

Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά

Fire Protection of Tunnels

ΣΑΚΚΑΣ, Κ.Μ.Γ.	M.Sc.Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Υ.Δ. Ε.Μ.Π
ΝΟΜΙΚΟΣ, Π.Π.	Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Πολιτικός Μηχ., Λέκτορας, Ε.Μ.Π.
ΠΑΝΙΑΣ, Δ.	Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Επικ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
ΣΟΦΙΑΝΟΣ, Α.Ι.	Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Απαραίτητο στοιχείο κατά το σχεδιασμό σηράγγων είναι η εξασφάλιση της τελικής επένδυσης έναντι αστοχίας από υψηλές θερμοκρασίες, που μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Για τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός συστήματος παθητικής πυροπροστασίας, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των θερμικών φορτίων κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Τα φορτία αυτά δίνονται από πρότυπες καμπύλες θερμοκρασίας-χρόνου που έχουν αναπτυχθεί βασιζόμενες σε πραγματικά περιστατικά. Σήμερα για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι παθητικής πυροπροστασίας. Οι μέθοδοι αυτές αναλύονται σε σχέση με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

ABSTRACT: An essential element of the design of tunnels is the ensurance of the final lining against failure due to high temperatures that may develop during a fire. For the proper design of the passive fire protection systems, the definition of the thermal loads during a fire is necessary. These loads are provided by standard fire curves of temperature versus time that have been developed based on real fire events. Nowadays, a number of methods of passive fire protection are applicable. These methods are herein analyzed with respect to their advantages and weaknesses.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια πυρκαγιά σε ένα κλειστό χώρο αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα ατυχήματα, με σημαντικές επιπτώσεις όπως ανθρώπινες απώλειες και μεγάλο οικονομικό και κοινωνικό κόστος. Παραδείγματα τέτοιων ατυχημάτων διεθνώς αποτελούν οι πυρκαγιές στις σήραγγες της Μάγχης στην Αγγλία, του Mont-Blanc στη Γαλλία, του Tauern στην Αυστρία και του Gotthard στην Ελβετία είναι γνωστά διεθνώς παραδείγματα (Beard & Carvel, 2005). Σε όλες τις περιπτώσεις οι ανθρώπινες απώλειες ήταν μεγάλες, το κόστος αποκατάστασης μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες εκατομμύρια ευρώ ενώ ο χρόνος που απαιτήθηκε μέχρι την επαναλειτουργία της σήραγγας από μήνες μέχρι και χρόνια (Πίνακας 1). Στα παραπάνω προστίθεται και η αμφιβολία που δημιουργείται στους χρήστες για την ασφάλεια των σηράγγων, ιδιαίτερα εκείνων με μεγάλο μήκος.

Αναγνωρίζοντας τα παραπάνω, η ΕΕ εξέδωσε το 2004 την οδηγία 2004/54/ΕΚ σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας στις ευρωπαϊκές οδικές σήραγγες. Για την προστασία των ανθρώπων και της σήραγγας από πυρκαγιά προβλέπονται, μεταξύ άλλων, υποχρεωτικές έξοδοι κινδύνου, σχεδιασμός του συστήματος αερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του καπνού, και επαρκής αντοχή των κατασκευών της σήραγγας στη φωτιά. Η Ελλάδα ανταποκρίθηκε στην ανωτέρω οδηγία με το ΠΔ 320/2007, που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 264Α/2007.

Σύμφωνα, εξάλλου, με τη ΙΤΑ (International Tunnelling Association) ο δομικός σχεδιασμός σηράγγων ανθεκτικών σε φωτιά αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού των νέων σηράγγων και αποκατάστασης των υπαρχουσών (ΙΤΑ, 2004). Στόχοι της πυρανθεκτικότητας των σηράγγων είναι να επιτραπεί η δυνατότητα εκκένωσης της σήραγγας από τους χρήστες και

η εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών για τις ενέργειες διάσωσης.

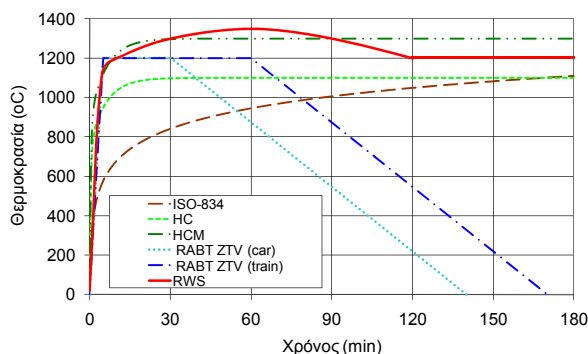
Πίνακας 1. Συνέπειες πυρκαγιάς σε σήραγγες
Table 1. Tunnel fire consequences.

