



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Κατσαρογιάννης Σταύρος

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής Α.Μπενάρδος

Αθήνα 2015

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών κ.Μπενάρδο Ανδρέα, για την εμπιστοσύνη του να μου αναθέσει το συγκεκριμένο θέμα. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την καθοδήγηση και την υψηλού επιπέδου συνεργασία που μου προσέφερε για την εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Σακκά Κωνσταντίνο, Μηχανικό Μεταλλείων – Μεταλλουργό, ΥΔ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την καθοριστική και ανεκτίμητη συνεισφορά του στο κομμάτι αναζήτησης σημαντικών πληροφοριών για την εκπόνηση της παρούσας, μεταπτυχιακής, διπλωματικής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Ηλιόπουλο Αλέξανδρο, υπεύθυνο της εταιρείας Promat σε θέματα πυροπροστασίας, για τα στοιχεία που μου παραχώρησε προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υπέρμετρη στήριξη που παρέχει στις προσπάθειες μου για επιπλέον μόρφωση και γνώση.

Περίληψη

Ένα από τα πλέον σημαντικά ζητήματα ασφάλειας που περιλαμβάνονται στη μελέτη και το σχεδιασμό των σύγχρονων σήραγγων είναι η πυροπροστασία. Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία, πραγματοποιείται αξιολόγηση των μεθόδων πυροπροστασίας που χρησιμοποιούνται σε σήραγγες.

Στα δύο πρώτα κεφάλαια της εργασίας γίνεται μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος της πυρκαγιάς σε σήραγγα (στατιστικές μελέτες, ανάλυση του κινδύνου) αλλά και των σημαντικότερων ατυχημάτων πυρκαγιάς των τελευταίων ετών. Επίσης αναλύονται οι λόγοι που επιβάλλουν τη χρήση μέτρων πυροπροστασίας, παρουσιάζονται οι πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς καθώς και οι διεθνής-ευρωπαϊκοί κανονισμοί πυροπροστασίας σήραγγων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται μία εκτενής αναφορά στις μεθόδους πυροπροστασίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας υπό υψηλές θερμοκρασίες, γίνεται διαχωρισμός των μεθόδων πυροπροστασίας σε ενεργητικές ή παθητικές και περιγράφονται οι υφιστάμενοι τρόποι για την εφαρμογή τους.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, όπου γίνεται αξιολόγηση των μεθόδων πυροπροστασίας βάσει της διαδικασίας ΑΗΡ. Αρχικά περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ) και ακολουθούν τα στοιχεία με βάση τα οποία εκτελέσθηκε η παρούσα ανάλυση. Με γνώμονα τρία βασικά κριτήρια αξιολόγησης (τεχνικό, οικονομικό και λειτουργικό) γίνεται επιλογή μεταξύ εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας. Αυτές οι λύσεις είναι η χρήση πυράντοχων τσιμεντοειδών κονιαμάτων ως πρόσθετο επίστρωμα στην τελική επένδυση της σήραγγας, η χρήση πυράντοχων πλακών για την δημιουργία πυράντοχης ασπίδας σε όλη τη διατομή της σήραγγας, η εγκατάσταση σταθερού συστήματος πυρόσβεσης και συνδυασμοί αυτών. Τέλος, για το βασικό σενάριο της ανάλυσης, που δίνεται έμφαση στο τεχνικό κομμάτι, προτείνεται ως βέλτιστη λύση συστήματος πυροπροστασίας η χρήση πυράντοχων πλακών.

Abstract

One of the most important security issues included in the study and design of modern tunnels is fire protection. In this thesis, an assessment of the fire protection methods used in tunnels was made.

The first two chapters are a brief description of the tunnel fire problem (statistical studies, risk analysis) and the major fire accidents that occurred in the recent years. Furthermore, the reasons that impose the use of fire protection measures are analyzed, the standard time/temperature curves are presented as well as the International/European regulations for fire protection in tunnels.

An extensive report on fire protection methods is listed in the third chapter. More specifically, the behavior of structural elements in the tunnel's final lining under high temperatures is studied, the fire protection methods are divided in active or passive and the existing ways to apply these methods are described.

This study ends with the fourth and final chapter, where an assessment of fire protection methods, based on AHP process, is made. Initially, the analytic hierarchy process is described, and the data on which this analysis was performed, is presented. An evaluation of fire protection alternatives is made based on three key criteria (technical, economic and functional). These solutions are the use of cementitious fire resistant mortars as an additional coating on the final lining of the tunnel, the use of fire-proof boards in order to form a fire resistant shield across the cross section of the tunnel, the installation of a fixed fire fighting system and combinations of these methods. Finally, for the baseline analysis, where the technical part is highlighted, it is proposed that the optimal solution are the fire proof boards.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	1
Περίληψη.....	2
Abstract	3
Λίστα εικόνων	6
Λίστα πινάκων.....	8
Κεφάλαιο 1ο :.....	10
Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας	10
1.1.Το πρόβλημα της πυρκαγιάς σε σήραγγα	11
1.2. Περιγραφή των σημαντικότερων γεγονότων πυρκαγιάς και παράθεση στατιστικών μελετών των τελευταίων ετών.....	13
1.2.1. Οδικές σήραγγες.....	13
1.2.2. Σιδηροδρομικές σήραγγες.....	18
1.2.3. Παράθεση συγκεντρωτικών πινάκων και στατιστικών μελετών για ατυχήματα πυρκαγιών σε σήραγγες.....	20
1.3. Ανάλυση του κινδύνου για περιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγες.....	24
Κεφάλαιο 2ο :.....	30
Αντιμετώπιση του προβλήματος «πυρκαγιά σε σήραγγα» με χρήση μέτρων πυροπροστασίας	30
2.1. Λόγοι που επιβάλλουν τη χρήση μέτρων πυροπροστασίας στις σήραγγες – Σκοπός πυροπροστασίας.....	31
2.2. Θερμικά φορτία – Πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς	33
2.3. Κανονισμοί πυροπροστασίας σηράγγων.....	40
Κεφάλαιο 3ο :.....	43
Μέθοδοι πυροπροστασίας σε σήραγγες	43
3.1. Η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας υπό υψηλές θερμοκρασίες	44
3.1.1. Σκυρόδεμα	44
3.1.2. Αποφλοίωση του σκυροδέματος (Concrete Spalling)	48
3.1.3. Ο οπλισμός του σκυροδέματος	55
3.2. Μέθοδοι πυροπροστασίας σε σήραγγες.....	58
3.2.1. Ενεργητική πυροπροστασία σηράγγων.....	58
3.2.2. Υφιστάμενοι τρόποι ενεργητικής πυροπροστασίας σηράγγων	60
3.2.3. Παθητική πυροπροστασία σηράγγων	64

3.2.4. Υφιστάμενοι τρόποι παθητικής πυροπροστασίας σήραγγων.....	65
3.3. Τρόποι και υλικά για την επισκευή σήραγγας	79
3.4. Τρόποι πρόσδοσης παθητικής πυροπροστασίας σε υπάρχουσες σήραγγες.....	89
Κεφάλαιο 4ο :	90
Χρήση της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ) για την αξιολόγηση μεθόδων πυροπροστασίας σε σήραγγες.....	90
4.1. Εισαγωγή στη διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ – Analytic Hierarchy Process).....	91
4.2. Επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας με τη διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης ΑΗΡ (Analytic Hierarchy Process)	96
4.2.1. Τα στοιχεία της ανάλυσης	96
4.2.2. Αξιολόγηση συστήματος πυροπροστασίας σε σήραγγα.....	97
4.3. Γενικά συμπεράσματα - Σχολιασμός αποτελεσμάτων	115
Βιβλιογραφία	118

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1.1: Η πεταλοειδής διατομή της σήραγγας του Mont blanc	14
Εικόνα 1.2: Καταστροφή του σκυροδέματος της επένδυσης της σήραγγας του Mont Blanc	15
Εικόνα 1.3: Σκαρίφημα της περιοχής της σήραγγας του Nihonzaka (Ιαπωνία)	16
Εικόνα 1.4: Εικόνα μετά από την πυρκαγιά στη σήραγγα του Καπρούν	19
Εικόνα 2.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα πρότυπων καμπύλων χρόνου/θερμοκρασίας	34
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας της καμπύλης ISO-834.....	35
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας της καμπύλης υδρογονανθράκων (HC)	36
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων (HCM)	37
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας καμπυλών RABT-ZTV	38
Εικόνα 2.6: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας καμπύλης RWS	39
Εικόνα 3.1: Εικόνα καταστροφής της επένδυσης της σήραγγας Great Belt (Δανία 1994)	47
Εικόνα 3.2: Μοντέλο ενός τμήματος επένδυσης (protection layer) όταν αυτό θερμαίνεται	49
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας πίεσης πόρων και υγρασίας ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια θέρμανσης	50
Εικόνα 3.4: Μονοδιάστατη ποιοτική κατανομή της θερμοκρασίας (T), της υγρασίας (W), και της πίεσης των ατμών (P) στο σκυρόδεμα όταν θερμαίνεται από μία πλευρά	50
Εικόνα 3.5: Ενεργές τάσεις σε σκυρόδεμα υπό θέρμανση	51
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα καμπύλης ISO-834 και μορφές αποφλοιώσης	52
Εικόνα 3.7: Αποφλοιώση του σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά.	53
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβα ASTM A36 υπό υψηλές θερμοκρασίες	56
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα σχετικών μεγεθών μέτρου ελαστικότητας για θερμοκρασίες 0°C και 600°C	56
Εικόνα 3.10: Σύστημα ψεκασμού νερού.....	59
Εικόνα 3.11: Διαδικασία εκτόξευσης πυρίμαχου κονιάματος στην τελική επένδυση της σήραγγας	70
Εικόνα 3.12: Εφαρμογή ως παραμένων ξυλότυπος	73
Εικόνα 3.13: Μηχανική στερέωση επί του σκυροδέματος	73
Εικόνα 3.14: Μηχανική στερέωση σε απόσταση από το σκυρόδεμα με μεταλλικά προφίλ	73
Εικόνα 3.15: Εφαρμογή πλακών πυροπροστασίας	74
Εικόνα 3.16: Διογκωμένο επίστρωμα στον οπλισμό	75

Εικόνα 3.17: Έκθεση πλάκας σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου σε θερμοκρασία 1200°C	76
Εικόνα 3.18: Ίνες πολυπροπυλενίου	77
Εικόνα 3.19: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης στο Summit Tunnel (Αγγλία), σοβαρή αποφλοίωση	82
Εικόνα 3.20: Πυροπροστασία σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου	83
Εικόνα 3.21,Εικόνα 3.22: Ρωγμή σε τμήμα της οροφής (αριστερά), αποφλοίωση σκυροδέματος (δεξιά).	85
Εικόνα 3.23: Υποστήριξη της οροφής στα σημεία σύνδεσης με τα πλαϊνά τοιχώματα	85
Εικόνα 3.24: Ανάρτηση και υποστήριξη της οροφής κατά την επισκευή	85
Εικόνα 3.25: Εργασίες για την αφαίρεση τμήματος της οροφής	86
Εικόνα 3.26: Εργασίες για τον καθαρισμό της επιφάνειας του σκυροδέματος	86
Εικόνα 3.27: Τοποθέτηση συνδετικών ράβδων χωρίς προβλήματα ροής νερού	87
Εικόνα 3.28,Εικόνα 3.29: Κατασκευή της νέας εσωτερικής επένδυσης (αριστερά), πλέγμα οπλισμού (δεξιά).....	87
Εικόνα 3.30: Διαφορετικοί τύποι προκατασκευασμένων τμημάτων	88
Εικόνα 3.31: Εγκατάσταση διαφορετικών προκατασκευασμένων τμημάτων σκυροδέματος... ..	88
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συνοπτικής ιεραρχίας τριών επιπέδων για πρόβλημα επιλογής	92
Εικόνα 4.2: Το παράθυρο εργασίας του λογισμικού Expert Choice.....	97
Εικόνα 4.3: Δομή της ιεραρχίας στην ανάλυση του βέλτιστου συστήματος πυροπροστασίας .	99
Εικόνα 4.4: Βαρύτητες των κριτηρίων και υποκριτηρίων για την επιλογή του συστήματος πυροπροστασίας.....	100
Εικόνα 4.5: Τελικές βαρύτητες των παραμέτρων εξέτασης των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή του συστήματος πυροπροστασίας	102
Εικόνα 4.6: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων αξιολόγησης των διάφορων εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας με βάση τα διάφορα υποκριτήρια εξέτασης	109
Εικόνα 4.7: Βαθμολόγηση και κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας και παρουσίαση της συνεισφοράς του κάθε κριτηρίου στο τελικό αποτέλεσμα	111
Εικόνα 4.8: Διαγραμματική απεικόνιση της βαθμολόγησης εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας σε σήραγγα για κάθε ένα από τα κριτήρια εξέτασης.....	112
Εικόνα 4.9(α,β): Επιπρόσθετη ανάλυση για συντελεστές 0.4,0.4,0.2 στα κύρια κριτήρια εξέτασης.....	113
Εικόνα 4.10(α,β): Επιπρόσθετη ανάλυση για συντελεστές 0.286,0.571,0.143 στα κύρια κριτήρια εξέτασης.....	114

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1.1: Απλοποιημένα χαρακτηριστικά για οδικές, σιδηροδρομικές και σήραγγες μετρό	20
Πίνακας 1.2: Καταγραφή πυρκαγιών σε σήραγγες για το διάστημα 1990-2015	21
Πίνακας 1.3: Σύνοψη από πυρκαγιές σε σήραγγες με εκτιμώμενη ενέργεια και μέγιστο εκτιμώμενο ρυθμό έκλυσης θερμότητας	23
Πίνακας 1.4: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για όλες τις κατηγορίες οχημάτων	23
Πίνακας 1.5: Παράθεση περιπτώσεων πυρκαγιάς σε αστικές σήραγγες διαφόρων χωρών.....	25
Πίνακας 1.6: Παράθεση περιπτώσεων πυρκαγιάς σε σήραγγες μεγάλων οδικών δικτύων.....	26
Πίνακας 1.7: Εκτίμηση της κρισιμότητας και της συχνότητας πυρκαγιάς σε γαλλικές σήραγγες	27
Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής ανθρώπινων απωλειών από πυρκαγιές σε σήραγγες	31
Πίνακας 2.2: Συντεταγμένες καμπύλης ISO-834	35
Πίνακας 2.3: Συντεταγμένες καμπύλης υδρογονανθράκων (HC)	36
Πίνακας 2.4: Συντεταγμένες τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων (HCM)	37
Πίνακας 2.5: Συντεταγμένες καμπύλης RABT	38
Πίνακας 2.6: Συντεταγμένες καμπύλης RWS	40
Πίνακας 2.7: Κοινές συστάσεις από PIARC και ITA.....	42
Πίνακας 3.1: Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θερμοκρασιακές μεταβολές.	46
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων αποφλοίωσης	48
Πίνακας 3.3: Μεταβολές ιδιοτήτων διάφορων ποιοτήτων χαλύβων	57
Πίνακας 3.4: Επιπτώσεις ενός συστήματος ομίχλης νερού FFFS στις επικρατούσες συνθήκες στην σήραγγα σε περίπτωση πυρκαγιάς.....	63
Πίνακας 3.5: Περιγραφή των φορτίων και αποτελέσματα των μετρήσεων	66
Πίνακας 3.6: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγάλης κλίμακας πειραμάτων πυρκαγιάς σε σήραγγα	67
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα δοκιμών για διαφορετικούς τύπους οχημάτων	68
Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά φυσικών και τεχνητών ελαφροβαρών κονιαμάτων	69
Πίνακας 3.9: Ιδιότητες υλικού πυροπροστασίας Meyco fireshield 1350.....	71
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα δοκιμών για το υλικό Meyco Fireshield 1350 σε θερμική δοκιμή προσομοίωσης της καμπύλης RWS.....	71
Πίνακας 3. 11: Ιδιότητες εμπορικών υλικών παθητικής πυροπροστασίας.....	78

Πίνακας 3.12: Μέθοδοι εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας	79
Πίνακας 4.1: Κλίμακα τιμών για συγκρίσεις κατά ζεύγη	93
Πίνακας 4.2: Δημιουργία μητρώου συγκρίσεων κατά ζεύγη.	94
Πίνακας 4.3: Συγκρίσεις κατά ζεύγη μεταξύ των κύριων κριτηρίων εξέτασης ως προς τον κύριο στόχο Fire Protection	100
Πίνακας 4.4: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Fire protection performance.....	101
Πίνακας 4.5: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Economic performance	101
Πίνακας 4.6: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Tunnel’s functionality.....	102
Πίνακας 4.7: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση το επίπεδο πυροπροστασίας που παρέχεται στη σήραγγα (Level of fire protection)	103
Πίνακας 4.8: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με την συμβατότητα της στην κατασκευή της σήραγγας (Method’s compatability)	104
Πίνακας 4.9: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το κόστος αγοράς της (Purchase cost).....	105
Πίνακας 4.10: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operational & Maintenance cost)	105
Πίνακας 4.11: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με τη διάρκεια «ζωής» της στα πλαίσια λειτουργίας μιας σήραγγας (Method’s durability over time).....	106
Πίνακας 4.12: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το ενδεχόμενο εκκένωσης της σήραγγας (Evacuation)	107
Πίνακας 4.13: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της κάθε μεθόδου (Installation time)	107
Πίνακας 4.14: Βαθμολόγηση των εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας σε σχέση με τα επιμέρους υποκριτήρια ως αποτέλεσμα των μεταξύ τους συγκρίσεων κατά ζεύγη	108
Πίνακας 4.15: Τελική βαθμολογία και κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων για σύστημα πυροπροστασίας σε σήραγγα	110

Κεφάλαιο 1ο :

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας

1.1.Το πρόβλημα της πυρκαγιάς σε σήραγγα

Οι πυρκαγιές αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα κινδύνου κατά τη λειτουργία σύγχρονων οδικών/σιδηροδρομικών δικτύων και ιδιαίτερα των σηράγγων. Μια πυρκαγιά σε κλειστό χώρο δύναται να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις όπως ανθρώπινες απώλειες, καθώς και σοβαρά οικονομικά και κοινωνικά κόστη. 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. 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. Η σοβαρότητα του γεγονότος της πυρκαγιάς σε σήραγγα έγκειται στην δυσκολία κατάσβεση της. Αυτό οφείλεται στην διαφορά καύσης που υπάρχει μεταξύ κλειστού και ανοιχτού χώρου καθώς και στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται γρήγορα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα ,λόγω του περιορισμένου χώρου, με άμεση συνέπεια τον εγκλωβισμό του παραγόμενου καπνού σε αυτή [Σακκάς et al,2010].

Εξετάζοντας την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα, επιβάλλεται να εντοπισθούν, σε πρώτο στάδιο, οι άμεσες συνέπειες ή αλλιώς παράγωγα του φαινομένου αυτού.

Πρώτος κίνδυνος: Ο παραγόμενος καπνός [Ζαφειρίου,2012]

Αυτός ο πρώτος κίνδυνος έχει τέσσερις συνέπειες. Την μείωση της ορατότητας, την δημιουργία τοξικού περιβάλλοντος, την μεγάλη ταχύτητα εξάπλωσης του καπνού και την μεγάλη ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η μείωση της ορατότητας σε περίπτωση πυρκαγιάς οφείλεται στην παραγωγή καπνού από τη καύση στερεών ή/και υγρών υλικών, παραγωγή καπνού με διαφορετική ταχύτητα και πυκνότητα ανάλογα με τα καιόμενα υλικά. Αποτέλεσμα είναι ο αποπροσανατολισμός, ο πανικός και η ολική ή μερική απόκρυψη των εξόδων διαφυγής της σήραγγας.

Οι καπνοί που παράγονται σε τέτοιου είδους πυρκαγιές είναι εξαιρετικά τοξικοί. Τα συστατικά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα ασφυξιογόνα ή/και τοξικά αέρια και τα ερεθιστικά. Περισσότερη έμφαση θα δοθεί στην πρώτη κατηγορία, διότι τα αέρια αυτά εισχωρούν στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και επιφέρουν το θάνατο σε σύντομο χρονικό διάστημα, εάν δεν απομακρυνθούν έγκαιρα όσοι βρίσκονται εντός της σήραγγας. Μερικά από αυτά τα αέρια, είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το υδροχλωρικό οξύ (HCl) και τα οξειδία του αζώτου (NO_x). Η παραγωγή των αερίων αυτών συναρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία στον καιόμενο χώρο, η οποία τα αυξάνει σε ποσότητα/πυκνότητα. Τα πλαστικά και λοιπά παράγωγα πετρελαίου που είναι συχνά παρόντα σε τέτοιες πυρκαγιές λόγω της ευρείας χρήσης τους στα οχήματα και παίζουν

ένα σημαντικό και αδιαμφισβήτητο ρόλο στη δημιουργία ενός λίαν τοξικού περιβάλλοντος, μέσα στις σήραγγες. Σε αυτό το σημείο εισέρχεται ο προβληματισμός της ταχύτητας εξάπλωσης των καπνών, διότι οι χρήστες της σήραγγας κινδυνεύουν από το να τους καλύψουν οι καπνοί και να εγκλωβιστούν. Λόγω του σχήματος τους οι σήραγγες, συμπεριφέρονται σαν "καμινάδες" και παράμετροι, όπως το μήκος της σήραγγας, ανηφόρες/παραλλαγές, διαφορετική ατμοσφαιρική πίεση μεταξύ εξόδων, αντικείμενα/εμπόδια, το φαινόμενο "πιστόνι" από διερχόμενα οχήματα, και της υπάρχουσας θερμοκρασίας παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επέκταση του καπνού. Αυτός ο προβληματισμός πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επέμβαση σε τέτοιου είδους περιστατικά διότι έχει άμεση επίδραση στο χρόνο επιβίωσης και δυνατότητας εξόδου των χρηστών της σήραγγας. Μελέτες δείχνουν πως ο καπνός επεκτείνεται με μία ταχύτητα της τάξεως των 400 m/min (24km/h). Ο χρόνος μεταξύ της γέννησης της πυρκαγιάς και της παραγωγής του καπνού είναι δευτερόλεπτα και συνήθως η συμπεριφορά των χρηστών νομίζοντας ότι μέσα στο αυτοκίνητο τους δεν κινδυνεύουν από τον επερχόμενο κίνδυνο, καθυστερεί "θανατηφόρα" την έξοδο τους από το όχημα και στην συνέχεια από τη σήραγγα. Εν κατακλείδι, με βάση τα προαναφερόμενα, η επιβίωση των χρηστών σε τέτοιου είδους περιστατικά, έγκειται στη γρήγορη αποχώρηση τους από τη σήραγγα σε ασφαλή σημεία και στην ταχύτητα επέμβασης των πυροσβεστικών ή άλλων κατασταλτικών δυνάμεων πυρόσβεσης και διαφυγής.

Δεύτερος κίνδυνος: Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της πυρκαγιάς [Ζαφειρίου,2012]

Σε τέτοιου είδους πυρκαγιές η θερμοκρασία, μέσα στη σήραγγα μπορεί να ξεπεράσει και τους 1000°C και η θερμική ακτινοβολία που θα παραγόταν θα ήταν αρκετή ώστε ή πυρκαγιά να εξαπλωθεί εκατοντάδες μέτρα μακριά από την κύρια εστία. Θα πρέπει να αναφερθεί, πως σε μία πυρκαγιά κλειστού χώρου όπως αυτή, η θερμική ακτινοβολία δεν είναι το ίδιο ισχυρή όσο σε μια πυρκαγιά "ανοιχτού" χώρου. Αυτό συμβαίνει διότι, υπάρχει έλλειψη οξυγόνου για να αναπτυχθεί ολοκληρωτικά η φλόγα και υπάρχει περιορισμός στο ύψος της λόγω της σήραγγας. Αυτή η διαφορά αντισταθμίζεται, εξαιτίας της συσσώρευσης θερμικής ενέργειας που παράγεται και σε ανοιχτό χώρο διαχέεται, εδώ όμως περιορίζεται από τα τοιχώματα της σήραγγας. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στη σήραγγα είναι πολύ πιθανό να πάρουν φωτιά υλικά ή/και υγρά που είναι αρκετά μακριά από την κύρια πηγή θερμότητας(εστία πυρκαγιάς), δια της αυτανάφλεξης*. Υλικά πάνω σε όχημα, με "χαμηλή" θερμοκρασία αυτανάφλεξης μπορεί να είναι ο λόγος έναρξης καινούριας εστίας με αλυσιδωτή αντίδραση πάνω στα υπόλοιπα εξαρτήματα ενός οχήματος υποβοηθούμενη από την ήδη υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα συνήθη υλικά που αναφλέγονται πρώτα είναι τα "μαλακά" πλαστικά και υλικά όπως καουτσούκ, όπως τα ελαστικά. Όλα τα υλικά πάντως δεν

*: αφορά στη θερμοκρασία εκείνη που μπορεί να εμφανιστεί ανάφλεξη της ουσίας χωρίς τη συνδρομή εξωτερικής πηγής ανάφλεξης [metal.ntua.gr]

αναφλέγονται στην ίδια θερμοκρασία και μάλιστα αμέσως. Υλικά όπως το ξύλο και το χαρτί έχουν τιμές θερμοκρασίας αυτανάφλεξης κάτω από 300°C ενώ υλικά όπως τα λάδια ενός κινητήρα ή ο πολυεστέρας είναι πάνω από τους 400°C.

Ο ανθρώπινος οργανισμός μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασίες της τάξεως των 60 °C περίπου 30 min, ενώ θερμοκρασίες πάνω από 100 °C μπορεί να τις αντέξει λιγότερο από 10 min. Επίσης έχει αποδειχθεί πως και ο "θερμός" αέρας που μπορεί να διεισδύσει στους πνεύμονες, μέσω της αναπνοής, σε ένα τέτοιο περιβάλλον μπορεί να αποβεί μοιραίος.

Η σημαντικότερη μεταβλητή που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR) q_c , κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, που δίνεται από τη σχέση:

$$q_c = \chi \cdot m'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad (1)$$

όπου χ είναι ένας συντελεστής (μεταξύ 0 και 1) που περιλαμβάνεται στη σχέση για να προσδιορίζει το ποσοστό της ατελούς καύσης, m'' είναι η ταχύτητα καύσης του καυσίμου (ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου), A_f είναι η επιφάνεια του καυσίμου, και ΔH_c είναι η θερμότητα της καύσης του καυσίμου [Σακκάς,2014;Carvel,2004;Barbauskas et al,1992].

1.2. Περιγραφή των σημαντικότερων γεγονότων πυρκαγιάς και παράθεση στατιστικών μελετών των τελευταίων ετών

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι σημαντικότερες πυρκαγιές που συνέβησαν σε σήραγγες τα τελευταία χρόνια.

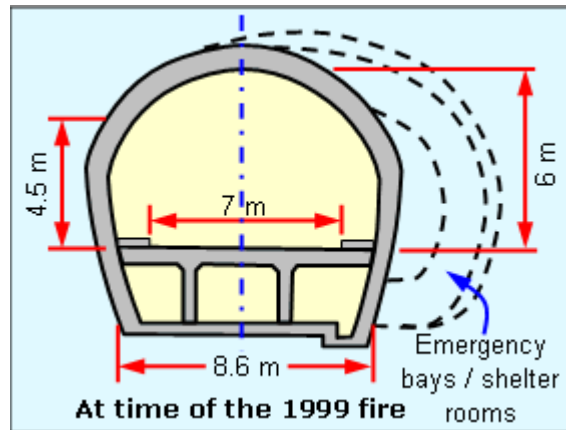
1.2.1. Οδικές σήραγγες

Σήραγγα του Mont Blanc (Γαλλία-Ιταλία, Άλπεις)

[Σακκάς 2014; mace.manchester.ac.uk; tunneltalk.com; Carvel et al,2005]

Η σήραγγα του Mont Blanc είναι μια οδική σήραγγα στις Άλπεις που συνδέει το Chamonix της Γαλλίας και το Courmayeur της Ιταλίας, κάτω από την οροσειρά του Mont Blanc. Με μήκος 11.6 km αποτελούσε την μακρύτερη οδική σήραγγα στον κόσμο, κατά την στιγμή ολοκλήρωσης της το 1965. Η σήραγγα του Mont Blanc είναι μονής οπής, με δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Το πεταλοειδές σχήμα της διατομής της έχει 7 m πλάτος οδοστρώματος με δύο πεζοδρόμια των 0.8 m αριστερά και δεξιά του οδοστρώματος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1. Κάθε 300 m υπάρχουν χώροι ανάπαυσης των οχημάτων με 3.15 m πλάτος και 30m μήκος, που βρίσκονται σε εναλλασσόμενες πλευρές του δρόμου και είναι αριθμημένες από 1 έως 36 στην κατεύθυνση Γαλλία-Ιταλία. Η πλάκα του καταστρώματος καθώς και οι αγωγοί κάτω από

αυτήν κατασκευάσθηκαν από οπλισμένο σκυρόδεμα, ωστόσο το 0.5 m πάχος της επένδυσης ήταν κατασκευασμένο από άοπλο σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.1: Η πεταλοειδής διατομή της σήραγγας του Mont blanc [mace.manchester.ac.uk]

Στις 24 Μαρτίου του 1999 ένα όχημα βαρέως τύπου, που μετέφερε 9 τόνους μαργαρίνη και 12 τόνους αλεύρι, περνούσε μέσα από τη σήραγγα του Mont Blanc με κατεύθυνση από τη Γαλλία προς την Ιταλία άρχισε να αναφλέγεται λόγω της υπερθέρμανσης του κινητήρα του. Το όχημα ακινητοποιήθηκε 6.5 km από το Γαλλικό στόμιο της σήραγγας, ενώ ο οδηγός του οχήματος έφυγε τρέχοντας προς την έξοδο της Ιταλίας. Εντός λίγων λεπτών οι υπεύθυνοι λειτουργίας και κυκλοφορίας της σήραγγας αντιλήφθηκαν την πυρκαγιά και επενέβησαν αποτρέποντας την είσοδο οχημάτων στη σήραγγα. Παρόλα αυτά, 18 οχήματα βαρέως τύπου, 9 αυτοκίνητα Ι.Χ (ιδιωτικής χρήσης), ένα βαν, και μία μοτοσυκλέτα είχαν ήδη εισέλθει από το στόμιο της Γαλλίας πριν διακοπεί η κυκλοφορία. Από τα 29 οχήματα που αναφέρθηκαν, τα 4 οχήματα βαρέως τύπου πέρασαν από το φλεγόμενο όχημα βαρέως τύπου και κατάφεραν να διέλθουν με ασφάλεια το υπόλοιπο της διαδρομής προς το Ιταλικό στόμιο της σήραγγας. Τα εναπομείναντα 29 οχήματα παγιδεύτηκαν μέσα στον καπνό και την φωτιά με αποτέλεσμα όσοι βρίσκονταν μέσα σε αυτά να πεθάνουν. Η φορά του ανέμου που επικρατούσε εκείνη την ώρα (βόρειος) αλλά και το διαφορετικό σύστημα αερισμού στα δύο άκρα της σήραγγας (όλοι οι ανεμιστήρες από την Ιταλική άκρη είχαν ρυθμιστεί να τροφοδοτούν με φρέσκο αέρα, ενώ στη Γαλλική άκρη οι ανεμιστήρες είχαν ρυθμιστεί άλλοι να τροφοδοτούν και άλλοι να απάγουν) οδηγούσε όλο τον καπνό της πυρκαγιάς προς την έξοδο της Γαλλίας. Παράλληλα όσο η ταχύτητα του αέρα παρέμενε μεγαλύτερη από 1 m/s τόσο ο καπνός δεν ήταν στατικός, γεγονός που συνετέλεσε στη έλλειψη καθαρού αέρα σε όλη τη σήραγγα. Η πυρκαγιά εξαπλώθηκε ταχέως με αποτέλεσμα να κάψει και τα 25 οχήματα τα οποία βρίσκονταν πίσω από το φλεγόμενο όχημα βαρέως τύπου. Το ερώτημα, που παραμένει έως και σήμερα χωρίς σαφείς απαντήσεις, έγκειται στο πως εξαπλώθηκε η πυρκαγιά σε τέτοια απόσταση και σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα. Οι εξηγήσεις που δόθηκαν αναφέρουν ως βασικό αίτιο την καύση των καυσίμων των οχημάτων. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ξεπέρασε τα 190 MW και οι

θερμοκρασίες στη σήραγγα ξεπερνούσαν τους 1000°C. Η φωτιά χρειάστηκε 53 ώρες για να κατασβεστεί, ενώ μικρές εστίες φωτιάς έκαιγαν για τις επόμενες πέντε ημέρες. Συνολικά 39 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους εκ των οποίων 38 ήταν χρήστες της σήραγγας ενώ ένας ήταν πυροσβέστης. Από τα 38 θύματα οι 27 πέθαναν μέσα στα οχήματα τους, δύο στην έξοδο διαφυγής όπου κατέφυγαν για να σωθούν, και οι υπόλοιποι καθώς οδηγούσαν προς την έξοδο της Γαλλίας. Η πυρκαγιά αυτή σημειώνεται ως μία από τις σοβαρότερες που έχει συμβεί σε οδική σήραγγα μέχρι και σήμερα, καθώς υπήρξαν 39 νεκροί και 34 σοβαρά τραυματισμένοι χρήστες.

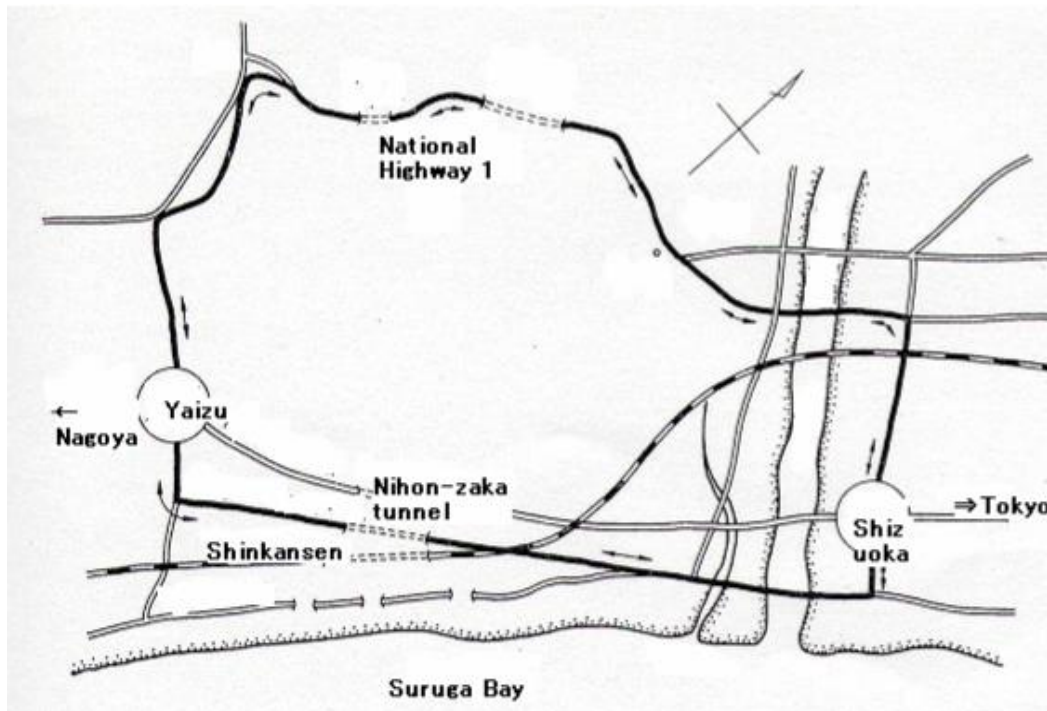
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η πρόκληση της συγκεκριμένης πυρκαγιάς ήταν αποτέλεσμα συνδυασμού παραγόντων όπως τα συστήματα αερισμού των δύο άκρων της σήραγγας, η ποσότητα των καυσίμων του φορτηγού οχήματος (550 lt πετρελαίου) και το εύφλεκτο φορτίο του. Η οικονομική απώλεια από τη συγκεκριμένη πυρκαγιά ήταν της τάξης των 392.000.000€ συμπεριλαμβανομένου του κόστους επισκευής αλλά και της απώλειας εσόδων λόγω της διακοπής της κυκλοφορίας μέσα στη σήραγγα για 3 έτη. Το σκυροδέμα της επένδυσης της σήραγγας καταστράφηκε πλήρως για περίπου 3 km της σήραγγας. (Εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.2: Καταστροφή του σκυροδέματος της επένδυσης της σήραγγας του Mont Blanc [tunneltalk.com]

Σήραγγα του Nihonzaka (Ιαπωνία) [Kunishima et al,1972]

Την 11η Ιουλίου του 1979, προκλήθηκε πυρκαγιά στη σήραγγα του Nihonzaka, που αποτελεί μέρος του αυτοκινητοδρόμου Tokyō-Nagoya και έχει μήκος 2045 m, σε απόσταση 400 m από την έξοδο της πόλης Yaizu (προς Nagoya), λόγω πολλαπλής σύγκρουσης μεταξύ 4 φορτηγών και 2 επιβατικών οχημάτων. Το αποτέλεσμα της σύγκρουσης αυτής ήταν η καταστροφή 173 οχημάτων και φορτηγών, ο θάνατος 7 ατόμων και ο σοβαρός τραυματισμός άλλων δύο λόγω της σύγκρουσης των οχημάτων. Η σήραγγα αυτή είναι η μοναδική, από όσες περιγράφονται σε αυτή την ενότητα, στην οποία υπήρχαν εγκατεστημένα συστήματα καταιονισμού νερού. Το αυτόματο σύστημα καταιονισμού ξεκίνησε να καταβρέχει 11 λεπτά μετά την σύγκρουση και κατέστειλε επιτυχημένα την εξάπλωση της πυρκαγιάς περίπου 30 λεπτά, χρονικό διάστημα που επαρκούσε για να διαφύγουν από τη σήραγγα όλοι οι χρήστες. Μετά από λίγη ώρα, όμως, τα καύσιμα αναφλέχθηκαν ξανά και η φωτιά αναζωπυρώθηκε ενώ τα καλώδια και οι σωλήνες των συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας είχαν διαλυθεί λόγω της φλόγας και της υψηλής θερμοκρασίας. Η εξάπλωση της φωτιάς ήταν δραματική και χρειάστηκαν δυο μέρες για να τεθεί υπό έλεγχο και άλλες πέντε για να σβήσει ολοκληρωτικά. Η καταστροφή αυτή προκάλεσε το κλείσιμο της μεγάλης οδικής αρτηρίας που συνδέει το Tokyō και την Nagoya, ενώ υπήρξε τεράστια σύγχυση στο εθνικό συγκοινωνιακό δίκτυο.



Εικόνα 1.3: Σκαρίφημα της περιοχής της σήραγγας του Nihonzaka (Ιαπωνία) [Kunishima et al,1972]

Σήραγγα του Caldecott, Oakland (ΗΠΑ) [Carvel et al,2005; Ingason,1994]

Την 7^η Απριλίου του 1982 μία σύγκρουση στη σήραγγα του Caldecott, στο Oakland των ΗΠΑ, συνέβη όταν ένα επιβατικό όχημα, με μεθυσμένο οδηγό, προσέκρουσε στα τοιχώματα της σήραγγας με αποτέλεσμα να κλείσει απότομα η κυκλοφορία. Στη συνέχεια ένα βυτιοφόρο πετρελαίου προσέκρουσε πάνω στο ακινητοποιημένο όχημα και ακολούθως αυτό χτυπήθηκε από ένα επερχόμενο λεωφορείο με αποτέλεσμα να ανατραπεί και να προκληθεί διαρροή του πετρελαίου. Εντός σύντομου χρονικού διαστήματος το πετρέλαιο αναφλέχθηκε και η φλόγα επεκτάθηκε τόσο στο βυτιοφόρο όσο και στο αυτοκίνητο αλλά και σε 4 ακόμα οχήματα που ακολουθούσαν. Το αποτέλεσμα ήταν να χάσουν επτά άτομα τη ζωή τους, να τραυματιστούν αρκετοί χρήστες και να καταρρεύσει η σήραγγα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε στην επένδυση της. Εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η διαρροή προκλήθηκε από το λιώσιμο του μετάλλου του βυτιοφόρου και δημιούργησε μια "λίμνη" πετρελαίου που αναφλέχθηκε και καιγόταν για δύο ώρες μέχρι να καταφέρουν να τη σβήσουν οι πυροσβέστες. Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε ήταν της τάξης των 1050°C.

