανύψωσης ή κρεμαστή σκαλωσιά). Επίσης, επιτρέπει την πρόσβαση σε δύσκολες ζώνες και χρησιμοποιεί υψηλότερους ρυθμούς εκτόξευσης μιας και μπορεί να χειριστεί σωλήνες μεγάλης διαμέτρου. Το προσωπικό βρίσκεται μακριά από την εκτοξευόμενη επιφάνεια με πρόσβαση στο εξοπλισμού τηλεχειρισμού έχοντας έτσι την δυνατότητα καλύτερης επίβλεψης της επισκευής. Η δυνατότητα περιστροφής και κίνησης μπρος-πίσω της σωλήνας εκτόξευσης προσφέρει ομοιόμορφη και σωστού πάχους εκτόξευση. Τέλος, υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ρομπότ :

- 1)Ολοκληρωμένα ρομπότ: περιλαμβάνουν μεταφορέα με βραχίονα, σταθμό ελέγχου και σωλήνες. Το πλεονέκτημά του είναι η αυτόνομη λειτουργία του.
- 2)Μετακινούμενα ρομπότ: περιλαμβάνουν βραχίονα και σε μερικές περιπτώσεις μια πλατφόρμα χειρισμού που προσαρμόζεται σε ένα μεταφορέα κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ανάλογα με το βαθμό βλάβης, το υπόστρωμα στο οποίο θα εκτοξεύσουμε το σκυροδέμα θα είναι [17]:

A) στην περίπτωση πλήρους κατάρρευσης της επικάλυψης, το έδαφος (βράχος ή χώμα) Τα σαθρά τμήματα πρέπει να αφαιρούνται για να αποκαλύπτεται πιο στέρεη επιφάνεια. Στην περίπτωση σαθρού εδάφους μπορεί να είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας προκαταρκτικής πολύ λεπτής στρώσης σκυροδέματος που παρέχει καλύτερη σύνδεση στην επιφάνεια. Όπου υπάρχουν διαρροές νερού από το βράχο πάνω στον οποίο πρόκειται να διαστρωθεί εκτοξευόμενο σκυροδέμα και η ροή του νερού δεν πρόκειται να σταματήσει από την εφαρμογή του, το νερό θα απομακρύνεται από την περιοχή με έμφραξη της φλέβας ή θα εκτρέπεται με σωλήνες, συλλεκτήρες ή άλλα εγκεκριμένα μέσα έτσι ώστε το εκτοξευόμενο σκυροδέμα να μείνει ανεπηρέαστο από την δράση του νερού λόγω διήθησης, υδροστατικής πίεσης ή διάβρωσης.

B) στην περίπτωση αποκόλλησης τμημάτων της επικάλυψης, το παλαιό οπλισμένο σκυροδέμα. Η προετοιμασία της επιφάνειας βάσης περιλαμβάνει όλες τις εργασίες που σχεδόν πάντοτε απαιτείται να προηγηθούν της επαφής νέου και παλαιού σκυροδέματος. Έτσι, θα πρέπει να απομακρυνθεί κάθε τμήμα αποσαθρωμένου σκυροδέματος, να απομακρυνθεί η εξωτερική μεμβράνη του τσιμεντοπολτού αποκαλύπτοντας έτσι τα αδρανή του υλικού βάσης και τέλος να διαβραχεί το υλικό βάσης αρκετό χρόνο πριν την εκτόξευση, ώστε να μην απορροφήσει το νερό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι [15] :

- Υδροβολή
- Αμμοβολή
- Ψεκάσμός με απολιπαντή
- Ψεκάσμός διαλύματος υδροχλωρικού οξέως
- Με σμιριδόχαρτο (προσαρμοσμένο σε τροχό)

Πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση έντονης ζημιάς στον φέροντα οργανισμό τοποθετούμε σύστημα προσωρινής αντιστήριξης για να αποφύγουμε τον κίνδυνο κατάρρευσης μέχρι το πέρας των εργασιών επισκευής. (Εικόνα 24 και 25).

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος που θερμαίνεται υπερβολικά μπορεί να αποφευχθεί με την μελέτη ειδικής σύνθεσης του. Αυτή περιλαμβάνει την επιλογή α) των αδρανών β) του τσιμεντοπολτού και γ) πρόσθετων ινών. [22]

α) Η επιλογή των αδρανών είναι η πιο σημαντική επειδή κάποια αδρανή, όπως τα πυριτικά, διασπώνται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 350 °C) ενώ άλλα όπως τα γρανιτικά παραμένουν σταθερά μέχρι τους 600 °C. Η θερμική σταθερότητα των διαφόρων αδρανών αυξάνεται με την παρακάτω σειρά: πυριτικά, ασβεστολιθικά, βασάλτικα, γρανιτικά. Άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά των αδρανών είναι : (α) χαμηλή θερμική διαστολή, η οποία

βελτιώνει την θερμική συμβατότητα με τον τσιμεντοπολτό (β) τραχιά επιφάνεια η οποία βελτιώνει την πρόσφυση με τον τσιμεντοπολτό και (γ) η παρουσία χημικά ενεργού πυριτίου το οποίο βελτιώνει τη χημική συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό. Επίσης, η διάμετρος των αδρανών συνίσταται να είναι μικρότερη από 10 mm.