Σήραγγα	Θύματα/ Τραυμ.	Οικον. απώλ. (εκ. €)	Χρόνος επισκ. (έτη)	Καταστρ. Σκυροδ. (cm)
Μάγχις (Αγγλία)	30 τραυμ.	250	>1	35
Mont Blanc (Γαλλία/Ιταλία)	39 νεκροί 34 τραυμ.	450	3	40
Tauern (Αυστρία)	12 νεκροί 49 τραυμ.	30		35
Gotthard (Ελβετία)	11 νεκροί	-	2 μήνες	35

2. ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Η πυρκαγιά είναι αντίδραση καύσης με ταυτόχρονη έκλυση φωτός και θερμότητας. Μια τυπική πυρκαγιά αποτελείται από τρεις φάσεις: τη φάση της επώασης, τη φάση της πλήρους ανάπτυξης και τη φάση της απόσβεσης (Τάσιος και Δεοδάτης, 1984).

Για την εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς έχουν προταθεί διάφορες πρότυπες καμπύλες. Στο σχήμα 1 δίνεται το διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες πρότυπες πυρκαγιές.



Σχήμα 1. Πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς

Figure 1. Standard fire temperature curves

Πιο αναλυτικά διακρίνονται οι εξής έξι πρότυπες καμπύλες:

1) καμπύλη ISO (ISO-384): βασίζεται στο ρυθμό καύσης υλικών που συναντώνται σε κατασκευές κτιρίων. Η θερμοκρασία μετά από 30min φτάνει τους 842 °C. Η πυρκαγιά διαρκεί

τρεις ώρες και η θερμοκρασία φτάνει στους 1110°C. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (1).

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

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min

2) Καμπύλη υδρογονανθράκων (HC): αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη την καύση πετρελαίου, ή άλλων χημικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην πετρελαϊκή βιομηχανία και δεν συναντώνται σε συνήθη οικοδομικά έργα. Συνεπώς η καμπύλη αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πυρκαγιών που προέρχονται από την καύση καυσίμων υλών. Η θερμοκρασία φτάνει στους 1100°C από τα πρώτα 15min και διατηρείται σε ισορροπία στην συγκεκριμένη θερμοκρασία για τις τρεις ώρες της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (2)

$$T = 20 + 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167 \cdot t} - 0.675 \cdot e^{-2.5 \cdot t}) \quad (2)$$

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min

3) Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM): η διαφορά της καμπύλης αυτής με την προηγούμενη είναι η μέγιστη θερμοκρασία της πυρκαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμοκρασία φτάνει στους 1300 °C από τα πρώτα 15min. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (3)

$$T = 20 + 1280 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167 \cdot t} - 0.675 \cdot e^{-2.5 \cdot t}) \quad (3)$$

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min

4) και 5) Καμπύλες RABT ZTV: Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναπτύχθηκαν στη Γερμανία ως αποτέλεσμα μιας σειράς πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο προγραμμάτων όπως π.χ το "EUREKA project". Στις καμπύλες αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 1200 °C πραγματοποιείται μέσα σε πέντε λεπτά. Η διάρκεια έκθεσης στους 1200 °C είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες πυρκαγιές με τη θερμοκρασία να αρχίζει να μειώνεται στα 30 min για πυρκαγιά σε αυτοκίνητο (RABT ZTV car) και στα 60min για πυρκαγιά σε τρένο (RABT ZTV train). Η φάση της απόσβεσης και για τις δύο περιπτώσεις είναι 110 min.

6) Καμπύλη RWS: η καμπύλη αυτή αναπτύχθηκε από το υπουργείο συγκοινωνιών της Ολλανδίας και πρόκειται για τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Βασίζεται στο σενάριο ότι πραγματοποιείται πυρκαγιά σε ένα φορτηγό με 50 m³ πετρέλαιο, η ισχύς είναι της τάξης των 300MW σε κλειστό χώρο και διαρκεί 120min. Τα αποτελέσματα για την κατασκευή της καμπύλης προέρχονται από τα πειράματα που έγιναν στη σήραγγα του Runehamar στην Νορβηγία. Η διαφορά της καμπύλης αυτής από εκείνη των υδρογοναναθράκων είναι ότι πρόκειται για πυρκαγιά σε κλειστό χώρο όπως σε σήραγγες κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις άλλες καμπύλες.