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναφορές σε γεγονότα πυρκαγιάς σε σήραγγα φαίνεται πως η ανθρώπινη συμπεριφορά (συνυπολογίζοντας το ανθρώπινο λάθος) αποτελεί βασικό παράγοντα στην πρόκληση αυτών των πυρκαγιών και επιφέρει, τις περισσότερες των περιπτώσεων, ανθρώπινες απώλειες. Οι πυρκαγιές στις σήραγγες του Nihonzaka και του Caldecott ξεκίνησαν ως αποτέλεσμα σύγκρουσης οχημάτων, ενώ οι συνθήκες της σήραγγας του Mont Blanc θα ήταν πιο ομαλές αν οι υπεύθυνοι των κέντρων ελέγχου της σήραγγας είχαν προετοιμαστεί κατάλληλα για να προσαρμόσουν τα συστήματα αερισμού της σήραγγας σε ένα τέτοιο συμβάν. Οι Beard και Carvel στο βιβλίο τους "Handbook of Tunnel Fire Safety" αναφέρουν ότι το 1/3 όλων των πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες ξεκίνησαν ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης συμπεριφοράς, ενώ περισσότερες από τις μισές των περιπτώσεων ξεκίνησαν λόγω μηχανικής ή ηλεκτρικής βλάβης των οχημάτων. Επίσης σημειώνεται ότι στις πυρκαγιές εμπλέκονται όλων των ειδών τα οχήματα, όπως επιβατικά, βαρέως τύπου, μοτοσικλέτες, βαν, φορτηγά, τουριστικά λεωφορεία. Στα περισσότερα από τα γεγονότα που υπήρχαν θάνατοι, συμμετείχαν ένα ή περισσότερα οχήματα βαρέως τύπου τα οποία ανεξάρτητα αν μετέφεραν εύφλεκτο φορτίο δυσκόλεψαν αρκετά τους πυροσβέστες κατά τις επιχειρήσεις κατάσβεσης αλλά και διάσωσης, λόγω του μεγάλου όγκου τους. Συμπερασματικά κρίνεται απαραίτητη τόσο η μέριμνα για πυροπροστασία κατά το στάδιο του σχεδιασμού/κατασκευής μιας σήραγγας όσο και η ενημέρωση των οδηγών κατά τη διάρκεια της οδικής τους εκπαίδευσης, για τη συμπεριφορά τους σε περίπτωση κινδύνου μέσα σε σήραγγα [Σακκάς,2014; Carvel et al,2005].

1.2.2. Σιδηροδρομικές σήραγγες

Η πλειοψηφία των μέσων μαζικής μεταφοράς που χρησιμοποιούνται για δημόσιες μετακινήσεις παγκοσμίως είναι σιδηροδρομικά συστήματα και γενικά αποτελούνται από τρένα, καθένα από τα οποία δύναται να εξυπηρετήσει εκατομμύρια επιβάτες σε καθημερινή βάση. Αυτά τα συστήματα μεταφοράς μπορούν σαφώς να αποφέρουν μεγαλύτερο αριθμό απωλειών σε περίπτωση πυρκαγιάς, σε σύγκριση με τις πυρκαγιές σε οδικές σήραγγες. Δύο γεγονότα της τελευταίας δεκαετίας τονίζουν την σοβαρότητα των πιθανών συνεπειών από πυρκαγιά σε συστήματα μαζικής μεταφοράς (μετρό): το 2003 στην Κορέα περίπου 200 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους όταν ξέσπασε πυρκαγιά σε βαγόνι του μετρό ενώ το 1995 στο μετρό του Αζερμπαϊτζάν πάνω από 200 ανθρώπινες απώλειες καταλογίστηκαν λόγω πυρκαγιάς που ξέσπασε εξαιτίας ηλεκτρικού βραχυκυκλώματος [Carvel et al,2005].

Σήραγγα του μετρό της πόλης Baku (Αζερμπαϊτζάν) [Andersen,2002]

Την 28^η Οκτωβρίου στη μία εκ των δύο δίδυμων σηράγγων ,μήκους 2.2 km, μεταξύ των σταθμών Uldus και Nagımanon της πόλης Baku(πρωτεύουσα πόλη Αζερμπαϊτζάν) ξέσπασε πυρκαγιά εξαιτίας ηλεκτρικής βλάβης στο τρένο του μετρό. Και οι 2 σήραγγες είχαν σχετικά στενή διατομή (H= 5.6m, W= 5m) και ήταν εξοπλισμένες με σύστημα ελέγχου του αερισμού (εκτιμάται ότι δεν επικοινωνούσαν οι 2 σήραγγες μεταξύ τους με άλλες συνδετήριες στοές). Ένα τρένο του μετρό με 5 βαγόνια, γεμάτα επιβάτες, σταμάτησε 200m μετά τον σταθμό Uldus εξαιτίας σπινθήρων στον ηλεκτρικό εξοπλισμό του οπίσθιου άκρου του τέταρτου βαγονιού. Η φωτιά που προκλήθηκε γρήγορα επεκτάθηκε και στο πέμπτο βαγόνι. Οι επιβάτες προσπάθησαν να διαφύγουν από το τρίτο βαγόνι καθώς δεν άνοιγαν οι πόρτες του τέταρτου βαγονιού. Τόσο η στενότητα χώρου της σήραγγας όσο και τα προβλήματα με τις πόρτες του βαγονιού καθυστέρησαν την εκκένωση αλλά και επέφεραν πανικό στους επιβάτες. Το σύστημα αερισμού είχε ρυθμιστεί να απάγει αέρα και ο περισσότερος καπνός ακολουθούσε την κατεύθυνση όπου λάμβανε χώρα η εκκένωση. Από τους 289 θανάτους που σημειώθηκαν, οι 245 συνέβησαν εντός του τρένου λόγω ασφυξίας και 40 νεκροί βρέθηκαν εντός της σήραγγας, ενώ 265 άτομα τραυματίστηκαν.

Σήραγγα του Καπρούν (Αυστρία) [Σακκάς,2014;the guardian,2004;Andersen,2002]

Στις 11 Νοεμβρίου του 2000, πυρκαγιά ξέσπασε στον οδοντωτό σιδηρόδρομο που από το 1974 συνδέει το χιονοδρομικό κέντρο του Καπρούν με την κορυφή του όρους Κίτσαϊνχόρν. Το τρένο, στην αμαξοστοιχία του οποίου είχαν επιβιβαστεί 167 άνθρωποι, εισήλθε σε σήραγγα μήκους 3.4 km. Μετά από περίπου 600 m μέσα στη σήραγγα, η αμαξοστοιχία πήρε φωτιά, έσβησαν τα φώτα στο τρένο και ήταν αδύνατο σε πρώτο στάδιο να ανοίξουν οι πόρτες του. Παρόλα αυτά κατάφεραν οι επιβάτες να ανοίξουν κάποιες από τις πόρτες αλλά η σήραγγα ήταν αρκετά στενή (διάμετρος 3.6m) και ο χώρος στις πλευρές τις αμαξοστοιχίας πολύ

περιορισμένος. Η μεγάλη κλίση της σήραγγας (43°) ήταν συνθήκη ικανή ώστε η σήραγγα να λειτουργήσει ως "καμινάδα" και εκτός αυτού, η κατηφορική έξοδος είχε αποκλειστεί από την πυρκαγιά. Οι επιβάτες που προσπάθησαν να διαφύγουν από την ανηφορική διαδρομή παγιδεύτηκαν στους καπνούς και απεβίωσαν εντός της σήραγγας, ενώ οι 12 που επέζησαν, κατάφεραν σε πολύ πρώιμο στάδιο να διαφύγουν από την κατηφορική διαδρομή της σήραγγας.

Ο απολογισμός αυτής της τραγωδίας ήταν 155 νεκροί η ταυτότητα των οποίων εξακριβώθηκε με την μέθοδο του DNA, αφού τα περισσότερα θύματα ήταν πλήρως απανθρακωμένα. Μετά από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε ολόκληρο το σιδηροδρομικό δίκτυο, οι εμπειρογνώμονες ανακάλυψαν στις ράγες του οδοντωτού, λιπαντικό που κατά πάσα πιθανότητα διέρρευσε από μία κατεστραμμένη ανάρτηση του συρμού και αναφλέχθηκε εξαιτίας της μεγάλης τριβής.



Εικόνα 1.4: Εικόνα μετά από την πυρκαγιά στη σήραγγα του Καπρούν [FireVu,2014]

Σήραγγα της Μάγχης (Γαλλία-Μεγάλη Βρετανία) [Σακκάς,2014;www.mace.manchester.ac.uk]

Στις 18 Νοεμβρίου του 1996 ξέσπασε πυρκαγιά σε τρένο που μετέφερε βαρέα φορτηγά οχήματα διαμέσου της σήραγγας της Μάγχης με κατεύθυνση από τη Γαλλία προς τη Μεγάλη Βρετανία. Η πυρκαγιά ξεκίνησε όταν η αμαξοστοιχία διήλθε από την είσοδο της σήραγγας με αποτέλεσμα να αντιληφθούν το γεγονός άμεσα οι φρουροί ασφαλείας. Στο τρένο είχαν επιβιβαστεί 31 άτομα και 3 άτομα του προσωπικού λειτουργίας. Ο οδηγός του τρένου ενημερώθηκε για το συμβάν ενώ το τρένο είχε προλάβει να εισέλθει αρκετά μέτρα μέσα στη σήραγγα και προσπάθησε να οδηγήσει το τρένο μέχρι την έξοδο της σήραγγας. Η βλάβη όμως που είχε προκληθεί από την πυρκαγιά ακινητοποίησε το τρένο εντός της σήραγγας. Μετά από 20 min έκθεση στον καπνό, οι επιβάτες και το πλήρωμα διέφυγαν από την έξοδο διαφυγής. Σε αυτό το ατύχημα δεν υπήρξαν απώλειες ενώ 7 άτομα μεταφέρθηκαν στο νοσοκομείο λόγω της παρατεταμένης εισπνοής καπνού. Η πυρκαγιά είχε διάρκεια 9 ώρες και κατέστρεψε την μηχανή του τρένου, δέκα φορτηγά και προκάλεσε σοβαρές ζημιές για περίπου 1 km στην

επένδυση της σήραγγας. Το μέγεθος του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς έφτασε μέχρι και τα 350 MW και το σκυρόδεμα της επένδυσης καταστράφηκε ολοσχερώς (αντοχή 28 ημερών > 80 MPa). Η μέγιστη θερμοκρασία εκτιμάται ότι έφτασε τους 1100°C. Η γεωλογική μελέτη της περιοχής του έργου, που είχε πραγματοποιηθεί κατά την διάνοιξη της σήραγγας, περιγράφει αμμώδεις σχηματισμούς σε 300m απόσταση από το σημείο του ατυχήματος. Το ατύχημα έλαβε χώρα σε βραχώδες γεωλογικό περιβάλλον καλών τεχνικών χαρακτηριστικών και εκτιμάται ότι αν είχε προκληθεί στο σημείο όπου επικρατούσε η άμμος θα είχε προκληθεί σοβαρότατη αστοχία στην κατασκευή της σήραγγας ή και πιθανή κατάρρευση αυτής.

1.2.3. Παράθεση συγκεντρωτικών πινάκων και στατιστικών μελετών για ατυχήματα πυρκαγιών σε σήραγγες

Οι θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ των οδικών, σιδηροδρομικών και μετρό σηράγγων είναι αποτέλεσμα του είδους της κίνησης και των μεταφορών που πραγματοποιούνται μέσω αυτών, γεγονός το οποίο διαφοροποιεί τα κριτήρια με τα οποία εκτιμάται ο κίνδυνος σε κάθε περίπτωση. Ο πίνακας 1.1 περιγράφει απλοποιημένα χαρακτηριστικά σηράγγων για κάθε μία από τις μεθόδους μεταφοράς που αναφέρθηκαν παραπάνω:

Πίνακας 1.1: Απλοποιημένα χαρακτηριστικά για οδικές, σιδηροδρομικές και σήραγγες μετρό [Gabay,2014]

Χαρακτηριστικό	Μετρό σήραγγες	Σιδηροδρομικές σήραγγες	Οδικές σήραγγες
Μήκος	500 με 600m απόσταση μεταξύ 2 σταθμών	30m έως 50km Χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς	200m έως 20km Χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς ή προσβάσεις*
Τοποθεσία	πόλη	πόλη, ύπαιθρο	πόλη, ύπαιθρο
Έξοδοι	σταθμοί	στόμια σηράγγων	στόμια σηράγγων, συνδετήριες στοές με άλλες σήραγγες
Χρόνος παρέμβασης πυροσβεστών από τα στόμια των σηράγγων	5 έως 10 λεπτά	10 έως 60 λεπτά	5 έως 60 λεπτά
Είδος μεταφοράς	άνθρωποι	άνθρωποι, εμπορεύματα, επικίνδυνα εμπορεύματα	άνθρωποι, εμπορεύματα, επικίνδυνα εμπορεύματα
Άνθρωποι	100 έως 250 ανά βαγόνι	150 ανά βαγόνι	1 έως 100 (λεωφορείο)
Επικοινωνία για συναγερμό	οδηγός ή ενδοεπικοινωνία	οδηγός	κάθε οδηγός διερχομένου οχήματος
Οχήματα	Με προδιαγραφές πρότυπου πυροπροστασίας	Χωρίς προδιαγραφές πρότυπου πυροπροστασίας	Χωρίς προδιαγραφές πρότυπου πυροπροστασίας
Τρόπος παρέμβασης πυροσβεστών	Από σταθμούς, ειδικές προσβάσεις πυροσβεστικής υπηρεσίας	Από στόμια σηράγγων	Από στόμια σηράγγων, ειδικές προσβάσεις

*μόνο σε αστικές ή πολύ μεγάλου μήκους σήραγγες

Παρατηρείται ότι η συχνότητα των μεγάλης έκτασης πυρκαγιών είναι μικρότερη σε επιβατικά τρένα λόγω της περιορισμένης ποσότητας καυσίμων σε σχέση με τα τρένα που εκτελούν μεταφορές εμπορευμάτων. Σύμφωνα με μελέτες, οι 11 από τις 18 πυρκαγιές που

συμβαίνουν σε σήραγγες που χρησιμοποιούνται τρένα οφείλονται σε ηλεκτρομηχανολογική αστοχία ή στη χρήση του φρένου έκτακτης ανάγκης [Andersen et al,2002]. Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 1.3 στις οδικές σήραγγες, όπου χρησιμοποιούνται κυρίως επιβατικά οχήματα, φορτηγά,κ.α τα ατυχήματα πυρκαγιών είναι αποτελέσματα της κυκλοφορίας της σήραγγας(συγκρούσεις) και όχι των βλαβών του εξοπλισμού της [PIARC,1999]. Σπουδαίο ρόλο παίζει το μήκος της σήραγγας όπως εύκολα διαπιστώνεται και από τον πίνακα 1.1. Το μήκος της σήραγγας επηρεάζει τόσο τον παράγοντα της πιθανότητας εκδήλωσης της πυρκαγιάς όσο και το βαθμό δυσκολίας στην κατάσβεση αυτής.

Σύμφωνα με καταγραφές των τελευταίων ετών, συνέβησαν περίπου 100 πυρκαγιές σε σήραγγες στο διάστημα ετών 1989-2015 από τις οποίες οι 25 είχαν θύματα. Τα ατυχήματα συνέβησαν κατά τη διάρκεια χρήσης των σηράγγων αλλά και κατά τη διάρκεια κατασκευής ορισμένων από αυτές. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας καταγραφών ατυχημάτων από 26 χώρες υποδηλώνοντας τον παγκόσμιο χαρακτήρα του προβλήματος "πυρκαγιά σε σήραγγα".

Πίνακας 1.2: Καταγραφή πυρκαγιών σε σήραγγες για το διάστημα 1990-2015
[Σακκάς,2014;Andersen,2002;www.iefimerida.gr]

Τύπος Σήραγγας	Όνομα	Μήκος (km)	Έτος	Χώρα	Θύματα
Οδική	Channel	51	2015	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	Madelena do Mar	1.5	2013	Πορτογαλία	-
Σιδηροδρομική	-	-	2013	Ρωσία	-
Οδική	Huai Khwang	-	2013	Ταϊλάνδη	-
Σιδηροδρομική	-	-	2013	Καναδάς	-
Οδική	Brattli	3.6	2013	Νορβηγία	-
Σιδηροδρομική	Oslo	-	2012	Νορβηγία	-
Οδική	Wallasey	2.4	2012	Αγγλία	-
Οδική	Channel	51	2012	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	Fjord	7.2	2011	Νορβηγία	-
Οδική	WuxiLihu	10.95	2010	Κίνα	24
Οδική	Trojane	2.9	2010	Σλοβενία	-
Οδική	Gubrist	3.2	2009	Ελβετία	-
Οδική	Elksund	7.7	2009	Νορβηγία	5
Οδική	Channel	51	2008	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	San Martino	0.4	2007	Ιταλία	2
Οδική	Santa Clarita	0.165	2007	Καναδάς	3
Οδική	Caldecott	1.028	2007	Καναδάς	-
Οδική	Burnley	2.9	2007	Αυστραλία	3
Οδική	Viamala	0.7	2006	Ελβετία	9
Οδική	Frejus	12.9	2005	Γαλλία	2
Οδική	Frejus	12.9	2004	Γαλλία	-
Οδική (υπό κατασκευή)	Trojane	2.9	2004	Σλοβενία	-
Οδική	Kinkempois	0.6	2004	Βέλγιο	-
Οδική	Dullin	1.5	2004	Γαλλία	-
Οδική	Golovec	0.7	2003	Σλοβενία	-
Οδική	Floyfjell	3.1	2003	Νορβηγία	1
Οδική (υπό	Guadarrama	30	2003	Ισπανία	-

Μεταπτυχιακή εργασία Σ.Κατσαρογιάννη, Ε.Μ.Π.,2015

κατασκευή)					
Οδική	Locica	0.8	2003	Σλοβενία	-
Οδική	Mornay	2.6	2003	Γαλλία	-
Σιδηροδρομική	Jungango	-	2003	Κορέα	189
Οδική	Horner	-	2002	Νέα Ζηλανδία	-
Οδική	Ted Williams	2.6	2002	Η.Π.Α	-
Οδική	A 86	-	2002	Γαλλία	-
Οδική	Tauern	6.4	2002	Αυστρία	-
Οδική	St Gotthard	16.9	2001	Ελβετία	11
Οδική	Gleinalm	8	2001	Αυστρία	-
Οδική	Howard Street	-	2001	Η.Π.Α	-
Οδική	Tauern	6.4	2001	Αυστρία	-
Σιδηροδρομική	-	-	-	Γερμανία	-
Οδική	Prapontin	-	2001	Ιταλία	-
Σιδηροδρομική	Dusseldorf	-	2001	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	Toronto	-	2000	Καναδάς	-
Οδική	Laerdal	24.5	2000	Νορβηγία	-
Οδοντωτός	Kiltzsteinhorn	3.3	2000	Αυστρία	155
Οδική	Oslofjord	-	2000	Νορβηγία	-
Οδική	Saukopf tunnel	-	2000	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	-	-	2000	Η.Π.Α	-
Οδική	Rotsethorn	1.2	2000	Νορβηγία	2
Οδική	Seljestad	1.3	2000	Νορβηγία	-
Οδική	Candid	0.252	1999	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	Amsterdam	-	1999	Ολλανδία	-
Σιδηροδρομική	-	-	1999	Η.Π.Α	-
Οδική	Tauern	6.4	1999	Αυστρία	12
Σιδηροδρομική	Salerno	9	1999	Ιταλία	4
Οδική	Mont -Blanc	11.6	1999	Ιταλία	39
Οδική	Leinebusch	-	1999	Γερμανία	-
Οδική	Oslofjord	-	1999	Νορβηγία	2
Οδική	Guelzhou	0.8	1998	Κίνα	80
Οδική	Gleinalm	8	1998	Αυστρία	-
Οδική	St. Gotthard	16.9	1997	Ελβετία	-
Σιδηροδρομική	Toronto	-	1997	Καναδάς	-
Σιδηροδρομική	Exilles	2.1	1997	Ιταλία	-
Οδική	Propontin	4.9	1997	Ιταλία	-
Οδική	Channel	51	1996	Γαλλία/Αγγλία	-
Οδική	Ekeberg	1.5	1996	Νορβηγία	-
Σιδηροδρομική	Washington	-	1996	Η.Π.Α	-
Οδική	Isola delle Femmine	0.148	1996	Ιταλία	5
Σιδηροδρομική	Baku	2.2	1996	Αζερμπαϊτζάν	289
Οδική	Pfander	6.7	1995	Αυστρία	3
Οδική	Hitra	5.6	1995	Νορβηγία	-
Οδική	Kingsway	2	1994	Αγγλία	-
Οδική	Great Belt	-	1994	Δανία	-
Οδική	St. Gotthard	16.9	1994	Ελβετία	-
Οδική	Castellar	0.57	1994	Γαλλία	-
Οδική	Huguenot	4	1994	Ν.Αφρική	1
Οδική	Hovden	1.3	1993	Νορβηγία	-
Οδική	Vardo	-	1993	Νορβηγία	-
Οδική	Serra a Ripoli	0.442	1993	Ιταλία	-
Σιδηροδρομική	New York	-	1992	Η.Π.Α	-
Οδική	Bonn	-	1991	Γερμανία	-
Σιδηροδρομική	-	-	1991	Κίνα	15

Σιδηροδρομική	Moscow	-	1991	Ρωσία	7
Σιδηροδρομική	Hirshengraben	1.3	1991	Ελβετία	-
Σιδηροδρομική	New York	-	1990	Η.Π.Α	2
Οδική	Roldal	4.7	1990	Νορβηγία	-
Οδική	Mont -Blanc	11.6	1990	Ιταλία	-

Από τα ατυχήματα που συγκεντρώνονται στον πίνακα 1.2, εκτιμήσεις για την ενέργεια και το ρυθμό έκλυσης θερμότητας πραγματοποιήθηκαν σε 4 από αυτές (πίνακας 1.3). Η μεγαλύτερη ενέργεια παρατηρείται στη σήραγγα του Mont Blanc (5000- 7000 GJ) με καταστροφικές επιπτώσεις και την καταστολή της λειτουργίας της σήραγγας για 3 χρόνια. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας για κάθε κατηγορία οχήματος δίνεται στον πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.3: Σύνοψη από πυρκαγιές σε σήραγγες με εκτιμώμενη ενέργεια και μέγιστο εκτιμώμενο ρυθμό έκλυσης θερμότητας [Σακκάς,2014;Lönnemark,2005]

Σήραγγα	Τύπος οχήματος	Εκτιμώμενη ενέργεια [GJ]	Μέγιστος εκτιμώμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας [MW]	Συνέπειες στη σήραγγα	Μέγιστη εκτιμώμενη θερμοκρασία (°C)
Eurotunnel (Channel)	10 οχήματα βαρέως τύπου	2200	370	Καταστροφή στην οροφή	1100
Mont Blanc	10 οχήματα βαρέως τύπου, 9 αυτοκίνητα	5000-7000	380	Κλειστή για 3 χρόνια	1000
Tauern	16 οχήματα βαρέως τύπου, 24 αυτοκίνητα	4000-4500	300-400	Κλειστή για 3 μήνες	800
St Gotthard	13 οχήματα βαρέως τύπου, 10 αυτοκίνητα	1400-2700	>100	Κλειστή για 2 μήνες	1000

Πίνακας 1.4: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για όλες τις κατηγορίες οχημάτων [NFPA 502,2011]

Όχημα	Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (MW)	Χρόνος μέχρι το μέγιστο ρυθμό θερμότητας (min)
Επιβατικό αυτοκίνητο	5-10	0-30
Πολλαπλά επιβατικά αυτοκίνητα (2-4 οχήματα)	10-20	13-55
Λεωφορείο	20-30	7-10
Φορητό βαρέως τύπου	70-200	10-18
Βυτιοφόρο	200-300	-

1.3. Ανάλυση του κινδύνου για περιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγες

Στην παρούσα ενότητα θα πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια ανάλυσης του κινδύνου πρόκλησης πυρκαγιάς σε σήραγγα. Ο κίνδυνος ορίζεται ως η επίδραση της αβεβαιότητας των στόχων [ISO GUIDE 73,2009] και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Κίνδυνος} = \text{Πιθανότητα} \times \text{Συνέπειες} \quad (1)$$

Ανάλυση του κινδύνου:

Οι πυρκαγιές σε οδικές σήραγγες αφορούν γενικά τα οχήματα που χρησιμοποιούν τη σήραγγα και προκαλούνται κυρίως από:

- ηλεκτρικές βλάβες (πιο συχνές σε ελαφρού τύπου οχήματα)
- υπερθέρμανση των φρένων (περιλαμβάνει το 60% με 70% σε πυρκαγιές από φορτηγά οχήματα [PIARC,1999])
- άλλες βλάβες που οδηγούν σε αυτανάφλεξη ενός οχήματος

Άλλοι παράγοντες σχετικά πιο σπάνιοι στην πρόκληση πυρκαγιάς είναι:

- οι συγκρούσεις οχημάτων
- οι τεχνικές βλάβες (αυτανάφλεξη) στον εξοπλισμό της σήραγγας
- εργασίες συντήρησης της σήραγγας

Οι περισσότερες πυρκαγιές, ωστόσο, παράγονται από την κυκλοφορία των οχημάτων στη σήραγγα και όχι από βλάβες στον εξοπλισμό της ή στα έργα συντήρησης [PIARC,1999]. Θεωρητικά η συχνότητα των πυρκαγιών σε σήραγγα σχετίζεται με παραμέτρους όπως το μήκος της σήραγγας, την πυκνότητα της κυκλοφορίας των οχημάτων σε αυτή, τον έλεγχο της ταχύτητας με την οποία κινούνται τα οχήματα και την ολισθηρότητα του οδοστρώματος. Οι παράμετροι αυτοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν γίνεται λόγος για διαφορετικές σήραγγες. Ως εκ τούτου, η συχνότητα των πυρκαγιών αξιολογείται όχι μόνο από τον αριθμό των συμβάντων ανά σήραγγα αλλά και από τον αριθμό των οχημάτων ανά χιλιόμετρο, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη το μήκος της σήραγγας και η πυκνότητα της κυκλοφορίας στο συνολικό τελικό αποτέλεσμα της μελέτης [PIARC,1999]. Πλήθος συμβάντων και αξιολόγηση των πυρκαγιών, με στοιχεία από 45 σήραγγες, παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες 1.5 και 1.6:

Πίνακας 1.5: Παράθεση περιπτώσεων πυρκαγιάς σε αστικές σήραγγες διαφόρων χωρών [PIARC, 1999]

Χώρα	Σήραγγα	Μήκος (m)	Χρονικό διάστημα έρευνας (έτη)	Μέση ετήσια κίνηση οχημάτων (10 ⁶ οχημ./έτος)	Περιπτώσεις πυρκαγιάς					
					Ι.Χ οχήματα		Φορτηγά		Όλα τα οχήματα	
					Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ/χλμ	Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ/χλμ	Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ/χλμ
Καναδάς	- Ville-Marie	2800	1988 - 1991	28.5	-	-	-	-	-	0.3
	- L.. Hippolyte Lafontaine	1400	1987 - 1991	40.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Γαλλία	- Croix Rousse	1800	1985 - 1991	29.4	6	2.0	0	0.0	0.0	1.8
	- Fourviere	1800	1985 - 1991	34.9	7	1.8	1	1.9	1.9	1.8
	- Vieux Port	600	1989 - 1994	23.9	6	2.0	0	0.0	0.0	1.8
Γερμανία	- Elbe	3300 (με ράμπες)	1990 - 1991	37.0	13	6.3	9	24.6	22	9.0
Ολλανδία	- Benelux	1300	1986 - 1988	25.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Coen	1200	1986 - 1988	30.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Νορβηγία	- Oslo	1800	1990 - 1993	18.3	-	-	-	-	-	2.0
Σουηδία	- Fredhall	200	1987 - 1991	36.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Soder	1100	1987 - 1991	25.6	-	-	-	-	-	0.7
	- Klara	500	1987 - 1991	9.6	-	-	-	-	-	15.5
	- Karlberg	500	1987 - 1991	9.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Ηνωμένο Βασίλειο	- Tyne	1700	1987 - 1992	9.7	-	-	-	-	-	25.0
Η.Π.Α	- Brooklyn	3200	1989 - 1991	21.0	-	-	-	-	-	23.0
	- Battery	2800	1989 - 1991	26.4	-	-	-	-	-	14.0
	- Queens	2500	1987 - 1991	38.3	-	-	-	-	-	15.0
	- Midtown - Lincoln									

Πίνακας 1.6: Παράθεση περιπτώσεων πυρκαγιάς σε σήραγγες μεγάλων οδικών δικτύων [PIARC,1999]

Ροή της κυκλοφορίας	Χώρα	Σήραγγα	Μήκος (m)	Χρονικό διάστημα έρευνας (έτη)	Μέση ετήσια κίνηση οχημάτων (10 ⁶ οχημ./έτος)	Περιπτώσεις πυρκαγιάς					
						Ι.Χ οχήματα		Φορτηγά		Όλα τα οχήματα	
						Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ./χλμ	Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ./χλμ	Αριθμός	Περιπτώσεις ανά 10 ⁸ οχημ./χλμ
Μονής κατεύθυνσης κυκλοφορία	Γαλλία	Dullin	1500	1984 - 1991	7.3	1	1.6	0	0.0	1	1.3
		Vuache	1400	1990 - 1993	4.8	1	3.0	0	0.0	1	2.0
		Chatillon	700	1990 - 1992	6.0	1	10.4	0	0.0	1	8.0
		St. Germain De Joux	1200	1990 - 1992	6.0	0	0.0	1	3.4	1	8.1
	Πορτογαλία	Aguas Santas	300	1991	7.6	0	0.0	0	0.0	0	0
Σουηδία	Karra	400	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	Sorvik	200	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	Askloster	300	1987 - 1991	4.0	-	-	-	-	-	19.0	
Διπλής κατεύθυνσης κυκλοφορία	Αυστρία	Perjen	2900	1987 - 1991	3.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Amberg	3000	1987 - 1991	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Pfander	6720	1985 - 1988	3.6	-	-	-	-	-	0.7
	Γαλλία	L'Elpine	3100	1984 - 1991	5.8	1	0.6	1	40.0	2	1.1
		Chamoise	3300	1988 - 1992	8.5	1	1.5	5	22.6	6	6.8
	Νορβηγία	Hvaler	3800	1989 - 1990	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Flekkeroy	2300	1989 - 1990	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Ellingsoy	3500	1988 - 1990	1.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Valderoy	4500	1988 - 1990	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
Σουηδία	Windo	500	1987 - 1991	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
Σήραγγες σε βουνά με διπλής κατεύθυνσης κυκλοφορία	Αυστρία	Arlberg	14000	1987 - 1991	1.7	-	-	-	-	-	2.5
		Katschberg	5400	1987 - 1991	3.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
		Tauern	6400	1987 - 1991	4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Γαλλία/Ιταλία	Frejus	12900	1980 - 1991	1.0	3	3.5	6	12.7	9	8.6
		Mont Blanc	11600	1985 - 1992	1.9	4	1.5	17	12.9	21	5.4
	Ιαπωνία	Kan-etsu	11000	1985 - 1995	7.3	13	1.5	-	-	-	-
	Ελβετία	Gothard	16900	1981 - 1987	3.7	-	-	-	-	-	-
Seelisberg		9300	1981 - 1987	4.2	-	-	-	-	-	-	2.0
San Bernardino		6600	1968 - 1987	1.7	-	-	-	-	-	-	5.0
Belchen		3200	1978 - 1986	11.0	-	-	-	-	-	-	1.0

Από τα στοιχεία των πινάκων 1.5 και 1.6 προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- η μέση τιμή των περιπτώσεων πυρκαγιάς ανά 10⁸ οχηματοχιλιόμετρα δεν ξεπερνάει την τιμή 25 σε καμία από τις περιπτώσεις,
- σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία, που είναι διαθέσιμα μέχρι σήμερα, οι αστικές σήραγγες τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές περιπτώσεων πυρκαγιάς σε σχέση με άλλες σήραγγες,
- στο 40% των παρατηρούμενων σηράγγων δεν εμφανίστηκε περιστατικό πυρκαγιάς,
- σε αρκετές σήραγγες (π.χ. Chamoise, Elb, Frejus, Mont Blanc) η τιμή των περιπτώσεων πυρκαγιάς ανά 10⁸ οχηματοχιλιόμετρα για φορτηγά οχήματα είναι σημαντικά υψηλότερη απ' ότι για τα ιδιωτικά αυτοκίνητα,

Μία γαλλική μελέτη, παρουσιάζοντας δείγμα 26 πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες που προκλήθηκαν από οχήματα, κατατάσσει σε κατηγορίες τις πυρκαγιές ανάλογα με την κρισιμότητα τους και τη συχνότητα τους (πίνακας 1.7). Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας στις περιπτώσεις πυρκαγιών που προκαλούν μικρή καταστροφή στη σήραγγα εκτιμάται χαμηλότερος των 20MW, ενώ στις περιπτώσεις σοβαρής καταστροφής εκτιμάται μεγαλύτερος των 20MW.

Πίνακας 1.7: Εκτίμηση της κρισιμότητας και της συχνότητας πυρκαγιάς σε γαλλικές σήραγγες [PIARC,1999]

Κατάταξη της πυρκαγιάς		Περιπτώσεις πυρκαγιάς ανά 10 ⁸ οχηματοχιλιόμετρα*
Επιβατικά αυτοκίνητα	- Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	1 - 2
Φορτηγά χωρίς επικίνδυνο φορτίο	- Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	8
	- Πυρκαγιά με μικρή καταστροφή στη σήραγγα - Πυρκαγιά με σοβαρές συνέπειες	1 0.1 - 0.3
Φορτηγά που μεταφέρουν επικίνδυνο φορτίο	- Πυρκαγιά χωρίς καμία καταστροφή	2
	- Πυρκαγιά με τη συμμετοχή και του επικίνδυνου φορτίου και μεγάλη καταστροφή	0.3

* διερχόμενα οχήματα ανά χιλιόμετρο μήκους οδού

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.7, οι πυρκαγιές που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη καταστροφή είναι πολύ σπάνια γεγονότα. Οι γαλλικές στατιστικές εκτιμούν ότι θα συμβούν 1-2 πυρκαγιές σε οχήματα για κάθε 10⁸ οχηματοχιλιόμετρα σήραγγας. Αντίστοιχα στην περίπτωση των οχημάτων βαρέως τύπου, για κάθε 10⁸ οχηματοχιλιόμετρα σήραγγας θα συμβούν 8 πυρκαγιές μία εκ των οποίων θα είναι σοβαρή και θα προκαλέσει καταστροφή στη σήραγγα. Επίσης εκτιμάται ότι θα υπάρξουν από 1 έως 3 πολύ σοβαρές πυρκαγιές σε σήραγγα για κάθε 10⁹ οχηματοχιλιόμετρα (σοβαρές απώλειες, θάνατοι). Μία ακόμη μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε στο διάστημα 2006-2009 αναφέρει ότι ο ρυθμός πραγματοποίησης σοβαρής σύγκρουσης στη σήραγγα είναι μεταξύ 9.12-20.45 συγκρούσεις/ 10⁸ οχηματοχιλιόμετρα όταν το ίδιο εύρος σε ανοιχτό δρόμο είναι 8.62-10.24. Πιθανή εξήγηση για την στατιστική αυτή αποτελεί η κακή ορατότητα μέσα στις σήραγγες, εάν δεν ληφθεί υπόψη ο παράγοντας της συμπεριφοράς του οδηγού [Σακκάς,2014;PIARC,1999].

Οι συνέπειες [Σακκάς,2014;ditzingen.de]

Η πιθανότητα να συμβεί πυρκαγιά σε σήραγγα είναι μικρή, αλλά η καταστροφή που μπορεί να επιφέρει, είναι μεγάλη, οπότε και το γινόμενο που συνιστά τον κίνδυνο αυξάνεται. Ως προς το θέμα της πιθανότητας να συμβεί ένα σημαντικό ατύχημα απαιτείται να συνυπολογισθούν τα εξής: πολλές οδικές σήραγγες έχουν πολύ υψηλή κυκλοφορία (π.χ περίπου 37.000.000 οχήματα διήλθαν από τη σήραγγα του Elb στη Γερμανία το 1991),

υπάρχουν 15000 οδικές, σιδηροδρομικές και σήραγγες μετρό μόνο στην Ευρώπη και οι περισσότερες από αυτές έχουν μήκος πολλών χιλιομέτρων [Σακκάς,2014;Cembureau,2004]. Οι συνέπειες είναι οι ακόλουθες:

1. Βασικότερη όλων των συνεπειών είναι η σοβαρότατη απειλή της ανθρώπινης ζωής, οι θάνατοι και τραυματισμοί είτε των χρηστών της σήραγγας είτε του προσωπικού λειτουργίας της σήραγγας είτε των πυροσβεστών και γενικότερα των δυνάμεων διάσωσης. Η θερμότητα, ο καπνός, τα αέρια, η απώλεια οξυγόνου, και η απώλεια όρασης οδηγεί στη ζάλη, ασφυξία, εγκαύματα, και ακόμα και στο θάνατο.

2. Οικονομικές απώλειες που σχετίζονται με την καταστροφή της σήραγγας συνυπολογίζοντας το κόστος επισκευής για την αντικατάσταση του εξοπλισμού της σήραγγας (φωτισμός, ανεμιστήρες, τηλεπικοινωνία), την αντικατάσταση της επένδυσης της σήραγγας που έχει καταστραφεί και την απώλεια εσόδων από την διακοπή της κυκλοφορίας. Επίσης στις οικονομικές απώλειες περιλαμβάνεται η καταστροφή των οχημάτων αλλά και των φορτίων που αυτά φέρουν. Για παράδειγμα η συνολική οικονομική απώλεια από τις πυρκαγιές στις σήραγγες Channel, Mont-Blanc και Tauern ήταν αντίστοιχα 298 Μ€, 392 Μ€ και 24.7 Μ€.

3. Κυκλοφοριακή συμφόρηση από τη διακοπή κυκλοφορίας της σήραγγας για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από μερικές εβδομάδες μέχρι και χρόνια, ανάλογα με την καταστροφή που έχει υποστεί η σήραγγα.

4. Περιβαλλοντική καταστροφή λόγω της τοξικότητας του καπνού.