(β) Τσιμεντοπολτός

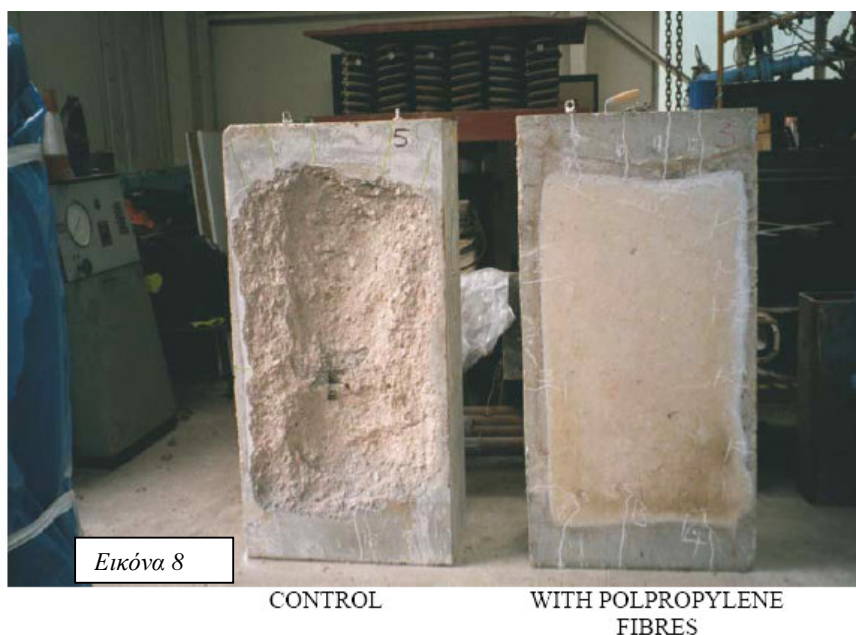
Μια σημαντική παράμετρος του τσιμεντοπολτού είναι ο λόγος CaO/SiO_2 (C/S). Χαμηλός λόγος C/S οδηγεί σε χαμηλή περιεκτικότητα σε υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) στο αρχικό μείγμα και διασφαλίζει καλύτερη υδροθερμική αντίδραση. Το υδροξείδιο του ασβεστίου δεν είναι επιθυμητό διότι στους 400 C διασπάται σε CaO και CO_2 . Το CaO επανενυδατώνεται διασταλτικά και καταστρεπτικά κατά την διάρκεια ψύξης και έκθεσης σε υγρασία. Ο λόγος C/S μειώνεται στην πράξη με χρήση σκουριάς (slag), PFA και με πυριτικά στοιχεία (silica fume). Σύμφωνα με πειράματα την καλύτερη συμπεριφορά από τα παραπάνω είχε η χρήση του **slag** μετά **το PFA** και την χειρότερη τα **silica fume**. Το silica fume έχει σχετικά χαμηλή απόδοση αντίθετα με την υψηλή αντοχή του σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος λόγο της πυκνής δομής του δεν επιτρέπει στην υγρασία να διαφύγει από το θερμό σκυρόδεμα οδηγώντας στην ανάπτυξη υψηλής πίεσης των πόρων και στην δημιουργία μικρορωγμών. Τέλος, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί παραπάνω το ποσοστό υγρασίας συνιστάται να είναι μεταξύ 3-4 %.

(γ) Πρόσθετες ίνες

Η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα έχει σκοπό την αύξηση της διαπερατότητας κατά την διάρκεια της θέρμανσης με αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης των πόρων άρα και την αποφυγή του κινδύνου να παρουσιαστεί το φαινόμενο της αποκόλλησης (Εικόνα 8). [20]

[19] Οι ίνες

πολυπροπυλενίου λειώνουν περίπου στους 160 °C δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό κανάλια διόδου μέσα στην μάζα του σκυροδέματος για να διαφεύγει η υγρασία. Επίσης, η μικροσκοπική ανάλυση έχει αποκαλύψει την ύπαρξη μικρορωγμών γύρω από τις ίνες οι οποίες συμβάλουν στη μείωση των τάσεων. Τα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι σήμερα δείχνουν ότι η πιο αποδοτική μορφή ινών είναι μονή ίνα διαμέτρου 18 micron (MONOfilament fibre). Υπάρχουν και ίνες πολυπροπυλενίου χαμηλού σημείου τήξης (130 °C) οι οποίες είναι πιο αποδοτικές. Η αποδοτικότητα των ινών δεν έχει βελτιστοποιηθεί μέχρι στιγμής για υψηλής αντοχής και αυτοσυμπικνούμενα σκυροδέματα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ινών