Η καμπύλη RWS αποτελεί την πιο απαιτητική καμπύλη θερμικών φορτίων σχεδιασμού, που όμως προσομοιώνει καλύτερα την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς, που προβλέπει η παραπάνω καμπύλη, οδηγεί χωρίς αμφιβολία σε αποφλοίωση του σκυροδέματος αν δεν ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα προστασίας.

3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Χωρίς κανένα μέτρο προστασίας η επένδυση της σήραγγας ανθίσταται σε θερμοκρασίες περί τους 1000 °C για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έως ότου αρχίσει η εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος (Φωτογραφία 1)



Φωτογραφία 1: Εικόνες καταστροφής της επένδυσης της σήραγγας (Krause 2006)
Photograph 1: Pictures of the destruction of the tunnel lining (Krause 2006)

3.1 Επιπτώσεις στο σκυροδέμα

Γενικότερα το σκυροδέμα δεν καίγεται και έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, όμως κατά την αύξηση της θερμοκρασίας υπόκειται σε διεργασίες που επηρεάζουν τη δομή του και μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητές του. Στον Πίνακα 2 συνοψίζεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Porovics 1992).

Πίνακας 2 : Θερμοκρασιακές μεταβολές του σκυροδέματος

Table 2 : Thermal transformations of concrete

Θερμοκρασία	Φυσικές διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες
0-100°C	Εξάτμιση του φυσικά ροφημένου νερού	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας
100-400 °C	Πραγματοποιούνται υδροθερμικές αντιδράσεις και εξάτμιση του μηχανικά συνδεδεμένου νερού.	Επίτευξη της τελικής θλιπτικής αντοχής και περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας
400-500 °C	Το συνδεδεμένο με τα υδροξειδία του ασβέστου νερό ελευθερώνεται μέσω της πίεσης των υδρατμών και ενεργεί διαρρηκτικά. Ξεκινά η αποφλοίωση του σκυροδέματος	Ισχυρή πτώση της αντοχής του σκυροδέματος αλλά και του μέτρου ελαστικότητας
500-1000 °C	Τα περιέχοντα χαλαζιακά συστατικά του σκυροδέματος (άμμος, χαλίκι) μεταβάλλουν αλματωδώς τον όγκο τους στους 600 °C	Μικρή παραμεινόμενη αντοχή
> 1000 °C		Αρχίζει η τήξη του σκυροδέματος

Παρατηρείται ότι στο εύρος μεταξύ 400 °C – 500 °C πραγματοποιείται αποφλοίωση του σκυροδέματος (spalling). Αποφλοίωση είναι η βίαιη ή μη αποκοπή στρώματος ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνεια μιας κατασκευής όταν εκτίθεται σε υψηλές και απότομα αυξανόμενες θερμοκρασίες όπως συμβαίνει δηλαδή στις πυρκαγιές. Συνολικά υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι αποφλοίωσης :

1. Αποφλοίωση αδρανών (Aggregate spalling)
 2. Αποφλοίωση γωνιών (Corner spalling)
 3. Επιφανειακή αποφλοίωση (surface spalling)
 4. Εκρηκτική αποφλοίωση (explosive spalling)
- Ο πιο συνηθισμένος τύπος αποφλοίωσης είναι ο τελευταίος και πραγματοποιείται λόγω τριών παραγόντων:
- Λόγω πίεσης των πόρων (pore pressure spalling)
 - Λόγω θερμικών εφελκυστικών τάσεων (Thermal stress spalling)

- Λόγω συνδυασμού των δύο παραπάνω
- Στην τελευταία περίπτωση, που είναι και η συνηθέστερη αναπτύσσονται αρχικά παράλληλα στην επιφάνεια μικρορωγμές και στη συνέχεια το σύνολο των τάσεων υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργείται βίαιη αστοχία της θερμαινόμενης επιφάνειας και απότομη απελευθέρωση ενέργειας (Khoury et. al. 2005). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοίωση είναι οι παρακάτω :
- Η αντοχή, ηλικία και αγωγιμότητα του σκυροδέματος
- Ο ρυθμός αύξησης της θερμότητας
- Το σχήμα της διατομής της σήραγγας
- Το μέγεθος και ο τύπος των αδρανών
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία
- Η παρουσία μικρορωγμών