Παράδειγμα υπολογισμού για την σήραγγα του Elb (Γερμανία) [PIARC,1999]

Οι τιμές των παραπάνω πινάκων 1.5 και 1.6, υπολογίζονται όπως το παράδειγμα για τη σήραγγα του Elb(Γερμανία) που περιγράφεται παρακάτω:

- περίοδος παρακολούθησης: 2 έτη
- μήκος σήραγγας (με ράμπες): 3.3 km
- αριθμός των διερχόμενων οχημάτων από την σήραγγα: $3 \cdot 10^6$ οχήμ/έτος
- ποσοστό οχημάτων βαρέως τύπου: 15%
- αριθμός συμβάντων που αφορούν επιβατηγά οχήματα Ι.Χ κατά την περίοδο παρακολούθησης: 13
- αριθμός συμβάντων που αφορούν οχήματα βαρέως τύπου κατά την περίοδο παρακολούθησης: 9

Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες, υπολογίζονται οι τιμές των περιπτώσεων πυρκαγιάς ανά 10^8 οχηματοχιλιόμετρα για τη σήραγγα του Elb στο Hamburg της Γερμανίας ως εξής:

- passenger vehicles (επιβατικά οχήματα Ι.Χ)

$$PV = \frac{13}{2 \times 37 \times 10^6 \times (1 - 0.15) \times 3.3} \cdot \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \rightarrow PV = 6.3 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh.} \times \text{km}$$

- heavy vehicles (οχήματα βαρέως τύπου)

$$HGV = \frac{9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 0.15 \times 3.3} \cdot \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \rightarrow HGV = 24.6 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh.} \times \text{km}$$

- all vehicles together (όλα τα οχήματα)

$$PV + HGV = \frac{13 + 9}{2 \times 37 \times 10^6 \times 3.3} \cdot \frac{\text{cases}}{\text{veh.} \times \text{km}} \rightarrow PV + HGV = 9.0 \text{ cases per } 10^8 \text{ veh.} \times \text{km}$$

Για την επεξεργασία των τιμών των πινάκων 1.5 και 1.6 απαιτείται να ληφθούν υπόψη η παρακάτω συνθήκες:

- γενικά οι πυρκαγιές σε οδικές σήραγγες είναι σπάνια γεγονότα, συνεπώς η σημαντικότητα των στατιστικών μελετών είναι περιορισμένη. Αρκεί ένα μεμονωμένο γεγονός πυρκαγιάς για αλλάξει δραματικά μία τιμή στους πίνακες,
- στην Ελβετία το βάρος του φορτίου στα οχήματα βαρέως τύπου περιορίζεται στους 28 τόνους, ενώ στην Ολλανδία περιορίζεται στους 50 τόνους,
- οι τιμές του πίνακα ,που αναφέρονται στην Ελβετία, αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των φορών που χρειάστηκε να επέμβει η πυροσβεστική υπηρεσία,
- στη σήραγγα του Elb (Γερμανία) καθώς και σε όλες τις γαλλικές σήραγγες υπολογίζεται κάθε ανιχνεύσιμη φωτιά, π.χ. συμπεριλαμβάνονται οι πυρκαγιές όπου ο ίδιος ο οδηγός του οχήματος έσβησε την πυρκαγιά μόνος του,
- τα ποσοστά των οχημάτων βαρέως τύπου ποικίλλουν από 9% έως 55% (σήραγγα Frejus) για διαφορετικές σήραγγες,
- σε πολλές σήραγγες όπου εκτελούνται επικίνδυνες μεταφορές πραγματοποιούνται ειδικές ρυθμίσεις, π.χ. περιορισμοί στους χρόνους με χαμηλή κίνηση, καθοδήγηση και επίβλεψη κατά τη διάρκεια της διέλευσης του επικίνδυνου φορτίου από τη σήραγγα. Σε αρκετές σήραγγες τέτοιου είδους μετακινήσεις απαγορεύονται.

Στα γεγονότα πυρκαγιάς όπου εμπλέκονται φορτηγά οχήματα, παρατηρείται μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με την αντίστοιχη αναμενόμενη από το ρυθμό κυκλοφορίας τους. Σύμφωνα με τα δεδομένα για τη σήραγγα του Elb, τα φορτηγά οχήματα προκαλούν περίπου το 30% των περιπτώσεων πυρκαγιάς, αν και αντιπροσωπεύουν το 15% της συνολικής κυκλοφορίας κατά τις εργάσιμες μέρες.

Κεφάλαιο 2ο :

Αντιμετώπιση του προβλήματος «πυρκαγιά σε σήραγγα» με χρήση μέτρων πυροπροστασίας

2.1. Λόγοι που επιβάλλουν τη χρήση μέτρων πυροπροστασίας στις σήραγγες – Σκοπός πυροπροστασίας

Υπάρχουν τρεις βασικοί λόγοι σύμφωνα με τους οποίους η παροχή προστασίας από πυρκαγιά στις σήραγγες κρίνεται απαραίτητη. Αρχικά, τίθεται το ζήτημα ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής. Το ζήτημα αυτό δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένο με την συμπεριφορά της κατασκευής σε συνθήκες πυρκαγιάς (ωστόσο μια κατασκευή που καταρρέει δεν δίνει την δυνατότητα στους χρήστες της να εξέλθουν από αυτήν με ασφάλεια) αλλά κυρίως συνδέεται με λειτουργίες όπως ο φωτισμός της σήραγγας και το σύστημα αερισμού αυτής [Promat,2008].

Μόνο στην Ευρώπη την τελευταία δεκαετία έχουν συμβεί εντός οδικών και σιδηροδρομικών σήραγγων 10 μεγάλες πυρκαγιές, και αμέτρητες περιπτώσεις πυρκαγιών μικρής έκτασης. Αυτές οι πυρκαγιές είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες ανθρώπινων ζωών (221 θάνατοι σε τέσσερις πυρκαγιές που έλαβαν χώρα σε διάστημα μόλις δύο ετών) και στις περισσότερες των περιπτώσεων προκλήθηκαν σοβαρές καταστροφές στις σήραγγες που απέφεραν τεράστιες οικονομικές ζημιές. Εκτενής καταγραφή των ανθρώπινων απωλειών σε ατυχήματα πυρκαγιών σε σήραγγες παρατίθεται στον πίνακα 1.2 του προηγούμενου κεφαλαίου. Σε αυτή την ενότητα χάρη παραδείγματος προστέθηκε ένας επιπλέον συγκεντρωτικός πίνακας για θανάτους που σημειώθηκαν τα τελευταία χρόνια σε σήραγγες λόγω πυρκαγιάς (πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής ανθρώπινων απωλειών από πυρκαγιές σε σήραγγες [Promat,2008]

Περιοχή ατυχήματος	Θάνατοι	Περιοχή ατυχήματος	Θάνατοι
Βοσνία	35	Hokuriku Tunnel, Ιαπωνία	34
Mont Blanc Tunnel, Γαλλία	39	Pecorile Tunnel, Ιταλία	8
Tauern Tunnel, Αυστρία	12	Ο'Shimizu Tunnel, Ιαπωνία	16
Vierzy Tunnel, Γαλλία	108	Salang Tunnel, Αφγανιστάν	700
Pfänder Tunnel, Αυστρία	3	Kings Cross Tunnel, Αγγλία	31
Huguenot Tunnel, Ν.Αφρική	3	Isola delle Femmine, Ιταλία	5
Nihonzaka Tunnel, Ιαπωνία	7	Velsen Tunnel, Ολλανδία	5
St Gottard Tunnel, Ελβετία	11	Kaprun Tunnel, Αυστρία	155

Σε δεύτερο στάδιο απαιτείται να εξεταστεί η συμπεριφορά της κατασκευής της σήραγγας σε συνθήκες πυρκαγιάς. Τα ερωτήματα που προκύπτουν αφορούν την κατάσταση στην οποία θα βρεθεί η κατασκευή της σήραγγας τόσο κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς όσο και μετά το πέρας της. Στην πυρκαγιά της σήραγγας του Mont Blanc το σκυρόδεμα της

επένδυσης υπέστη σημαντική αποφλοίωση για 900 m σήραγγας. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς στην σήραγγα του St. Gotthard το 2001, κατέρρευσαν 250 m σήραγγας παρεμποδίζοντας τις επιχειρήσεις διάσωσης των χρηστών της σήραγγας. Και στις δύο περιπτώσεις πυρκαγιάς που αναφέρθηκαν πριν, η φωτιά είχε εκδηλωθεί σε σημεία όπου το γεωλογικό περιβάλλον στις σήραγγες ήταν υγιής βράχος, γεγονός που απέτρεψε αστοχίες μεγάλης κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την πυρκαγιά στην σήραγγα της Μάγχης μόνο το λεπτό στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής επένδυσης συγκρατούσε την κατασκευή σε αρκετά σημεία της, γεγονός που θα μπορούσε να αποφευχθεί αν είχε γίνει χρήση συστημάτων παθητικής πυροπροστασίας κατά την κατασκευή της [Promat,2008].

Ο τρίτος λόγος που επιβάλλει τη χρήση μέτρων πυροπροστασίας είναι οι οικονομικές απώλειες που επιφέρει η αστοχία της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Αυτές οι οικονομικές απώλειες δεν σχετίζονται αποκλειστικά με την επισκευή/ανακατασκευή της σήραγγας αλλά και με την διακοπή της λειτουργίας της, πράγμα που οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερα οικονομικά κόστη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πυρκαγιά της σήραγγας της Μάγχης όπου το οικονομικό κόστος είχε εκτιμηθεί ότι θα ξεπεράσει το διπλάσιο του κόστους επισκευής της σήραγγας. Οι διαδικασίες επισκευής της σήραγγας εκτιμήθηκε ότι έφτασαν τα 87.000.000 € ενώ το επιπλέον κόστος λόγω της διακοπής της κυκλοφορίας και των επιπρόσθετων εργασιών για την αντικατάσταση της υποδομής εκτιμήθηκε στα 211.000.000 €. Ωστόσο το κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο που μπορεί να επιφέρει μια καταστροφή τέτοιου βεληνεκούς πρέπει να εξετασθεί σε μια ευρύτερη βάση και όχι μόνο στις επιπτώσεις που έχει στη σήραγγα. Ενδεικτικά οι συνολικές οικονομικές απώλειες που εκτιμήθηκαν για την Ιταλική οικονομία στην περιοχή κοντά στην σήραγγα του Mont Blanc ήταν της τάξης του 1.750.000.000 € παρόλο που το συνολικό κόστος επισκευής της σήραγγας ήταν 392.000.000 € [Promat,2008;ditzingen.de].

Σκοπός πυροπροστασίας σηράγγων

Η χρήση των μέτρων πυροπροστασίας σε περίπτωση που προκληθεί πυρκαγιά σε σήραγγα αποσκοπεί κατά κύριο λόγο στην ασφαλή διαφυγή των χρηστών από αυτήν και σε δεύτερο στάδιο στην προστασία του δομήματος της σήραγγας. Τα μέτρα πυροπροστασίας στοχεύουν στην καταστολή και επιβράδυνση της επέκτασης της πυρκαγιάς ώστε να πραγματοποιηθεί έγκαιρη εκκένωση της σήραγγας με όσο τον δυνατόν γρηγορότερη πρόσβαση των συνεργείων διάσωσης στο σημείο του ατυχήματος. Τα μέτρα αυτά διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά μέτρα πυροπροστασίας [Σακκάς et al,2010]:

A. Ενεργητικά μέτρα αποτελούν τα συστήματα πυρανίχνευσης, καταιονητήρες νερού ή κατασβεστικού αφρού, εγκατάσταση μόνιμου πυροσβεστικού δικτύου, συστήματα αερισμού. Η χρήση τους στοχεύει στον περιορισμό της επέκτασης της φωτιάς και στην απομάκρυνση του

καπνού από τη σήραγγα με τέτοιο τρόπο που να διευκολύνει την επέμβαση των πυροσβεστών και τη διαφυγή των χρηστών.

Β. Η παθητική πυροπροστασία της επένδυσης επιτυγχάνεται με την εκτόξευση πυράντοχων κονιαμάτων στην επένδυση της σήραγγας, με τη δημιουργία πυράντοχης ασπίδας από πυράντοχες πλάκες, και με την προσθήκη προστατευτικών επιστρώσεων στον οπλισμό του σκυροδέματος της επένδυσης. 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 σηράγγων προβλέπει την γρήγορη εκκένωση σε περίπτωση πυρκαγιάς μέσω των στοών διαφυγής. Μία επερχόμενη κατάρρευση της επένδυσης όμως, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη ζωή των πυροσβεστών. Η παθητική πυροπροστασία προσφέρει πυρανθεκτικότητα στην επένδυση της σήραγγας αποτρέποντας έτσι πιθανούς τραυματισμούς και απώλειες ζωής.

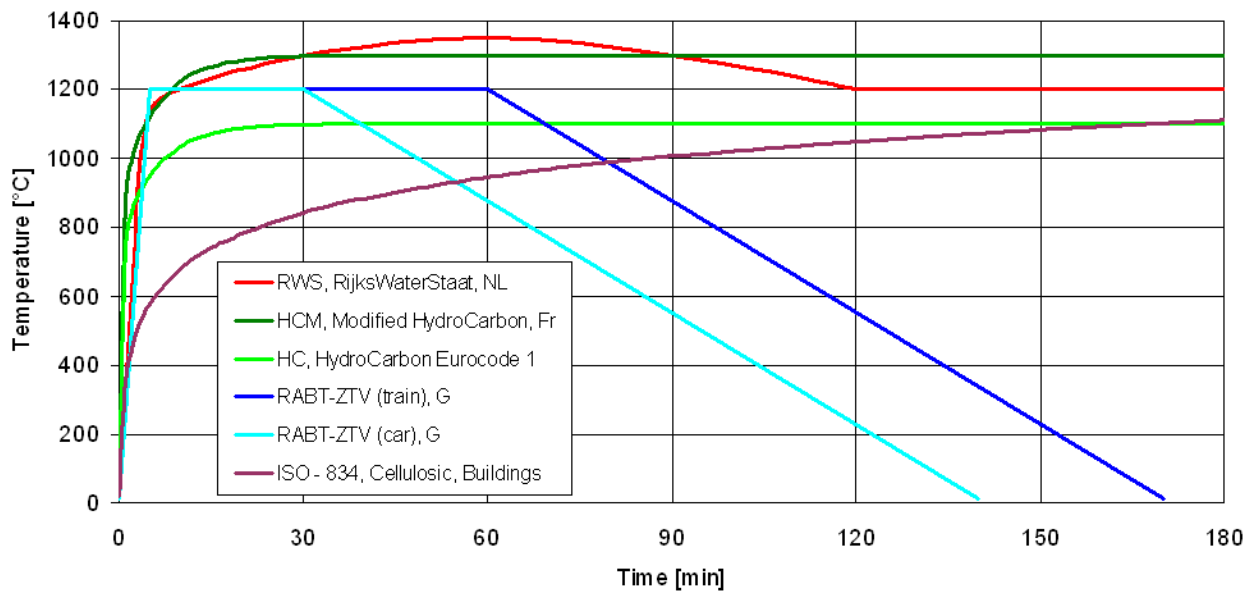
2.2. Θερμικά φορτία – Πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά είναι 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. Μια τυπική πυρκαγιά διαχωρίζεται σε τρεις φάσεις: τη φάση της επώασης, τη φάση της πλήρους ανάπτυξης και τη φάση της απόσβεσης [Τάσιος et al,1984]. 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 η διάρκεια είναι πολύ μεγαλύτερη εξαιτίας της δυσκολίας κατάσβεσης της. Επίσης η στενότητα της οροφής μίας σήραγγας πάνω από την φωτιά συνεπάγεται ότι το ζεστό σύννεφο καπνού ανάμεσα στη φωτιά και στην κορυφή της σήραγγας έχει λιγότερο ύψος μέσα στο οποίο μπορεί να παρασυρθεί κρύος αέρας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών σε αντίθεση με κτίρια. Εκτός από τις υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται συμβαίνει και γρήγορη άνοδος της θερμοκρασίας στην αρχή της πυρκαγιάς οδηγώντας σε εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος (explosive spalling) [Αγγελόπουλος et al,2005]. Η μελέτη μίας πυρκαγιάς σε σήραγγα γίνεται με βάση [Σακκάς,2014]:

- Το ρυθμό ροής θερμότητας, παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη της θερμοκρασίας, και της πίεσης πόρων εντός του σκυροδέματος
- Το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR)
- Τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται
- Τη διάρκεια της πυρκαγιάς και τον τρόπο απόσβεσης της

Τα τελευταία χρόνια, μία μεγάλη σειρά ερευνών έχει πραγματοποιηθεί διεθνώς προκειμένου να εξακριβωθεί το είδος της πυρκαγιάς που μπορεί να συμβεί σε σήραγγες και άλλους υπόγειους χώρους. Η ερευνητική αυτή δραστηριότητα έλαβε χώρα τόσο σε σήραγγες που βρίσκονται σε λειτουργία όσο και σε άλλες που δεν χρησιμοποιούνται αλλά και σε συνθήκες εργαστηρίου. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων που ελήφθησαν από τα πειράματα, αναπτύχθηκε μία σειρά από καμπύλες χρόνου/θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις έκθεσης της σήραγγας σε πυρκαγιά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα με πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες που έχουν θεσπιστεί βάσει εθνικών και διεθνών κανονισμών [promat-tunnel.com]:

Εικόνα 2.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα πρότυπων καμπύλων χρόνου/θερμοκρασίας [promat-tunnel.com]

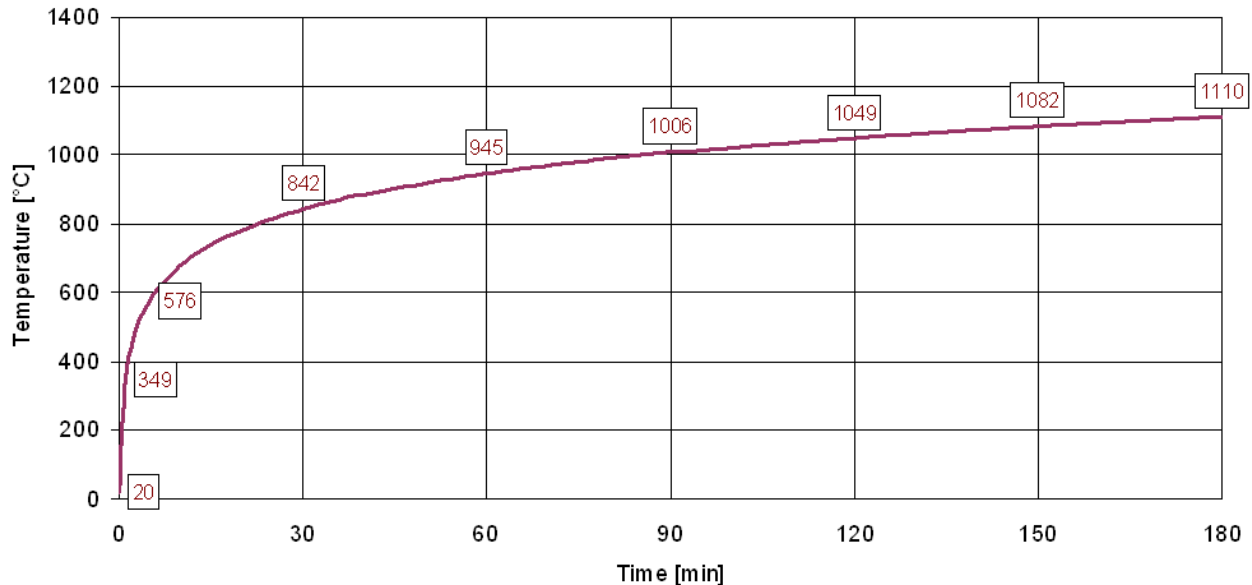


Στο διάγραμμα της εικόνας 2.1 διακρίνονται οι έξι πρότυπες καμπύλες ανάπτυξης της θερμοκρασίας T σε $^{\circ}\text{C}$ συναρτήσει του χρόνου t σε min :

1. *Καμπύλη ISO- 834 (Cellulosic ISO Curve)* : Η καμπύλη αυτή περιγράφει την ταχύτητα καύσης υλικών που συναντώνται σε εμπορικά κτίρια, δηλαδή σε κανονικά αεριζόμενους χώρους (πυρκαγιά κυτταρινικής φύσης). Η καμπύλη ISO-834 βασίζεται σε δεδομένα ερευνών της δεκαετίας του 1940 και γενικά είναι αποδεκτή για πυρκαγιές σε απλές κατασκευές (κτίρια κλπ.) αλλά δεν αντιπροσωπεύει τις περισσότερες πυρκαγιές που συνέβησαν σε σήραγγες. Στη συνέχεια ακολουθεί η εξίσωση που περιγράφει την εξέλιξη της θερμοκρασίας της καμπύλης ISO-834 συναρτήσει του χρόνου, το διάγραμμα της καμπύλης της εξίσωσης (εικόνα 2.2) και ο πίνακας 2.2 με τις τιμές της καμπύλης:

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

Εικόνα 2.2: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας της καμπύλης ISO-834 [promat-tunnel.com]



Πίνακας 2.2: Συντεταγμένες καμπύλης ISO-834 [promat-tunnel.com]

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	20	90	1006
5	576	120	1049
10	678	150	1082
15	738	180	1110
20	781	210	1133
30	842	240	1153
45	902	300	1186
60	945	360	1214

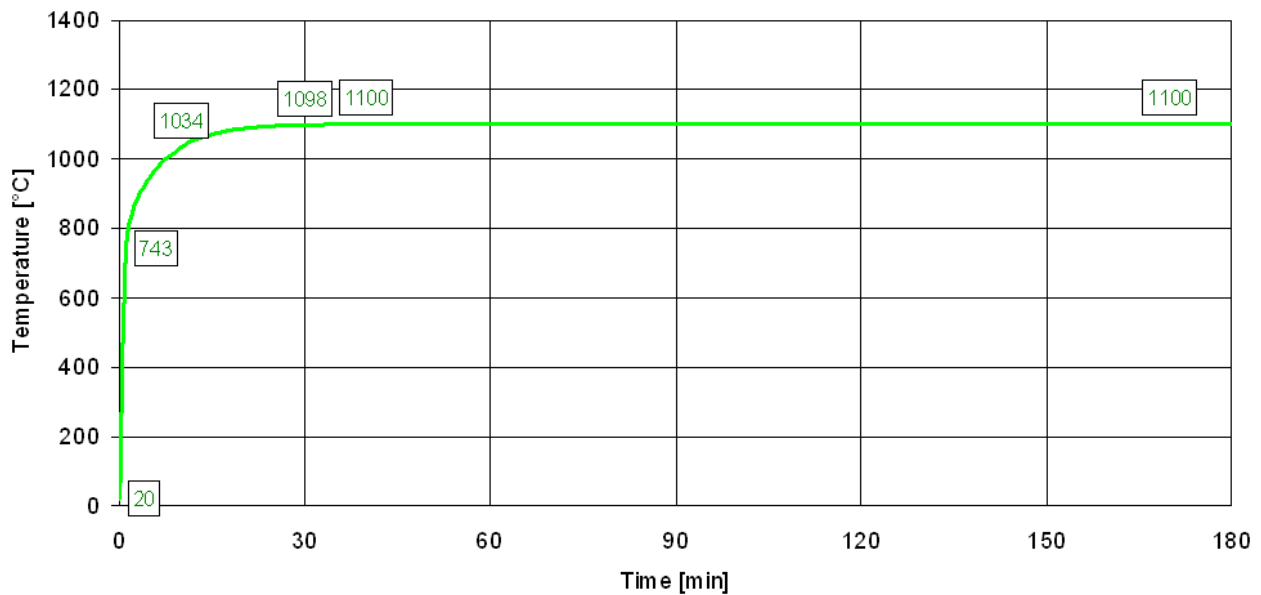
Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζονται παραπάνω η θερμοκρασία έπειτα από 30 min φτάνει τους 842° και έπειτα από 120 min τους 1049°C.

2. Καμπύλη υδρογονανθράκων (Hydrocarbon Curve) : Παρόλο που η καμπύλη ISO-834 χρησιμοποιήθηκε για πολλά χρόνια, σύντομα κατανοήθηκε ότι ο ρυθμός της καύσης για ορισμένα υλικά όπως βενζίνη, χημικά κλπ., ήταν πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό με τον οποίο, για παράδειγμα, καίγεται ο ξυλότυπος μιας οικοδομής. Ως εκ τούτου, προέκυψε η ανάγκη για μία εναλλακτική καμπύλη με σκοπό τη διεξαγωγή δοκιμών σε κατασκευές και υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετροχημικών. Κατά αυτό τον τρόπο αναπτύχθηκε η καμπύλη υδρογονανθράκων που περιλαμβάνει την καύση και άλλων υλικών (πετρέλαιο, άλλα χημικά υλικά) τα οποία χρησιμοποιούνται στην πετρελαϊκή βιομηχανία και δεν συναντώνται σε συνήθη οικοδομικά έργα. Η καμπύλη αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μικρές

πυρκαγιές πετρελαίου όπως για παράδειγμα, σε δεξαμενές καυσίμων αυτοκινήτων ή σε πετρελαιοφόρα οχήματα. Οι πυρκαγιές υδρογονανθράκων διαφέρουν από τις πυρκαγιές κυτταρινικής φύσης λόγω της ταχύτερης αύξησης της θερμοκρασίας τους, όπως φαίνεται και παρακάτω στον πίνακα 2.3 όπου η θερμοκρασία έχει φτάσει τους 1034°C στα πρώτα 10 min. Στη συνέχεια ακολουθεί η εξίσωση που περιγράφει την εξέλιξη της θερμοκρασίας της καμπύλης υδρογονανθράκων συναρτήσει του χρόνου, το διάγραμμα της καμπύλης της εξίσωσης (εικόνα 2.3) και ο πίνακας 2.3 με τις τιμές της καμπύλης:

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

Εικόνα 2.3: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας της καμπύλης υδρογονανθράκων (HC) [promat-tunnel.com]



Πίνακας 2.3: Συντεταγμένες καμπύλης υδρογονανθράκων (HC) [promat-tunnel.com]

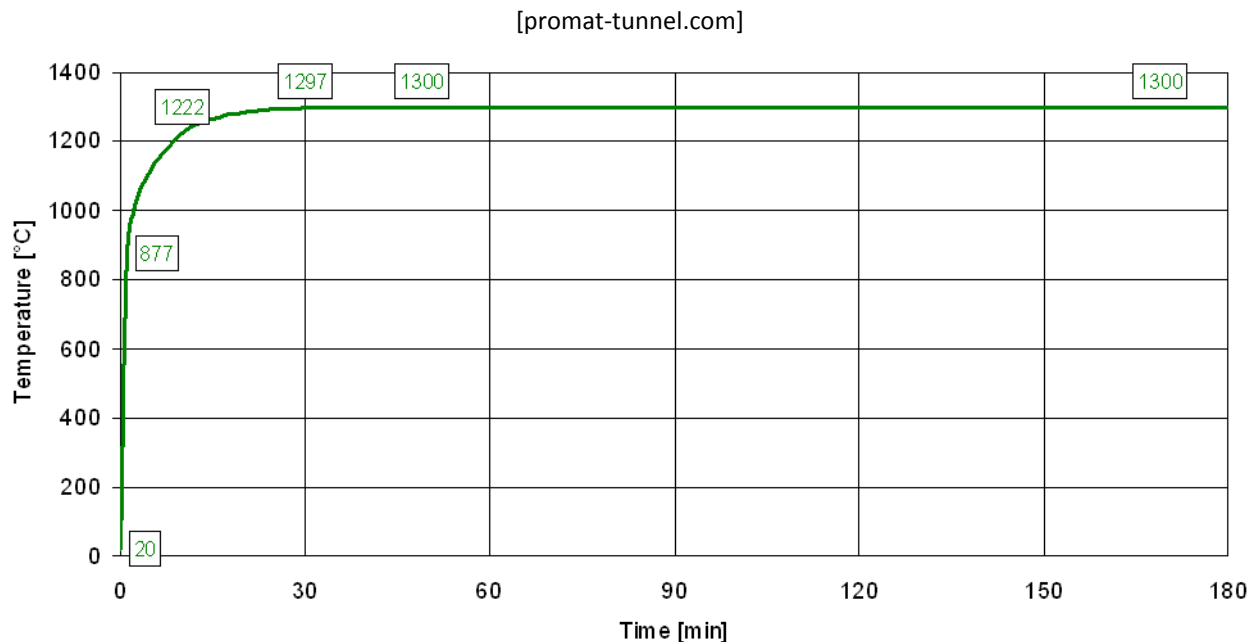
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
3	887	60	1100
5	948	90	1100
10	1034	120	1100
30	1098	120+	1100

Από τα παραπάνω στοιχεία παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στην καμπύλη υδρογονανθράκων φτάνει σε χρόνο 30 min τους 1100°C και διατηρείται στη θερμοκρασία αυτή για παραπάνω από 120 min.

3. *Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (Hydrocarbon Modified Curve)* : Η καμπύλη αυτή αποτελεί τροποποίηση της προαναφερθείσας καμπύλης, κατόπιν αίτησης των γαλλικών κανονισμών πυροπροστασίας και είναι γνωστή ως «Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων»(HCM). Η μέγιστη θερμοκρασία της καμπύλης HCM είναι 1300°C αντί των 1100°C, της τυπικής καμπύλης HC. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τα πρώτα λεπτά της καμπύλης HCM είναι τόσο απότομη όσο σε όλες τις καμπύλες υδρογονανθράκων (RWS,HCM,HC), που πιθανά προκαλεί ένα θερμοκρασιακό σοκ στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την αποφλοίωση του. Στη συνέχεια ακολουθεί η εξίσωση που περιγράφει την εξέλιξη της θερμοκρασίας της τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων συναρτήσει του χρόνου, το διάγραμμα της καμπύλης της εξίσωσης (εικόνα 2.4) και ο πίνακας 2.4 με τις τιμές της καμπύλης:

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

Εικόνα 2.4: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων (HCM)

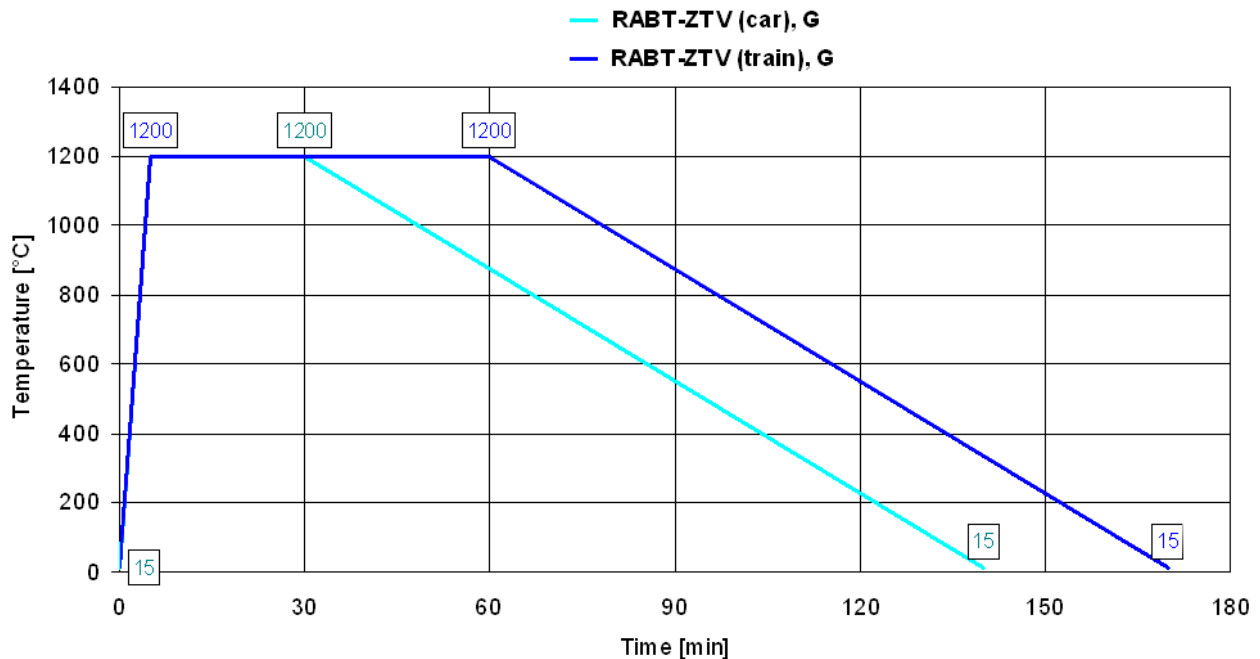


Πίνακας 2.4: Συντεταγμένες τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων (HCM) [promat-tunnel.com]

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
3	1047	60	1300
5	1120	90	1300
10	1222	120	1300
30	1297	120+	1300

4. Καμπύλες RABT (*Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln*) – ZTV : Οι καμπύλες RABT-ZTV αναπτύχθηκαν στη Γερμανία έπειτα από μία σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών προγραμμάτων “EUREKA”, “SOLIT” και “URTUN”. Στις καμπύλες αυτές η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ραγδαία καθώς φτάνει τους 1200°C μέσα σε 5 min. Η διάρκεια έκθεσης σε σταθερή θερμοκρασία 1200°C είναι μικρότερη συγκριτικά με άλλες καμπύλες, αφού συμβαίνει πτώση της θερμοκρασίας μετά από 30 min για πυρκαγιά σε αυτοκίνητο (RABT-ZTV car) και μετά από 60 min για πυρκαγιά σε τρένο (RABT-ZTV train). Η περίοδος ψύξης και στις δύο περιπτώσεις διαρκεί 110 min. Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα των καμπυλών RABT-ZTV (εικόνα 2.5) και ο πίνακας 2.5 με τις συντεταγμένες τους:

Εικόνα 2.5: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας καμπυλών RABT-ZTV [promat-tunnel.com]



Πίνακας 2.5: Συντεταγμένες καμπύλης RABT [promat-tunnel.com]

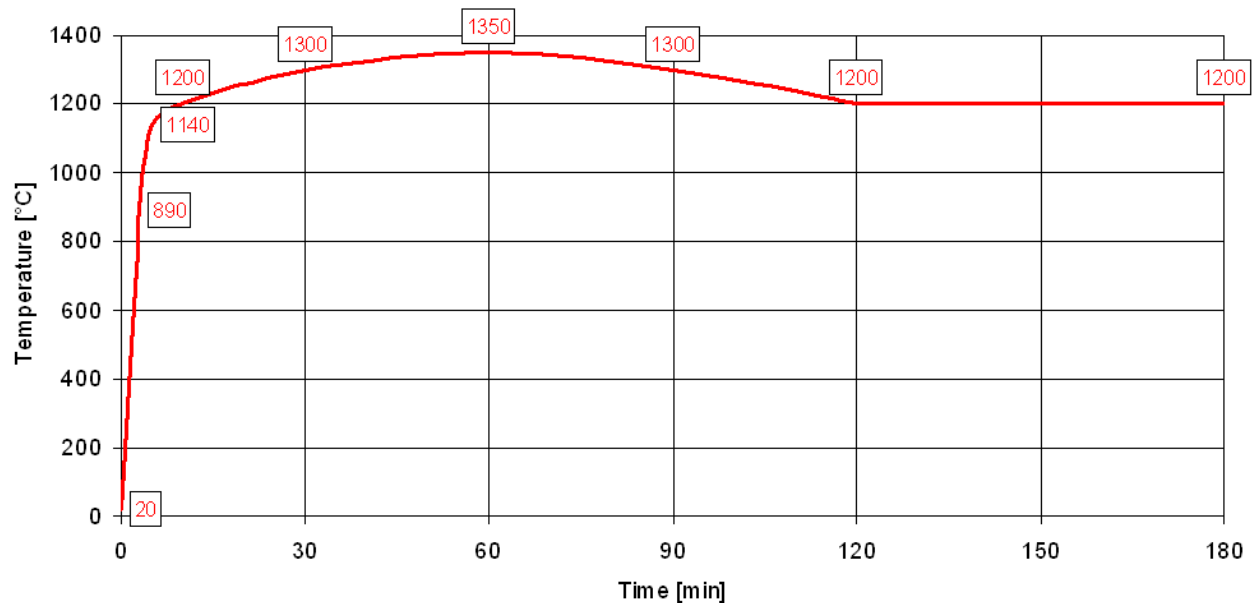
RABT-ZTV (τρένο)		RABT-ZTV (αυτοκίνητο)	
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	15	0	15
5	1200	5	1200
60	1200	30	1200
170	15	140	15

5. Καμπύλη RWS (*Rijkswaterstaat*) : Η καμπύλη αυτή αναπτύχθηκε από το υπουργείο συγκοινωνιών της Ολλανδίας και πρόκειται για τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Η καμπύλη RWS βασίζεται στην υπόθεση ενός χειριστού σεναρίου, όπου ξεσπάει πυρκαγιά σε ένα φορτηγό με 50 m³ πετρέλαιο, ή οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, και η ισχύς είναι της τάξης των 300 MW, ενώ η διάρκεια της είναι 120 min. Η μέγιστη θερμοκρασία στην καμπύλη αυτή είναι 1350°C.

Η διαφορά μεταξύ της καμπύλης RWS και της καμπύλης υδρογονανθράκων βρίσκεται στις συνθήκες όπου αναπτύσσονται οι θερμοκρασίες σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η καμπύλη υδρογονανθράκων βασίζεται σε θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όταν η πυρκαγιά συμβαίνει σε έναν σχετικά ανοικτό χώρο, όπου μπορεί να διαχέεται η θερμότητα στο περιβάλλον, ενώ η καμπύλη RWS προσεγγίζει τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όταν η πυρκαγιά συμβαίνει σε έναν κλειστό χώρο, όπως μία σήραγγα, στον οποίο η διάχυση θερμότητας στο περιβάλλον είναι πολύ μικρή έως μηδαμινή.

Η καμπύλη RWS προσομοιώνει την αρχική ραγδαία ανάπτυξη μίας πυρκαγιάς, όπου πηγή εκδήλωσης της αποτελεί ένα πετρελαιοφόρο όχημα, και την σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας, που αναμένεται καθώς το φορτίο καυσίμου καίγεται. Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα της καμπύλης RWS (εικόνα 2.6) και ο πίνακας 2.6 με τις συντεταγμένες της:

Εικόνα 2.6: Διάγραμμα χρόνου/θερμοκρασίας καμπύλης RWS [promat-tunnel.com]



Πίνακας 2.6: Συντεταγμένες καμπύλης RWS [promat-tunnel.com]

RWS, RijksWaterStaat	
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200
180	1200

Οι θερμοκρασίες που εκτιμήθηκαν από πραγματικά γεγονότα σε σήραγγα ήταν μικρότερες από τις τιμές της καμπύλης RWS, όπως ήταν αναμενόμενο. Για παράδειγμα στη σήραγγα του Caldecott η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 1050°C, στη σήραγγα του Great Belt η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 800°C και στη σήραγγα του Mont-Blanc η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 1000°C [Αγγελόπουλος et al,2005]. 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 προβλέπεται από την καμπύλη οδηγεί σε καταστροφή της επένδυσης της σήραγγας αν δεν ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα προστασίας.

2.3. Κανονισμοί πυροπροστασίας σηράγγων

Με το Προεδρικό Διάταγμα 230/2007 (ΦΕΚ 264/2007) πραγματοποιήθηκε η προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην οδηγία 2004/54/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29^{ης} Απριλίου 2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού δικτύου. Η βάση για την επιλογή των ενδεδειγμένων μέτρων ασφαλείας έχει διαμορφωθεί στα πλαίσια μιας ολιστικής θεώρησης που λαμβάνει υπόψη όλους τους χρήστες, τα οχήματα, τις λειτουργικές διαδικασίες, την διαμόρφωση του δομικού συστήματος της σήραγγας και τον εξοπλισμό της καθώς και όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις αυτών των παραγόντων. Στο παράρτημα I του άρθρου 16 της παρούσας οδηγίας δίδονται οι παράμετροι ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιούνται για την προστασία των ανθρώπων και της σήραγγας από πυρκαγιά. Οι παράμετροι που αναφέρονται, μεταξύ άλλων, είναι οι υποχρεωτικές έξοδοι κινδύνου, ο φωτισμός εκκένωσης, ο σχεδιασμός του συστήματος αερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του καπνού, και η επαρκής αντοχή των κατασκευών της σήραγγας στη φωτιά. Η οδηγία αυτή εστιάζει στην ύπαρξη κατάλληλου αερισμού, συστημάτων ανίχνευσης καπνού και πυρκαγιάς, στην ύπαρξη πυροσβεστήρων αλλά και στην αντοχή των ηλεκτρονικών και μηχανολογικών εξοπλισμών

έναντι πυρκαγιάς. Παρόλα αυτά δεν γίνεται λόγος για σχεδιασμό της μόνιμης επένδυσης βάσει θερμικών φορτίων ώστε να εξασφαλίζεται η δομοστατική της επάρκεια [Προεδρικό Διάταγμα 264,2007].