πολυπροπυλενίου είναι το χαμηλό κόστος τους και το ότι τοποθετούνται στο σκυρόδεμα κατά την ανάμειξή του.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΙΝΩΝ

Κατά την επισκευή της σήραγγας Channel Tunnel χρειάστηκε η επένδυση να παρέχει μεγάλη φέρουσα ικανότητα ταυτόχρονα με υψηλή προστασία έναντι φωτιάς. Επιλέχθηκε τελικά σκυρόδεμα ειδικής σύνθεσης το οποίο περιείχε συνδυασμό ινών με συγκεκριμένα αδρανή. Τα αποτελέσματα ενός πειράματος το οποίο βοήθησε αρκετά σε αυτήν την επιλογή φαίνονται στον πίνακα 4 [19]

Πίνακας 4. 15 διαφορετικοί συνδυασμοί και ο βαθμός που επηρεάζουν το φαινόμενο της αποκόλλησης.					
MIX	AGGREGATES	STEEL FIBRES	MONO FIBRES	FIBRIL FIBRES	OBSERVATIONS DURING TESTS
1	GRANITE	x	x	x	SPALLING VISIBLE AFTER 30 MINS
2	GRANITE	YES	x	x	SPALLING VISIBLE AFTER 20 MINS
3	GRANITE	YES	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING
4	GRANITE	YES	x	YES	MINOR SPALLING VISIBLE
5	GRANITE	x	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING
6	LIMESTONE	x	x	x	SPALLING VISIBLE AFTER 20 MINS
7	LIMESTONE	YES	x	x	SPALLING VISIBLE AFTER 20 MINS
8	LIMESTONE	YES	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING
9	LIMESTONE	YES	x	YES	MINOR SPALLING VISIBLE
10	LIMESTONE	x	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING
11	LYTAG	x	x	x	EXTENSIVE VIOLENT SPALLING
12	LYTAG	YES	x	x	EXTENSIVE VIOLENT SPALLING
13	LYTAG	YES	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING
14	LYTAG	YES	x	YES	EXTENSIVE SPALLING
15	LYTAG	x	YES	x	NO EVIDENCE OF SPALLING

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ

Κατά την επισκευή της σήραγγας θα πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψη ότι υπάρχει περίπτωση να ξεσπάσει πυρκαγιά και στο μέλλον. Οπότε, εκτός της επισκευής και ενίσχυσης οφείλουμε να "ενισχύσουμε" την σήραγγα έναντι πυρκαγιάς. Η ενίσχυση αυτή μπορεί να γίνει είτε με χρήση συνηθισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος επενδυμένου με ειδικές πλάκες πυρίμαχων υλικών είτε με χρησιμοποίηση ειδικής σύνθεσης σκυροδέματος το οποίο έχει αυξημένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Μετά την ολοκλήρωση των επισκευών με την μέθοδο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ακόμα και αν έχουμε χρησιμοποιήσει σκυρόδεμα υψηλής αντίστασης στην φωτιά μπορούμε να τοποθετήσουμε θερμικές ασπίδες για να προστατέψουμε την επιφάνειά του από μια μεγάλης διάρκειας και έντασης φωτιά.

Στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί συνηθισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επιβάλλεται η χρήση της παθητικής πυροπροστασίας.

Οι θερμικές ασπίδες είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή μειώνουν την ροή θερμότητας στο υπόστρωμα (σκυρόδεμα) κατά συνέπεια περιορίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θερμικών ασπίδων όπως πλάκες, ειδικής σύνθεσης κονιάματα και ειδικής σύνθεσης ινοπλισμένο εκτοξευόμενο χρησιμοποιούμενο σαν στρώση μόνωσης. Όλα τα κριτήρια σχεδιασμού του πάχους μιας θερμικής ασπίδας βασίζονται στην μέγιστη θερμοκρασία της διεπιφάνειας ασπίδας – υποστρώματος [19]. Αν και πολλοί θεωρούν πως κυμαίνεται μεταξύ 200 και 380 °C αυτό είναι λάθος καθώς η μόνη ασφαλής θερμοκρασία είναι οι 100 C⁰ το μέγιστο. Όμως αυτό το κριτήριο είναι πολύ περιοριστικό γι' αυτό και ο σχεδιασμός γίνεται σύμφωνα με τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Κατά την διάρκεια της φωτιάς η εκρηκτική αποκόλληση συμβαίνει τα πρώτα 10-30 min όταν τα εσωτερικά τμήματα του σκυροδέματος έχουν θερμοκρασίες μόνο 100-200 °C. Αφού, η εκρηκτική αποκόλληση είναι συνάρτηση κυρίως του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας και λιγότερο της μέγιστης τιμής της είναι καλύτερα να προσδιορίσουμε κρίσιμους ρυθμούς αύξησης παρά κρίσιμες θερμοκρασίες διεπιφάνειας.