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε μία προσπάθεια προσομοίωσης πυρκαγιάς σε σκυρόδεμα. Για το σκοπό αυτό εκτέθηκε σε φλόγα προπανίου ένα δοκίμιο σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε ότι μετά από την πάροδο λίγων δευτερολέπτων (=10 sec) πραγματοποιήθηκε μία μορφή έκρηξης η οποία αντιστοιχούσε στην εκρηκτική αποφλοίωση που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο χώρος γύρω από τον οποίο πραγματοποιούνταν η δοκιμή γέμιζε με θραύσματα από το δοκίμιο. Το πάχος της αποφλοίωσης ήταν της τάξης των 2 mm όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 2.



Φωτογραφία 2: Εικόνα αποφλοίωσης δοκίμιου σκυροδέματος
 Photograph 2: Picture of spalling of a concrete sample

3.2 Επιπτώσεις στο χάλυβα του οπλισμού

Η συμπεριφορά του χάλυβα του οπλισμού σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από το είδος

του. Γενικά όμως ισχύει ότι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των χαλύβων μειώνονται με τη αύξηση της θερμοκρασία έκθεσης. Η μείωση είναι σχετικά μικρή για έκθεση σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200 °C και γίνεται μεγαλύτερη για υψηλότερες θερμοκρασίες, φθάνοντας σε μείωση έως και 60% των αρχικών τιμών για θερμοκρασία 600 °C. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 °C ο ρυθμός μείωσης της αντοχής αυξάνεται, ενώ λόγω και των υπολοίπων μεταβολών που θα συμβούν στον χάλυβα και στο σκυρόδεμα (μείωση συνάφειας με το σκυρόδεμα, μεταβολές μικρογραφικής δομής) είναι ενδεχόμενο να προκληθούν σοβαρές βλάβες σε στοιχεία της κατασκευής (ΚΕΔΕ 2008).

4. ΜΕΤΡΑ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Σκοπός των μέτρων παθητικής πυροπροστασίας είναι να περιορίσουν την ανάπτυξη της πυρκαγιάς και τις προκαλούμενες υψηλές θερμοκρασίες και να μετριάσουν τις συνέπειες της αποτρέποντας την καταστροφή της επένδυσης της σήραγγας. Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά. Στα ενεργητικά περιλαμβάνονται συστήματα πυρανίχνευσης, καταιονητήρες νερού ή κατασβεστικού αφρού, εγκατάσταση μόνιμου πυροσβεστικού δικτύου κλπ. Τα μέτρα αυτά στοχεύουν κυρίως τον περιορισμό της επέκτασης της φωτιάς.

Για την μετρίαση των συνεπειών της πυρκαγιάς πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέτρα παθητικής πυροπροστασίας

Τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας προσφέρουν αυξημένη προστασία στην επένδυση της σήραγγας και η εφαρμογή τους μπορεί να μειώσει κατά πολύ τον απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ο σύγχρονος σχεδιασμός των σιράγγων προβλέπει την γρήγορη εκκένωση σε περίπτωση πυρκαγιάς μέσω των στοών διαφυγής. Όμως, η κατάρρευση της επένδυσης μπορεί να αποβεί μοιραία για το πυροσβεστικό προσωπικό. Η παθητική πυροπροστασία προσφέρει πυραντοχή στην επένδυση της σήραγγας και μπορεί έτσι να αποτρέψει πιθανούς τραυματισμούς και απώλειες ζωής. Εντούτοις, η χρήση τους εξετάζεται σε σχέση με το κόστος εφαρμογή τους, ενώ παρά την εκτεταμένη έρευνα, που πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια για την εξεύρεση οικονομικών λύσεων, το κόστος εξακολουθεί να παραμένει υψηλό.