Το 2011 ο εθνικός οργανισμός προστασίας από την πυρκαγιά των Η.Π.Α- NFPA (National Fire Protection Association) δημοσίευσε πρότυπα, βάσει θερμικών φορτίων, σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για προστασία από πυρκαγιά για έργα όπως οδικές σήραγγες, γέφυρες, και άλλοι αυτοκινητόδρομοι περιορισμένης πρόσβασης. Για την περίπτωση των οδικών σηράγγων αναφέρεται στην παράγραφο 7.3 ότι ανεξάρτητα από το μήκος της σήραγγας, τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας πρέπει να περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό της για την προστασία των δομικών στοιχείων της, με σκοπό [NFPA,2011]:

- Την μετρίαση των καταστροφών του δομήματος και την αποφυγή κατάρρευσης της σήραγγας
- Την ελαχιστοποίηση των οικονομικών απωλειών λόγω του κλεισίματος της σήραγγας.

Ο οργανισμός NFPA στο πρότυπο 502 αναφέρει ότι η κατασκευή πρέπει να είναι ικανή να αντέξει στην Rijkswaterstaat (RWS) καμπύλη χρόνου/θερμοκρασίας ή άλλη αντίστοιχη πρότυπη καμπύλη. Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου φαίνεται και από τον πίνακα 2.6 της προηγούμενης ενότητας. Μετά από περίοδο έκθεσης 120 min της κατασκευής σε πυρκαγιά, τα ακόλουθα κριτήρια αστοχίας που πρέπει να ικανοποιούνται είναι τα παρακάτω[NFPA,2011]:

1. Σε σήραγγες με επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα πρέπει:
 - Η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια των υλικών να μην υπερβαίνει τους 380°C (716°F).
 - Η θερμοκρασία του χαλύβδινου οπλισμού εντός του σκυροδέματος να μην υπερβαίνει τους 250°C (482°F) (υποθέτοντας μία ελάχιστη κάλυψη 25 mm (1 in)).
2. Σε σήραγγες από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος θα πρέπει να αποφευχθεί η εκρηκτική αποφλοίωση (explosive spalling).
3. Σε σήραγγες με χαλύβδινο οπλισμό η θερμοκρασία στην επένδυση δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 300°C (572°F).
4. Το υλικό πυροπροστασίας που χρησιμοποιείται στην επένδυση να είναι άκαυστο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 136 ή άλλο αντίστοιχο διεθνές πρότυπο.
 - Το υλικό να έχει ελάχιστη θερμοκρασία τήξης τους 1350°C (2462°F).
 - Το υλικό πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις πυροπροστασίας με <5% υγρασία κατά βάρος και όταν είναι πλήρως κορεσμένο με νερό να είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη αποδεκτή καμπύλη χρόνου-θερμοκρασίας.

Η Διοικητική Αρχή Σηράγγων (Δ.Α.Σ) δημοσίευσε το 2009 μία σεναριακή προσέγγιση για την ανάλυση επικινδυνότητας οδικών σηράγγων χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα. Σε αυτή την ανάλυση γίνεται λόγος για απαιτήσεις που αφορούν στη δομοστατική επάρκεια της μόνιμης επένδυσης σύμφωνα με αυτές που περιγράφονται στο πρότυπο 502 του NFPA[Διοικητική Αρχή Σηράγγων,2009].

Τέλος, η διεθνής ένωση οδικών μεταφορών PIARC σε συμφωνία με την ITA (International Tunneling Association) κρίνει απαραίτητο τον δομικό σχεδιασμό σηράγγων ανθεκτικών στην φωτιά και προτείνει οδηγίες για τα κριτήρια σχεδιασμού των σηράγγων ανάλογα με το είδος των οχημάτων που κινούνται σε αυτές αλλά και το είδος της σήραγγας, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 2.7:

Πίνακας 2.7: Κοινές συστάσεις από PIARC και ITA [ITA,2004]

Τύπος οχημάτων	Κύρια κατασκευή				Δευτερεύουσες κατασκευές ⁴			
	Σήραγγα κάτω από μεγάλη κατασκευή	Σήραγγα σε ασταθές έδαφος	Σήραγγα σε σταθερό έδαφος	Σήραγγα Cut & Cover	Αεραγωγοί ⁵	Έξοδοι κινδύνου προς ανοιχτό περιβάλλον	Έξοδοι κινδύνου προς άλλη σήραγγα	Καταφύγια ⁶
Αυτοκίνητα /Βαν	ISO 60 min	ISO 60 min	2	2	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
Φορτηγά /Βυτιοφόρα	RWS/HC 120 min ¹	RWS/HC 120 min ¹	3	3	ISO 120 min	ISO 30 min	RWS/HC 120 min	RWS/HC 120 min ⁷

1. 180 min πιθανών να απαιτούνται για πυκνή κίνηση φορτηγών με εύφλεκτο φορτίο

2. Η ασφάλεια δεν αποτελεί κριτήριο και συνεπώς δεν απαιτείται ανθεκτικότητα στην πυρκαγιά. Παρόλα αυτά υπάρχουν οι παρακάτω απαιτήσεις:

- ISO-834 για 60 min στις περισσότερες περιπτώσεις

- Καμία προστασία αν το σύστημα πυροπροστασίας είναι τόσο ακριβό σχετικά και με το κόστος αλλά και την ενόχληση από τις εργασίες αποκατάστασης μετά από μία πυρκαγιά

3. Η ασφάλεια δεν αποτελεί κριτήριο και συνεπώς δεν απαιτείται ανθεκτικότητα στην πυρκαγιά. Παρόλα αυτά υπάρχουν οι παρακάτω απαιτήσεις:

- RWS/HC για 120 min αν απαιτείται πυροπροστασία λόγω κάποιας ιδιότητας (π.χ σήραγγα κάτω από κτίριο)

- ISO-834 για 120 min στις περισσότερες περιπτώσεις

- Καμία προστασία αν το σύστημα πυροπροστασίας είναι τόσο ακριβό σε σχέση με το κόστος κατασκευής

4. άλλες δευτερεύουσες κατασκευές θα πρέπει να ορίζονται στην βάση ενός "project"

5. Σε περίπτωση εγκάρσιου αερισμού

6. Τα καταφύγια θα πρέπει να συνδέονται με το ανοιχτό περιβάλλον

7. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εάν είναι πολύ πυκνή η κυκλοφορία φορτηγών με εύφλεκτο φορτίο και η εκκένωση από τα καταφύγια δεν είναι δυνατή εντός 120 min

Κεφάλαιο 3ο :

Μέθοδοι πυροπροστασίας σε σήραγγες

3.1. Η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας υπό υψηλές θερμοκρασίες

3.1.1. Σκυρόδεμα

Ιστορικά, η απόδοση του σκυροδέματος στο θέμα αντοχής σε πυρκαγιά συχνά θεωρείται ως δεδομένη λόγω της άκαυστης φύσης του και της ιδιότητας του να λειτουργεί ως θερμικό «φράγμα». Τα κριτήρια σχεδιασμού έχουν βασιστεί σε πειράματα συγκεκριμένων σεναρίων πυρκαγιάς και εκφράζονται με την απαιτούμενη επικάλυψη του οπλισμού με σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά, η γενική αυτή εφαρμογή και χρήση αυτής της προσέγγισης σχεδιασμού αναθεωρήθηκε όταν τα θερμικά καθεστώτα σε πραγματικές πυρκαγιές ήταν αρκετά διαφορετικά. Είναι φανερό ότι υπάρχουν κενά γνώσης στο ζήτημα της πραγματικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος στις κατασκευές που εκτίθενται στη φωτιά [Fletcher et al,2007].

Η επένδυση της σήραγγας αποτελείται από το σκυρόδεμα και το χαλύβδινο οπλισμό. Η εξέλιξη που υπήρχε στην ανάπτυξη υπερρευστοποιητών έφερε γρήγορα τη δημιουργία σκυροδέματος με υψηλή θλιπτική αντοχή. Την εποχή που διανύουμε αναφέρονται αντοχές σε θλίψη έως 120 MPa σε αντίθεση με παλαιότερα όπου μια αντοχή της τάξης των 30 MPa θεωρείτο υψηλή. Λόγω των απαιτήσεων για αυξημένη διάρκεια ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιάστηκαν σκυροδέματα υψηλής απόδοσης (High Performance Concrete – HPC) [Σιδέρης,2010;www.fire-protection.gr]. Αυτά είναι σκυροδέματα που παρασκευάζονται με ποζολανικά πρόσθετα όπως πυριτική παιπάλη κ.α, και χαμηλό λόγο νερού προς υδραυλικά υλικά και χρησιμοποιούνται ευρέως γιατί παρέχουν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα συγκριτικά με τα συνήθη σκυροδέματα. Ωστόσο το σκυρόδεμα παρά την υψηλή αντοχή, ανθεκτικότητα και ακαυστότητα του δεν αποτελεί πυράντοχο υλικό αφού, πρώτον οι μηχανικές του ιδιότητες υποβαθμίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και δεύτερον συντελείται εκρηκτική αποφλοίωση που έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια κομματιών σκυροδέματος και την απόλυτη έκθεση του οπλισμού στην πυρκαγιά. Το σκυρόδεμα όμως συγκριτικά με τα συνήθη δομικά υλικά παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε πυρκαγιά επειδή: 1) τα δομικά στοιχεία τα οποία κατασκευάζονται από σκυρόδεμα είναι γενικά πολύ μεγαλύτερης μάζας από τα αντίστοιχα χαλύβδινα, και έτσι καθυστερεί η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του στοιχείου, 2) το σκυρόδεμα ακόμα και σε ξηρό περιβάλλον περιέχει νερό με αποτέλεσμα να είναι ανθεκτικό σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα δομικά υλικά, 3) σε σύγκριση με το ξύλο θεωρείται άκαυστο [Khoury,2000].

Το σκυρόδεμα προκύπτει από την ανάμιξη τσιμέντου, άμμου, νερού και αδρανών υλικών. Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου θεωρούνται γενικώς χημικά σταθερά σε θερμοκρασίες μεταξύ 20°C και 80°C. Το τσιμέντο χάνει το προσροφημένο νερό μεταξύ 60°C και

85°C και το ελεύθερο νερό του μεσοστρώματος των υδροξυλίων μεταξύ 80°C και 100°C. Στο θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ 100°C και 200°C το τσιμέντο αρχίζει να χάνει τη σταθερότητα του, αφού η εξατμιζόμενη υγρασία αρχίζει να συμβάλλει πλέον στη μείωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των υδροξυλίων (OH^-) που δημιουργούν τη μηχανική αντοχή του υλικού και τελικά την μείωση της αντοχής του. Ταυτόχρονα επηρεάζονται οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των υδροξυλίων, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων. Σε θερμοκρασίες άνω των 300°C ξεκινά η διάσπαση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε CaO και H_2O . Η διάσπαση αυτή δεν επιφέρει απώλεια αντοχής αλλά μπορεί να οδηγήσει σε ζημιές ή ακόμα και στην αποφλοιώση του σκυροδέματος. Στους 500°C αρχίζει σταδιακά η αποσύνθεση των ενώσεων του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH) και η καταστροφή της γέλης του τσιμεντολιθώματος. Η διαδικασία αποσύνθεσης των υδροξυλίων επιταχύνεται στο θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ 600°C και 700°C και ολοκληρώνεται στους 800°C. Η τήξη του τσιμέντου επέρχεται σε θερμοκρασίες άνω των 900°C [Σακκάς,2014].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σκυρόδεμα περιέχει αδρανή υλικά τα οποία καταλαμβάνουν το 65% έως 75% του όγκου του σκυροδέματος. Συνεπώς η συμπεριφορά του σκυροδέματος στις υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζεται από τον τύπο των αδρανών. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά εμφανίζουν σταθερότητα σε θερμοκρασίες έως 300-350°C. Τα αδρανή μπορούν να υποστούν κρυσταλλικούς μετασχηματισμούς που οδηγούν σε σημαντική αύξηση του όγκου τους, όπως η περίπτωση των πυριτικών αδρανών στα οποία πραγματοποιείται η μετατροπή του α-χαλαζία (τριγωνικό) σε β-χαλαζία (εξαγωνικό) μεταξύ των 500°C και 650°C και συνοδεύεται με αύξηση του όγκου περίπου 5.7%. Από την άλλη πλευρά τα ασβεστολιθικά αδρανή διασπώνται σε θερμοκρασίες άνω των 800°C κατά το φαινόμενο της ασβεστοποίησης των αδρανών ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί διαστολή, ρωγμές και θραύση των ασβεστολιθικών αδρανών και ταυτόχρονα διαφεύγει CO_2 στο περιβάλλον [Promat,2008]. Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί αναλύεται εξελικτικά η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε σχέση με τις θερμοκρασίες πυρκαγιάς:

Πίνακας 3.1: Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θερμοκρασιακές μεταβολές. [www.fire protection.gr]

Θερμοκρασία	Φυσικές διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος
Έως 100°C	Εξάτμιση του φυσικά προσροφημένου νερού και του νερού του μεσοστρώματος των υδροξυλίων.	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Μείωση του μέτρου ελαστικότητας.
100°C έως 400°C	Εξάτμιση του υπό μηχανική σύνδεση νερού. Διάσπαση του Ca(OH) ₂ σε CaO και H ₂ O, που επιταχύνει την αποφλοιώση αλλά και μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος.	Μείωση της θλιπτικής αντοχής. Περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας..
400°C έως 500°C	Το συνδεδεμένο προς υδροξείδια ασβεστίου νερό ελευθερώνεται και μέσω πίεσης υδρατμών ενεργεί διαρρηκτικά (αποφλοιώση). Σε όλα τα σκυροδέματα συμβαίνουν χαλαρώσεις δομής και εξωθήσεις.	Ισχυρή πτώση αντοχής. Ισχυρή πτώση του μέτρου ελαστικότητας.
Άνω των 500°C	Τα περιέχοντα χαλαζία συστατικά του σκυροδέματος (άμμος, χαλίκι) μεταβάλλουν αλματωδώς τον όγκο τους στους 575°C (κονιορτοποίηση αυτών). Διάσπαση ανθρακικού ασβεστίου.	Μικρό υπόλοιπο αντοχής. Το σκυρόδεμα με περιεκτικότητα χαλαζία καταστρέφεται. Τήξη σκυροδέματος στους 900°C. Μόνο το πυρίμαχο σκυρόδεμα ανακτά αντοχή μεταξύ των 800°C και 1000°C.

Κατά προσέγγιση εκτιμάται ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια της κατασκευής (πάτωμα) είναι 100°C έως 150°C 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 την φωτιά θερμότητας [www.fire-protection.gr].

Για να σχεδιαστεί ή να επιδιορθωθεί μία κατασκευή από σκυρόδεμα με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι σημαντικό να κατανοηθεί 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 άνω των 1000°C. Μερικά συστατικά του σκυροδέματος λιώνουν περίπου στους 1060°C, και το συνηθισμένο τσιμέντο τύπου Portland ξεκινάει να λιώνει στους 1350°C. Η φύση αυτών των διεργασιών εξαρτάται από τα συστατικά, τις αναλογίες των μιγμάτων και από τις συνθήκες κατά την διάρκεια της θέρμανσης. Για παράδειγμα, η θερμική τάση του σκυροδέματος εξαρτάται πολύ από τον 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°C από το 60% έως το 130% της θλιπτικής αντοχής σε κανονική θερμοκρασία, ανάλογα με την σύνθεση του. Συνεπώς, είναι

λάθος να θεωρηθεί ότι μία «χαρακτηριστική» καμπύλη δύναται να απεικονίσει την αντοχή του σκυροδέματος ανάλογα με τη θερμοκρασία [Αγγελόπουλος et al,2005].

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 [Khoury,2003]. 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 υπό εξέταση στοιχείου. Η ιδιότητα αυτή βοηθάει στην ανακούφιση του στοιχείου από τις θερμικές τάσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός 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. 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 άνω των 600°C. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, μόνο οι επιφανειακές περιοχές θα εκτεθούν σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, εάν το σκυρόδεμα δεν αποφλοιωθεί θα συνεχίσει να παρέχει καλή θερμική μόνωση. Στην πραγματικότητα η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται περίπου στο μισό για θερμοκρασίες κάτω των 600°C. Επομένως το σκυρόδεμα αποτελεί ένα ευπροσάρμοστο υλικό. Αυτό έχει οδηγήσει στην αναζήτηση προσμίξεων στο σκυρόδεμα ανάλογα με τις απαιτήσεις ενάντια στην πυρκαγιά [Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.1: Εικόνα καταστροφής της επένδυσης της σήραγγας Great Belt (Δανία 1994). [Αγγελόπουλος et al,2005]

3.1.2. Αποφλοίωση του σκυροδέματος (Concrete Spalling)

Αποφλοίωση (spalling) είναι η βίαιη ή μη βίαιη αποκοπή στρωμάτων ή κομματιών του σκυροδέματος από την επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου όταν αυτό εκτίθεται σε πολύ γρήγορα αυξανόμενες θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει στις πυρκαγιές. Η αποφλοίωση του σκυροδέματος συντελεί στη μείωση της θλιπτικής αντοχής με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας του. Το φαινόμενο της αποφλοίωσης έχει παρατηρηθεί και σε κτίρια, όμως τα παραδείγματα από πυρκαγιές που συνέβησαν σε σήραγγες τόνισαν το πρόβλημα της εκρηκτικής αποφλοίωσης, που πλέον αποτελεί σημαντικό ζήτημα στο σχεδιασμό κάθε νέας σήραγγας. Η αποφλοίωση μπορεί να συμβεί στο σκυρόδεμα είτε εκτεθεί σε φλόγα είτε θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς την παρουσία της φλόγας. Όταν γίνεται αναφορά στον όρο αποφλοίωση εννοείται η εκρηκτική αποφλοίωση αφού η εκρηκτική αλλά και η πολλαπλή φύση της την καθιστά υψηλού κινδύνου. Εκτός της εκρηκτικής αποφλοίωσης υπάρχουν και άλλες μορφές αποφλοίωσης που δεν έχουν μελετηθεί στον ίδιο βαθμό και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 3.2 [Αγγελόπουλος et al,2005;Σακκάς,2014]:

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων αποφλοίωσης [Khoury,2003;Σακκάς,2014]

Μορφή αποφλοίωσης	Χρονικό διάστημα εμφάνισης (min)	Φύση	Ήχος	Συνέπεια	Βασικοί παράγοντες
Αδρανών	7-30	Μη-βίαιη	Σκάσιμο	Επιφανειακή	H,A,S,D,W
Γωνιακή	30-90	Μη-βίαιη	Κανένας	Μπορεί να είναι σοβαρή	T,A,F _t ,R
Επιφανειακή	7-30	Βίαιη	Σκάσιμο	Μπορεί να είναι σοβαρή	H,W,P,F _t
Εκρηκτική	7-30	Βίαιη	Δυνατός κρότος	Σοβαρή	H,A,S,F _x ,G,O,P,Q,R,S,W,Z
Μετά την ψύξη	Κατά τη διάρκεια και μετά την ψύξη ανάλογα με την απορρόφηση υγρασίας	Μη-βίαιη	Κανένας	Μπορεί να είναι σοβαρή	T,A,F _t ,L,Q,R,WI,AT

A = Θερμική διαστολή αδρανών, B = Θερμική διάχυση αδρανών, P = Διαπερατότητα, F_x = Διατμητική αντοχή σκυροδέματος, O = Προφίλ θερμότητας, Z = Μέγεθος διατομής, Q = Σχήμα διατομής, F_t = Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος, R = Οπλισμός, G = Ηλικία σκυροδέματος, S = Μέγεθος αδρανών, AT = τύπος αδρανών, H = Ρυθμός θερμότητας, T = Μέγιστη θερμοκρασία, L = Φόρτιση, W = Παρουσία υγρασίας, WI = Απορρόφηση υγρασίας

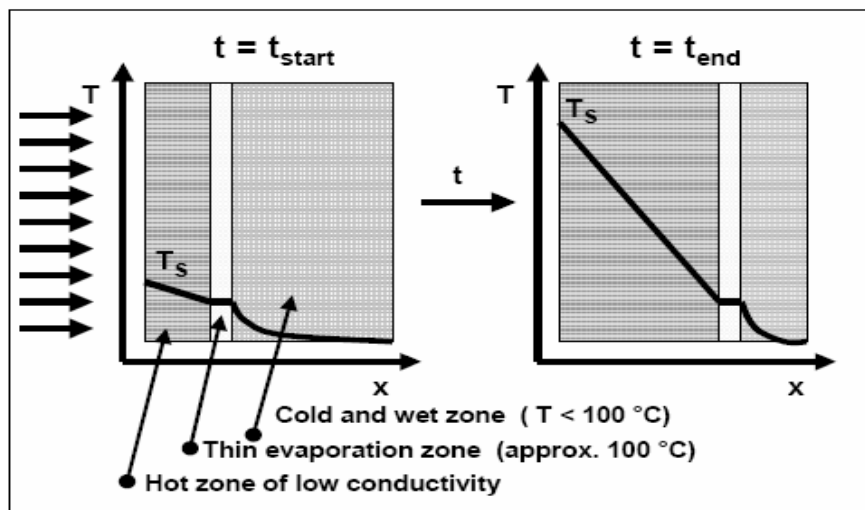
Παρατηρείται ότι η αποφλοίωση αδρανών, η επιφανειακή αποφλοίωση και η εκρηκτική αποφλοίωση επηρεάζονται από τον ρυθμό θερμότητας και πραγματοποιούνται στα πρώτα 7-30 min από την αρχή της φωτιάς, ενώ η γωνιακή αποφλοίωση εκδηλώνεται στα 30-90 min και επηρεάζεται από την μέγιστη θερμοκρασία. Η επιφανειακή και η εκρηκτική αποφλοίωση είναι βίαιες μορφές αποφλοίωσης ενώ η γωνιακή δεν είναι. Έτσι είναι σημαντική: α) η κατανόηση των μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για την εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος και β) η βελτιστοποίηση (από την άποψη του κόστους και της αποτελεσματικότητας) των μεθόδων εξουδετέρωσης της εκρηκτικής αποφλοίωση στην πράξη.

Μηχανισμοί εκρηκτικής αποφλοίωσης

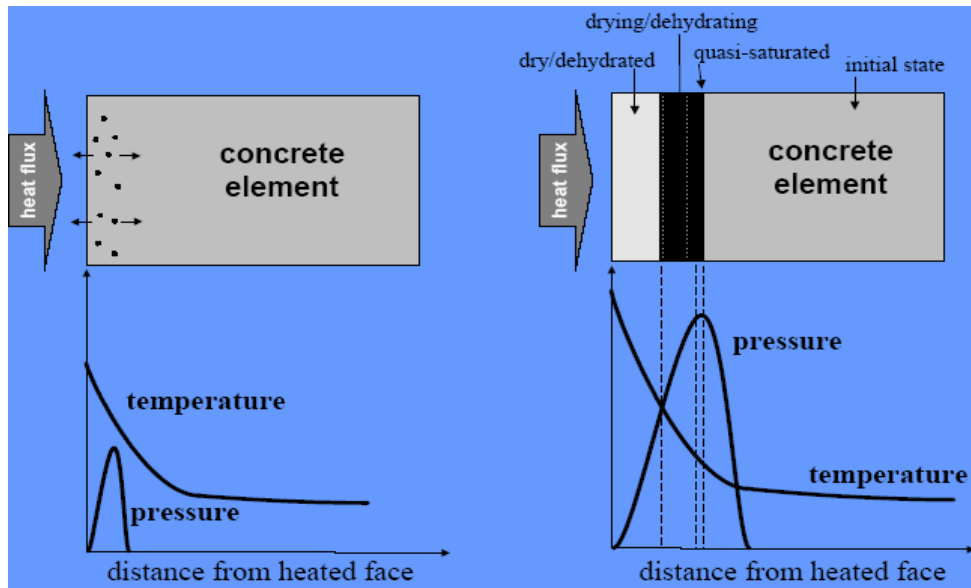
Οι μηχανισμοί οι οποίοι εξηγούν την αποφλοίωση του σκυροδέματος είναι οι εξής:

A) Αποφλοίωση λόγω της πίεσης πόρων.

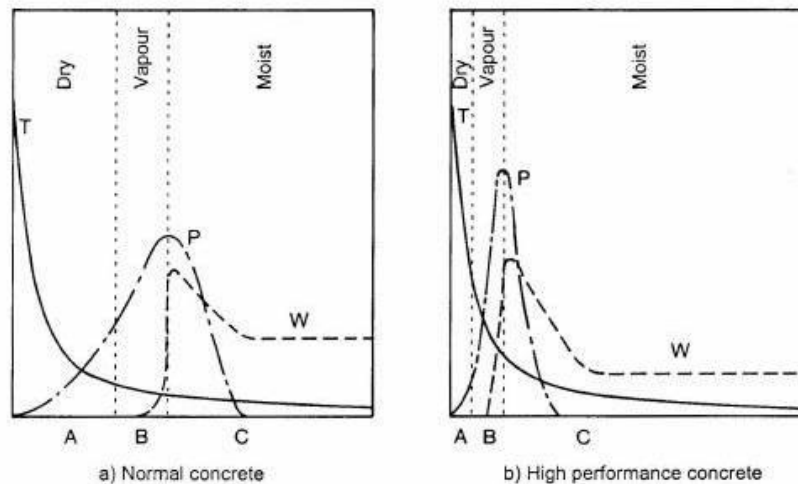
Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποφλοίωση αυτή είναι η διαπερατότητα του σκυροδέματος, το αρχικό επίπεδο κορεσμού των πόρων και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας. Η τιμή της πίεσης πόρων στο υπό θέρμανση σκυρόδεμα είναι δύσκολο να προβλεφθεί αξιόπιστα. Η πλειοψηφία των μοντέλων που υπάρχουν 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 αποφλοίωση. Η επιβολή της θερμότητας στην επιφάνεια του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας θερμοκρασιακής βάρμωσης που ωθεί την υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος, και έτσι αναπτύσσονται τρεις διαφορετικές ζώνες υγρασίας: α) μία ξηρή ζώνη κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια, β) μία ενδιάμεση ζώνη εξάτμισης και γ) μία κορεσμένη ζώνη η οποία μπορεί να περιέχει περισσότερη υγρασία από την αρχική του σκυροδέματος (εικόνες 3.2,3.3). Το γεγονός αυτό συντελεί στην ανάπτυξη της μέγιστης πίεσης πόρων σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια ανάλογα με την διαπερατότητα και την αντοχή του σκυροδέματος (εικόνα 3.4). Η μέγιστη πίεση των πόρων είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερης αντοχής σκυροδέματα και αναπτύσσεται πιο κοντά στην επιφάνεια. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις μέσα στους πόρους εξαιτίας της χαμηλότερης διαπερατότητας ενώ και η μέγιστη τιμή της πίεσης των πόρων εμφανίζεται πιο κοντά στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται επαναλαμβανόμενη αποφλοίωση λεπτομερών τμημάτων σκυροδέματος [Αγγελόπουλος et al,2005;Σακκάς,2014].



Εικόνα 3.2: Μοντέλο ενός τμήματος επένδυσης (protection layer) όταν αυτό θερμαίνεται [Αγγελόπουλος et al,2005]



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα κατανομής θερμοκρασίας πίεσης πόρων και υγρασίας ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια θέρμανσης [Αγγελόπουλος et al,2005]



Εικόνα 3.4: Μονοδιάστατη ποιοτική κατανομή της θερμοκρασίας (T), της υγρασίας (W), και της πίεσης των ατμών (P) στο σκυρόδεμα όταν θερμαίνεται από μία πλευρά [Σακκάς,2014]

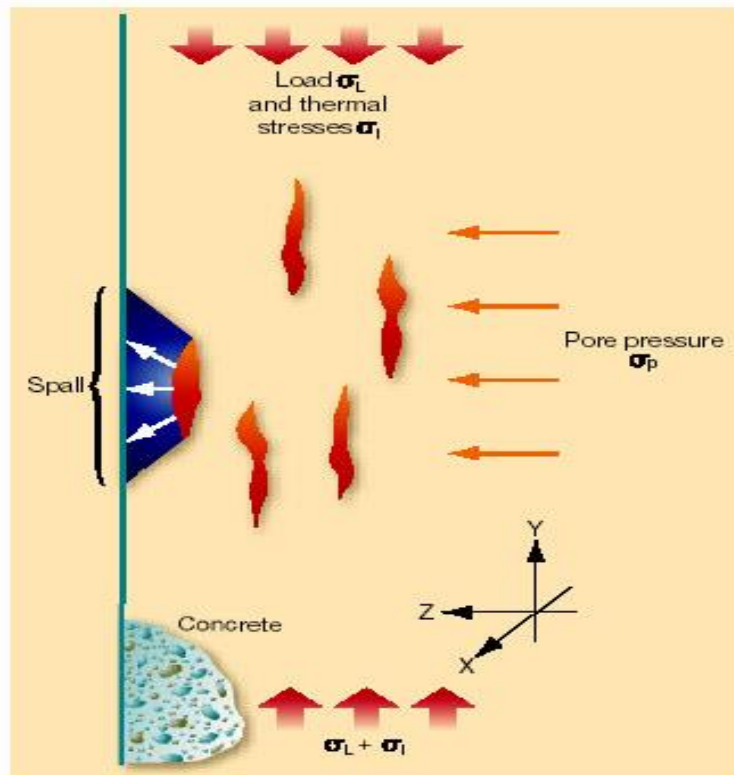
B) Αποφλοιώση λόγω θερμικών τάσεων

Όταν το σκυρόδεμα υποστεί γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να παρουσιάσει εκρηκτική αποφλοιώση. Αυτό οφείλεται στις υπερβολικές θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω 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 αποφλοίωσης λόγω θερμικών τάσεων και μόνο σχετικά σπάνιο, αλλά όχι αδύνατο να συμβεί [Αγγελόπουλος et al,2005].

Γ) Αποφλοίωση λόγω συνδυασμού θερμικών τάσεων και πίεσης των πόρων (Εικόνα 3.5)

Συνήθως η αποφλοίωση 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 σκυροδέματος όταν το άθροισμα των τάσεων υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του. Έπειτα παρουσιάζεται ξαφνική έκλυση ενέργειας και βίαιη αστοχία της επιφάνειας. Η αποφλοίωση λόγω της πίεσης των πόρων και αυτή λόγω των θερμικών τάσεων (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 [Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.5: Ενεργές τάσεις σε σκυρόδεμα υπό θέρμανση [Αγγελόπουλος et al,2005]

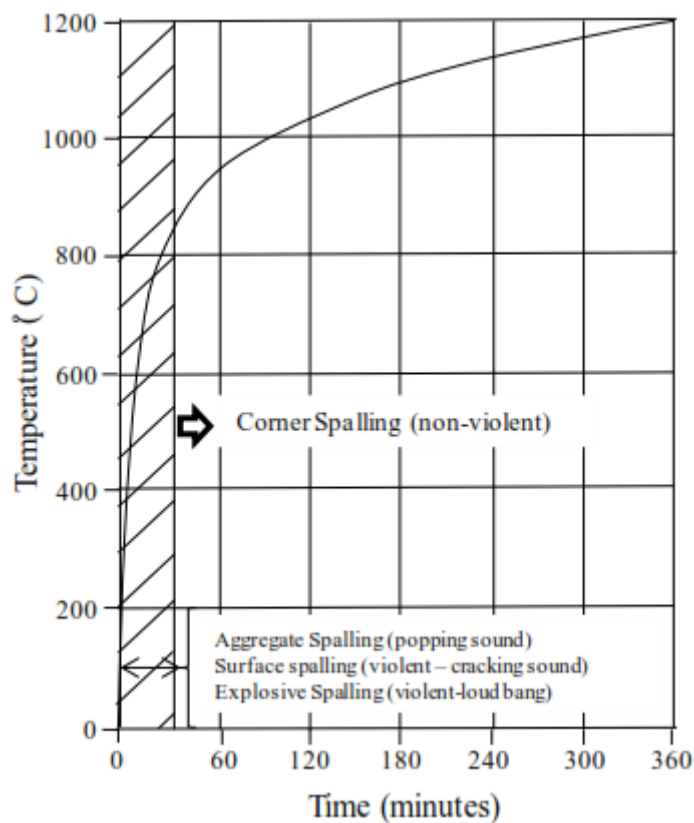
Κατηγορίες αποφλοίωσης [Αγγελόπουλος et al,2005]:

A) Ασήμαντη. Μέχρι 12 mm βάθους.

B) Προχωρημένη. Από 12 mm μέχρι 3 mm βάθους.

Γ) Σοβαρή. Περισσότερο από 25 mm βάθος ή περίπτωση όπου αποκαλύπτεται ο οπλισμός.

Οι περισσότερες δοκιμές αποφλοίωσης εκτελούνται σε εργαστήρια προσομοίωσης πυρκαγιάς ακολουθώντας ένα ρυθμό θέρμανσης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 834:1987. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 3.6) διακρίνεται ο χρόνος εμφάνισης κάποιων μορφών αποφλοίωσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία κατά την προσομοίωση της καμπύλης ISO 834 [Σακκάς,2014].



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα καμπύλης ISO-834 και μορφές αποφλοίωσης [Σακκάς,2014]

Στα πρώτα 7-20 min της πυρκαγιάς και σε θερμοκρασία 150-300°C πραγματοποιείται η εκρηκτική αποφλοίωση προκαλώντας την απομάκρυνση στρώματος σκυροδέματος πάχους 25-100 mm.



Εικόνα 3.7: Αποφλοίωση του σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά. [Αγγελόπουλος et al,2005]

Παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος

- Ο ρυθμός ροής θερμότητας: Η πιθανότητα και το μέγεθος του φαινομένου της εκρηκτικής αποφλοίωσης αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ροής θερμότητας [Σακκάς,2014].
- Η αντοχή του σκυροδέματος: Η υψηλή αντοχή του σκυροδέματος συμβάλει στην εμφάνιση εκρηκτικής αποφλοίωσης ακόμα και σε χαμηλούς ρυθμούς ροής θερμότητας. Το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης (HPC), το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των σύγχρονων σηράγγων, έχει χαμηλότερη διαπερατότητα και είναι πιο ισχυρό (60-100 MPa θλιπτική αντοχή) από το κανονικό σκυρόδεμα (NSC), οπότε είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να αποφλοιωθεί μέσα στα πρώτα 20 min της πυρκαγιάς[Peng et al,2006].
- Το μέγεθος του θερμαινόμενου τμήματος: Η εκρηκτική αποφλοίωση συμβαίνει δυσκολότερα σε λεπτά κομμάτια εξαιτίας της περιεχόμενης υγρασίας που ελευθερώνεται πιο εύκολα με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται πιέσεις στους πόρους. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η εκρηκτική αποφλοίωση έχει λιγότερες πιθανότητες να συμβεί σε τεμάχια μεγάλου πάχους, μεγαλύτερου των 200-300 mm. Έτσι είναι πιο πιθανό να συμβεί σε μεσαίου μεγέθους τμήματα[Corier,1979].
- Το σχήμα του θερμαινόμενου τμήματος: Η εκρηκτική αποφλοίωση ευνοείται σε τμήματα με «απότομη» εναλλαγή της διατομής δηλαδή σε γωνίες και πιο συχνά σε οξείες γωνίες. Τα σχήματα που αποτρέπουν την εκρηκτική αποφλοίωση είναι οι επίπεδες επιφάνειες και οι στρογγυλεμένες γωνίες. Ο Khougy αναφέρει ότι η μορφή της σήραγγας επηρεάζει την ικανότητα της να είναι ανθεκτική στην πυρκαγιά. Ορθογώνιας διατομής σήραγγες του τύπου cut and cover μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως κατασκευές οι οποίες καταπονούνται από καμπτικές τάσεις. Κατά συνέπεια, η φωτιά σε

μα τέτοια κατασκευή θα προκαλέσει αποφλοίωση σκυροδέματος στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και σοβαρή μείωση της καμπτικής αντοχής του στοιχείου επηρεάζοντας την σταθερότητα της κατασκευής. Οι κυκλικής διατομής σήραγγες συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις ορθογωνικές αφού καταπονούνται από θλιπτικές τάσεις στον θόλο της σήραγγας οι οποίες αυξάνονται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς εξαιτίας της εμποδιζόμενης διαστολής που αναπτύσσεται κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια [Khoury,2000;Αγγελόπουλος et al,2005].

- Το ποσοστό της υγρασίας που περιέχει το σκυρόδεμα: Η αποφλοίωση είναι πιθανό να συμβεί σε σκυρόδεμα με υγρασία μεγαλύτερη του 2%-3% κατά βάρος (5% κατ'όγκο). Στην περίπτωση σκυροδέματος υψηλής αντοχής μπορεί να συμβεί εκρηκτική αποφλοίωση ακόμα και με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία 2.3-3.0% κατά βάρος λόγω του χαμηλού πορώδους και της χαμηλής διαπερατότητας του[Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Η διαπερατότητα: Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει σημαντικά την εκδήλωση της εκρηκτικής αποφλοίωσης διότι σχετίζεται με το ρυθμό απελευθέρωσης των ατμών [Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Οι πιέσεις των πόρων: Σε σκυρόδεμα με χαμηλή διαπερατότητα και υψηλό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας μπορούν να αναπτυχθούν σημαντικές πιέσεις πόρων. Το μέγεθος της πίεσης εξαρτάται από το επίπεδο κορεσμού των πόρων. Οι πιέσεις των πόρων που έχουν μετρηθεί σε συνθήκες προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι της τάξης του 1.4-2.1 N/mm²[Phan,2008], οι οποίες είναι μικρότερες από την εφελκυστική αντοχή του κανονικού σκυροδέματος και δεν είναι δυνατό να προκαλέσουν αστοχία από μόνες τους. Σε συνδυασμό όμως με άλλες πιέσεις ευνοούν την εμφάνιση εκρηκτικής αποφλοίωσης (εικόνα 3.5).
- Η ηλικία του σκυροδέματος: Καθώς αυξάνεται η ηλικία του σκυροδέματος μειώνεται το ποσοστό της υγρασίας που αυτό περιέχει, όποτε και η πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοίωσης[Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Η θλιπτική τάση: Αν αυξηθεί η θλιπτική τάση είτε εξαιτίας μείωσης του μεγέθους του τμήματος του σκυροδέματος είτε από αύξηση της φόρτισης τότε ευνοείται η δημιουργία εκρηκτικής αποφλοίωσης. Η θλιπτική τάση (άνω των 2 N/mm²) σε συνδυασμό με την υγρασία (άνω του 3.3% κατά βάρος) αυξάνουν την πιθανότητα να εμφανιστεί εκρηκτική αποφλοίωση [Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Ο τύπος των αδρανών του σκυροδέματος: Όταν τα αδρανή που περιέχονται στο σκυρόδεμα είναι αδρανή χαμηλής θερμικής διαστολής μειώνεται η πιθανότητα εκρηκτικής αποφλοίωσης. Η πιθανότητα για να συμβεί εκρηκτική αποφλοίωση εξαρτάται από το είδος του αδρανούς και αυξάνεται με την ακόλουθη σειρά αδρανών: ελαφροβαρές, βασάλτης, ασβεστόλιθος, πυριτικά αδρανή [Urtun, 2008;Khoury et al, 2005].

- Το μέγεθος των αδρανών: Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των αδρανών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα δημιουργίας εκρηκτικής αποφλοίωσης[Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Η ρωγμάτωση: Οι μικρορωγματώσεις ευνοούν την απελευθέρωση της υγρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ανακουφίζοντας τις πιέσεις των πόρων ενώ ταυτόχρονα διευκολύνουν τη διαδικασία της αποφλοίωσης διότι αποτελούν πηγή διάδοσης ρωγμών [Urtun,2008;Khoury et al,2000].
- Ο οπλισμός του σκυροδέματος: Το σκυρόδεμα που φέρει οπλισμό μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης εκρηκτικής αποφλοίωσης, ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει την αποφλοίωση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σημαντικός παράγοντας είναι η ύπαρξη του οπλισμού και όχι η ποσότητα αυτού για το αν θα προκληθεί η εκρηκτική αποφλοίωση. [Σακκάς,2014].