α)Ειδικά κονιάματα

Η εσωτερική επιφάνεια της σήραγγας μπορεί να καλυφθεί με ειδικά κονιάματα τα οποία προσφέρουν προστασία έναντι πυρκαγιάς (Εικόνα 9 και 10). [16] Συγκεκριμένα, ελαφροβαρή κονιάματα με βάση το τσιμέντο τύπου Portland και οργανικά ή ανόργανα ελαφροβαρή αδρανή (Πίνακας 5) μπορούν να παρέχουν αποτελεσματική προστασία στην επικάλυψη αποτρέποντας υπερβολική ζημιά και μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης. Η καλή αντίστασή τους στη φωτιά οφείλεται στην μειωμένη πυκνότητα και στην χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Δυστυχώς λόγω της χαμηλής πυκνότητας δεν αυξάνουν τις μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά φυσικών και τεχνητών ελαφροβαρών κονιαμάτων

Aggregate Type	Typ. Concrete Density (kg/m ³) (Air dried)	Compressive Strength (MPa)	Thermal Conductivity W/m K
Vermiculite	480	0.9	0.1 – 0.2
Perlite	520	3.0	0.1 – 0.2
Leca®	1300	14.0	0.3 – 0.6
Aglite®	1550	26.0	0.6
Lyttag®	1600	37.5	0.5
Foamed slag	2000	27.5	0.9



Εικόνα 9.



Εικόνα10

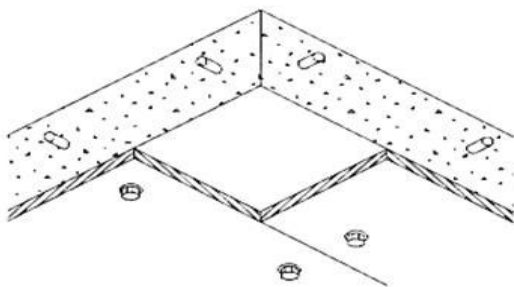
β) Πλάκες προστασίας

Η δόκιμη λύση πυροπροστασίας σηράγγων (τούνελ), επιτυγχάνεται με την επικάλυψη τους με πυράντοχες πλάκες [18]. Οι πλάκες βιδώνονται απευθείας στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς καμία άλλου είδους απαίτηση και δεν αντιμετωπίζουν θέμα πρόσφυσης. Επίσης δεν επηρεάζονται από την υγρασία διότι έχουν μικρή ικανότητα απορρόφησης νερού (περίπου $0,5 \text{ gr/cm}^3$) ενώ η διαστολή μέσα σε νερό 100% κορεσμό είναι περίπου $\text{max. } 0,39 \text{ mm/m}$. Επίσης, επειδή βιδώνονται, δεν αντιμετωπίζουν κανενός είδους πρόβλημα σε αρνητικές πιέσεις. Ακόμα, δεν απαιτούν κανενός είδους συντήρηση. Η ορατή επιφάνεια μπορεί, εάν χρειασθεί να βαφεί, ενώ δεν υπάρχει απαίτηση γεμίσματος των αρμών μεταξύ των πλακών με άλλο υλικό. Εάν για οποιοδήποτε λόγο χρειασθεί να γίνει αντικατάσταση μιας πλάκας, η πλάκα αφαιρείται εύκολα και αντικαθίσταται με μία καινούργια. Η τοποθέτησή τους γίνεται χωρίς την απαίτηση διακοπής των εργασιών άλλων συνεργείων ενώ το τελικό αποτέλεσμα είναι μία ομοιόμορφη και λεία επιφάνεια.

Δύο είναι οι τρόποι εφαρμογής:

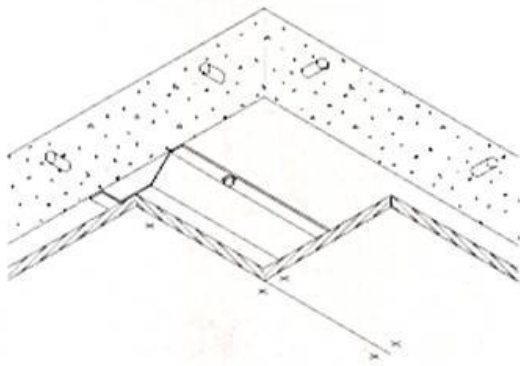
1) Με μηχανική στερέωση επί του σκυροδέματος. Οι πυράντοχες πλάκες σταθεροποιούνται πάνω στο σκυρόδεμα με τη χρήση μεταλλικών, άκαυστων αγκυριών. Η εργασία αυτή γίνεται μετά την απομάκρυνση του ξυλοτύπου. (Εικόνα 11)

Εικόνα 11



2) Με μηχανική στερέωση σε απόσταση από το σκυρόδεμα, με τη χρήση κατάλληλων μεταλλικών προφίλ. (Εικόνα 12,13)