Η παθητική πυροπροστασία της επένδυσης επιτυγχάνεται με τη χρήση πυράντοχων πλα-

κών, με την εφαρμογή εκτοξευόμενων κονιαμάτων, με την προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα, ή με το σχεδιασμό πυράντοχου σκυροδέματος. Οι τέσσερις αυτοί τρόποι αναλύονται στη συνέχεια σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

4.1 Πυράντοχες πλάκες (fire protection boards)

Πρόκειται για πλάκες από γύψο και ίνες υάλου ή άλλα μη εύφλεκτα υλικά. Αποτρέπουν τη διάδοση της φωτιάς και τη μετάδοση της θερμότητας. Οι διαστάσεις τους ποικίλλουν κατά περίπτωση ενώ το πάχος εφαρμογής τους πλακών κυμαίνεται από 10 – 50 mm ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού τους και το επιθυμητό επίπεδο προστασίας. Η εφαρμογή τους είναι χρονοβόρα και παρουσιάζει δυσκολίες σε περιπτώσεις καμπύλων κατασκευών. Πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων μέτρων προστασίας για τους παρακάτω λόγους:

- Μπορούν να τοποθετηθούν σε ήδη υπάρχουσες σήραγγες
- Μπορούν να καλύψουν τη βασική επένδυση, αγωγούς και αρθρώσεις
- Αντικαθίστανται εύκολα σε περίπτωση τοπικής βλάβης
- Λόγω σταθερού πάχους η προστασία της επένδυσης είναι ομοιόμορφη

Μειονεκτούν όμως λόγω των παρακάτω :

- Δύσκολη και χρονοβόρα τοποθέτηση
- Η επιθεώρηση της επένδυσης καθίσταται αδύνατη
- Απαραίτητη χρήση αναμονών για την τοποθέτηση

Ένα παράδειγμα πυράντοχων πλακών που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι οι πλάκες της εταιρείας Promatec.

4.2 Εκτοξευόμενα κονιάματα (spray mortars)

Πρόκειται για κονιάματα τσιμεντοειδούς βάσεως τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση με τη μέθοδο της υγρής ανάμιξης. Τα κονιάματα αυτά αποτελούνται από τσιμέντο, λεπτόκοκκα αδρανή, νερό, ειδικά πρόσθετα και επιταχυντή. Επίσης, μπορεί να περιέχουν ορυκτά όπως βερμικουλίτη ή ίνες πολυπροπυλενίου σε μικρό ποσοστό. Τα υλικά αυτά εμποδίζουν την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και την εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος.

Το απαιτούμενο πάχος εξαρτάται από την επιτρεπτή θερμοκρασία στη διεπιφάνεια κονιάματος και επένδυσης, από το θερμικό φορτίο σχεδιασμού, δηλ. από την καμπύλη που θα

επιλεγεί για το σχεδιασμό της παθητικής πυροπροστασίας, και από τον αναμενόμενο χρόνο έκθεσης στην πυρκαγιά. Πάχος μεγαλύτερο από 40 mm θεωρείται ότι προσφέρει ικανοποιητική θερμική μόνωση, καθιστά όμως τη συγκεκριμένη μέθοδο αρκετά ακριβή.

Η καλή εφαρμογή του εκτοξευόμενου κονιάματος προϋποθέτει την επίτευξη ικανοποιητικής πρόσφυσης με την επιφάνεια της επένδυσης, που επιτυγχάνεται είτε με την εκτόξευση νερού υπό υψηλή πίεση 1500-2000 bar (hydromilling) είτε με τη στερέωση στην επένδυση ελαφρού μεταλλικού πλέγματος από ανοξείδωτο χάλυβα, είτε και με τα δύο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε σχήμα διατομής σήραγγας
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές
- Μειώνει αισθητά την θερμοκρασία στην επένδυση

Η λύση με το εκτοξευόμενο κονίαμα έχει και τα παρακάτω μειονεκτήματα :

- Δεν προσφέρει ομοιομορφία στην κατασκευή
- Έχει υψηλό κόστος

Στο εμπόριο κυκλοφορούν με διάφορες ονομασίες, όπως π.χ το υλικό Meyco fix fire-shield 1350 της εταιρείας Basf, το οποίο έχει τύχει εφαρμογής και σε σήραγγα στον ελλαδικό χώρο.

4.3 Σκυρόδεμα με ίνες πολυπροπυλενίου

Οι ίνες πολυπροπυλενίου (polypropylene fibers) τοποθετούνται μέσα στο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της παρασκευής του. Με την προσθήκη των ινών πολυπροπυλενίου αποτρέπεται η εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος. Αποτελεί τη φθηνότερη ίσως λύση αλλά και την ευκολότερη από πλευράς εφαρμογής. Μειονεκτεί όμως σε σχέση με τις άλλες μεθόδους διότι δεν αποτρέπει την μετάδοση της θερμότητας προς τον οπλισμό της επένδυσης. Επίσης η διάρκεια τους στο χρόνο δεν έχει ακόμα επιβεβαιωθεί. Επιπλέον δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε υπάρχουσες σήραγγες.

Τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων είναι τα παρακάτω :

- Είναι σχετικά φθηνή λύση
- Οι ίνες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του και συνεπώς δεν υπάρχει καθυστέρηση στην εφαρμογή
- Αποφεύγεται η αποφλοίωση του σκυροδέματος

Τα μειονεκτήματα της λύσης αυτής είναι :

- Δεν έχει εφαρμογή σε υπάρχουσες σήραγγες
- Δεν μειώνεται η θερμοκρασία στην επένδυση, παρά μόνο η πίεση των πόρων και συνεπώς το σκυρόδεμα χάνει την αντοχή του με τον ίδιο τρόπο όπως το σκυρόδεμα χωρίς ίνες πολυπροπυλενίου
- Δεν βελτιώνονται οι θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος
- Δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμα η διάρκεια στον χρόνο

4.4 Πυράντοχο σκυρόδεμα

Πυράντοχο σκυρόδεμα (fire resistant concrete) επιτυγχάνεται με κατάλληλο σχεδιασμό του σκυροδέματος ώστε να αποκτά πυράντοχες ιδιότητες. Η χρήση αδρανών μικρής θερμικής διαστολής μειώνει αισθητά την πιθανότητα αποφλοιώσης του σκυροδέματος. Επίσης καλύτερη αντίσταση στη φωτιά επιτυγχάνεται όταν το σκυρόδεμα έχει χαμηλό βάρος (lightweight concrete) και μικρό ποσοστό υγρασίας. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης πυράντοχου σκυροδέματος συνοψίζονται ως εξής:

- Δεν απαιτείται διεύρυνση της διατομής εκσκαφής
- Μειώνεται ο χρόνος κατασκευής
- Δεν απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός
- Δεν εμποδίζεται η οπτική επιθεώρηση της επένδυσης.
- Η χρονική διάρκεια ζωής της πυροπροστασίας είναι ίδια με τη χρονική διάρκεια ζωής της σήραγγας

Τα βασικά του μειονεκτήματα είναι ότι :

- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ήδη υπάρχουσες σήραγγες
- Το κόστος αναζήτησης κατάλληλων αδρανών είναι υψηλό
- Είναι αμφίβολη η εύρεση κατάλληλων αδρανών στην περιοχή όπου κατασκευάζεται το έργο.

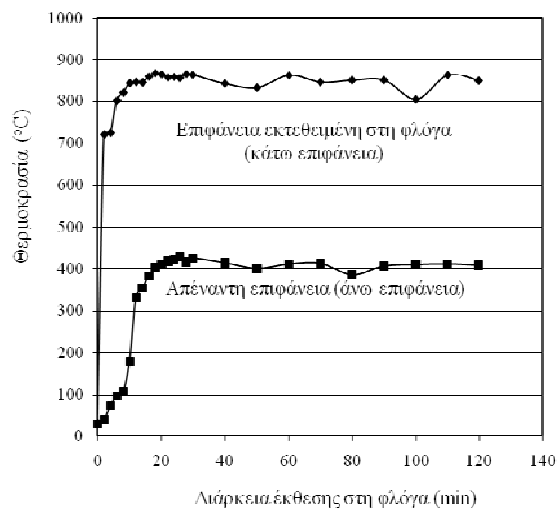
Στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών ΕΜΠ, βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, έρευνα για την ανάπτυξη ενός κατάλληλου υλικού πυροπροστασίας. Η έρευνα πραγματοποιείται με τη συνεργασία του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων και του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας. Στα πρώτα στάδια της έρευνας έχουν ήδη καθορισθεί οι προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληρεί ένα τέτοιο υλικό και οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- Το υλικό πρέπει να έχει άριστες θερμικές ιδιότητες με σκοπό α) να δημιουργεί εμπόδιο

στη διάδοση της θερμότητας προκαλώντας βάρθρωση μεταξύ της εκτειθέμενης και μη εκτειθέμενης στη φλόγα επιφάνειας, β) να δημιουργεί εμπόδιο στη διάδοση της φλόγας και του καπνού.