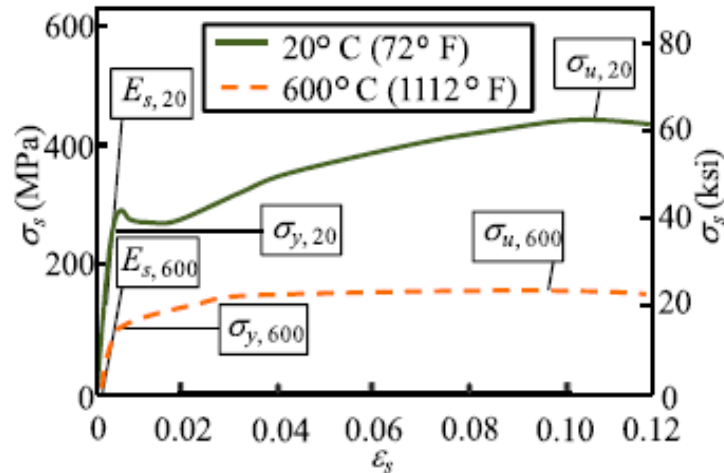
Συμπεράσματα

1. Η εκρηκτική αποφλοίωση είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης 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 της ύπαρξης εσωτερικών ρωγμών.
2. Κατασκευές από συνηθισμένο σκυρόδεμα με λιγότερο από 3% κατά βάρος υγρασία δεν έχουν την τάση να παρουσιάζουν το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης. Ωστόσο στις σήραγγες που χρησιμοποιείται σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης (HPC) είναι πιθανό να παρουσιαστεί εκρηκτική αποφλοίωση ακόμα και σε ποσοστά υγρασίας χαμηλότερα του 3% κατά βάρος λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του.

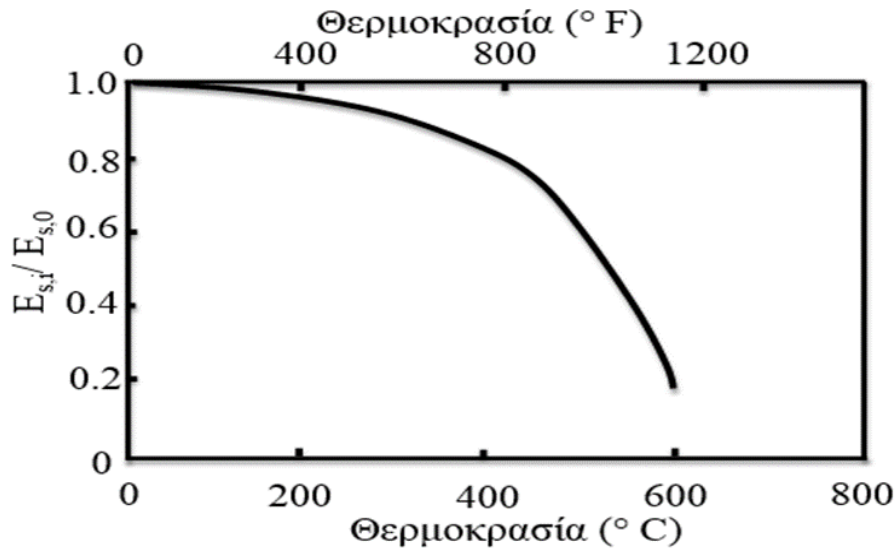
3.1.3. Ο οπλισμός του σκυροδέματος

Κρίσιμο στοιχείο αποτελεί ο χρόνος εντός του οποίου η θερμότητα μεταφέρεται στο σκυρόδεμα και αυξάνει τη θερμοκρασία του περιεχόμενου οπλισμού. Σημαντικό ρόλο ενέχουν τόσο το πάχος της επικάλυψης (πόσο απέχει ο χάλυβας οπλισμού από την επιφάνεια), όσο και το ίδιο το υλικό της επιφάνειας[www.fire-protection.gr]. Ο χάλυβας είναι ένα άκαυστο υλικό το οποίο δεν αντέχει για μεγάλη χρονική διάρκεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιθανό να εμφανισθούν φαινόμενα όπως ερπυσμός, χαλάρωση και μεταβολή της μικροδομής του χάλυβα. Οι μεταβολές που μπορεί να υποστεί ο χάλυβας κατά την έκθεση του σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατό να παραμείνουν ή όχι όταν επανέλθει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, γεγονός που εξαρτάται από την μέθοδο παραγωγής και την θερμοκρασία στην οποία εκτέθηκε. Τα χαρακτηριστικά των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος που επηρεάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες είναι, το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η τάση αστοχίας και η δυσκαμψία τους [Σακκάς,2014].

Στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του δομικού χάλυβα ASTM A36 για συνθήκες έκθεσης 20°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) και 600°C (υψηλή θερμοκρασία) είναι διακριτές οι μεταβολές ορισμένων χαρακτηριστικών του χάλυβα:



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβα ASTM A36 υπό υψηλές θερμοκρασίες [Davidson et al,2013]



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα σχετικών μεγεθών μέτρου ελαστικότητας για θερμοκρασίες 0°C και 600°C [Davidson et al,2013]

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.8 παρατηρείται μεταβολή στην τάση διαρροής του χάλυβα σε συνθήκες περιβάλλοντος ($\sigma_{y,20}$) είναι 248 MPa, ενώ η τάση διαρροής ($\sigma_{y,600}$) στους 600°C για το ίδιο υλικό μειώνεται περισσότερο από το μισό και φτάνει στην τιμή των 103 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας E_s που έχει τιμή 200 GPa σε συνθήκες περιβάλλοντος ελαττώνεται σημαντικά στους 600°C και φτάνει στην τιμή των 36 GPa [Davidson et al,2013]. Η τάση αστοχίας ($\sigma_{u,20}$) σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι περίπου 440 MPa, ενώ η αντίστοιχη

τιμή της στους 600°C φτάνει στα 152 MPa[Davidson et al,2013;Felicetti et al,2006]. Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα της εικόνας 3.9 όπου παρουσιάζεται το σχετικό μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασίες μεταξύ 0°C και 600°C. Το διάγραμμα δείχνει την «ικανότητα» του δομικού χάλυβα να διατηρεί ένα μεγάλο μέρος της δυσκαμψίας του (περίπου 90%) για θερμοκρασίες της τάξης των 300°C, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρείται σημαντική πτώση της δυσκαμψίας με ταχύ ρυθμό[Davidson et al,2013].

Οι χάλυβες των κατασκευών όπως ο χάλυβας που χρησιμοποιείται ως οπλισμός σκυροδέματος ή ως αγκύριο (οπλισμού), έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Σε κάποιες περιπτώσεις ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για τον οπλισμό σκυροδέματος μπορεί να προεντεταθεί, προκειμένου να προσφέρει μια θλιπτική δύναμη στη δοκό του σκυροδέματος. Σε μια τέτοια περίπτωση αν ο χάλυβας θερμανθεί σε μία θερμοκρασία περίπου 300°C, χάνει την τάση και σχεδόν όλη την αντοχή κάτι το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στις κατασκευές. Όταν ο χάλυβας χρησιμοποιείται ως αγκύριο για να ενισχύσει τη βραχομάζα, δεν μπορεί να εξασφαλισθεί κανενός είδους προστασία δεδομένου ότι τα αγκύρια έχουν εγκατασταθεί κάθετα προς την επιφάνεια του βράχου, με τα άκρα των αγκυρίων απροστάτευτα από τη θερμότητα [Σακκάς 2014].

Στον πίνακα 3.3 φαίνονται εξελικτικά οι μεταβολές των ιδιοτήτων διάφορων ποιοτήτων χαλύβων συναρτήσει της θερμοκρασίας πυρκαγιάς:

Πίνακας 3.3: Μεταβολές ιδιοτήτων διάφορων ποιοτήτων χαλύβων [www.fire-protection.gr]

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.}
Χάλυβες μπετόν	BSt 220/340	126	200	300	570
	420/500	240	200	100	500
	500/550	286	200	100	500
Χάλυβες Προεντάσεως	St 600/900 Έως 900/1000	605	300	300	500
	St 1100/1250 Έως 1450/1600	880	100	100	450
Σύρματα ή Καλώδια Προεντάσεως	St 1400/1600 Έως 1600/1800	990	100	100	350

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού. Το χαρακτηριστικό αυτό εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μήκους αγκυρώσεως και είναι οι εξής: α) ποιότητα σκυροδέματος (θλιπτική- εφελκυστική αντοχή), β) είδος και μέγεθος αδρανών μέσα στο σκυρόδεμα, γ) είδος καταπόνησης που ασκείται στο σκυρόδεμα, δ) επιφάνεια ράβδου οπλισμού, ε) επικάλυψη οπλισμού, στ) παρουσία εγκάρσιου οπλισμού και ζ) θερμοκρασία [Davidson et al,2013]. 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 % [Αγγελόπουλος et al,2005]. Σύμφωνα με το πρότυπο πυροπροστασίας, NFPA 502, έχει υιοθετηθεί η θερμοκρασία των 250°C ως θερμοκρασιακό όριο για τους δομικούς χάλυβες, πέραν του οποίου θεωρείται ότι χάνουν την δομική τους ακεραιότητα.

3.2. Μέθοδοι πυροπροστασίας σε σήραγγες

Η αντιμετώπιση των περιστατικών πυρκαγιάς σε σήραγγες απαιτεί τόσο την εφαρμογή μεθόδων πυροπροστασίας όσο και το συνδυασμό των μεθόδων αυτών με τα συστήματα διαχείρισης κινδύνου (π.χ. οι διαδικασίες εκκένωσης, οι διαδικασίες επικοινωνίας, η απαγωγή του παραγόμενου καπνού, κλπ.). Ο μηχανικός κρίνεται απαραίτητο να μεριμνήσει για το θέμα της πυροπροστασίας στη φάση σχεδιασμού του έργου επιλέγοντας τις κατάλληλες μεθόδους ενεργητικής και παθητικής πυροπροστασίας.

3.2.1. Ενεργητική πυροπροστασία σηράγγων

Η ενεργητική πυροπροστασία στις σήραγγες απαρτίζεται από το σύνολο των μέτρων που απαιτούνται για την καταστολή της πυρκαγιάς αλλά και τη διαχείριση του κινδύνου. Η ενεργητική πυροπροστασία περιλαμβάνει το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που εγκαθίσταται σε μία κατασκευή και χρησιμεύει στην έγκαιρη ανίχνευση μιας πυρκαγιάς ή στην άμεση αντιμετώπιση της πριν αυτή τεθεί εκτός ελέγχου.

Τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας που ευρέως χρησιμοποιούνται στις σήραγγες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα συστήματα εξαερισμού και τα συστήματα καταιονισμού. Η λειτουργία των συστημάτων αερισμού αποσκοπεί στην απομάκρυνση του καπνού και των τοξικών αερίων από τη σήραγγα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν καλύτερες οι συνθήκες για την απομάκρυνση των χρηστών της σήραγγας. Τα συστήματα αερισμού δεν αποτελούν μέσο καταστολής της φωτιάς αλλά παίζουν σημαντικό ρόλο σε συνδυασμό με τα συστήματα καταιονισμού [Σακκάς,2014]. Τη σημαντικότητα της ορθής λειτουργίας των συστημάτων αερισμού τόνισε η περίπτωση της πυρκαγιάς στη σήραγγα του Mont – Blanc (1^ο κεφάλαιο). Τα συστήματα καταιονισμού περιλαμβάνουν τα συστήματα

ψεκασμού, τα συστήματα κατακλυσμού και το σύστημα ομίχλης νερού. Η ενεργοποίηση αυτών των μέσων κατάσβεσης μπορεί να γίνεται είτε μέσω ενός χειριστή είτε αυτόματα (με αισθητήρες θερμοκρασίας ή καπνού). Ωστόσο η χρήση αυτών των συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας αποτελεί ένα θέμα συζήτησης στο οποίο αμφισβητείται η αποτελεσματικότητά τους [Carvel et al,2005]. Σύμφωνα με την παγκόσμια ένωση οδικών δικτύων PIARC τα προβλήματα που είναι δυνατό να παρουσιαστούν λόγω της χρήσης συστημάτων καταιονισμού συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Το νερό μπορεί να προκαλέσει έκρηξη στο καύσιμο ή οποιαδήποτε άλλη χημική διεργασία.
- Υπάρχει κίνδυνος ενώ έχει πραγματοποιηθεί η κατάσβεση της φωτιάς να προκληθεί έκρηξη λόγω εύφλεκτων αερίων που παράγονται.
- Το νερό που εξατμίζεται μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας στους χρήστες της σήραγγας.
- Η αποτελεσματικότητά τους είναι μικρή για πυρκαγιές που συμβαίνουν εντός των οχημάτων.
- Έχουν ακριβή συντήρηση.
- Ο χειροκίνητος χειρισμός τους είναι δύσκολος.
- Κατά την λειτουργία τους μειώνεται η ορατότητα μέσα στη σήραγγα.

Ως συνέπεια των όσων αναφέρθηκαν, οι ψεκαστήρες δεν πρέπει να λειτουργήσουν πριν εκκενωθεί η σήραγγα.



Εικόνα 3.10: Σύστημα ψεκασμού νερού [www.ultrafog.com]

3.2.2. Υφιστάμενοι τρόποι ενεργητικής πυροπροστασίας σηράγγων

Χρήση σταθερού συστήματος πυρόσβεσης (Fixed Fire Fighting System –FFFS)

Η χρήση των σταθερών συστημάτων πυρόσβεσης FFFS σε κτιριακά διαμερίσματα ή σε μηχανοστάσια πλοίων είναι διαδεδομένη σε όλο τον κόσμο την εποχή που διανύουμε. Παρόλα αυτά η χρήση των συστημάτων αυτών σε οδικές σήραγγες παραμένει υπό διερεύνηση, τη στιγμή που μόνο στην Ιαπωνία και σε μικρότερο βαθμό στην Αυστραλία έχουν εξοπλίσει οδικές σήραγγες με τέτοιου είδους συστήματα. Στις υπόλοιπες χώρες του κόσμου όπου η εγκατάσταση των συστημάτων FFFS αποφασίζεται μόνο κατά περίπτωση, υπάρχουν περίπου 20 σήραγγες στις οποίες υπάρχει εγκατεστημένο σταθερό σύστημα πυρόσβεσης ή πρόκειται να εγκατασταθεί στο άμεσο μέλλον. Αυτή η περιορισμένη χρήση των συστημάτων FFFS στις σήραγγες ανά τον κόσμο μπορεί να οφείλεται στην ιδιομορφία που παρουσιάζουν οι φωτιές σε οδικές σήραγγες, εξαιτίας αφ' ενός των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν οι υπόγειες υποδομές και αφ' ετέρου της φύσης και του μεγέθους των πυρκαγιών που μπορούν να συμβούν στις σήραγγες [CETU,2010].

Ερευνητική δραστηριότητα

- Ευρωπαϊκό πρόγραμμα UPTUN

Μετά από όσα συνέβησαν στις καταστροφικές πυρκαγιές στις οδικές σήραγγες του Mont Blanc και του Tauern το 1999, και σε αυτήν της σήραγγας του Gotthard το 2001, ένας αριθμός ερευνητικών προγραμμάτων με στόχο την βελτίωση του επιπέδου ασφάλειας στις σήραγγες ξεκίνησε σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

Ανάμεσα σε αυτά τα ερευνητικά προγράμματα, το UPTUN (sustainable and innovative UPgrading methods for the safety in existing TUNnels) ήταν το πρόγραμμα όπου μεταξύ άλλων ερευνήθηκε η πιθανότητα της χρήσης συστημάτων ψεκασμού σε σήραγγες. Το πρόγραμμα κοστολογήθηκε περίπου στα 13.000.000€ και συνεργάστηκαν για την διεξαγωγή του 14 χώρες. Δύο μεγάλης κλίμακας πειραματικές διαδικασίες έλαβαν χώρα στο πλαίσιο αυτού το προγράμματος [CETU,2010].

Επιπρόσθετα σε αυτές διαδικασίες, διεξήχθησαν ακόμα μερικές σειρές από πειράματα στη σήραγγα Runehamar της Νορβηγίας (εκτός λειτουργίας) και στην σήραγγα του Virgolo στην Ιταλία (σε λειτουργία). Αυτά τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρήση συστήματος ομίχλης νερού FFFS με υψηλή πίεση.

- 1 σειρά πειραμάτων: τρέχουσες τεχνολογίες μετριάσμού της πυρκαγιάς που ήδη υπάρχουν σε σήραγγες [CETU,2010].

Αυτή η σειρά πειραμάτων είχε εκτελεσθεί στην στοά δοκιμών της Deutsche Montan Technology (DMT) στο Dortmund της Γερμανίας. Η στοά αυτή έχει διατομή 9.7 m² και μήκος περί τα 150 m. Στόχος αυτής της σειράς πειραμάτων ήταν να αξιολογηθεί η επίδοση των τριών σταθερών συστημάτων καταιονισμού νερού για χρήση σε σήραγγα. Τα συστήματα αυτά ήταν τα εξής:

- σύστημα κουρτίνας νερού,
- ψεκαστήρες νερού με σταγονίδια μεγέθους 1 mm , αναφερόμενοι και ως sprinklers,
- σύστημα ομίχλης νερού με χαμηλή πίεση.

Τα πειράματα διεξήχθησαν με πυρκαγιά που προήλθε από την καύση ξύλων ή λιμνών επτανίου της οποίας ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας HRR ήταν της τάξης των 20 MW – 15 MW, ενώ η διαμήκης ροή του αέρα είχε ταχύτητα 1 ή 2,5 m/s.

- 2^η σειρά πειραμάτων: νέες καινοτόμες τεχνολογίες για προστασία από πυρκαγιά σε σήραγγες [CETU,2010].

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στην στοά της ασφαλιστικής εταιρείας IF, που βρίσκεται στα περίχωρα της πόλης του Όσλο της Νορβηγίας και έχει εμβαδόν εγκάρσιας διατομής 40 m² με μήκος που φτάνει τα 100 m. Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν η αξιολόγηση της επίδοσης δύο διαφορετικών καινοτόμων συστημάτων ψεκασμού νερού για χρήση σε σήραγγα:

- ένα σύστημα ομίχλης νερού με χαμηλή πίεση (< 12.5 bar),
- ένα σύστημα ομίχλης νερού με υψηλή πίεση (> 35 bar).

Τα πειράματα διεξήχθησαν με πυρκαγιά που προήλθε από την καύση ξύλων ή λιμνών επτανίου της οποίας ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας HRR ήταν της τάξης των 20 MW - 15 MW, ενώ η διαμήκης ροή του αέρα είχε ταχύτητα 1 ή 2.5 m/s.

- Πρόγραμμα SOLIT

Το ερευνητικό πρόγραμμα SOLIT (Safety Of Life In Tunnels) χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Οικονομικών και Τεχνολογίας της Γερμανίας και είχε ως αντικείμενο έρευνας την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός σταθερού συστήματος πυρόσβεσης FFFS (με υψηλή πίεση νερού) στο θέμα βελτίωσης της ασφάλειας στις σήραγγες [CETU,2010].

Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, μία σειρά δοκιμών έλαβε χώρα στην δοκιμαστική στοά του San Pedro de Anes στην Ισπανία. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της στοάς αυτής είναι τα ακόλουθα: πλάτος 9.8m, ύψος 5.2m, μήκος 600m. Ο διαμήκης και ημι-εγκάρσιος τρόπος αερισμού μπορούν να προσομοιωθούν (στην περίπτωση του ημι-εγκάρσιου αερισμού, υπάρχει μόνο απαγωγή καπνού, όχι τροφοδοσία με φρέσκο αέρα). Τα πειράματα

εκτελέσθηκαν σε πυρκαγιά λιμνών επτανίου παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα UPTUN ή πυρκαγιά ξύλινων παλετών καλυμμένη ή μη από μουσαμά [CETU,2010].

- Πειράματα Hagerbach (A86 σήραγγα)

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ομίχλης νερού στην A86 σήραγγα (ανοιχτή μόνο σε οχήματα ελαφρού τύπου), η κατασκευάστρια αλλά και λειτουργός εταιρεία Cofiroute διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων με χρήση συστήματος FFFS αλλά και χωρίς χρήση συστήματος FFFS στην στοά δοκιμών του Hagerbach στην Ελβετία [CETU,2010].

Δύο σειρές πειραμάτων έλαβαν χώρα προκειμένου να δοκιμαστεί το σύστημα ομίχλης νερού FFFS, στην μία περίπτωση κάνοντας χρήση μίας μέτριας πίεσης νερού στο σύστημα πυρόσβεσης (μεταξύ των 12 και 35 bar) και στην δεύτερη περίπτωση κάνοντας χρήση υψηλής πίεσης νερού στο σύστημα πυρόσβεσης (πάνω από 35 bar). Αυτά τα πειράματα ουσιαστικά στόχευαν στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας τέτοιων συστημάτων ως προς τον περιορισμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς μεταξύ ελαφρών οχημάτων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση [CETU,2010].

- Πρόγραμμα CETU (Tunnels Study Centre)

Σύμφωνα με το κέντρο μελετών που αφορούν σήραγγες CETU, έχει σχεδιαστεί ένα ερευνητικό πρόγραμμα δύο φάσεων προκειμένου να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες για τις επιπτώσεις που έχει η χρήση συστήματος FFFS σε πυρκαγιά που συμβαίνει σε σήραγγα. Η πρώτη φάση θα πραγματοποιηθεί σε περιορισμένης κλίμακας σήραγγα (με μια κλίμακα περίπου 1/3) στις εγκαταστάσεις του ιδρύματος CSTB (French scientific institute for building), και η δεύτερη φάση θα περιλαμβάνει πειράματα σε πραγματικές συνθήκες. Έως τώρα μόνο η πρώτη φάση έχει ολοκληρωθεί, τα πειράματα της οποίας έλαβαν χώρα σε ανοιχτού ή ημίκλειστου τύπου φωτιές από καύση λιμνών επτανίου ή ξύλινων παλετών. Στόχος του προγράμματος είναι να κατανοηθούν τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς καθώς και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος FFFS [CETU,2010].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων και την γνώση που έως τώρα είναι διαθέσιμη για τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει ένα σύστημα ομίχλης νερού FFFS το περιβάλλον της σήραγγας, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας 3.4:

Πίνακας 3.4: Επιπτώσεις ενός συστήματος ομίχλης νερού FFFS στις επικρατούσες συνθήκες στην σήραγγα σε περίπτωση πυρκαγιάς. [CETU,2010]

	Σίγουρη βελτίωση	Πιθανή βελτίωση	Αβέβαιη επίπτωση	Καμία επίπτωση	Σίγουρη χειροτέρευση
Θερμοκρασία και ακτινοβολία	Μείωση της θερμοκρασίας και της ροής ακτινοβολίας θερμότητας*				Μείωση του βιώσιμου ορίου θερμοκρασίας λόγω της της αυξημένης υγρασίας του αέρα
Εξάπλωση της φωτιάς	Περιορισμός εξάπλωσης της φωτιάς (στερεό καύσιμο)		Περιορισμός της εξάπλωσης της φωτιάς (υγρό καύσιμο σε κεκλιμένη σήραγγα)		
Ρυθμός έκλυσης θερμότητας της φωτιάς	Μείωση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας**				
Τοξικότητα αερίων		Μείωση της εκπομπής τοξικών αερίων**	Κίνδυνος παραγωγής οξέων	Απομάκρυνση των τοξικών αερίων	Απώλεια στρωματοποίησης αν αρχικά υπήρχε
Ορατότητα				Απομάκρυνση του καπνού	Περιορισμένη μείωση της ορατότητας όταν δεν υπάρχει καπνός Απώλεια στρωματοποίησης αν αρχικά υπήρχε

*αλλά με τροποποιημένο θερμοκρασιακό προφίλ

** δεν δείχνει να είναι επαρκής για να εξασφαλίσει την βιωσιμότητα από τον καπνό σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις

Μολονότι ένα σύστημα ομίχλης νερού FFFS αποτελεί μια σημαντική προστασία για το δόμημα της σήραγγας, δεν παρουσιάζει αξιοπιστία ανάλογη των μέτρων παθητικής πυροπροστασίας. Δεν κρίνεται σωστό να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση για την εκπλήρωση απαιτήσεων παθητικής πυροπροστασίας. Για να υφίσταται μία τέτοιου είδους θεώρηση πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η άρτια λειτουργία του συστήματος ανά πάσα στιγμή, γεγονός που δεν είναι εύκολο να συμβεί στην πράξη. Αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά προσεκτική συντήρηση του εξοπλισμού και στις συχνές δοκιμές που πρέπει να πραγματοποιούνται. Πράγματι στο σύστημα είναι δυνατό να εμφανιστούν διάφορες δυσλειτουργίες, όπως η βλάβη μίας αντλίας, η φραγή των ακροφυσίων νερού λόγω σκόνης, παγετού κ.α. Είναι επίσης σημαντικό να εντοπίζεται όσο το δυνατόν ακριβέστερα το σημείο εκδήλωσης της πυρκαγιάς έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί έγκαιρη ενεργοποίηση των συστημάτων καταιονισμού, πράγμα που σημαίνει άριστη λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιάς σε συνδυασμό με την

γρήγορη αντίδραση του χειριστή του συστήματος (αν πραγματοποιείται μέσω χειριστή και δεν λειτουργεί αυτόματα).

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος ομίχλης νερού FFFS σε μία σήραγγα πρέπει να αξιολογείται κατά περίπτωση, στο πλαίσιο μίας συνολικής ανάλυσης του συστήματος ασφαλείας της σήραγγας. Όλα τα χαρακτηριστικά και ο εξοπλισμός της σήραγγας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας αυτής. Μία τέτοια προσέγγιση απαιτεί τον ξεκάθαρο προσδιορισμό των στόχων ασφάλειας και την κατάλληλη επιλογή του χρόνου ενεργοποίησης του συστήματος. Τέλος, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι το κόστος εγκατάστασης ενός σταθερού συστήματος πυρόσβεσης FFFS (ομίχλης νερού) εκτιμάται στα 2.000.000€ ανά km σήραγγας και το κόστος συντήρησης στις 40.000 € ανά km σήραγγας το χρόνο (στο κόστος συντήρησης δεν συνυπολογίζεται το κόστος που σχετίζεται με το «κλείσιμο» της σήραγγας) [CETU,2010].

3.2.3. Παθητική πυροπροστασία σηράγγων

Τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας αποσκοπούν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών της τελικής επένδυσης της σήραγγας έτσι ώστε η κατασκευή να είναι ανθεκτική στην πυρκαγιά. Η εγκατάσταση τους πραγματοποιείται στην φάση της κατασκευής της σήραγγας και παραμένουν στο δόμημα της σήραγγας για όλη τη διάρκεια ζωής της. Στοχεύουν στη διατήρηση της ακεραιότητας των δομικών της στοιχείων (σκυρόδεμα, οπλισμός) ενάντια στην πυρκαγιά, ενώ δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση σε αντίθεση με τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας.

Ο ρόλος της παθητικής πυροπροστασίας είναι:

A) Η ελαχιστοποίηση του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας εντός του σκυροδέματος και του οπλισμού (εφόσον υπάρχει), έτσι ώστε να διατηρείται η δομική ακεραιότητα τόσο κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς όσο και μετά το πέρας της.

B) Η μείωση της πιθανότητας εμφάνισης εκρηκτικής αποφλοίωσης και απώλειας της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Οι μέθοδοι παθητικής πυροπροστασίας διακρίνονται σε εξωτερικές (μόνωση) και εσωτερικές (σχεδιασμός σκυροδέματος). Τα εξωτερικά συστήματα πυροπροστασίας περιλαμβάνουν την εφαρμογή ειδικών κονιαμάτων στην επένδυση ή στον οπλισμό της σήραγγας και την εφαρμογή πλακών πυροπροστασία σε όλη την περίμετρο της σήραγγας. Τα εσωτερικά συστήματα περιλαμβάνουν εφαρμογή ειδικών συνθέσεων σκυροδέματος, προσθήκη πρόσθετων σκυροδέματος, διαφοροποίηση στον τύπο των αδρανών καθώς και εφαρμογή ινών πολυπροπυλενίου ή χαλύβδινων ινών [Σακκάς,2014].

3.2.4. Υφιστάμενοι τρόποι παθητικής πυροπροστασίας σιηράγγων

Ερευνητική δραστηριότητα

Η πρώτη εκτεταμένη μεγάλης κλίμακας σειρά πειραμάτων όπου μετρήθηκαν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι θερμοκρασίες των παραγόμενων, κατά την φωτιά, αερίων από διάφορα μεγάλα οχήματα (επιβατικά αυτοκίνητα, βαγόνια τρένων και βαρέα φορτηγά οχήματα με ρυμουλκούμενο φορτίο) πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα EUREKA 499 – FIRETUN στο χρονικό διάστημα 1990-1992 [Lönnemark,2005]. Οι μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν για τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ποικίλουν μεταξύ 6 MW – 128 MW και η θερμοκρασία των αερίων στο ύψος της οροφής της σιηραγγας μετρήθηκε μεταξύ των 200°C και 1100°C [Lönnemark,2005]. Μία ακόμη μεγάλη σειρά δοκιμών για τη μελέτη του φαινομένου της πυρκαγιάς σε σιηραγγα έλαβε χώρα στη σιηραγγα του Memorial στη Μασαχουσέτη των Η.Π.Α το 1995. Σε αυτές τις δοκιμές η πηγή εκδήλωσης της πυρκαγιάς δεν αποτελείτο από οχήματα, αλλά από λίμνες υγρών καυσίμων διαφορετικών μεγεθών, το φορτίο των οποίων κυμαινόταν από 20 MW μέχρι 100 MW με τις μέγιστες θερμοκρασίες αερίων στο ύψος της οροφής της σιηραγγας να φτάνουν τους 1360°C. Ο κύριος στόχος των δοκιμών στη σιηραγγα του Memorial ήταν η διεξαγωγή έρευνας για τις επιπτώσεις που έχουν τα διαφορετικά συστήματα αερισμού στον έλεγχο του καπνού μέσα στη σιηραγγα [Σακκάς,2014].

Εξίσου σημαντικές σειρές πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στη σιηραγγα του Offenegg (Ελβετία, 1965) με τη χρήση δεξαμενών βενζίνης εμβαδού 6.6 έως 95 m², σε μία εκτός λειτουργίας σιδηροδρομική σιηραγγα στην Γλασκόβη (Ηνωμένο Βασίλειο, 1970), στη σιηραγγα του Zwenberg (Αυστρία, 1975) με τη χρήση δεξαμενών βενζίνης εμβαδού 6.8 έως 13.6 m², και στην Ιαπωνία το 1980 με τη σειρά πειραμάτων P.W.R.I όπου χρησιμοποιήθηκαν δεξαμενές βενζίνης εμβαδού 4 έως 6 m² αλλά και επιβατικά αυτοκίνητα και λεωφορεία [Lönnemark,2005]. Ωστόσο σε κανένα από τα πειράματα αυτά δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Στα πειράματα της σιηραγγας του Offenegg (Ελβετία, 1965) οι θερμοκρασίες των αερίων έφθασαν τους 1325°C. Σε μικρής κλίμακας πειράματα που έλαβαν χώρα στην Ολλανδία έγινε χρήση δοχείων βενζίνης σε σιηραγγα μήκους 8 m, ύψους 2 m και πλάτους 2 m, μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες των αερίων που κυμαίνονταν μεταξύ 900°C -1360°C. Η καμπύλη Rijkswaterstaat που αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας μελέτης έχει προκύψει από αυτή τη σειρά πειραμάτων. Η καμπύλη RWS αντιπροσωπεύει την χειρίστη περίπτωση σεναρίου πυρκαγιάς όπου πετρελαιοφόρο όχημα 300 MW ρυθμού έκλυσης θερμότητας καίγεται για 2 h [Lönnemark,2005].

Το 2002, ακόμη μία σειρά πειραμάτων έλαβε χώρα στη σιηραγγα του Benelux της Ολλανδίας. Στα πειράματα αυτά μετρήθηκαν ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι θερμοκρασίες των αερίων για πυρκαγιές με πηγή καύσης επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά και βαρέα φορτηγά οχήματα. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της πυρκαγιάς κυμαινόταν μεταξύ

4.5 MW – 26 MW και η μέγιστη θερμοκρασία των αερίων στο ύψος της οροφής της σήραγγας δεν ξεπερνούσε του 600°C [Σακκάς,2014].

Το 2003, ακολούθησε η σειρά δοκιμών μεγάλης κλίμακας στη σήραγγα του Runehamar (Νορβηγία), όπου συμμετείχαν φορτία οχημάτων βαρέως τύπου. Πρόκειται για δίδυμη οδική σήραγγα μήκους 1600 m διανοιγμένη σε σκληρό γνεύσιο, ύψους 6 m, πλάτους 9 m και κλίσης που ποικίλει μεταξύ του 0,5 % ανηφορικής κλίσης – 1 % κατηφορικής κλίσης (σε σχέση με την διεύθυνση αερισμού) [Lönnemark,2005]. Η σήραγγα βρίσκεται περίπου 40 km νότια από το Μόλντε (Νορβηγία) και δεν χρησιμοποιείται από τα τέλη του 1980. Συνολικά, τέσσερα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ψεύτικα φορτηγά οχήματα διαφορετικών φορτίων. Για την προστασία του βράχου και την εξασφάλιση ομαλών συνθηκών εργασίας τοποθετήθηκε μία εσωτερική ασπίδα με πλάκες προστασίας. Η αναλογία μάζας στο φορτίο ήταν 80% κυτταρίνη και 20% πλαστικό (προσομοίωση φορτηγού οχήματος). Οι τιμές του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας που μετρήθηκαν στις 4 δοκιμές ήταν μεταξύ των 70 MW και 203 MW ενώ οι θερμοκρασίες των αερίων έφτασαν το διάστημα μεταξύ των 1250°C – 1365°C [Lönnemark,2005]. Στον πίνακα 3.5 που ακολουθεί περιγράφεται η περιγραφή των φορτίων της πυρκαγιάς για κάθε δοκιμή:

Πίνακας 3.5: Περιγραφή των φορτίων και αποτελέσματα των μετρήσεων [Σακκάς,2014]

Δοκιμή	Φορτίο	Βάρος (kg)	Θεωρητική ενέργεια (GJ)	Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (MW)
T1	380 ξύλινες παλέτες/ 74 πλαστικές παλέτες	10911	240	203
T2	380 ξύλινες παλέτες / 240 στρώματα πολυουρεθάνης	6853	129	158
T3	Έπιπλα και φωτιστικά / 10 ελαστικά από καουτσουκ	8500	152	125
T4	600 κουτιά που περιέχουν κούπες πολυστερενίου/ 40 ξύλινες παλέτες	3120	67	70

Τα αποτελέσματα των δοκιμών Runehamar έδειξαν ότι ο ρυθμός ανάπτυξης τη θερμότητας ήταν σχεδόν γραμμικός σε όλες τις δοκιμές. Ο χρόνος από τη στιγμή της ανάφλεξης μέχρι το μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας της πυρκαγιάς ήταν μεταξύ 7 – 18.5 min [Σακκάς,2014]. Αξίζει να συμπληρωθεί ότι στη σήραγγα του Runehamar πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές για την αξιολόγηση των συστημάτων παθητικής πυροπροστασίας. Στις δοκιμές αυτές μελετήθηκε η συμπεριφορά των πλακών πυροπροστασίας Promatec [promat-tunnel.com] και η επικάλυψη με το κονίαμα Fire Barrier

135 [www.cetu.developement-durable.gouv.fr]. Τα δύο συστήματα παθητικής πυροπροστασίας ανταποκρίθηκαν επιτυχώς στις προσδοκίες των πειραμάτων.

Στα πλαίσια του προγράμματος UPTUN έλαβε χώρα ένα πλήρους κλίμακας πείραμα στη σήραγγα του Virgolo στην Ιταλία για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας ενός κονιάματος πυροπροστασίας. Για μήκος σήραγγας 4 m περίπου είχε εφαρμοσθεί το κονίαμα Fire Barrier 135 πάχους 50 mm. Για την πηγή της πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε ένα κοινό εμπορικό φορτηγό. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του κονιάματος μετρήθηκε μέχρι τους 1000°C κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία στην επένδυση δεν είχε ξεπεράσει τους 120°C [Σακκάς,2014]. Συνοψίζοντας δίνεται ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας 3.6 όπου σημειώνονται τα μεγάλης κλίμακας πειράματα πυρκαγιών που έχουν εκτελεσθεί σε σήραγγες μέχρι σήμερα και ο πίνακας 3.7 με αποτελέσματα μετρήσεων από τις δοκιμές αυτές:

Πίνακας 3.6: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγάλης κλίμακας πειραμάτων πυρκαγιάς σε σήραγγα [Lönnemark,2005]

Τοποθεσία	Αριθμός δοκιμών	Μήκος σήραγγας (m)	Ύψος (m)	Διατομή (m ²)	Αντικείμενα	Σχόλια, Παρατηρήσεις
Ofenegg, Ελβετία, 1965	11	190	6	23	Δεξαμενή πετρελαίου (6.6,47.5,95 m ²)	Μονή Σιδηροδρομική σήραγγα
Γλασκόβη, Ηνωμένο Βασίλειο, 1970	5	620	5.2	39.5	Κηροζίνη (1.44, 2.88, 5.75 m ²)	Εγκαταλελειμμένη σιδηροδρομική σήραγγα
Zwenberg, Αυστρία, 1975	30	390	3.9	20	Δεξαμενή πετρελαίου (6.8, 13.6 m ²), ξύλο, καουτσούκ	Εγκαταλελειμμένη σιδηροδρομική σήραγγα
TNO, Ολλανδία, 1979-80	2	8	2	4	Δεξαμενή πετρελαίου (~3 m ²)	Σήραγγα πειραμάτων
P.W.R.I, Ιαπωνία, 1980	16	700	~6.8	57.3	Δεξαμενή πετρελαίου (4, 6 m ²), επιβατικό αυτοκίνητο, λεωφορείο	Σήραγγα πειραμάτων
Σήραγγα Kakeihigasi P.W.R.I, Ιαπωνία 1980	8	3277	~6.8	58	Δεξαμενή πετρελαίου (4 m ²)	Σήραγγα σε λειτουργία
TUB-VTT, Φινλανδία, 1985	2	140	5	24-31	Ξύλινες κατασκευές	Εγκαταλελειμμένος υπόγειος θάλαμος

Repparfjord, Σουηδία, EUREKA 1990-92	21	2300	4.8-5.5	25-35	Ξύλινες κατασκευές, επιβατικά αυτοκίνητα, οχήματα βαρέως τύπου	Εγκαταλελειμμένη οδική σήραγγα
Memorial, ΗΠΑ, 1993-1995	98	853	4.4 and 7.9	36 and 60	Καύσιμο (4.5 - 45 m ²)	
Shimizu No.3, Ιαπωνία, 2001	10	1120	8.5	115	Δεξαμενή πετρελαίου (1, 4, 9 m ²), αυτοκίνητα, λεωφορείο	Νέα οδική σήραγγα
Benelux, Ολλανδία, 2001	14	872	5.1	50		Νέα οδική σήραγγα
Runehamar, Νορβηγία 2003	4	1600	5-6	32-47	κυτταρίνη, πλαστικό, έπιπλα	Εγκαταλελειμμένη οδική σήραγγα
Virgolo, Ιταλία 2005	3	860	6.5	45	Αυτοκίνητα	

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα δοκιμών για διαφορετικούς τύπους οχημάτων [Lönnermark,2005]

Όχημα	Αριθμός δοκιμών	Ενέργεια [GJ]	Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας [MW]	Μέσος μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας [MW]	Χρόνος μέχρι το μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας [min]
Επιβατικό αυτοκίνητο	15	2-8	1.5-8.5	4.1	10-38
2 αυτοκίνητα	7	5-10	5.6-10	7.6	13-55
3 αυτοκίνητα	1	-	8.9	8.9	33
Λεωφορείο	2	41	29-30	29.5	7-8
Όχημα βαρέως τύπου	10	10-244	13-202	-	8-18

Οι υφιστάμενοι τρόποι παθητικής πυροπροστασίας περιγράφονται στις 4 κατηγορίες που ακολουθούν:

1) Εφαρμογή τσιμεντοειδών κονιαμάτων στην επένδυση της σήραγγας

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου το οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να προστατευθεί από το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίσωσης σε περίπτωση που εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Έναν τρόπο προστασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος αποτελεί η επικάλυψη της τελικής επένδυσης της σήραγγας με τσιμεντοειδή κονιάματα που περιέχουν αδρανή υλικά όπως βερμικουλίτη. Συγκεκριμένα, ελαφροβαρή κονιάματα με βάση το τσιμέντο τύπου Portland και οργανικά ή ανόργανα ελαφροβαρή αδρανή μπορούν να παρέχουν αποτελεσματική προστασία στην επικάλυψη αποτρέποντας υπερβολική ζημιά και μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης. Η καλή αντίσταση τους στην φωτιά οφείλεται στην μειωμένη πυκνότητα και στην χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Ωστόσο λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας δεν αυξάνουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε υφιστάμενες σήραγγες όσο και σε νέες, υπό κατασκευή σήραγγες. Το στρώμα των κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται ως επικάλυψη σε σήραγγες έχει πάχος το οποίο δεν ξεπερνάει τα 50 mm λόγω του υψηλού κόστους των υλικών τους (Αγγελόπουλος et al,2005;Σακκάς,2014).

Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά φυσικών και τεχνητών ελαφροβαρών κονιαμάτων [Αγγελόπουλος et al,2005]

Τύπος αδρανών	Πυκνότητας σκυροδέματος (kg/m ³) (Ξήρανση με αέρα)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Θερμική αγωγιμότητα W/m ·K
Βερμικουλίτης	480	0.9	0.1-0.2
Περλίτης	520	3.0	0.1-0.2
Υλικό Leca (αργιλικό)	1300	14.0	0.3-0.6
Υλικό Aglite (αργιλικό)	1550	26.0	0.6
Υλικό Lytag (τέφρα καυσίμου)	1600	37.5	0.5
Αφρώδης σκωρία	2000	27.5	0.9

Η διαδικασία εγκατάστασης των πυρίμαχων κονιαμάτων ξεκινάει με την εφαρμογή ενός χαλύβδινου πλέγματος στην επένδυση της σήραγγας. Στη συνέχεια εκτοξεύεται το πυρίμαχο κονίαμα πάνω στο πλέγμα ανάλογα με το προβλεπόμενο πάχος (το πάχος εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας). Ωστόσο έχουν αναφερθεί έντονα προβλήματα σχετικά με τη συνάφεια των υλικών στην επένδυση της σήραγγας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα

πυρίμαχα κονιάματα πυροπροστασίας μπορούν να εφαρμοσθούν και σε άλλες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα όπως π.χ. γέφυρες. Η εγκατάσταση πυρίμαχων κονιαμάτων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.11 [Davidson et al,2013].



Εικόνα 3.11: Διαδικασία εκτόξευσης πυρίμαχου κονιάματος στην τελική επένδυση της σήραγγας [Δηλαβέρης,2004]

Το MEYCO Fireshield 1350 κονίαμα της εταιρείας BASF είναι το πιο γνωστό για την παθητική πυροπροστασία σηράγγων λόγω της ευρείας χρήσης του. Το κονίαμα αυτό αποτελείται από τσιμέντο Portland, ανόργανα αδρανή, νερό, ειδικά πρόσθετα και επιταχυντή. Η εφαρμογή του μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με εκτόξευση είτε με τη μορφή πυράντοχων πλακών. Το κονίαμα αυτό προστατεύει το σκυρόδεμα που εκτίθεται σε θερμοκρασίες >300°C από εκρηκτική αποφλοίωση και διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες [CETU,2008]. Σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων της ITA (International Tunneling Association) το υλικό αυτό ανταποκρίθηκε επιτυχώς στις δοκιμές για πυρκαγιά RWS του ερευνητικού κέντρου πυράντοχων υλικών TNO (Ολλανδία). Σε σήραγγες όπως του Mitholz της Ελβετίας και του Soderled της Σουηδίας έχει γίνει χρήση του υλικού MEYCO Fireshield 1350 ως μέτρο παθητικής πυροπροστασίας καθώς και σε μία συνδετήρια σήραγγα του οδικού δικτύου της Κακιάς Σκάλας στην Ελλάδα[CETU,2008;Σακκάς,2014]. Η ITA μέσω των δοκιμών της έχει εξάγει τον παρακάτω πίνακα 3.9 για της ιδιότητες του υλικού αυτού:

Πίνακας 3.9: Ιδιότητες υλικού πυροπροστασίας Meycο fireshield 1350 [Cetu,2008]

Φυσικές και Θερμικές Ιδιότητες του Meycο fireshield 1350	
Αντίδραση στη φωτιά (Γαλλική/Ευρωπαϊκή κατηγοριοποίηση)	Κατηγορία A1
Θερμική αγωγιμότητα	0.41 W/m·K
Ειδική θερμότητα	830 J/kg·K
Πυκνότητα	1200 – 1800 kg/m ³
Συντελεστής απορρόφησης	0.91
Υδαταπορροφητικότητα	18%
Μηχανικές ιδιότητες του Meycο fireshield 1350	
Μέτρο ελαστικότητας – E	7900 MPa
Αντοχή σε θλίψη	15 – 18 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό	1.5 MPa
Συμπληρωματικά στοιχεία	
Πορώδες	52%
pH (αλκαλικότητα)	< 12

Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας όπου παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια του σκυροδέματος με το κονίαμα, για διάφορα πάχη του κονιάματος (πίνακας 3.10).

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα δοκιμών για το υλικό Meycο Fireshield 1350 σε θερμική δοκιμή προσομοίωσης της καμπύλης RWS [Σακκάς,2014]

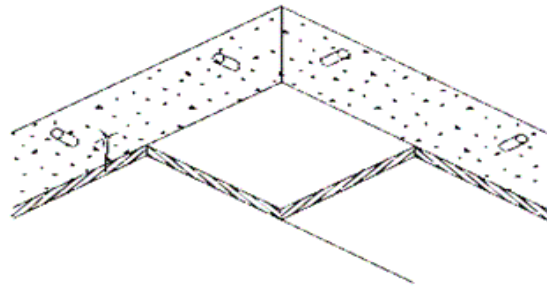
Πάχος κονιάματος (mm)	30 min (°C)	60 min (°C)	90 min (°C)	120 min (°C)
25	234	383	474	521
30	182	316	401	511
35	148	261	343	393
40	126	217	295	345
45	108	182	254	304
50	94	157	219	267
55	84	139	190	236
60	75	124	167	208
65	67	112	149	185
70	61	100	136	167
75	55	92	124	151

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η δοκιμή θεωρείται επιτυχημένη για πάχος μεγαλύτερο ή ίσο με 50 mm, όπου η θερμοκρασία έχει τιμές χαμηλότερες από τις απαιτούμενες. Για μεγαλύτερο πάχος κονιάματος η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια είναι χαμηλότερη ενώ αντίθετα για πάχη κονιάματος μικρότερα των 50 mm η θερμοκρασία είναι σε υψηλά επίπεδα, όχι ασφαλή για την κατασκευή. Με το πέρας της δοκιμής θα πρέπει να αποκατασταθεί το πάχος του κονιάματος το οποίο έχει εκτεθεί σε θερμοκρασία άνω των 600°C λόγω της αποσύνθεσης που έχει υποστεί[Δηλαβέρης,2004].

2) Χρήση πυράντοχων πλακών για τη δημιουργία πυράντοχης ασπίδας

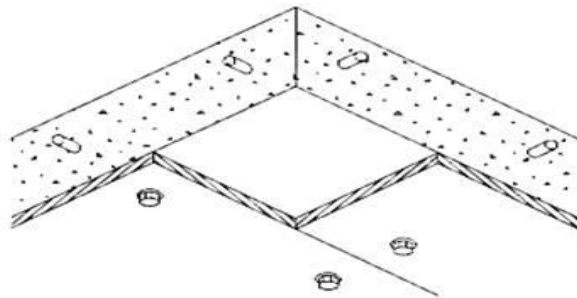
Μία πιθανή λύση του προβλήματος της παθητικής πυροπροστασίας θα μπορούσε να αποτελεί η χρήση στρωμάτων σκυροδέματος μεγάλου πάχους τα οποία θα θυσιάζονταν σε περίπτωση πυρκαγιάς χωρίς να καταρρεύσει η σήραγγα. Άλλη λύση θα μπορούσε να είναι η προσθήκη επικαλύψεων μεγάλου πάχους πυρίμαχων κονιαμάτων σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο τέτοιες λύσεις είναι ασύμφωρες τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής πλευράς λόγω της υπέρμετρης αύξησης του βάρους και του κόστους της κατασκευής. Έτσι τα τελευταία χρόνια, αρκετοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει συστήματα με πλάκες πυροπροστασίας που είναι ικανά να παρέχουν προστασία στη σήραγγα έναντι υψηλών θερμοκρασιών. 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 gr/cm³) ενώ η διαστολή μέσα σε νερό 100 % κορεσμού είναι περίπου max. 0,39 mm/m[Αγγελόπουλος et al,2005]. Επειδή βιδώνονται εξαλείφουν πιθανά προβλήματα λόγω αρνητικών πιέσεων και δεν απαιτούν κάποιο είδος συντήρησης. Η ορατή επιφάνεια μπορεί, εάν χρειασθεί να βαφεί, ενώ δεν υπάρχει απαίτηση γεμίματος των αρμών μεταξύ των πλακών με άλλο «συνδετήριο» υλικό. Εάν για οποιοδήποτε λόγο χρειασθεί να γίνει αντικατάσταση μιας πλάκας, η πλάκα αφαιρείται εύκολα και αντικαθίσταται με καινούργια. Η τοποθέτηση τους γίνεται χωρίς την απαίτηση διακοπής των εργασιών άλλων συνεργείων ενώ το τελικό αποτέλεσμα είναι μία ομοιόμορφη και λεία επιφάνεια. Τα σύγχρονα συστήματα επένδυσης σήραγγας συνήθως αποτελούνται από προκατασκευασμένες άκαμπτες πλάκες, οι οποίες είναι άκαυστες και περιέχουν πυρίμαχα συστατικά (π.χ. πυριτικά άλατα ασβεστίου, γύψο και ενισχύονται από ίνες για την αποφυγή της αποσύνθεσης τους)[Davidson et al,2013]. Οι πλάκες τοποθετούνται απευθείας η μία δίπλα στην άλλη και εφαρμόζονται με τρεις διαφορετικούς τρόπους[www.fire-protection.gr]:

1) Εφαρμογή ως παραμένων ξυλότυπος. Οι πλάκες τοποθετούνται πριν από την σκυροδέτηση και ανά τακτά διαστήματα τοποθετούνται μεταλλικά αγκύρια (καρφιά) στις πλάκες για την πλήρη σύνδεση με το σκυρόδεμα (εικόνα 3.12).



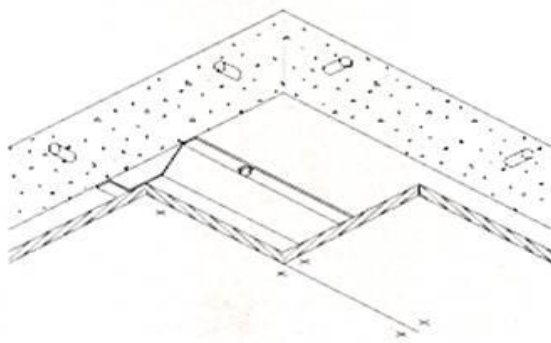
Εικόνα 3.12: Εφαρμογή ως παραμένον ξυλότυπος [www.fire-protection.gr]

2) 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 ξυλότυπου (εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13: Μηχανική στερέωση επί του σκυροδέματος [www.fire-protection.gr]

3) Με μηχανική στερέωση σε απόσταση από το σκυρόδεμα, με τη χρήση κατάλληλων μεταλλικών προφίλ (εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.14: Μηχανική στερέωση σε απόσταση από το σκυρόδεμα με μεταλλικά προφίλ [www.fire-protection.gr]

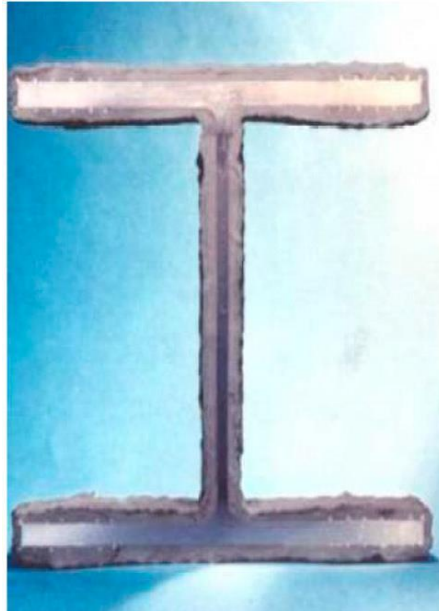


Εικόνα 3.15: Εφαρμογή πλακών πυροπροστασίας [www.promat-tunnel.com]

Η εταιρεία PROMAT κατασκευάζει και διαθέτει στο εμπόριο τέτοιου είδους πλάκες. Οι πλάκες PROMATECT – T είναι κατασκευασμένες από πυριτικό ασβέστιο και είναι άφλεκτες. Οι συγκεκριμένες πλάκες εξετάστηκαν και σε πλήρους κλίμακας δοκιμές στη σήραγγα Runehamar για να αξιολογηθεί το επίπεδο πυροπροστασίας που μπορεί να καλυφθεί. Σε επενδεδυμένο, με πλάκες PROMATECT- T, τμήμα σήραγγας μήκους 75 m έλαβε χώρα δοκιμή πυρκαγιάς με πηγή έναυσης ένα όχημα βαρέως τύπου. Η θερμοκρασία κυμαινόταν σε τιμές άνω των 1300°C στην περιοχή της φωτιάς ενώ η θερμοκρασία στην επένδυση της σήραγγας περιοριζόταν στους 200°C με τις πλάκες να παραμένουν άθικτες στο τέλος της δοκιμής [Davidson et al,2013;www.promat-tunnel.com;Σακκάς,2014]]. Τα συστήματα επένδυσης με πλάκες πυροπροστασίας χρησιμοποιούνται ευρέως στις ευρωπαϊκές οδικές σήραγγες, όπου έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες από 100 εγκαταστάσεις.

3) Εφαρμογή διογκωμένων επιστρωμάτων στον οπλισμό της επένδυσης

Η εγκατάσταση των διογκωμένων επιστρωμάτων πραγματοποιείται με την εκτόξευση τους στον οπλισμό της κατασκευής που κινδυνεύει να καταστραφεί όταν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα επιστρώματα αυτά όταν εκτίθενται σε θερμοκρασίες των 300°C ή μεγαλύτερες, μετασχηματίζονται, δημιουργώντας στρώματα καμένου άνθρακα. Το ανθρακώδες υλικό διαστέλλεται, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, και αυξάνει τον όγκο του 25-30 φορές. Το διογκωμένο πλέον υλικό αποκτά ισχυρές μονωτικές ιδιότητες και ιδιότητες πυραντίστασης, με την εφαρμογή ενός στρώματος πάχους μόλις 2mm. Τα διογκούμενα επιστρώματα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα ως υλικά πυροπροστασίας, ενώ δείχνουν ότι μπορούν να ανθίστανται σε θερμοκρασίες μέχρι και 1093°C. Η διογκούμενη εποξική βαφή Burn Barrier 46801 αποτελεί παράδειγμα τέτοιου επιστρώματος καθώς μπορεί να ανταποκριθεί σε άμεση έκθεση σε φλόγα και σε θερμοκρασίες άνω των 1093°C [Davidson et al,2013].



Εικόνα 3.16: Διογκωμένο επίστρωμα στον οπλισμό [Davidson et al,2013]

4) Χρήση ινών πολυπροπυλενίου για εσωτερική παθητική πυροπροστασία

Οι ίνες πολυπροπυλενίου εφαρμόζονται στο σκυρόδεμα κατά την διάρκεια της παρασκευής του και έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν την τάση που έχει το σκυρόδεμα προς αποφλοίωση και σε ορισμένες περιπτώσεις την αποτρέπουν. Η χρήση ινών πολυπροπυλενίου κατατάσσεται στις μεθόδους εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας αφού αποτελεί μέτρο που εφαρμόζεται κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, όπως και ο σχεδιασμός των διάφορων μιγμάτων του σκυροδέματος με τη χρήση ειδικών πρόσθετων.

Ο Alfred Haack αναφέρει σε μελέτη που πραγματοποίησε ότι σε δοκιμή που έγινε χρήση ινών πολυπροπυλενίου σε ποσότητα 2 με 3 kg/m³ σε σκυρόδεμα με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά δεν παρατηρήθηκε εκρηκτική αποφλοίωση στην επιφάνεια του σε θερμοκρασία 1200°C (εικόνα 3.17) [Haack,2004;Davidson et al,2013]. Ως τώρα, δύο μοντέλα που περιγράφουν τον τρόπο λειτουργίας των ινών πολυπροπυλενίου είναι τα επικρατέστερα. Σύμφωνα με το πρώτο οι ίνες τήκονται σε θερμοκρασία των 160°C σχηματίζοντας διόδους μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, επιτρέποντας έτσι στην περιεχόμενη υγρασία να διαφύγει σε μορφή υδρατμών. Αυτό πραγματοποιείται χωρίς να δημιουργείται εσωτερική πίεση αλλά προκαλώντας υψηλή διαπερατότητα και αποτρέποντας την εκρηκτική αποφλοίωση. Το δεύτερο μοντέλο υποστηρίζει ότι οι μικρο-ρωγμές που δημιουργούνται γύρω από τις ίνες συμβάλλουν στην μείωση της πίεσης του ατμού [Clement et al,2011].

Κρίσιμη παράμετρος για το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας αποτελεί η ποσότητα των ινών πολυπροπυλενίου που εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη θερμική αντίσταση πρέπει να επιτευχθεί τόσο μεγαλύτερη ποσότητα εφαρμόζεται. Για παράδειγμα για την αντίσταση σε μία πυρκαγιά τύπου ISO-834 απαιτείται ποσότητα ινών $1\text{kg}/\text{m}^3$, ενώ για αντίσταση σε πυρκαγιά τύπου RWS η απαιτούμενη ποσότητα μπορεί να φτάσει τα $3\text{ kg}/\text{m}^3$. Ωστόσο η παρασκευή του σκυροδέματος με μεγάλες ποσότητες ινών δυσκολεύει την άντληση και την εφαρμογή του [Σακκάς,2014].



Εικόνα 3.17: Έκθεση πλάκας σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου σε θερμοκρασία 1200°C . [Haack,2004]

Για την αξιολόγηση της χρήσης των ινών πολυπροπυλενίου ως μέσο εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας εξετάζονται οι ακόλουθοι παράγοντες: ο τύπος, η διάμετρος και το μήκος των ινών, η ποσότητα των ινών ανά κυβικό μέτρο, ο τύπος των αδρανών, ο σχεδιασμός του σκυροδέματος, η διαπερατότητα του σκυροδέματος, η περιεκτικότητα σε υγρασία του σκυροδέματος, ο ρυθμός ροής της θερμότητας και η μέγιστη θερμοκρασία. Παρόλου που οι ίνες πολυπροπυλενίου είναι ένας ακόμη μηχανισμός για την αποφυγή της αποφλοίωσης δεν προστατεύουν το σκυρόδεμα και τον οπλισμό του από τις αρνητικές επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών. Εκτός αυτού, η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται απότομα λόγω της τήξης των ινών, ενώ η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή μετά τη φωτιά είναι ιδιαίτερα χαμηλή, γεγονός που παραπέμπει σε περαιτέρω επισκευές στην κατασκευή. Εκτός από την εφαρμογή ινών πολυπροπυλενίου είναι δυνατό να σχεδιαστεί το μίγμα του σκυροδέματος με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πυράντοχο. Συγκεκριμένα έχουν παρασκευαστεί πυράντοχα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με μίξη κατάλληλων αναλογιών τσιμέντου Portland τύπου Ι, πορσελάνης, σκωρίας υψικαμίνων και ινών πολυπροπυλενίου σε αναλογία 0.1% κ.ο [Σακκάς,2014].



Εικόνα 3.18: Ίνες πολυπροπυλενίου [<http://volzhsky-vgg.all.biz/el/polypropylenoy-nes-g3099080>]

Σύμφωνα με συστάσεις από την επιτροπή πυροπροστασίας οδικών σιηράγγων (Fire Protection in Tunnels) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Σκυροδέματος E.F.N.A.R.C, την διεθνή επιτροπή της FIB (Fire Design of Concrete Structures) και το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα «Upgrading Tunnels»(UPTUN) δόθηκαν οι συνθήκες παθητικής πυροπροστασίας που πρέπει να εξασφαλίζει η κατασκευή της σιηράγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες με την παρακάτω σειρά προτεραιότητας: α) αποφυγή της άμεσης κατάρρευσης της κατασκευής και της εκρηκτικής αποφλοίσωσης του σκυροδέματος προκειμένου να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος στους χρήστες για να την εγκαταλείψουν, και ως εκ τούτου η διατήρηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος σε θερμοκρασίες κάτω των 350°C ,β) η αποφυγή της κατάρρευσης προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των σωστικών συνεργείων και των συνεργείων πυρόσβεσης που εισέρχονται σε αυτήν, μετά την εκκένωση της από του χρήστες και γ) δυνατότητα εκ των υστέρων επισκευής της με το μικρότερο δυνατό κόστος προκειμένου αυτή να επανέλθει στην κατάσταση που βρισκόταν πριν την πυρκαγιά διατηρώντας τη στατική και αντισεισμική λειτουργία της στο ακέραιο[UPTUN,2008]. Ωστόσο η συντριπτική πλειοψηφία των σιηράγγων παγκοσμίως δεν περιέχουν παθητική πυροπροστασία που να ανθίσταται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ λίγες από αυτές διαθέτουν συστήματα ενεργητικής πυροπροστασίας [Carvel et al,2005].

Τέλος ακολουθούν δύο συγκεντρωτικοί πίνακες όπου γίνεται αναφορά για τα διαθέσιμα εμπορικά υλικά παθητικής πυροπροστασίας αλλά και τις μεθόδους επίτευξης εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας:

Πίνακας 3. 11: Ιδιότητες εμπορικών υλικών παθητικής πυροπροστασίας [Σακκάς, 2014;www.cetu.developpement-durable.gouv.fr;www.sika.com]

Κονίαμα/ Πλάκα	Αναπόκριση σε θερμοκρασιακές καμπύλες	Θερμική αγωγιμότητα ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) στους 300 Κ	Ειδική θερμότητα ($J/kg \cdot K$) στους 300 Κ	Πυκνότητα (kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Αντοχή σε θλίψη/ εφελκυσμό (MPa)	Πορώδες %	Σκληρότητα	PH (αλκαλι κότητα)	Συνάφεια με το σκυρόδεμα (MPa)	Υδαταπορρο- φητικότητα
Cye Feu 6	ISO 834	0.26	880	850	-	-	-	-	-	-	-
Fendolite MII	ISO 834, HC, HCM,RWS	0.19	-	775	-	-	-	-	12-12.5	-	-
Pyrocrete 241	ISO 834, HC	0.12	1500	881	-	6/	-	-	-	-	-
IR 4020	ISO 834, HC, HCM	0.26	880	850	-	-	-	-	-	4.17	-
Sikacrete 213	ISO 834, HC, HCM,RWS	0.23	-	-	-	2/	-	-	12-12.5	-	-
FireBarrier 135	ISO 834, HC, HCM, RABT, RWS	0.185	765	1150	4050	9/0.8	66%	90 shore A	8	1.1	49%
Meyco Fireshield 1350	ISO 834, HC, HCM, RABT, RWS	0.41	830	1200-1800	7900	15-18/1.5	52%	-	<12	2	18%
Promatec- Πλάκα	ISO 834, HC, HCM, RABT, RWS	0.175	-	940	-	9.3	-	-	12	-	-
PST- system	ISO 834, HC, HCM, RABT, RWS	0.13	1050	800	1840	0.5/0.5	2%	90 shore A	13	>0.5	-

Πίνακας 3.12: Μέθοδοι εσωτερικής παθητικής πυροπροστασίας [UPTUN, 2008]

Μέθοδος	Αποτελεσματικότητα	Σχόλια
Αερακτικά πρόσθετα στο σκυρόδεμα	Αποτελεσματικότητα όταν υπάρχει χαμηλό ποσοστό υγρασίας	Μειώνουν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
Περιορισμός υγρασίας στο σκυρόδεμα	Μειώνει την πίεση στο εσωτερικό των πόρων του σκυροδέματος	Στις σήραγγες η υγρασία είναι υψηλή και δύσκολο να ελεγχθεί
Περιορισμός θλιπτικής αντοχής	Μειώνει την πίεση της εκρηκτικής αποφλοίωσης	Αντιοικονομική λύση που οδηγεί σε επιλογή μεγαλύτερων διατομών
Επιλογή αδρανών	Η χρήση αδρανών χαμηλής διαστολής με μικρό μέγιστο κόκκο είναι αποτελεσματική	Σε σκυροδέματα με υψηλή υγρασία δεν αποφεύγεται η εκρηκτική αποφλοίωση
Χρήση σπλισμού	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοίωσης	Δεν είναι πάντα αποτελεσματική μέθοδος όπως για παράδειγμα στη σήραγγα της Μάγχης
Χρήση βοηθητικού σπλισμού	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοίωσης	Η χρήση τους είναι δύσκολη σε λεπτές διατομές
Μεταλλικές ίνες	Μειώνει την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοίωσης	Αποτελεσματική λύση σε χαμηλές θερμοκρασίες
Επιλογή διατομής	Λεπτότερες διατομές μειώνουν την καταστροφή λόγω εκρηκτικής αποφλοίωσης	Λύση όχι πάντα εφικτή

3.3. Τρόποι και υλικά για την επισκευή σήραγγας

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 σπλισμένο σκυρόδεμα. Η πιθανότητα κατάρρευσης εξαρτάται από την αστοχία της επένδυσης, οπότε και χάνει την ικανότητα να φέρει εξωτερικά φορτία, σε συνδυασμό με τον τύπο του εδάφους-βράχου γύρω από τη σήραγγα. Για παράδειγμα σε μια σήραγγα σε βράχο ή cut and cover τύπου σήραγγα, η ευστάθεια της δεν θα επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την πυρκαγιά αν και η επένδυση της σήραγγας μπορεί να έχει υποστεί σοβαρή ζημιά. Εντούτοις, μια σήραγγα με χαλύβδινο πλαίσιο για την υποστήριξη του εδάφους ή μια καταδυόμενη σήραγγα έχει υψηλή πιθανότητα να καταρρεύσει από την πυρκαγιά [Αγγελόπουλος et al,2005].

Για την επισκευή σηράγγων που έχουν υποστεί βλάβη σε τμήματα της επένδυσης λόγω πυρκαγιάς χρησιμοποιείται η τεχνική του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι λόγοι που το

καθιστούν σαν την καλύτερη λύση για την επισκευή της σήραγγα είναι τα παρακάτω χαρακτηριστικά του [Αγγελόπουλος et al,2005]:

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 δύο διαδικασίες ανάμειξης: η ξηρή και η υγρή ανάμειξη. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο τεχνικές έχει να κάνει με το σημείο στο οποίο προστίθεται το νερό. Στην ξηρή ανάμειξη αρχικά αναμειγνύονται το τσιμέντο με τα αδρανή και το νερό εισάγεται με πίεση στο ακροφύσιο όπου ελέγχεται από τον χειριστή, ενώ στην υγρή το νερό προστίθεται στον αναμικτήρα οπότε μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια και να αναμειγνύεται πλήρως με τα άλλα συστατικά. Στην περίπτωση επισκευής σε σήραγγα, όπου ο χώρος αερίζεται επαρκώς, προτιμάται η υγρή διαδικασία επειδή η σκόνη και το τσιμέντο που διαφεύγουν προς τον περιβάλλοντα χώρο είναι σημαντικά μειωμένα σε σχέση με την ξηρή διαδικασία. Επίσης, το κόστος παραγωγής ενός m^3 εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι σημαντικά μικρότερο στην περίπτωση υγρής διαδικασίας επειδή το ανακλώμενο υλικό είναι λιγότερο [Αγγελόπουλος et al,2005]. 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 στην κυκλοφορία όσο πιο γρήγορα γίνεται.

Ο εξοπλισμός που συνίσταται να χρησιμοποιηθεί σε σήραγγα με μεγάλα τμήματα για επισκευή ($>30 m^2$), με την μέθοδο της εκτόξευσης, είναι τα *spray robots*, τα οποία αντικαθιστούν τον χειριστή του ακροφυσίου [Αγγελόπουλος et al,2005]. 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 στον τηλεχειρισμό του εξοπλισμού 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 [Αγγελόπουλος et al,2005]:

A) Ολοκληρωμένα ρομπότ: περιλαμβάνουν μεταφορέα με βραχίονα, σταθμό ελέγχου και σωλήνες. Το πλεονέκτημα του είναι η αυτόνομη λειτουργία του.

B) Μετακινούμενα ρομπότ: περιλαμβάνουν βραχίονα και σε μερικές περιπτώσεις μια πλατφόρμα χειρισμού που προσαρμόζεται σε ένα μεταφορέα κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης.

Προετοιμασία επιφάνειας

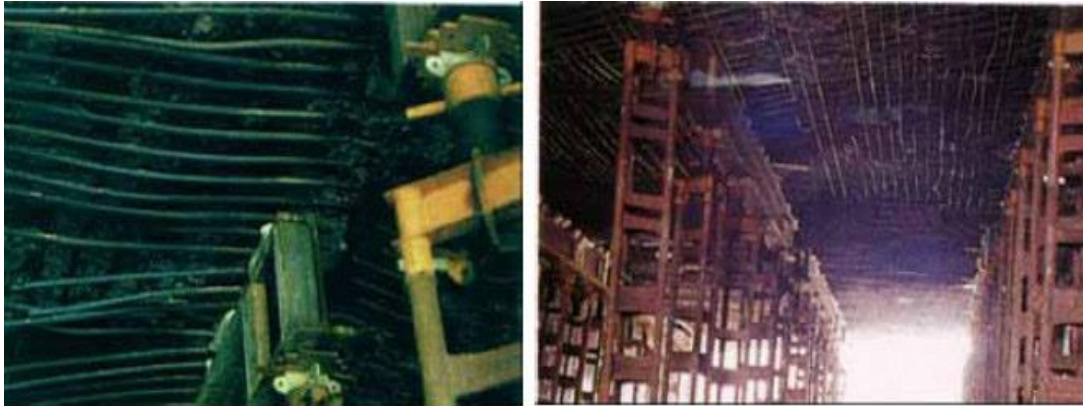
Ανάλογα με το βαθμό βλάβης, το υπόστρωμα στο οποίο θα εκτοξεύσουμε το σκυρόδεμα θα είναι:

A) στην περίπτωση πλήρους κατάρρευσης της επικάλυψης, το έδαφος (ή βράχος). Τα σαθρά τμήματα πρέπει να αφαιρούνται για να αποκαλύπτεται πιο στερεή 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 σκυρόδεμα 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 σκυρόδεμα να μείνει ανεπηρέαστο από την δράση του νερού λόγω διήθησης, υδροστατικής πίεσης ή διάβρωσης [Αγγελόπουλος et al,2005].

B) στην περίπτωση αποκόλλησης τμημάτων της επικάλυψης, το παλαιό οπλισμένο σκυρόδεμα. 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 [Αγγελόπουλος et al,2005]. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι:

- Υδροβολή
- Αμμοβολή
- Ψεκασμός με απολιπαντή
- Ψεκασμός διαλύματος υδροχλωρικού οξέος (HCl)
- Με σμιριδόχαρτο (προσαρμοσμένο σε τροχό)

Πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση σοβαρής ζημιάς στον φέροντα οργανισμό τοποθετούμε σύστημα προσωρινής αντιστήριξης για να αποφευχθεί ο κίνδυνος κατάρρευσης μέχρι το πέρας των εργασιών επισκευής (εικόνα 3.19).



Εικόνα 3.19: Μέτρα προσωρινής υποστήριξης στο Summit Tunnel (Αγγλία), σοβαρή αποφλοίσωση [Αγγελόπουλος et al,2005].

Επιλογή σύνθεσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος

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.

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, βασαλτικά, 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 χημικού ενεργού πυριτίου το οποίο βελτιώνει την χημική συνάφεια με τον τσιμεντοπολτό. Επίσης η διάμετρος των αδρανών συνίσταται να είναι μικρότερη από 10 mm [Αγγελόπουλος et al,2005].

β) 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 επανυδατώνεται διασταλτικά και καταστρεπτικά κατά την διάρκεια ψύξης και έκθεσης σε υγρασία. Ο λόγος C/S μειώνεται στην πράξη με χρήση σκουριάς (slag), κονιοποιημένης τέφρας καυσίμου (Pulverized Fuel Ash-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 λόγω 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 συνίσταται να είναι μεταξύ 3-4%[Αγγελόπουλος et al,2005].

γ) 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 παρουσιαστούν φαινόμενα εκρηκτικής αποφλοΐωσης. Οι ίνες πολυπροπυλενίου λειώνουν περίπου στους 160°C δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό κανάλια διόδου στην μάζα του σκυροδέματος για να διαφεύγει η υγρασία. Επίσης, η μικροσκοπική ανάλυση έχει αποκαλύψει την ύπαρξη μικρορωγμων γύρω από τις ίνες οι οποίες συμβάλουν στην μείωση των τάσεων. Τα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι σήμερα δείχνουν ότι η πιο αποδοτική μορφή ινών είναι η μονή ίνα διαμέτρου 18 μm (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 αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα[Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.20: Πυροπροστασία σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου [Αγγελόπουλος et al,2005].

Εφαρμογή μεθόδων πυροπροστασίας κατά την επισκευή

Κατά την επισκευή της σήραγγας θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι υπάρχει περίπτωση να ξεσπάσει πυρκαγιά και στο μέλλον. Συνεπώς, εκτός της επισκευής και ενίσχυσης πρέπει η σήραγγα να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές πυροπροστασίας. Η ενίσχυση αυτή μπορεί να γίνει σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε σχετική υποενότητα αυτού του κεφαλαίου 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.

Επισκευή στη σήραγγα του Tauern (Αυστρία)

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. Η οροφή για τους δύο αεραγωγούς στον θόλο της σήραγγας αποτελείτο από 150 mm έγχυτου οπλισμένου σκυροδέματος. 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 ώρες. Η σήραγγα έχει μήκος 6400 m [Αγγελόπουλος et al,2005].

ZHMIES

A) Πλαϊνά τοιχώματα

Στην περιοχή όπου παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες το άοπλο σκυρόδεμα της εσωτερικής επένδυσης αποκολλήθηκε σε βάθος 400 mm για 100 m μήκους σήραγγας. Σε μήκος 450 m παρακείμενα στην παραπάνω περιοχή των 100 m υπήρχε αποκόλληση σε βάθος 50 mm. Περίπου 600 m³ θραυσμάτων αποκολλημένου σκυροδέματος έπρεπε να απομακρυνθούν [Αγγελόπουλος et al,2005].

B) Οροφή

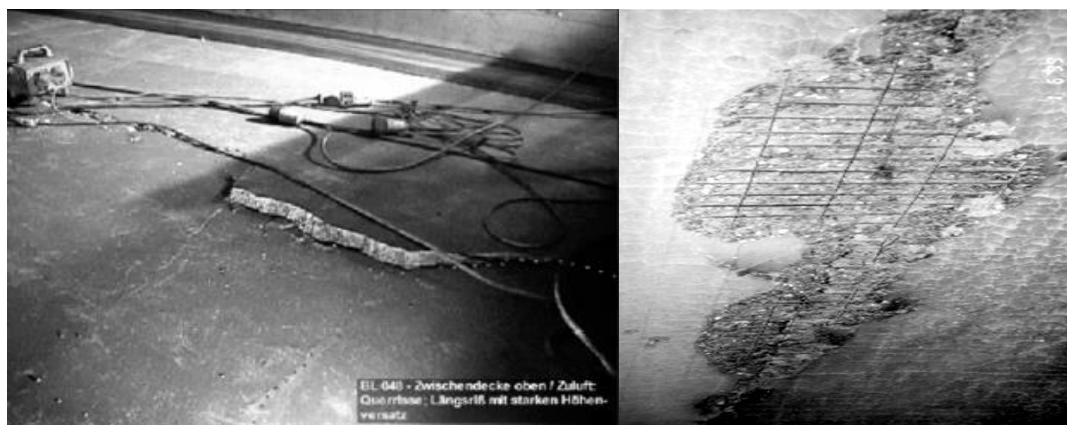
Το τμήμα της οροφής που κατέρρευσε έδειξε ότι η ανάρτηση είχε παραμείνει άθικτη ενώ η υποστήριξη των πλαϊνών τοιχωμάτων αστόχησε εξαιτίας του βάθους της αποφλοίωσης του σκυροδέματος. Επομένως αρκετή προσοχή δόθηκε στις παρειές της σήραγγας. Επίσης, σε τμήμα της οροφής που δεν έπεσε και συγκεκριμένα στον αγωγό καθαρού αέρα εντοπίστηκε ρωγμή (εικόνα 3.21). 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 3.22) [Αγγελόπουλος et al,2005].

ΕΠΙΣΚΕΥΗ

A) Αρχικά μέτρα ασφαλείας

Πριν την εκκίνηση κάθε εργασίας επισκευής εφαρμόστηκαν τα παρακάτω μέτρα ασφαλείας (εικόνες 3.23,3.24) [Αγγελόπουλος et al,2005]:

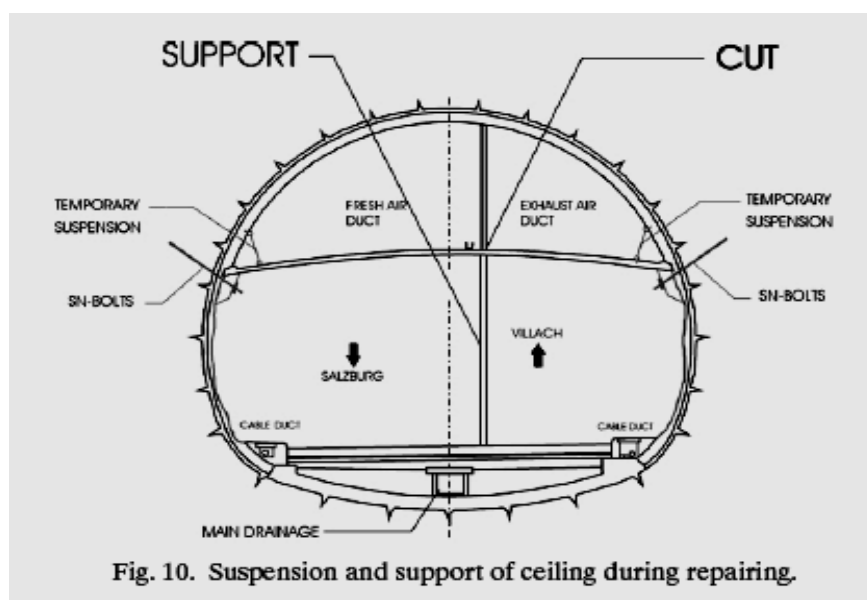
- 1) Υποστήριξη της οροφής στα σημεία σύνδεσης με τα πλαϊνά τοιχώματα.
- 2) Υποστήριξη έναντι κατάρρευσης τμημάτων της εσωτερικής επένδυσης, για την αποφυγή της υποχώρησης της σε περιοχές που η αποφλοίωση παρουσιάστηκε σε μεγάλο βαθμό.