Εικόνα 12



Εικόνα 13

ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΣΤΟ TAUERN TUNNEL

Η συγκεκριμένη κυκλικής διατομής σήραγγα (κατασκευασμένη με την μέθοδο NATM) είχε μια εξωτερική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα , βλήτρα και μια εσωτερική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα [23] Η οροφή για τους δύο αεραγωγούς στον θόλο της σήραγγας αποτελείτο από 150 mm ένχυτου οπλισμένου σκυροδέματος (cast-in-situ-concrete). Το 60% του φορτίου της οροφής είχε αναρτηθεί από την κορυφή της σήραγγας με την χρήση διαχωριστικού τοίχου , ενώ το 40% είχε στηριχθεί στα πλαϊνά τοιχώματα της εσωτερικής επένδυσης. Η φωτιά είχε διάρκεια 5 ωρών. Μήκος σήραγγας 6400m.

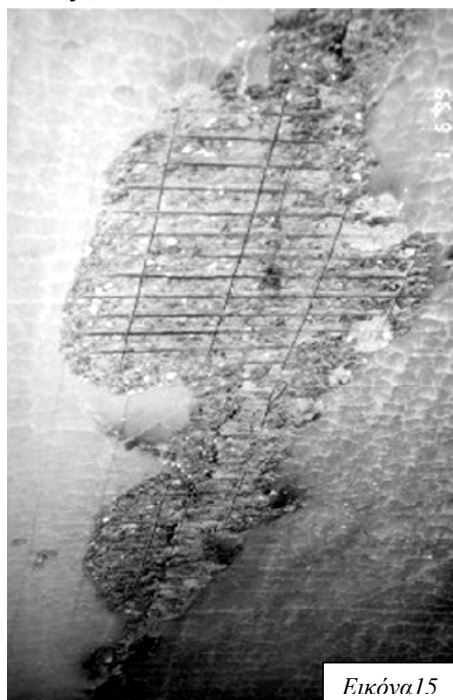
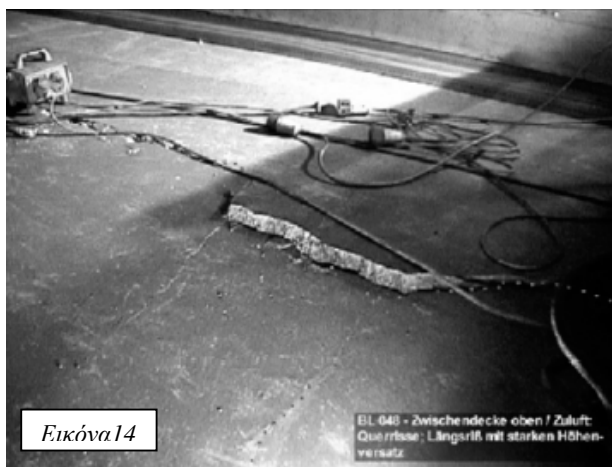
ΖΗΜΙΕΣ

α) Πλαϊνά τοιχώματα

Στην περιοχή όπου παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες το άοπλο σκυρόδεμα της εσωτερικής επένδυσης αποκολλήθηκε μέχρι βάθους 400 mm σε 100 m μήκους της σήραγγας. Σε μήκος 450 m παρακείμενα στην παραπάνω περιοχή των 100 m υπήρχε αποκόλληση σε βάθος 50 mm. Στο σύνολο περίπου 600m³ θραυσμάτων αποκολλημένου σκυροδέματος έπρεπε να απομακρυνθεί.

β) Οροφή

Το πεσμένο τμήμα της οροφής έδειξε ότι η ανάρτηση είχε παραμείνει άθικτη ενώ η υποστήριξη των πλαϊνών τοιχωμάτων αστόχησε εξαιτίας του βάθους της αποκόλλησης του σκυροδέματος. Επομένως αρκετή προσοχή δόθηκε στα πλαϊνά τοιχώματα. Επίσης, σε τμήμα της οροφής που δεν έπεσε και συγκεκριμένα στον αγωγό καθαρού αέρα εντοπίστηκε ρωγμή (Εικόνα 14). Αυτή η ρωγμή δημιουργήθηκε εξαιτίας της εμποδιζόμενης θερμικής διαστολής από τον διαχωριστικό τοίχο. Στο κάτω μέρος της οροφής η επένδυση από σκυρόδεμα αποκολλήθηκε και ο οπλισμός έχασε την αντοχή του λόγω της υψηλής θερμοκρασίας (Εικόνα 15).