- Να μπορεί να υφίσταται ωρίμανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με σκοπό να μπορεί να εφαρμοσθεί επί τόπου στη σήραγγα
- Να είναι αντλήσιμο για τη δημιουργία επιφανειακών επικαλύψεων με εκτόξευση
- Να έχει ικανοποιητική μηχανική αντοχή
- Να έχει μικρή υδροαπορροφητικότητα ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα σε περιπτώσεις σηράγγων σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας
- Να έχει χαμηλό κόστος παραγωγής

Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί ένα υλικό για παθητική πυροπροστασία το οποίο χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη τη σκυρία από τις ηλεκτροκαμίνους της εταιρείας Γ.Μ.Ε.Ε Λάρκο, και υπόκεινται σε δοκιμές τόσο για την εκτίμηση των θερμικών όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Στο Σχήμα 2 δίνεται το διάγραμμα το οποίο εξήλθε από τη δοκιμή σε φλόγα προπανίου του υλικού και στις φωτογραφίες (Φωτογραφία 3) που ακολουθούν δίνονται οι δύο επιφάνειες (εκτειθέμενη και μη) μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 2. Καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου κατά την έκθεσή του ανόργανου πολυμερούς υλικού σε φλόγα προπανίου

Figure 2. Curve temperature versus time during exposition of inorganic polymeric material to propane flame

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι η άνω επιφάνεια του υλικού υφίσταται μόνο μικρορωγματώσεις ενώ η επιφάνεια που εκτίθεται στη φλόγα δεν ρωγματώνεται. Επίσης από το

Σχήμα 2 φαίνεται ότι το υλικό δημιουργεί θερμοκρασιακή βλάβη της τάξης των 400-450° C για πάχος ίσο με 10 mm.



Φωτογραφία 3: Εικόνες άνω και κάτω επιφάνειας υλικού μετά την έκθεση σε φλόγα για δύο ώρες

Photograph 3: Pictures of upper and lower surface after exposition to flame for two hours

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τυχόν καταστροφή της επένδυσης λόγω πυρκαγιάς μπορεί να οδηγήσει, αναλόγως και των γεωτεχνικών συνθηκών, σε πολύ σοβαρές καταστροφές. Σε περιπτώσεις διάνοιξης σήραγγας (ανεξαρτήτου διατομής) σε χαλαρό έδαφος ή σε αποσαθρωμένο πέτρωμα κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μία πιθανή κατάρρευση της οροφής λόγω πυρκαγιάς μπορεί να προκαλέσει εισροή υδάτων, τεμαχίων πετρώματος μέσα στη σήραγγα αλλά και δημιουργία καμινάδων (sink holes) στην επιφάνεια. Όταν η σήραγγα είναι σε σκληρό σχηματισμό τα φορτία αναλαμβάνονται κυρίως από το πέτρωμα και έτσι η καταστροφή λόγω της πυρκαγιάς περιορίζεται μόνο στην καταστροφή της επένδυσης, που μπορεί να διορθωθεί με το ανάλογο κόστος.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος μπορούν να δώσουν τεχνικές λύσεις. Έχουν όμως αρκετά μειονέκτηματα που τις καθιστούν δύσχρηστες είτε από θέμα κόστους είτε από θέμα εφαρμογής.

Οι σήραγγες είναι σημαντικότερα έργα υποδομής που συμβάλουν καθοριστικά στην κοινωνία και στην οικονομική ανάπτυξη μίας περιοχής. Η απώλεια της λειτουργικότητας τους λόγω πυρκαγιάς είναι θέμα υψηλής σημασίας και συνεπώς η πυροπροστασία τους γίνεται επιτακτική.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Beard A., Carvel R. (2005), "The handbook of tunnel fire safety". Thomas Telford Publishing, London, UK. p.514.

International Tunnelling Association (2004), "Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels", p. 81.

Τάσιος Θ., Δεοδάτης Γ. (1984) "Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών έναντι πυρκαγιάς", Αθήνα σελ. 117.

Popovics S., "Concrete materials: Properties, Specifications and Testing", 1992, NOYES New Jersey, U.S.A, 2nd Ed.

Khoury G., Hemelop W., Niels P., (2005), "Workpackage 4: Fire effects and tunnel performance: system structural response".

Κ.Ε.Δ.Ε (2008), "Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος", Αθήνα, σελ. 128.

Krause T. (2006), "View of a contractor", Fire protection engineering for new and existing tunnels". Institution of Civil Engineers, London, UK,