Εικόνα 3.21,Εικόνα 3.22:Ρωγμή σε τμήμα της οροφής (αριστερά), αποφλοίωση σκυροδέματος (δεξιά) [Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.23: Υποστήριξη της οροφής στα σημεία σύνδεσης με τα πλαϊνά τοιχώματα [Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.24: Ανάρτηση και υποστήριξη της οροφής κατά την επισκευή [Αγγελόπουλος et al,2005]

B) Εργασίες προετοιμασίας

Η οροφή έπρεπε να αφαιρεθεί για ένα μήκος πάνω από 300 m. Για να γίνει αυτό, έπρεπε αρχικά να κοπεί ο διαχωριστικός τοίχος με την χρήση ειδικού πριονιού(εικόνα 3.25). Στα πλαϊνά τοιχώματα τα 50 mm του σκυροδέματος που είχε απομείνει αφαιρέθηκαν με υδροβολή υψηλής πίεσης (1400 bars) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μια καλή επιφάνεια για την νέα επένδυση από οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα(εικόνα 3.26)[Αγγελόπουλος et al,2005].



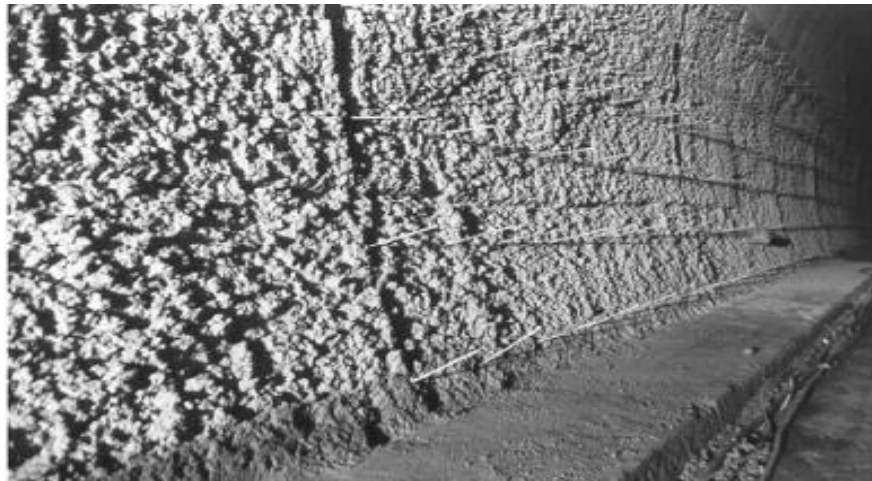
Εικόνα 3.25: Εργασίες για την αφαίρεση τμήματος της οροφής [Αγγελόπουλος et al,2005]



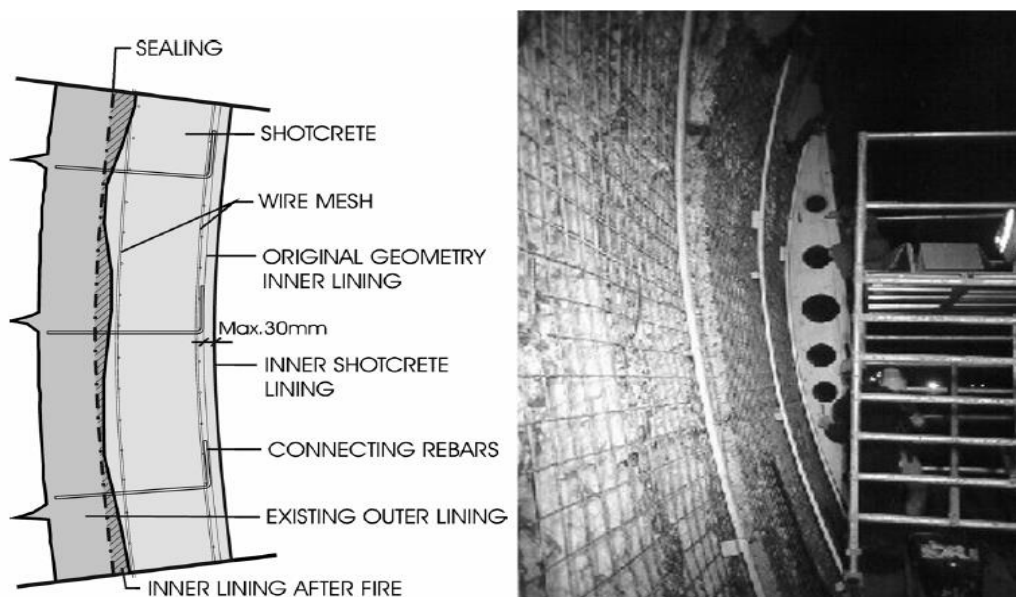
Εικόνα 3.26: Εργασίες για τον καθαρισμό της επιφάνειας του σκυροδέματος [Αγγελόπουλος et al,2005]

Γ) Εσωτερική επένδυση πλαϊνών τοιχωμάτων σήραγγας

Η κατασκευή της νέας εσωτερικής επένδυσης φαίνεται στις εικόνες 3.28,3.29. Αποτελείται από συνδετικές ράβδους τοποθετημένες ανά 750 mm, και στις δύο διευθύνσεις, στο σκυρόδεμα της εξωτερικής επένδυσης που είχε απομείνει. Η σήραγγα στην περιοχή αυτή δεν αντιμετώπιζε προβλήματα λόγω ροής νερού και για αυτό δεν χρειάστηκε 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 3.27). Επίσης τοποθετήθηκαν μία ή δύο στρώσεις από πλέγμα σπλισμού και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εκτόξευση του σκυροδέματος (εικόνα 3.28)[Αγγελόπουλος et al,2005].



Εικόνα 3.27: Τοποθέτηση συνδετικών ράβδων χωρίς προβλήματα ροής νερού [Αγγελόπουλος et al,2005]

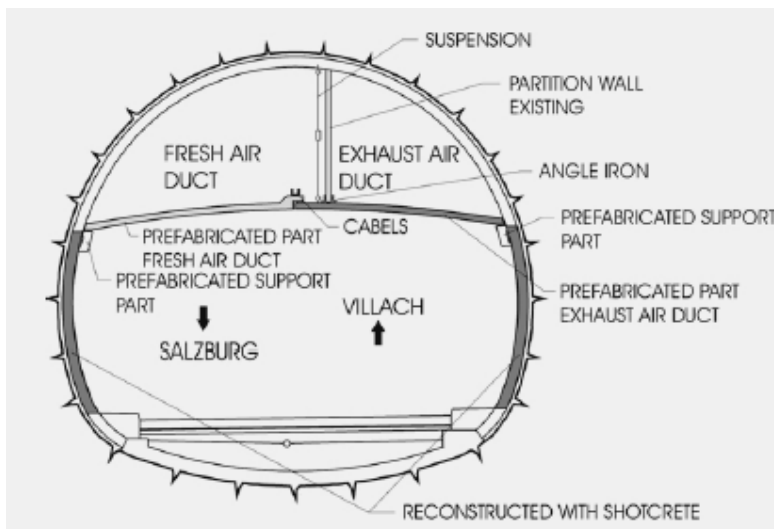


Εικόνα 3.28,Εικόνα 3.29: Κατασκευή της νέας εσωτερικής επένδυσης (αριστερά), πλέγμα σπλισμού (δεξιά) [Αγγελόπουλος et al,2005]

Δ) Ανακατασκευή οροφής

Για την πιο γρήγορη εγκατάσταση αλλά και την αποφυγή της σκυροδέτησης λόγω περιορισμένου χώρου έγινε χρήση προκατασκευασμένων τμημάτων από σκυρόδεμα (εικόνες 3.30,3.31) [Αγγελόπουλος et al,2005]. Τρεις διαφορετικοί τύποι τμημάτων χρησιμοποιήθηκαν:

- 1) τμήμα υποστήριξης τοποθετημένο στα πλαϊνά τοιχώματα
- 2) τμήματα 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 αεραγωγού καυσαερίων.



Εικόνα 3.30: Διαφορετικοί τύποι προκατασκευασμένων τμημάτων [Αγγελόπουλος et al,2005]



Εικόνα 3.31: Εγκατάσταση διαφορετικών προκατασκευασμένων τμημάτων σκυροδέματος [Αγγελόπουλος et al,2005].

Ε) Κόστος

Το κόστος μετά τους 3 μήνες που διήρκησε η επισκευή ήταν :

- 6.500.000 \$ για την επισκευή και
- 19.500.000 \$ από τις χαμένες εισφορές των διοδίων[Αγγελόπουλος et al,2005].

3.4. Τρόποι πρόσδοσης παθητικής πυροπροστασίας σε υπάρχουσες σήραγγες.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.4 για τους υφιστάμενους τρόπους παθητικής πυροπροστασίας του παρόντος κεφαλαίου, γίνεται κατανοητό το γεγονός ότι η εκτόξευση τσιμεντοειδών κονιαμάτων καθώς και η χρήση πυράντοχων πλακών για την δημιουργία πυράντοχης ασπίδας στην τελική επένδυση της σήραγγας αποτελούν δύο διαθέσιμους τρόπους παθητικής πυροπροστασίας για ήδη κατασκευασμένες σήραγγες στις οποίες δεν έχουν εφαρμοστεί μέτρα παθητικής πυροπροστασίας κατά την κατασκευή τους.

Κεφάλαιο 4ο :

Χρήση της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ) για την αξιολόγηση μεθόδων πυροπροστασίας σε σήραγγες

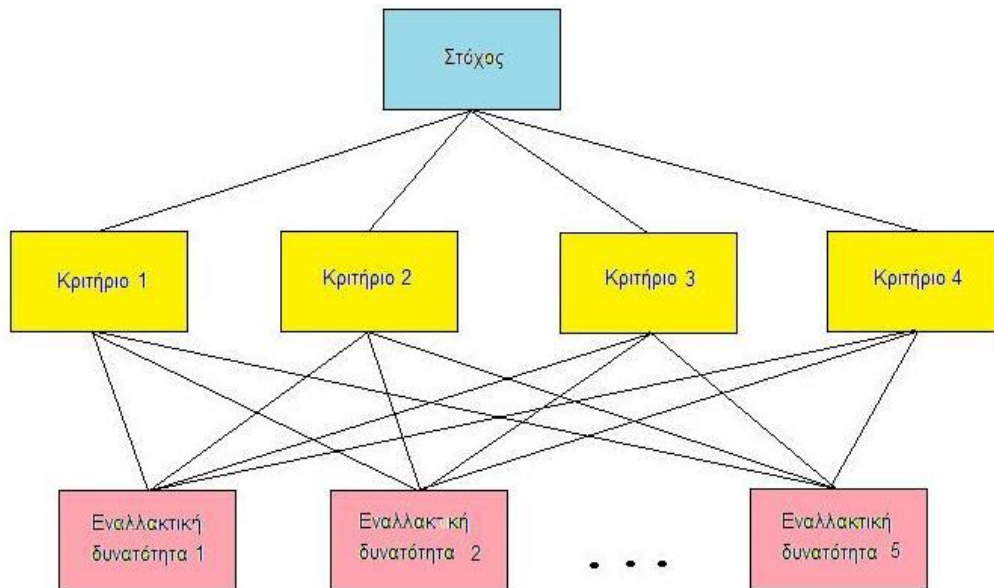
4.1. Εισαγωγή στη διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP – Analytic Hierarchy Process)

Η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (AHP), που προτάθηκε από τον Thomas Saaty το 1980, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση πολύπλοκων διαδικασιών λήψης αποφάσεων και μπορεί να βοηθήσει τον αποφασίζοντα ως προς τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων και την λήψη της βέλτιστης δυνατής απόφασης. Η AHP παρέχει ένα ολοκληρωμένο και ορθολογικό πλαίσιο για τη δόμηση ενός προβλήματος απόφασης, για την αναπαράσταση και ποσοτικοποίηση των στοιχείων του, ώστε να τα συνδέσει με τον τελικό στόχο και να αξιολογήσει τις εναλλακτικές λύσεις. Χρησιμοποιείται για «καταστάσεις αποφάσεων» σε τομείς όπως: κυβέρνηση, επιχειρήσεις, βιομηχανία, υγειονομική περίθαλψη και εκπαίδευση. Πολλές εφαρμογές AHP έχουν αναφερθεί σε όλο τον κόσμο, δεδομένου ότι λαμβάνουν χώρα σε υψηλά επίπεδα μεγάλων οργανισμών, όπου η ασφάλεια και η προστασία της ανθρώπινης ζωής είναι ευαίσθητα δεδομένα. Άλλες χρήσεις της AHP έχουν συζητηθεί στη λογοτεχνία. Πρόσφατα αυτές έχουν περιληφθεί σε βιβλία όπως: « Ποσοτικοποιώντας τη συνολική ποιότητα των συστημάτων λογισμικού» (Microsoft Corporation), «Επιλέγοντας Πανεπιστημιακές Σχολές» (Bloomsburg University of Pennsylvania), «Επιλογή του τόπου για να εντοπίσετε υπεράκτιες εγκαταστάσεις παραγωγής» (University of Cambridge), «Αξιολόγηση των κινδύνων στη λειτουργία αγωγών που διασχίζουν τη χώρα» (American Society of Civil Engineers), «Αποφασίζοντας τον καλύτερο τρόπο διαχείρισης των υδρορροών στις ΗΠΑ» (US Department of Agriculture) [Σιαμπίρη,2010]. Η AHP χρησιμοποιείται και για το σχεδιασμό πολύ συγκεκριμένων διαδικασιών, όπως η βαθμολόγηση των κτιρίων με ιστορική σημασία. Πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε σ' ένα έργο για την αξιολόγηση της κατάστασης των αυτοκινητοδρόμων στη Βιρτζίνια. Οι μηχανικοί του αυτοκινητοδρόμου αρχικά τη χρησιμοποίησαν για να καθορίσουν το βέλτιστο πεδίο εφαρμογής και στη συνέχεια για να δικαιολογήσουν τον προϋπολογισμό του έργου[Σιαμπίρη,2010].

Η ουσία της AHP βρίσκεται στο ότι η ανθρώπινη κρίση, και όχι απλά οι υποκείμενες πληροφορίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση της αξιολόγησης. Το ισχυρό σημείο της AHP είναι η ικανότητα της να διορθώνει ιεραρχικά ένα πολύπλοκο, πολυπρόσωπο πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων και στη συνέχεια να ερευνά κάθε επίπεδο ιεραρχίας χωριστά, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα καθώς προχωρά η ανάλυση. Γίνονται συγκρίσεις ανά ζεύγη παραγόντων (pairwise comparisons) χρησιμοποιώντας μια κλίμακα που δείχνει το ισχυρό σημείο με το οποίο ένας παράγοντας κυριαρχεί σε σχέση με έναν παράγοντα υψηλότερου επιπέδου. Η κλιμακωτή αυτή διαδικασία μπορεί στη συνέχεια να εκφραστεί με βαρύτητες προτεραιότητας ή βαθμολογίες για την κατάταξη των εναλλακτικών δυνατοτήτων [Σιαμπίρη,2010].

Το στάδιο της ανάλυσης στοχεύει στην διάσπαση του προβλήματος και στη δόμηση μιας ιεραρχίας από τα τμήματα του, ταξινομημένα ανάλογα με τον βαθμό σπουδαιότητας τους. Ένας τρόπος δόμησης μιας ιεραρχίας είναι η από πάνω προς τα κάτω διαδικασία (top-down). Συγκεκριμένα, και με βάση τον γενικό στόχο, στο κορυφαίο επίπεδο της ιεραρχίας καθορίζεται το επίπεδο των κριτηρίων ή δεύτερο επίπεδο, στη συνέχεια το τρίτο επίπεδο ή επίπεδο των υποκριτηρίων, ως τον σαφή καθορισμό των εναλλακτικών δυνατοτήτων στο κατώτατο επίπεδο. Ένας άλλος τρόπος δόμησης είναι η αντίστροφη ή η από κάτω προς τα πάνω διαδικασία (bottom-up). Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, αρχικά αναγνωρίζονται οι εναλλακτικές δυνατότητες (ή αντικείμενα απόφασης, τα οποία αποτελούν το κατώτατο επίπεδο) και τα υποκριτήρια (αμέσως ανώτερο επίπεδο) ως προς τα οποία εκτιμάται η απόδοση των εναλλακτικών δυνατοτήτων. Στη συνέχεια ορίζονται τα κριτήρια του αμέσως ανώτερου επιπέδου, κοκ[Saaty,1980].

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια ομάδα τεσσάρων κριτηρίων και μία ομάδα πέντε εναλλακτικών δυνατοτήτων. Πολλές φορές για να αποφευχθεί η ακαταστασία στα ΑHP διαγράμματα, οι γραμμές που συνδέουν εναλλακτικές δυνατότητες και καλύπτουν τα κριτήρια, συχνά παραλείπονται. Γενικά ο σχεδιασμός της κάθε ΑHP ιεραρχίας δεν εξαρτάται μόνο από τη φύση του προβλήματος αλλά και από τη γνώση, την κρίση, τις αξίες, τις ανάγκες, τα θέλω. Καθώς μπαίνουν νέα στοιχεία στην ΑHP, η ιεραρχία μπορεί να αλλάξει και να προστεθούν σε αυτήν κριτήρια που αρχικά δεν είχαν θεωρηθεί σημαντικά. Επίσης, με την ίδια λογική, εναλλακτικές μπορούν να προστεθούν, να διαγραφούν, ή να αλλάξουν[Σιαμπίρη,2010].



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συνοπτικής ιεραρχίας τριών επιπέδων για πρόβλημα επιλογής [Σιαμπίρη,2010]

Αφού διαρθρωθεί η ιεραρχία, πρέπει να θεσπιστούν τοπικές προτεραιότητες για κάθε παράγοντα σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο σε σχέση με τον αντίστοιχο «γονέα» του στο αμέσως ανώτερο επίπεδο. Στο βήμα αυτό αναπτύσσονται οι σχετικές βαρύτητες ή προτεραιότητες διενεργώντας συγκρίσεις ανά ζεύγη (pairwise comparisons) σε μητρώα (πίνακες). Τα δεδομένα των μητρώων αυτών αποτελούν οι προτιμήσεις του/των αποφασιζόντων, οι οποίες δίνονται σύμφωνα με μια αριθμητική κλίμακα από 1-9[Saaty,1980], από την πλήρως ισοδύναμη σημαντικότητα έως την ισχυρά πολύ πιο μεγάλη σημαντικότητα του ενός στοιχείου έναντι του άλλου (πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Κλίμακα τιμών για συγκρίσεις κατά ζεύγη [Saaty,1980]

Τιμή	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σπουδαιότητα	Και οι δύο παράγοντες συμβάλλουν εξίσου στον στόχο ή το κριτήριο
3	Μικρή σπουδαιότητα ενός σε σχέση με άλλον	Η πείρα και η κρίση ευνοούν ασθενώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον
5	Βασική ή μεγάλη σπουδαιότητα	Η πείρα και η κρίση ευνοούν σαφώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον
7	Πολύ ισχυρή ή αποδεδειγμένη σπουδαιότητα	Ένας παράγοντας ευνοείται ιδιαίτερα σε σχέση με άλλον. Η κυριαρχία του αποδεικνύεται στην πράξη
9	Απόλυτη σπουδαιότητα σε σχέση με άλλον	Τα στοιχεία που ευνοούν έναν παράγοντα είναι αδιαμφισβήτητα
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές	Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβιβασμός

Για όλα τα ζεύγη σύγκρισης των στοιχείων i, i^* (όπου το στοιχείο i είναι πιο σημαντικό από το στοιχείο i^*), η τιμή της διαφοράς του θεωρείται ως a_{ii^*} και τοποθετείται στην αντίστοιχη θέση του μητρώου σύγκρισης. Επιπλέον θεωρείται ότι $a_{ii^*} = 1/a_{i^*i}$, ενώ $a_{ii} = 1$.

Στο παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζονται τρεις εναλλακτικές επιλογές Α,Β,Γ με τελικό στόχο την επιλογή της βέλτιστης. Μετά από τις μεταξύ τους συγκρίσεις δίνονται οι παρακάτω πληροφορίες:

- Η επιλογή Α είναι «ισοδύναμη έως ευνοείται ασθενώς» σε σχέση με την Β.
- Η επιλογή Α ευνοείται «ασθενώς έως αισθητά» σε σχέση με την Γ.
- Η επιλογή Β ευνοείται «ασθενώς» σε σχέση με την Γ.

Η κατασκευή του μητρώου σύγκρισης δίνεται στον πίνακα και η βαθμολογία που προκύπτει για την κάθε εναλλακτική λύση (Α,Β,Γ) προκύπτει ως ο κανονικοποιημένος γεωμετρικός μέσος όρος της κάθε στήλης, αντίστοιχα.

Ο γεωμετρικός μέσος όρος (γ_i) για κάθε στήλη δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_i = \left(\prod_{i^*} a_{ii^*} \right)^{\frac{1}{i}}$$

Και ο κανονικοποιημένος γεωμετρικός μέσος όρος (γ_{in}) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\gamma_{in} = \frac{\gamma_i}{\sum \gamma_i}$$

Πίνακας 4.2: Δημιουργία μητρώου συγκρίσεων κατά ζεύγη.

	A	B	Γ
A	1	2	4
B	1/2	1	3
Γ	1/4	1/3	1

Η βαθμολογία που προκύπτει για τις επιλογές του παραδείγματος είναι: A=0.56, B=0,32 και Γ=0,12. Συνεπώς η επιλογή Α υπερτερεί σημαντικά έναντι των άλλων και αυτή θα πρέπει να επιλεγεί τελικά, ενώ και η επιλογή Β υπερτερεί έναντι της Γ, η οποία συγκεντρώνει και την μικρότερη βαθμολογία.

Η σύνθεση των προτιμήσεων εφαρμόζεται από το δεύτερο επίπεδο και κάτω. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές των μητρώων των συσχετίσεων ανά ζεύγη. Στη συνέχεια, οι τοπικές προτιμήσεις των στοιχείων ενός επιπέδου πολλαπλασιάζονται με την προτεραιότητα του αντίστοιχου κριτηρίου γονέα, που υπάρχει στο αμέσως ανώτερο επίπεδο και τα επιμέρους γινόμενα αθροίζονται για το κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Η παραπάνω διαδικασία συντελεί στον καθορισμό της συνολικής βαρύτητας του κάθε στοιχείου [Saaty,1980].

Έλεγχος συνέπειας

Η συνέπεια των απαντήσεων ή η μεταβατικότητα των προτιμήσεων ελέγχεται υπολογίζοντας κατά πόσο ισχύει: $\alpha_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{kj}$ για κάθε i,j,k. Στην πράξη, η απόλυτα συνεπής περίπτωση δεν είναι πιθανόν να συμβεί. Έτσι, για την αξιολόγηση της ποιότητας κάθε πίνακα

συγκρίσεων A, δημιουργήθηκε ένας δείκτης συνέπειας (CI - Consistency Index), ο οποίος εκφράζεται από την σχέση:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

,όπου: λ_{max} = η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα και n = η διάσταση του συγκεκριμένου πίνακα συγκρίσεων.

Έπειτα γίνεται σύγκριση του δείκτη CI με τον δείκτη που προκύπτει από έναν τελείως αυθαίρετο πίνακα συγκρίσεων, του οποίου τα δεδομένα εισόδου επιλέγονται τυχαία. Μέσω προσομοίωσης ο Saaty πέτυχε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

όπου RI υποδηλώνει τον τυχαίο δείκτη που υπολογίζεται από τον μέσο όρο του CI για ένα μεγάλο δείγμα τυχαίων πινάκων σύγκρισης. Μπορούμε να καθορίσουμε το λόγο συνέπειας (CR) από τη σχέση: $CR = \frac{CI}{RI}$. Η εμπειρία δείχνει ότι ο λόγος CR πρέπει να είναι μικρότερος του 0.1 για να έχουμε απόλυτη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα [Σιαμπίρη,2010].

4.2. Επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας με τη διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης AHP (Analytic Hierarchy Process)

4.2.1. Τα στοιχεία της ανάλυσης

Η επιλογή ενός ολοκληρωμένου συστήματος πυροπροστασίας σε σήραγγα, είτε αυτό απαρτίζεται από ενεργητικές ή παθητικές μεθόδους πυροπροστασίας ή συνδυασμό αυτών, εξετάζεται με βάση τρία κύρια κριτήρια:

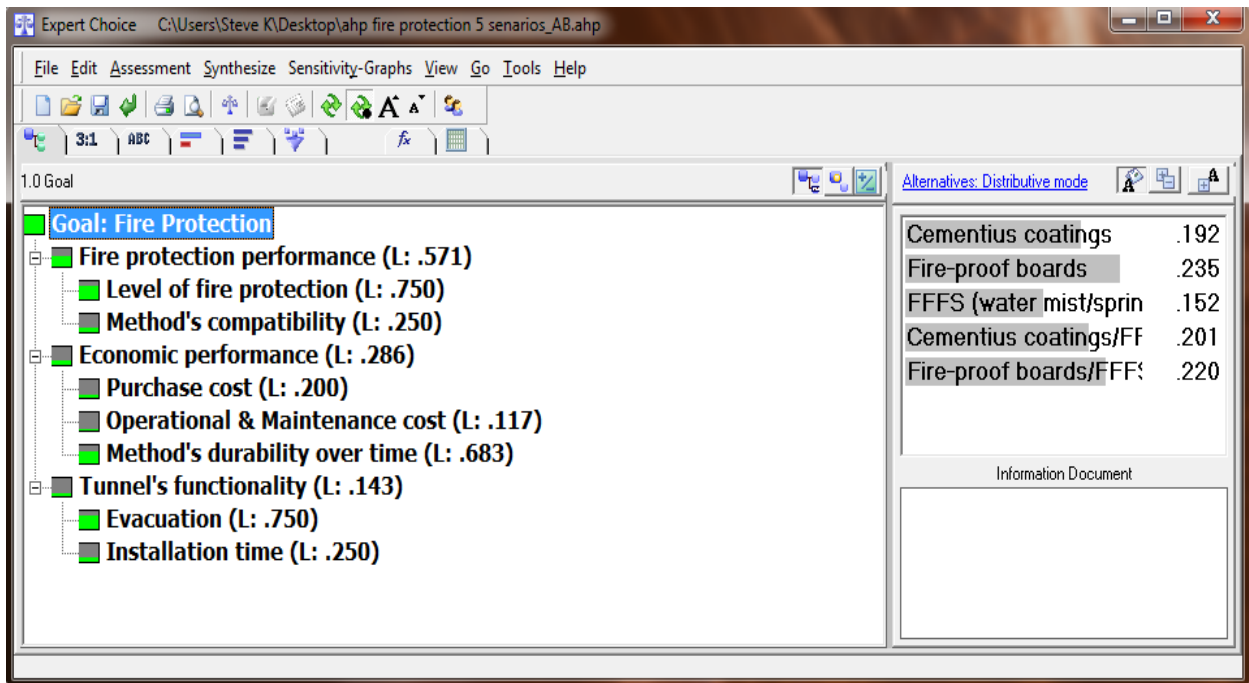
1. Το πρώτο κριτήριο αφορά στην απόδοση του συστήματος πυροπροστασίας σε συνθήκες πυρκαγιάς (Fire protection performance) και δομείται σε 2 υποκριτήρια. Στο πρώτο εξετάζεται το επίπεδο πυροπροστασίας που παρέχεται στη σήραγγα (Level of fire protection) και στο δεύτερο η συμβατότητα της κάθε μεθόδου με την κατασκευή της σήραγγας (Method's compatibility).
2. Το δεύτερο κριτήριο αφορά στην οικονομική απόδοση του συστήματος πυροπροστασίας στα ευρύτερα πλαίσια κατασκευής μιας σήραγγας (Economic performance). Το κριτήριο αυτό χωρίζεται σε 3 υποκριτήρια: το κόστος αγοράς (Purchase cost), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operational & Maintenance cost), και τη διάρκεια «ζωής» της μεθόδου στα πλαίσια λειτουργίας μιας σήραγγας (Method's durability over time).
3. Το τρίτο κριτήριο αφορά στο πόσο βελτιώνει την ευρύτερη λειτουργία της σήραγγας η χρήση της μεθόδου που θα επιλεγεί (Tunnel's functionality). Το κριτήριο αυτό χωρίζεται σε 2 υποκριτήρια: στο ενδεχόμενο εκκένωσης της σήραγγας (Evacuation) και στον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της κάθε μεθόδου (Installation time).

Σε κάθε κριτήριο είναι δυνατό να εκτιμηθούν πολλές και διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις. Η τελική επιλογή ανάμεσα τους γίνεται με την κατάρτιση ενός συστήματος αξιολόγησης με τη χρήση της μεθόδου της αναλυτικής ιεράρχησης, η περιγραφή της οποίας πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 4.1 του παρόντος κεφαλαίου.

Στην κορυφή κάθε δέντρου ιεραρχίας βρίσκεται ως στόχος, η επιλογή του βέλτιστου συστήματος πυροπροστασίας. Το βέλτιστο σύστημα πυροπροστασίας μπορεί να αποτελείται και από συνδυασμό μεθόδων, γεγονός το οποίο εξαρτάται και από τον χαρακτήρα του εκάστοτε τεχνικού έργου. Την κορυφή του δέντρου διαδέχονται τα ενδιάμεσα επίπεδα της ανάλυσης που είναι τα κύρια κριτήρια εξέτασης (π.χ. απόδοση συστήματος πυροπροστασίας σε πυρκαγιά) και οι διάφορες παράμετροι αυτών –τα υποκριτήρια- (π.χ. συμβατότητα της μεθόδου), ενώ στο τελευταίο επίπεδο τοποθετούνται οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις, από τις οποίες αναζητείται η βέλτιστη. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κάθε κριτήριο του συστήματος ξεχωριστά, έτσι ώστε η δομή ιεράρχησης να καταστεί πιο ομογενής και εύκολη στη διαχείριση της, γεγονός που θα βελτιώσει την ευχέρεια κατά την διαδικασία συγκρίσεων

κατά ζεύγη (pairwise comparisons). Επιπροσθέτως επιτρέπει την αύξηση της ευαισθησίας της αξιολόγησης με την εισαγωγή κριτηρίων προσανατολισμένων πάνω στην εξεταζόμενη φάση του συστήματος. Ο σχεδιασμός της ανάλυσης και οι εκτιμήσεις των συγκρίσεων κατά ζεύγη είχαν ως βάση τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καθώς και τις συμβουλές ειδικών του χώρου.

Με χρήση του λογισμικού Expert Choice της ομώνυμης εταιρείας υλοποιήθηκε η παρούσα ανάλυση. Το λογισμικό αυτό είναι το πλέον διαδεδομένο για την επίλυση προβλημάτων αναλυτικής ιεραρχίας, καθώς ο χρήστης μπορεί εύκολα να δημιουργήσει επιμέρους συγκρίσεις κατά ζεύγη, ιδιαίτερα σε προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας. Στην εικόνα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.



Εικόνα 4.2: Το παράθυρο εργασίας του λογισμικού Expert Choice

4.2.2. Αξιολόγηση συστήματος πυροπροστασίας σε σήραγγα

Η επιλογή μίας ή περισσότερων μεθόδων πυροπροστασίας για την βέλτιστη δυνατή απόδοση του δομήματος της σήραγγας σε συνθήκες πυρκαγιάς σε συνδυασμό με τη λειτουργία των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων κατάσβεσης της πυρκαγιάς είναι ο κύριος στόχος του συστήματος της ανάλυσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν ως συστήματα πυροπροστασίας σε υπό κατασκευή αλλά και ήδη κατασκευασμένες σήραγγες, και οι οποίες λήφθηκαν υπ' όψη για την κατάρτιση της ανάλυσης:

1. Χρήση πυράντοχων τσιμεντοειδών κονιαμάτων ως πρόσθετο επίστρωμα στην τελική επένδυση της σήραγγας (Cementitious coatings)

Στη λύση αυτή προτείνεται η επικάλυψη της επιφάνειας του σκυροδέματος της τελικής επένδυσης της σήραγγας με συγκεκριμένης σύστασης κονιάματα σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.4 του προηγούμενου κεφαλαίου. Τα κονιάματα αυτά κυρίως αποτρέπουν το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοιώσης που εμφανίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος όταν αυτό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι εκτιμήσεις για την βαθμολογία αυτής της λύσης στις συγκρίσεις κατά ζεύγη με άλλες λύσεις πραγματοποιήθηκε βάση των στοιχείων του πίνακα 3.10.

2. Χρήση πυράντοχων πλακών για την δημιουργία πυράντοχης ασπίδας στην τελική επένδυση της σήραγγας (Fire-proof boards)

Η δεύτερη λύση που προτείνεται είναι η εγκατάσταση προκατασκευασμένων άκαμπτων πλακών στη επένδυση της σήραγγας. Οι πλάκες αυτές είναι άκαυστες και περιέχουν πυρίμαχα συστατικά σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.4 του προηγούμενου κεφαλαίου, με βάση την οποία προέκυψαν και οι εκτιμήσεις στις συγκρίσεις κατά ζεύγη με άλλες λύσεις.

3. Χρήση σταθερού συστήματος πυρόσβεσης (Fixed Fire Fighting System –FFFS)

Η τρίτη κατά σειρά λύση που προτείνεται είναι η εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων πυρόσβεσης στη σήραγγα σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.2 του κεφαλαίου 3 της παρούσας εργασίας και με βάση την οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκρίσεις κατά ζεύγη με άλλες λύσεις.

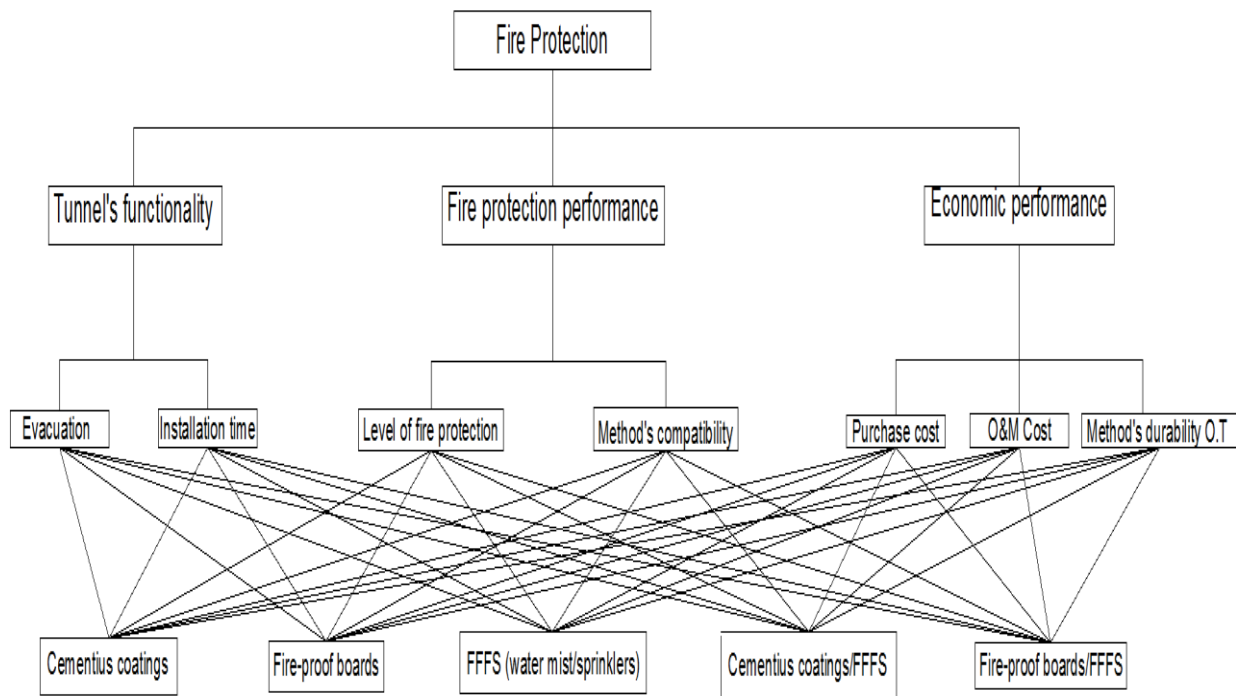
4. Χρήση πυράντοχων τσιμεντοειδών κονιαμάτων σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ενός σταθερού συστήματος πυρόσβεσης (Cementitious coatings/FFFS)

Η λύση αυτή δομείται ως συνδυασμός των λύσεων 1 και 3. Στις συγκρίσεις κατά ζεύγη γίνεται προσπάθεια συνεκτίμησης της απόδοσης των 2 μεθόδων σε ένα ενιαίο σύστημα πυροπροστασίας.

5. Χρήση πυράντοχων πλακών σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ενός σταθερού συστήματος πυρόσβεσης (Fire-proof boards/FFFS)

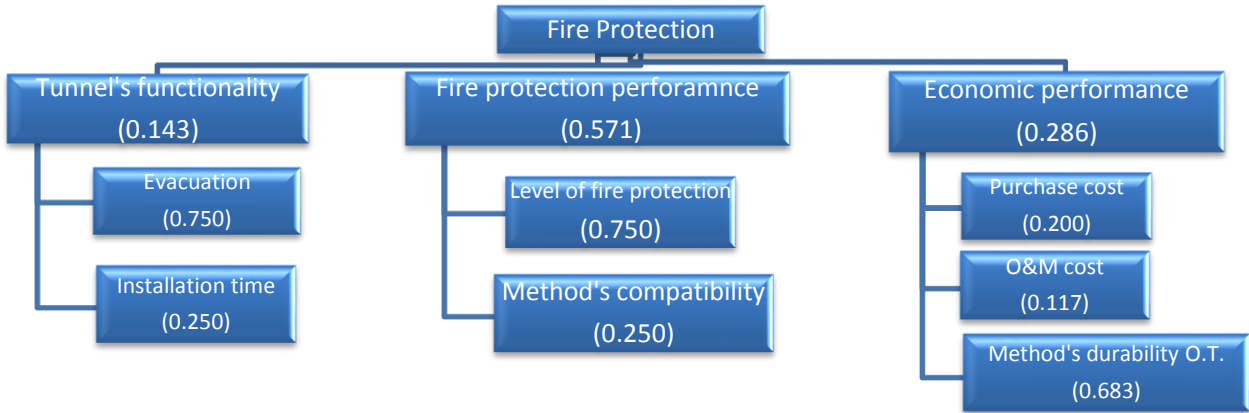
Η λύση αυτή δομείται ως συνδυασμός των λύσεων 2 και 3. Στις συγκρίσεις κατά ζεύγη γίνεται προσπάθεια συνεκτίμησης της απόδοσης των 2 μεθόδων σε ένα ενιαίο σύστημα πυροπροστασίας.

Στο σχήμα της εικόνας 4.3 παρουσιάζεται η μορφή της ιεραρχίας του συγκεκριμένου μοντέλου για την επιλογή των μεθόδων πυροπροστασίας με τη βέλτιστη απόδοση. Στο ανώτερο επίπεδο που δομεί το στόχο της ανάλυσης βρίσκεται η εύρεση του βέλτιστου συστήματος πυροπροστασίας, ακολουθούν το δεύτερο και τρίτο επίπεδο ιεραρχίας που αποτελούνται από τα κύρια κριτήρια και υποκριτήρια εξέτασης αντίστοιχα και στο τελευταίο επίπεδο της ανάλυσης βρίσκονται οι εξεταζόμενες εναλλακτικές λύσεις.



Εικόνα 4.3: Δομή της ιεραρχίας στην ανάλυση του βέλτιστου συστήματος πυροπροστασίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το βασικό σενάριο αναλυτικής ιεραρχίας το οποίο επιλέχθηκε για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων που προαναφέρθηκαν. Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το δέντρο του βασικού σεναρίου και ακολουθούν λεπτομέρειες για τον τρόπο κατασκευής του, δηλαδή την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων, υποκριτηρίων και την βαθμολόγηση των εναλλακτικών λύσεων για κάθε υποκριτήριο. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις συγκρίσεις που έγιναν στο λογισμικό Expert Choice ο δείκτης CR ήταν μικρότερος του 10%, οπότε τα αποτελέσματα είναι συνεπή.