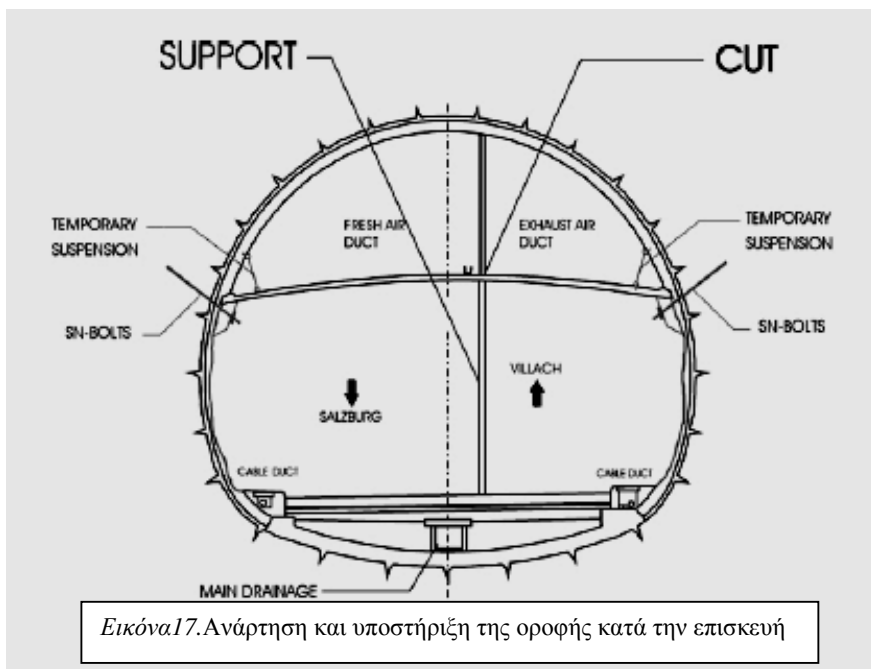


ΕΠΙΣΚΕΥΗ

A) Αρχικά μέτρα ασφαλείας

Πριν την εκκίνηση κάθε εργασίας επισκευής εφαρμόστηκαν τα παρακάτω μέτρα ασφαλείας (Εικόνα 16 και 17)

- 1) Υποστήριξη (suspension) της οροφής στα σημεία σύνδεσης με τα παλαιά τοιχώματα.
- 2) Υποστήριξη έναντι κατάρρευσης τμημάτων της εσωτερικής επένδυσης, για την αποφυγή της υποχώρησής της σε περιοχές που η αποκόλληση παρουσιάστηκε σε αρκετά μεγάλο βαθμό.



Β) Εργασίες προετοιμασίας

Η οροφή έπρεπε να αφαιρεθεί για ένα μήκος πάνω από 300 m . Πριν από αυτό, ο διαχωριστικός τοίχος έπρεπε να κοπεί με την χρήση ειδικού πριονιού.(*Εικόνα 18*) Στα πλαϊνά τοιχώματα τα 50mm του εναπομείναντος σκυροδέματος αφαιρέθηκε με υδροβολή υψηλής πίεσης (1400 bars) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μια καλή επιφάνεια για την νέα επένδυση από οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (*Εικόνα 19*)



Εικόνα 19

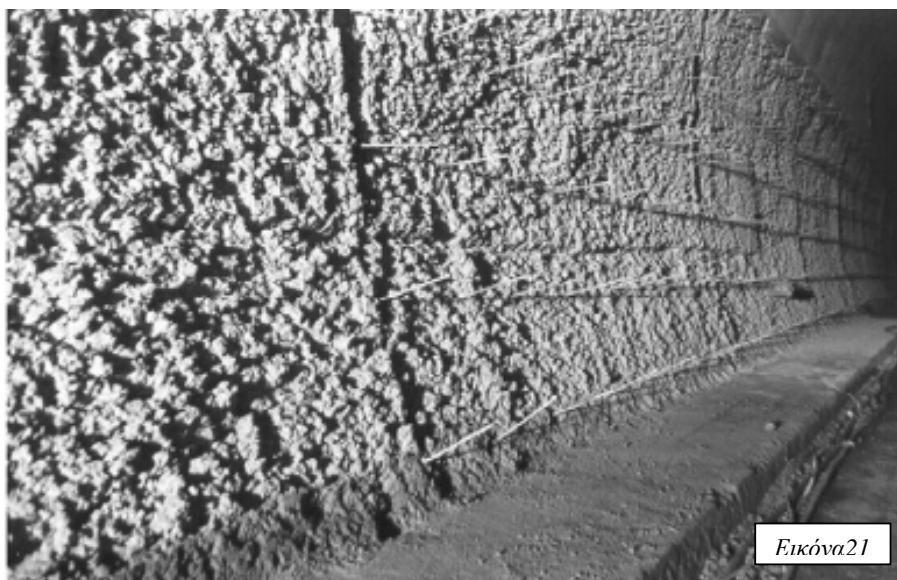
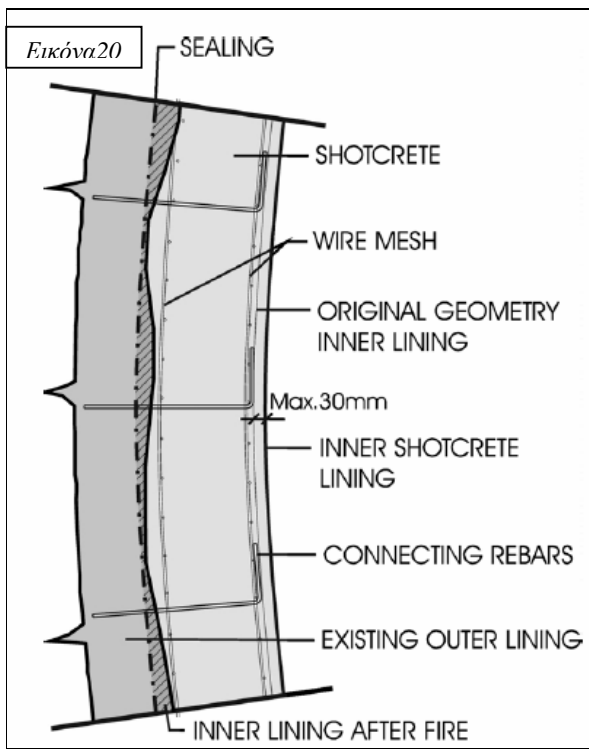


Εικόνα 18

Γ) Εσωτερική επένδυση πλαϊνών τοιχωμάτων σήραγγας

Η κατασκευή της νέας εσωτερικής επένδυσης φαίνεται στην *εικόνα 20*. Αποτελείται από συνδετικές ράβδους τοποθετημένες ανά 750mm, και στις δύο διευθύνσεις , στο **εναπομείναν** σκυρόδεμα της εξωτερικής επένδυσης. Η σήραγγα είναι στεγνή σε αυτήν την περιοχή και για αυτό δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί κάποιο υλικό στεγανοποίησης. Οι ράβδοι μπορούν έτσι να καταδυθούν άνετα στην εξωτερική επιφάνεια χωρίς να υπάρχει ανησυχία για την στεγανότητα

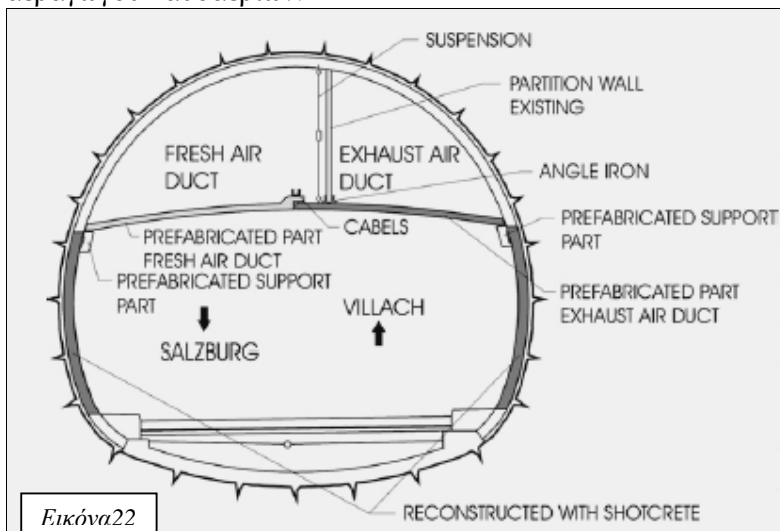
της σήραγγας. (Εικόνα 21). Επίσης τοποθετήθηκαν μία ή δύο στρώσεις από πλέγμα οπλισμού χρησιμοποιώντας μια μέθοδο που θα εγγυάται την σωστή γεωμετρική τοποθέτησή του (Εικόνα 22). Τέλος εφαρμόστηκε η μέθοδος της εκτόξευσης σκυροδέματος.



Δ) Ανακατασκευή οροφής

Για την οικονομία χρόνου και την αποφυγή της σκυροδέτησης λόγο περιορισμένου χώρου αποφασίστηκε να επισκευαστεί με χρήση προκατασκευασμένων τμημάτων από σκυρόδεμα. (Εικόνα 23 και 24). Τρεις διαφορετικοί τύποι τμημάτων χρησιμοποιήθηκαν :

- 1) τμήμα υποστήριξης τοποθετημένο στα πλαϊνά τοιχώματα
- 2) τμήμα στον αεραγωγό καυσαερίων στηριζόμενο στο τμήμα υποστήριξης, αναρτημένο από τον θόλο της σήραγγας και στερεωμένο στον διαχωριστικό τοίχο με σιδερένιες γωνίες
- 3) τμήμα στον αεραγωγό φρέσκου αέρα στηριζόμενα στο τμήμα υποστήριξης και στο τμήμα του αεραγωγού καυσαερίων.



Εικόνα22



Εικόνα23

ΚΟΣΤΟΣ

Το κόστος μετά την 3μηνη επισκευή ήταν:

- ⇒ 6.5 εκατομμύρια δολάρια για την επισκευή και
- ⇒ 19.5 εκατομμύρια δολάρια από τις χαμένες εισφορές των διοδίων.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΒΛΑΜΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΦΩΤΙΑ[24]



Εικόνα 24 και 25. Μέτρα προσωρινής υποστήριξης στο Summit Tunnel, σοβαρή αποκόλληση.



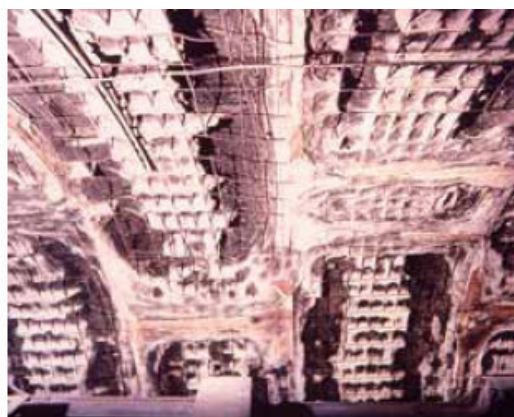
Εικόνα 26 , 27 και 28. Gotthard Tunnel, μέγιστη θερμοκρασία 1200 °C + ,σοβαρή αποκόλληση, χρειάστηκαν 2 μήνες για επισκευή .



Εικόνα 28



Εικόνα 29 και 30. Moorfleet Tunnel (ορθογωνικής διατομής), με πάχος επένδυσης 1 m από προενταμένο σκυρόδεμα, σοβαρή αποκόλληση στην οροφή και στα πλαϊνά τοιχώματα, έφυγε η επικάλυψη από τις προεντεταμένες ράβδους οι οποίες επιμηκύνθηκαν)



Εικόνα 31 και 32. Euro Tunnel, σοβαρή αποκόλληση, απώλεια φέρουσας ικανότητας, μερική κατάρρευση, χρειάστηκαν 6 μήνες για επισκευή με συνολικό κόστος 350 εκατ. \$.



Εικόνα 33. Mont Blanc Tunnel, 3 χρόνια επισκευής με κόστος 163 εκατ. \$ για την επισκευή. Σοβαρή αποκόλληση.

Βιβλιογραφία

Επίδραση της φωτιάς στην σήραγγα ανάλογα με την μορφή της

[1] **Passive fire protection in tunnels.** Gabriel Alexander Khoury Imperial College, Περιοδικό Concrete for the construction industry (Volume 37-Number 2). February 2003

Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου / θερμοκρασίας

[2] **Passive protection against fire.** Gabriel Alexander Khoury *chairman of the FIB International Committee 4.3.1 “Fire design for concrete structures” and scientific manager of the UPTUN European project “Upgrading Tunnels”* . Περιοδικό *Tunnels & Tunnelling International* NOVEMBER 2002

[3] **Προστασία Κατασκευών Από Σκυρόδεμα (σήραγγες).**
www.fire-protection.gr

Συμπεριφορά σκυροδέματος σε πυρκαγιά – φαινόμενο αποκόλλησης

[4] **Βλάβες Δομικών έργων Τόμος 2 Κατασκευές από οπλισμένο μπετόν.** Rudolf Rybicki .Εκδότης Μ.Γκιούρδας , Αθήνα , 1981.

[5] **Effect of fire on concrete and concrete structures.** Gabriel Alexander Khoury Imperial College, London, UK, 2000 , E-mail: Gabriel@clara.net

[6] **Passive fire protection in tunnels.** Gabriel Alexander Khoury Imperial College, Περιοδικό Concrete for the construction industry (Volume 37-Number 2). February 2003

[7] **Cement-based mineral-containing passive fire protection for underground structures.** Dieter Mai MBT (Schweiz) AG, R&D Underground Construction, Zurich, Switzerland. Fourth international symposium on sprayed concrete – 2002.

[8] **Passive protection against fire.** Gabriel Alexander Khoury *chairman of the FIB International Committee 4.3.1 “Fire design for concrete structures” and scientific manager of the UPTUN European project “Upgrading Tunnels”* . Περιοδικό *Tunnels & Tunnelling International* NOVEMBER 2002

[9] **Limits of spalling of fire-exposed concrete.** K.D. Hertz Department of Civil Engineering. Technical University of Denmark. www.scinedirect.com . 2003.

[10] **MACSI-net MID-TERM Meeting, WP7 - Environmental problems, WG11– Concrete as a multiphase material.** Department of Structural and Transportations Engineering Faculty of Engineering University of Padova (Italy). B.A.Schrefler. November 2002.

[11] **Highway and rail transit tunnel inspection manual.** Federal highway administration- Federal transit administration March 2003.

[12] **Προστασία Κατασκευών Από Σκυρόδεμα (σήραγγες).**
www.fire-protection.gr

Συμπεριφορά οπλισμού σε πυρκαγιά

[13] **Βλάβες Δομικών έργων Τόμος 2 Κατασκευές από οπλισμένο μπετόν.** Rudolf Rybicki .Εκδότης Μ.Γκιούρδας , Αθήνα , 1981.

[14] **Προστασία Κατασκευών Από Σκυρόδεμα (σήραγγες).**
www.fire-protection.gr