Εικόνα 4.4: Βαρύτητες των κριτηρίων και υποκριτηρίων για την επιλογή του συστήματος πυροπροστασίας

Συντελεστές βαρύτητας κύριων κριτηρίων ως προς τον στόχο Fire Protection

Πίνακας 4.3: Συγκρίσεις κατά ζεύγη μεταξύ των κύριων κριτηρίων εξέτασης ως προς τον κύριο στόχο Fire Protection

	Economic performance	Tunnel's functionality
Fire protection performance	2.0	4.0
Economic performance	-	2.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Για την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας των κύριων κριτηρίων εξέτασης θεωρήθηκε ότι:

- Το κριτήριο Fire protection performance είναι ισοδύναμο έως ασθενώς πιο σημαντικό (τιμή 2.0) από το κριτήριο Economic performance.
- Το κριτήριο Fire protection performance είναι ασθενώς έως αισθητά πιο σημαντικό (τιμή 4.0) από το κριτήριο Tunnel's functionality.
- Το κριτήριο Economic performance είναι ισοδύναμο έως ασθενώς πιο σημαντικό (τιμή 2.0) από το κριτήριο Tunnel's functionality.

Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω συντελεστές βαρύτητας:

- Fire protection performance – 0.571
- Economic performance – 0.286
- Tunnel's functionality – 0.143

Συνεπώς το τεχνικό κομμάτι συμμετέχει κατά 57.1%, το οικονομικό κομμάτι κατά 28.6% και το κομμάτι της λειτουργικότητας κατά 14.3%. Το σενάριο αυτό επιλέχθηκε ως βασικό για να εξεταστεί η καλύτερη εναλλακτική λύση με προτεραιότητα το τεχνικό κομμάτι της ανάλυσης.

Συντελεστές βαρύτητας υποκριτηρίων για το κύριο κριτήριο Fire protection performance

Πίνακας 4.4: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Fire protection performance

	Method's compatibility
Level of fire protection	3.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στη σύγκριση αυτή το υποκριτήριο Level of fire protection είναι ασθενώς πιο σημαντικό (τιμή 3.0) από το υποκριτήριο Method's compatibility. Αυτό επιλέχθηκε διότι το παρεχόμενο επίπεδο πυροπροστασίας μίας μεθόδου συμμετέχει σε μεγαλύτερο βαθμό στην συνολική απόδοση του συστήματος πυροπροστασίας από ότι η συμβατότητα της με την κατασκευή της σήραγγας. Έτσι οι συντελεστές βαρύτητας που προκύπτουν είναι: 0.750 - Level of fire protection και 0.250 - Method's compatibility.

Συντελεστές βαρύτητας υποκριτηρίων για το κύριο κριτήριο Economic performance

Πίνακας 4.5: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Economic performance

	Operational & Maintenance cost	Method's durability over time
Purchase cost	2.0	(4.0)
Operational & Maintenance cost	-	(5.0)

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Για την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας των υποκριτηρίων εξέτασης για το κριτήριο Economic performance εκτιμήθηκε ότι:

- Το υποκριτήριο Purchase cost είναι ισοδύναμος έως ασθενώς πιο σημαντικό (τιμή 2.0) από το υποκριτήριο Operational & Maintenance cost.
- Το υποκριτήριο Method's durability over time είναι ασθενώς έως αισθητά πιο σημαντικό (τιμή 4.0) από το υποκριτήριο Purchase cost.
- Το υποκριτήριο Method's durability over time είναι σαφώς πιο σημαντικό (τιμή 5.0) από το υποκριτήριο Operational & Maintenance cost.

Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω συντελεστές βαρύτητας:

- Purchase cost – 0.200
- Operational & Maintenance cost – 0.117
- Method's durability over time – 0.683

Η βαθμολόγηση των παραπάνω υποκριτηρίων έγινε με γνώμονα την κρισιμότητα της παραμέτρου της διάρκειας ζωής της μεθόδου, καθώς αντικαταστάσεις που μπορεί να χρειαστούν απαιτούν σημαντικό επιπλέον κόστος. Ωστόσο κρίθηκε απαραίτητο για την εκτίμηση της συνολικής οικονομικής απόδοσης του συστήματος να συμπεριληφθούν στην ανάλυση το κόστος αγοράς αλλά και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Συντελεστές βαρύτητας υποκριτηρίων για το κύριο κριτήριο Tunnel's functionality

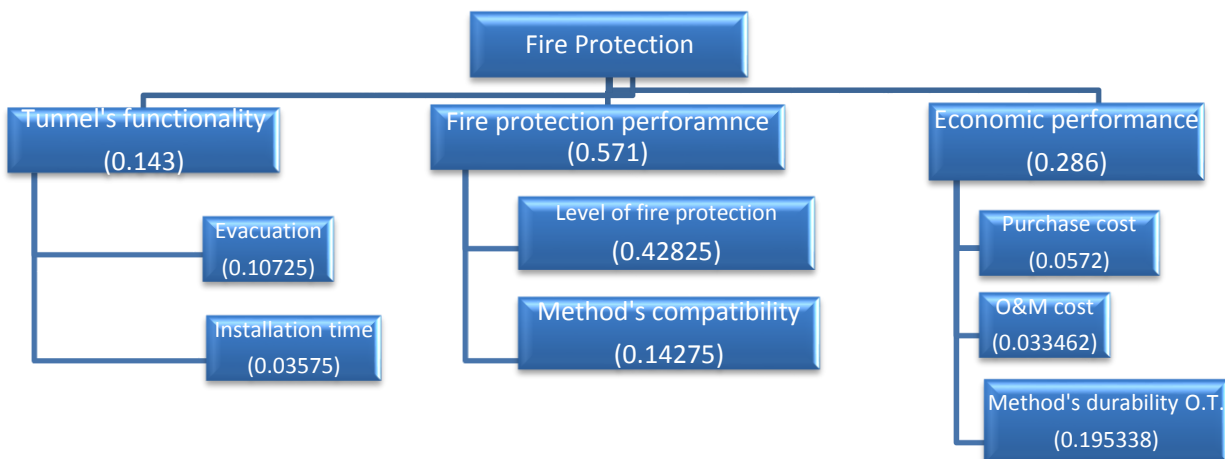
Πίνακας 4.6: Σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των υποκριτηρίων εξέτασης ως προς το κύριο κριτήριο Tunnel's functionality

	Installation time
Evacuation	3.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στη σύγκριση αυτή το υποκριτήριο Evacuation εκτιμήθηκε ως ασθενώς (τιμή 3.0) πιο σημαντικό από το υποκριτήριο Installation time (τιμή 3.0). Η επιλογή αυτή ήταν αποτέλεσμα της εκτίμησης ότι το ενδεχόμενο εκκένωσης αποτελεί θέμα ασφάλειας των χρηστών της σήραγγας για αυτό και προηγείται του χρόνου εγκατάστασης της μεθόδου. Έτσι οι συντελεστές βαρύτητας που προκύπτουν είναι: 0.750 – Evacuation και 0.250 - Installation time.

Οι βαρύτητες των υποκριτηρίων που παρουσιάζονται στην εικόνα 4.4 αποτελούν τους επιμέρους συντελεστές βαρύτητας και παρουσιάζουν το πόσο συνεισφέρουν στο τελικό αποτέλεσμα των κύριων κριτηρίων. Για να γίνει εκτίμηση των τελικών συντελεστών (w_i), γίνεται ο πολλαπλασιασμός των συντελεστών των υποκριτηρίων με τον συντελεστή του κύριου κριτηρίου στο οποίο συμμετέχουν, αντίστοιχα. Έτσι προκύπτουν τα δεδομένα στην παρακάτω εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Τελικές βαρύτητες των παραμέτρων εξέτασης των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή του συστήματος πυροπροστασίας

Η πραγματοποίηση των συγκρίσεων κατά ζεύγη γίνεται για τις επιλογές που υπάρχουν σε κάθε επίπεδο σε σχέση με τον εκάστοτε στόχο, ο οποίος είναι ο κόμβος γονέας (parent node). Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι εκάστοτε βαρύτητες (weighting) των κριτηρίων σύγκρισης (π.χ. τι είναι πιο σημαντικό για το σύστημα πυροπροστασίας η απόδοση σε πυρκαγιά, ή οικονομική απόδοση του), αλλά και οι τελικές συγκριτικές αποτιμήσεις των εναλλακτικών λύσεων για τα επιμέρους κριτήρια στα αντίστοιχα μητρώα. Στη συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες των μητρώων της ανάλυσης για κάθε υποκριτήριο εξέτασης, όπου αναλυτικά παρουσιάζεται ο τρόπος βαθμολόγησης και κατασκευής τους:

Βαθμολόγηση υποκριτηρίων για Fire protection performance

Το κύριο κριτήριο Fire protection performance απαρτίζεται από τα 2 υποκριτήρια Level of protection και Method's compatibility που περιγράφονται παρακάτω με τα αντίστοιχα μητρώα τους.

Πίνακας 4.7: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση το επίπεδο πυροπροστασίας που παρέχεται στη σήραγγα (Level of fire protection)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	1.0	5.0	(3.0)	(3.0)
Fire-proof boards		5.0	(3.0)	(3.0)
FFFS (water mist/sprinklers)			(5.0)	(5.0)
Cementius coatings/FFFS				1.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στο υποκριτήριο του παρεχόμενου επιπέδου πυροπροστασίας στη σήραγγα η βαθμολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τον βαθμό προστασίας που παρέχει η κάθε μέθοδος στην κατασκευή της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα οι συγκρίσεις έγιναν με βάση τα παρακάτω:

- Οι λύσεις Cementius coatings και Fire-proof boards θεωρήθηκαν ισοδύναμες (τιμή 1.0) για αυτό το υποκριτήριο, καθώς με κατάλληλη επιλογή είτε πυράντοχων κονιαμάτων είτε πυράντοχων πλακών πυροπροστασίας είναι δυνατό να καλυφθούν οι υψηλότερες απαιτήσεις πυροπροστασίας, δηλαδή να ικανοποιείται το σενάριο της καμπύλης RWS.
- Οι λύσεις Cementius coatings και Fire-proof boards θεωρήθηκαν σαφώς πιο προτιμητέες (τιμή 5.0) σε σχέση με την λύση FFFS (water mist/sprinklers) διότι, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, δεν είναι δυνατό για ένα ενεργητικό σύστημα

πυροπροστασίας να ανταποκριθεί σε απαιτήσεις παθητικής πυροπροστασίας όπως μία παθητική μέθοδος.

- Ωστόσο ο συνδυασμός μεθόδων Cementius coatings/FFFS και Fire-proof boards/FFFS εκτιμάται ότι υπερτερεί από κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Εύκολα γίνεται κατανοητή αυτή η εκτίμηση αφού ο συνδυασμός ενεργητικού συστήματος με παθητικό καλύπτει τις απαιτήσεις για παθητική πυροπροστασία αλλά και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εντός της σήραγγας.

Πίνακας 4.8: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με την συμβατότητα της στην κατασκευή της σήραγγας (Method's compatibility)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	(5.0)	(5.0)	3.0	(5.0)
Fire-proof boards		1.0	6.0	3.0
FFFS (water mist/sprinklers)			6.0	3.0
Cementius coatings/FFFS				(5.0)

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στο υποκριτήριο αυτό οι συγκρίσεις έγιναν ως προς τη συμβατότητα της κάθε μεθόδου με την κατασκευή της σήραγγας. Η βαθμολόγηση έγινε με βάση τα παρακάτω:

- Η λύση Fire-proof boards είναι σαφώς πιο προτιμητέα (τιμή 5.0) της λύσης Cementius coatings εξαιτίας των προβλημάτων συνάφειας με το σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης που έχουν παρουσιάσει τα πυράντοχα κονιάματα. Αντιθέτως, τέτοια προβλήματα δεν συνηθίζεται να εμφανίζουν οι πυράντοχτες πλάκες καθώς βιδώνονται απευθείας στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς καμία άλλου είδους απαίτηση.
- Οι λύσεις Fire-proof boards και FFFS (water mist/sprinklers) είναι ισοδύναμες στο υποκριτήριο αυτό καθώς δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα συμβατότητας με την κατασκευή.
- Στο θέμα της συμβατότητας γίνεται κατανοητό ότι η χρήση μιας μεθόδου έχει προβάδισμα σε σχέση με το συνδυασμό μεθόδων. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση σύγκρισης των λύσεων Fire-boards/FFFS και Cementius coatings όπου είναι σαφώς πιο προτιμητέα η πρώτη.

Βαθμολόγηση υποκριτήριων για Economic performance

Το κύριο κριτήριο Economic performance χωρίζεται σε 3 υποκριτήρια: το Purchase cost, το Operational & Maintenance cost και το Method's durability over time. Στη συνέχεια ακολουθούν πίνακες με τα μητρώα για κάθε υποκριτήριο.

Πίνακας 4.9: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το κόστος αγοράς της (Purchase cost)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	2.0	(2.0)	4.0	7.0
Fire-proof boards		(4.0)	3.0	5.0
FFFS (water mist/sprinklers)			5.0	8.0
Cementius coatings/FFFS				2.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στο υποκριτήριο του κόστους αγοράς μεθόδου πυροπροστασίας οι συγκρίσεις κατά ζεύγη πραγματοποιήθηκαν βάσει στοιχείων για το κόστος αγοράς κάθε μεθόδου ανά χιλιόμετρο σήραγγας. Όπως προκύπτει και από τον πίνακα 4.5 η λύση με το μεγαλύτερο κόστος αγοράς είναι η Fire-proof boards και ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά οι λύσεις Cementius coatings, FFFS (water mist/sprinklers).

Πίνακας 4.10: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operational & Maintenance cost)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	1.0	5.0	7.0	7.0
Fire-proof boards		5.0	7.0	7.0
FFFS (water mist/sprinklers)			2.0	2.0
Cementius coatings/FFFS				1.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στο υποκριτήριο αυτό οι συγκρίσεις μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων πραγματοποιήθηκαν ως προς το κόστος λειτουργίας και συντήρησης που προκύπτει για κάθε μέθοδο σε καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η βαθμολόγηση έγινε με βάση τα παρακάτω:

- Οι λύσεις Fire-proof boards και Cementius coatings εκτιμήθηκαν ισοδύναμες καθώς δεν απαιτούν ιδιαίτερα κόστη λειτουργίας και συντήρησης. Πιθανά κόστη συντήρησης αποτελούν η επισκευή μίας πυράντοχης πλάκας ή η πρόσθεση πυράντοχου κονιάματος σε σημεία που θα παρουσιαστούν πιθανές ζημιές ενώ το κόστος λειτουργίας τους εκτιμάται σχεδόν μηδαμινό.
- Οι λύσεις Fire-proof boards και Cementius coatings εκτιμήθηκαν σαφώς πιο προτιμητέες (τιμή 5.0) από την λύση FFFS (water mist/sprinklers) διότι τα ενεργητικά συστήματα πυροπροστασίας περιλαμβάνουν ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα που απαιτούν χρήση ηλεκτρικού ρεύματος για να λειτουργήσουν αλλά και συχνή συντήρηση.
- Στο θέμα του κόστους λειτουργίας και συντήρησης γίνεται κατανοητό ότι η χρήση μιας μεθόδου έχει προβάδισμα σε σχέση με το συνδυασμό μεθόδων.

Πίνακας 4.11: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με τη διάρκεια «ζωής» της στα πλαίσια λειτουργίας μιας σήραγγας (Method's durability over time)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	1.0	7.0	7.0	7.0
Fire-proof boards		7.0	7.0	7.0
FFFS (water mist/sprinklers)			2.0	2.0
Cementius coatings/FFFS				1.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Με το υποκριτήριο αυτό εκτιμάται το αν θα παρουσιαστεί η ανάγκη για αντικατάσταση των μέτρων πυροπροστασίας στα πλαίσια λειτουργίας μίας σήραγγας. Οι λύσεις Cementius coatings και Fire-proof boards παρουσιάζονται μεταξύ τους ισοδύναμες και ισχυρά πιο προτιμητέες (τιμή 7.0) σε σχέση με την λύση FFFS (water mist/sprinklers). Η εκτίμηση αυτή γίνεται εύκολα κατανοητή καθώς είναι πιο πιθανό να χρειαστεί αντικατάσταση ένας ψεκαστήρας από ότι μια πυράντοχη πλάκα. Τέλος γίνεται κατανοητό ότι στο υποκριτήριο αυτό η χρήση μίας μεθόδου έχει προβάδισμα σε σχέση με το συνδυασμό μεθόδων.

Βαθμολόγηση υποκριτήριων για Tunnel's functionality

Το κύριο κριτήριο Tunnel's functionality χωρίζεται σε 2 υποκριτήρια: το Evacuation και το Installation time. Στους πίνακες που ακολουθούν στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μητρώα τους.

Πίνακας 4.12: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με το ενδεχόμενο εκκένωσης της σήραγγας (Evacuation)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	1.0	(9.0)	(9.0)	(9.0)
Fire-proof boards		(9.0)	(9.0)	(9.0)
FFFS (water mist/sprinklers)			1.0	1.0
Cementius coatings/FFFS				1.0

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

Στο υποκριτήριο αυτό οι συγκρίσεις μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων πραγματοποιήθηκαν ως προς τη βελτίωση των συνθηκών εντός της σήραγγας για πιθανό ενδεχόμενο εκκένωσης. Στο μητρώο φαίνεται ότι, η λύση FFFS (water mist/sprinklers) είναι αδιαμφισβήτητα πιο προτιμητέα (τιμή 9.0) από τις υπόλοιπες διότι τα ενεργητικά συστήματα πυροπροστασίας κατά την ορθή λειτουργία τους μπορούν να ομαλοποιήσουν τις συνθήκες της σήραγγας σε ένα περιστατικό πυρκαγιάς ώστε να καταστεί εφικτή η εκκένωση της. Παρόλο που οι παθητικές μέθοδοι στοχεύουν στην αποφυγή κατάρρευσης της σήραγγας, δεν επιδρούν στις επικρατούσες συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού φωτιάς.

Πίνακας 4.13: Μητρώο συγκρίσεων κατά ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για την επιλογή μεθόδου πυροπροστασίας σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της κάθε μεθόδου (Installation time)

	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius coatings/FFFS	Fire-proof boards/FFFS
Cementius coatings	(3.0)	3.0	5.0	5.0
Fire-proof boards		5.0	7.0	7.0
FFFS (water mist/sprinklers)			2.0	3.0
Cementius coatings/FFFS				(3.0)

Σημείωση: Σύμφωνα με τις παραδοχές του προγράμματος, το στοιχείο στη σειρά υπερτερεί του στοιχείου στη στήλη κατά τόσες φορές (όσες και ο αριθμός που εμφανίζεται στο μητρώο), εκτός αν βρίσκεται εντός παρενθέσεως οπότε ισχύει το αντίστροφο

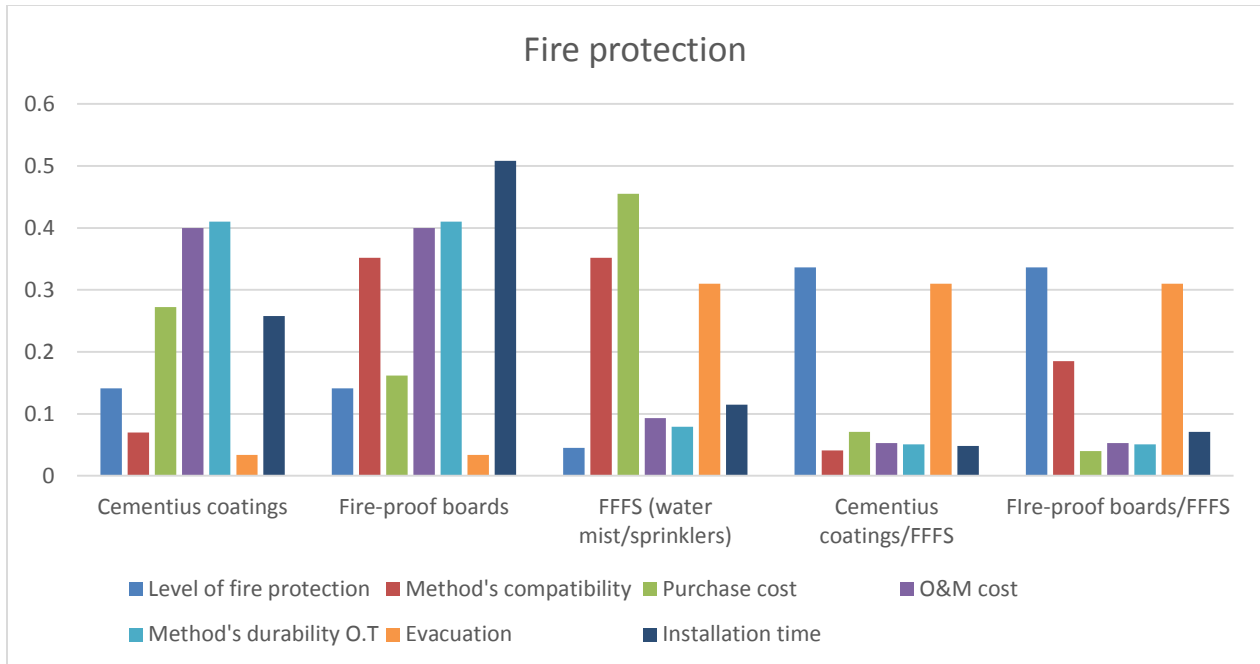
Στο υποκριτήριο αυτό οι συγκρίσεις μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων έγιναν βάσει του χρόνου εγκατάστασης που απαιτείται για κάθε μέθοδο. Η βαθμολόγηση έγινε σύμφωνα με τις παρακάτω εκτιμήσεις:

- Η λύση Fire-proof boards είναι ασθενώς πιο προτιμητέα (τιμή 3.0) από την λύση Cementius coatings διότι οι πυράντοχες πλάκες μπορούν να σταθεροποιηθούν απευθείας στην τελική επένδυση της σήραγγας με τη χρήση μεταλλικών, άκαυστων αγκυρίων ενώ η διαδικασία εγκατάστασης των πυρίμαχων κονιαμάτων προϋποθέτει την εφαρμογή ενός χαλύβδινου πλέγματος στην επένδυση της σήραγγας.
- Η λύση FFFS (water mist/sprinklers) υστερεί σε σχέση με τις άλλες 2 λύσεις καθώς εκτιμάται χρονοβόρος η εγκατάσταση των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων σε σχέση με τις παθητικές μεθόδους.
- Στο θέμα του χρόνου εγκατάστασης γίνεται κατανοητό ότι η χρήση μιας μεθόδου έχει προβάδισμα σε σχέση με το συνδυασμό μεθόδων.

Κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται και βαθμολογείται σε σχέση με τη συμπεριφορά που παρουσιάζει έχοντας ως βάση τα διάφορα υποκριτήρια που έχουν οριστεί (πίνακες 4.7-4.13). Η συγκριτική τους αξιολόγηση γίνεται με τη μέθοδο κατά ζεύγη από όπου και προκύπτουν τα αποτελέσματα προτίμησης (βαθμολογίας) τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 4.14 και στο διάγραμμα της εικόνας 4.6.

Πίνακας 4.14: Βαθμολόγηση των εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας σε σχέση με τα επιμέρους υποκριτήρια ως αποτέλεσμα των μεταξύ τους συγκρίσεων κατά ζεύγη

		Cementius coatings	Fire-proof boards	FFFS (water mist/sprinklers)	Cementius c./FFFS	Fire-proof b./FFFS
Technical part	Level of fire protection	0.141	0.141	0.045	0.336	0.336
	M. compatibility	0.070	0.352	0.352	0.041	0.185
Economy part	Purchase cost	0.272	0.162	0.455	0.071	0.040
	O&M cost	0.400	0.400	0.093	0.053	0.053
	M. durability	0.410	0.410	0.079	0.051	0.051
Tunnel's functionality	Evacuation	0.034	0.034	0.310	0.310	0.310
	Installation time	0.258	0.508	0.115	0.048	0.071



Εικόνα 4.6: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων αξιολόγησης των διάφορων εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας με βάση τα διάφορα υποκριτήρια εξέτασης

Το λογισμικό Expert Choice δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εκτελέσει την ανάλυση με 2 διαφορετικούς τρόπους:

1^{ος} τρόπος - Αν στην επιλογή *alternatives* χρησιμοποιηθεί το *ideal mode* τότε γίνεται κανονικοποίηση του αποτελέσματος κάθε εναλλακτικής λύσης μόνο με τη βαθμολογία της βέλτιστης λύσης για κάθε κριτήριο.

2^{ος} τρόπος – Αν στην επιλογή *alternatives* χρησιμοποιηθεί το *distributive mode* τότε το αποτέλεσμα δίνεται ως προϊόν του γραμμικού συνδυασμού των βαρών και των αντίστοιχων τιμών βαθμολογίας που λαμβάνει το υπό εξέταση σενάριο για κάθε υποκριτήριο ανάλυσης.

Σύμφωνα με τους Millet και Saaty (2000) αν η ανάλυση που πραγματοποιείται είναι ένα κλειστό σύστημα (δηλαδή δεν γίνεται προσθαφαίρεση εναλλακτικών λύσεων), τότε προτείνεται η χρήση του *distributive mode*, όπως στην παρούσα ανάλυση. Αντίθετα το *ideal mode* χρησιμοποιείται για να μην επηρεαστεί το τελικό αποτέλεσμα από άλλες επιπλέον εναλλακτικές λύσεις [Saaty et al,2000].

Το τελικό αποτέλεσμα και η κατάταξη των λύσεων με βάση την προτίμηση τους γίνεται με την εφαρμογή των συντελεστών βαρύτητας που έχουν προκύψει για κάθε υποκριτήριο, στα αποτελέσματα του πίνακα 4.14. Το αποτέλεσμα δίνεται ως προϊόν του γραμμικού συνδυασμού των βαρών και των αντίστοιχων τιμών βαθμολογίας που λαμβάνει το υπό εξέταση σενάριο για κάθε υποκριτήριο ανάλυσης (*distributive mode*, $CR < 10\%$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$A_i = \sum a_i^E \cdot w_i^E + \sum a_j^T \cdot w_j^T + \sum a_k^Z \cdot w_k^Z, \text{ όπου:}$$

a_i^E : η βαθμολογία που λαμβάνει το υπό εξέταση σενάριο σε σχέση με κάθε ένα από τα υποκριτήρια απόδοσης του συστήματος πυροπροστασίας σε συνθήκες πυρκαγιάς, ($i=1,2,3$)

w_i^E : η βαρύτητα για κάθε ένα από τα υποκριτήρια της απόδοσης του συστήματος πυροπροστασίας σε συνθήκες πυρκαγιάς (τεχνικό κομμάτι)

a_j^T : η βαθμολογία που λαμβάνει το υπό εξέταση σενάριο σε σχέση με κάθε ένα από τα υποκριτήρια οικονομικής απόδοσης του συστήματος πυροπροστασίας, ($j=1,2$)

w_j^T : η βαρύτητα για κάθε ένα από τα υποκριτήρια οικονομικής απόδοσης

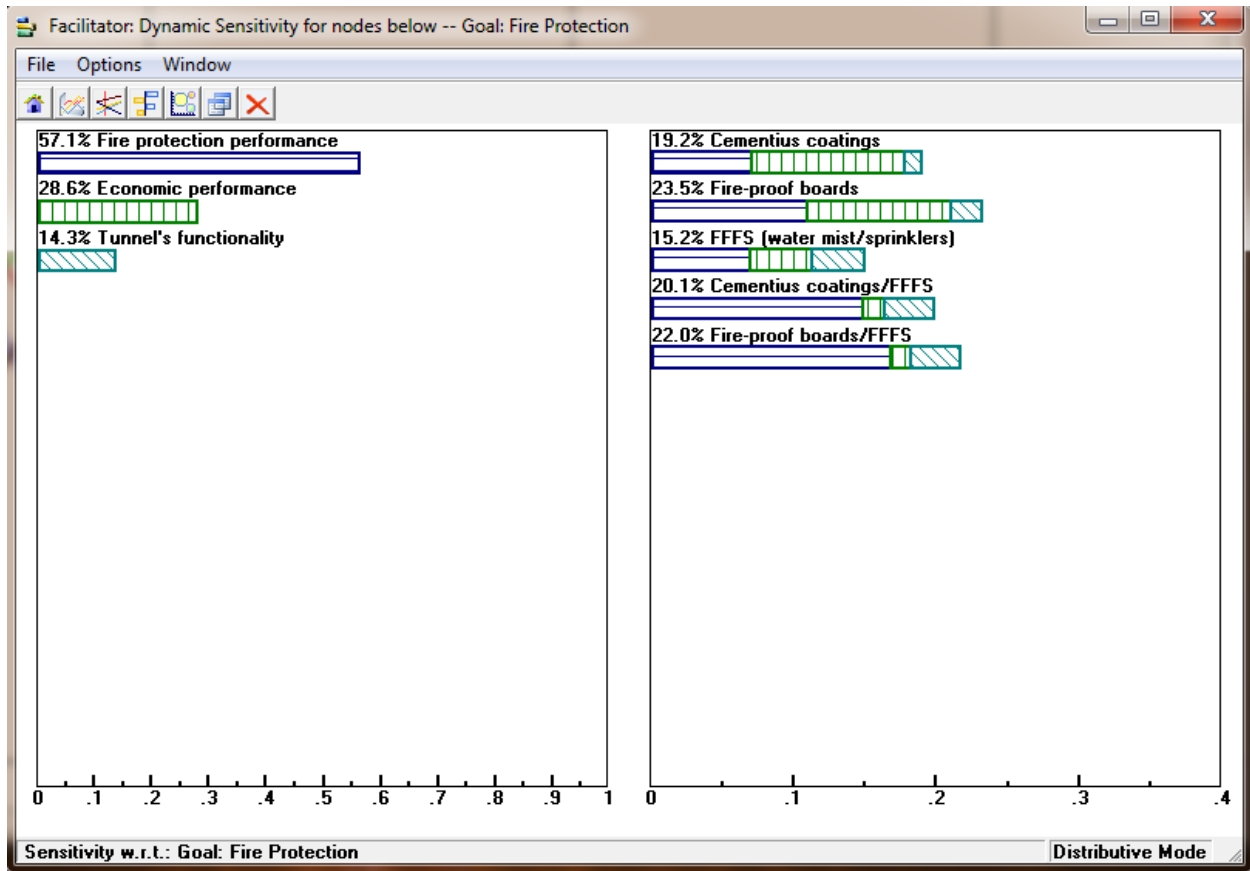
a_k^Z : η βαθμολογία που λαμβάνει το υπό εξέταση σενάριο σε σχέση με κάθε ένα από τα υποκριτήρια λειτουργικότητας της σήραγγας, ($k=1,2,3$)

w_k^Z : η βαρύτητα για κάθε ένα από τα υποκριτήρια λειτουργικότητας της σήραγγας

Τα αποτελέσματα προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας σε σήραγγα δίνονται στον πίνακα 4.15 και στο σχήμα της εικόνας 4.7. Για το συγκεκριμένο σενάριο όπου επιλέχθηκε το τεχνικό κομμάτι να είναι 1.99 φορές σημαντικότερο από το οικονομικό κομμάτι προκύπτει ότι, η καλύτερη επιλογή είναι η χρήση πυράντοχων πλακών για την δημιουργία πυράντοχης ασπίδας στην τελική επένδυση της σήραγγας **Fire-proof boards** ενώ δεύτερος κατατάσσεται ο συνδυασμός Fire-proof boards/FFFS. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ίδια ανάλυση στο ideal mode του Expert choice οι δύο πιο προτιμητέες λύσεις είναι πάλι οι ίδιες (με διαφορετική σειρά). Τέλος ακολουθούν κατά φθίνουσα βαθμολογία οι εναλλακτικές λύσεις Cementius coatings/FFFS, Cementius coatings και FFFS (water mist/sprinklers).

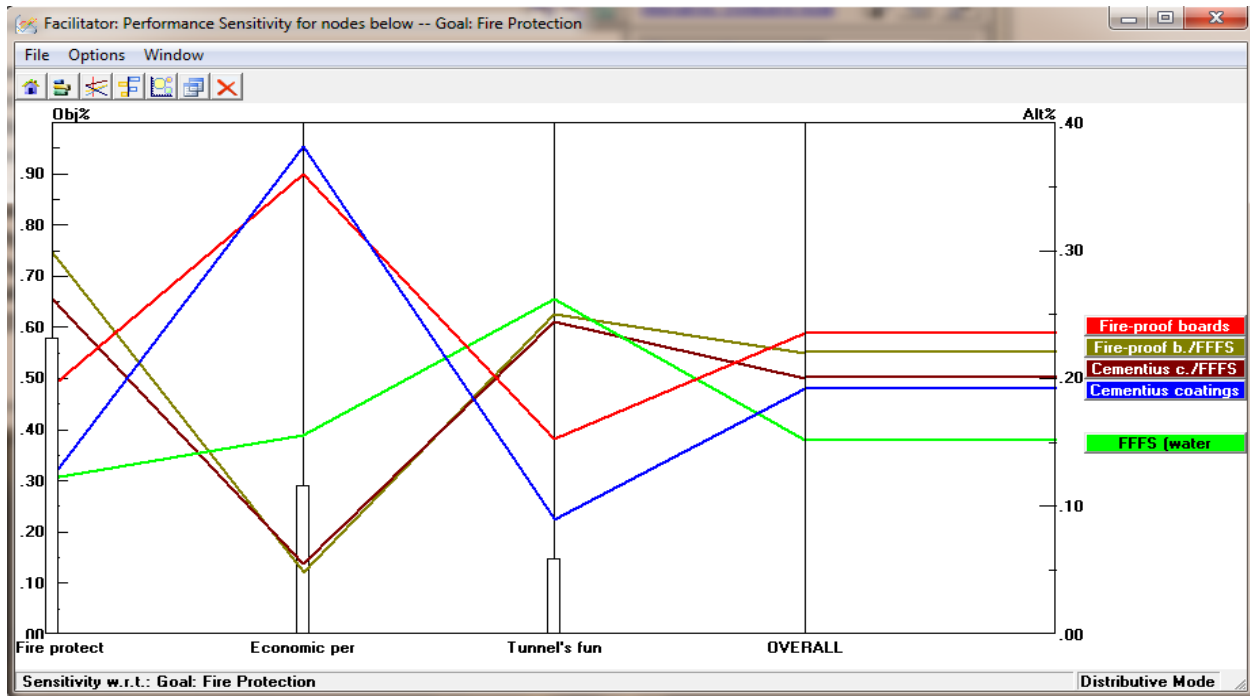
Πίνακας 4.15: Τελική βαθμολογία και κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων για σύστημα πυροπροστασίας σε σήραγγα

Σενάριο εξέτασης	Τελική βαθμολογία	Κατάταξη
Cementius coatings	0.192	4
Fire-proof boards	0.235	1
FFFS (water mist/sprinklers)	0.152	5
Cementius coatings/FFFS	0.201	3
Fire-proof boards/FFFS	0.220	2



Εικόνα 4.7: Βαθμολόγηση και κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας και παρουσίαση της συνεισφοράς του κάθε κριτηρίου στο τελικό αποτέλεσμα

Το λογισμικό Expert Choice παρέχει την δυνατότητα εκτέλεσης ανάλυσης ευαισθησίας των διάφορων λύσεων, έτσι ώστε να παρουσιαστεί το πόσο συνεισφέρει το κάθε κριτήριο στην τελική βαθμολογία. Ήδη κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό μέσω της εικόνας 4.7, όπου φαίνεται ότι η προτεινόμενη λύση εμφανίζεται με ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα 3 κύρια κριτήρια εξέτασης με συντελεστές βαρύτητας 0.571 (Fire protection performance), 0.286 (Economic performance) και 0.143 (Tunnel's functionality). Μία πιο αναλυτική προσέγγιση δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.8 που ακολουθεί, στο οποίο παρουσιάζονται συγκριτικά οι βαθμολογίες που λαμβάνουν οι εναλλακτικές λύσεις πυροπροστασίας σε σχέση με τα κριτήρια εξέτασης. Εύκολα παρατηρείται το προβάδισμα της λύσης Cementius coatings στο κριτήριο της οικονομικής απόδοσης και της λύσης FFFS (water mist/sprinklers) στο κριτήριο της λειτουργικότητας αντίστοιχα. Για το κριτήριο της τεχνικής απόδοσης προβάδισμα παρουσιάζει ο συνδυασμός Fire-proof boards/FFFS. Παρατηρείται ότι παρόλο που η λύση Fire-proof boards δεν προηγείται των άλλων λύσεων σε κανένα από τα τρία κριτήρια υπερέχει στην συνολική απόδοση του συστήματος της ανάλυσης.

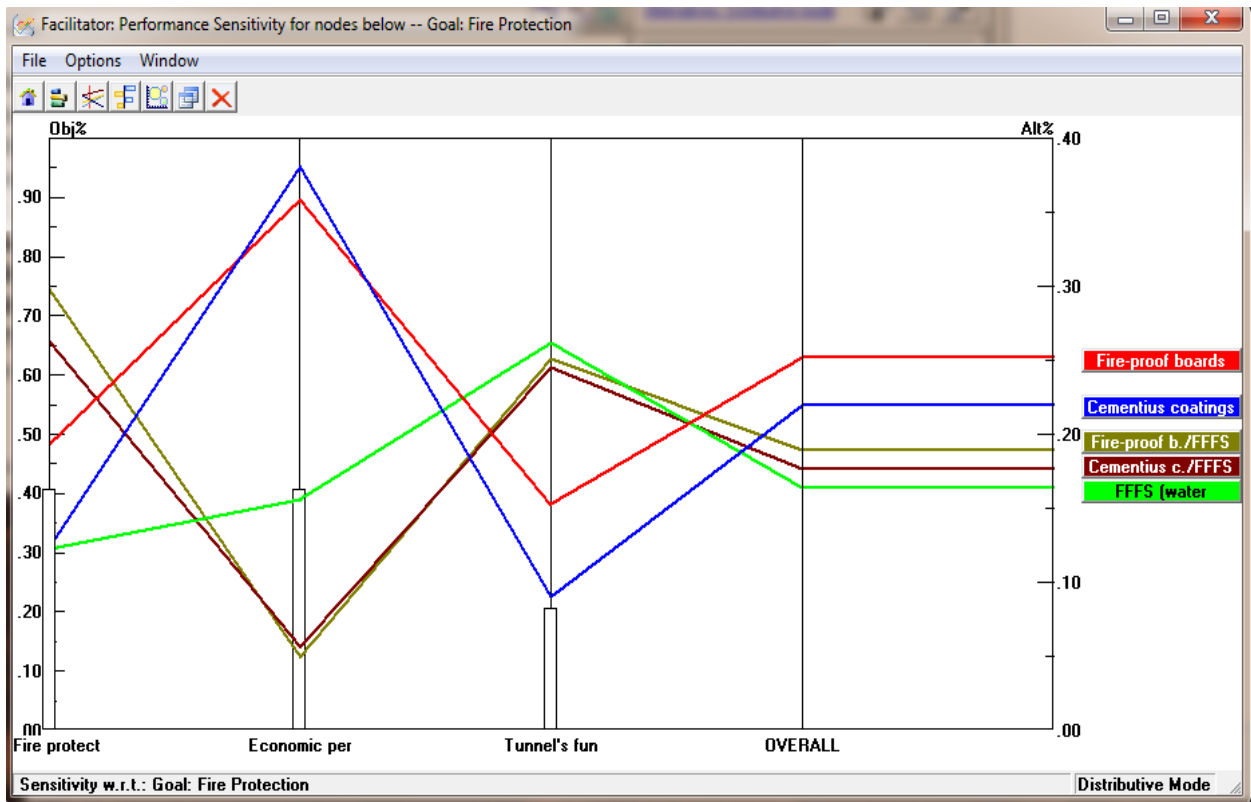
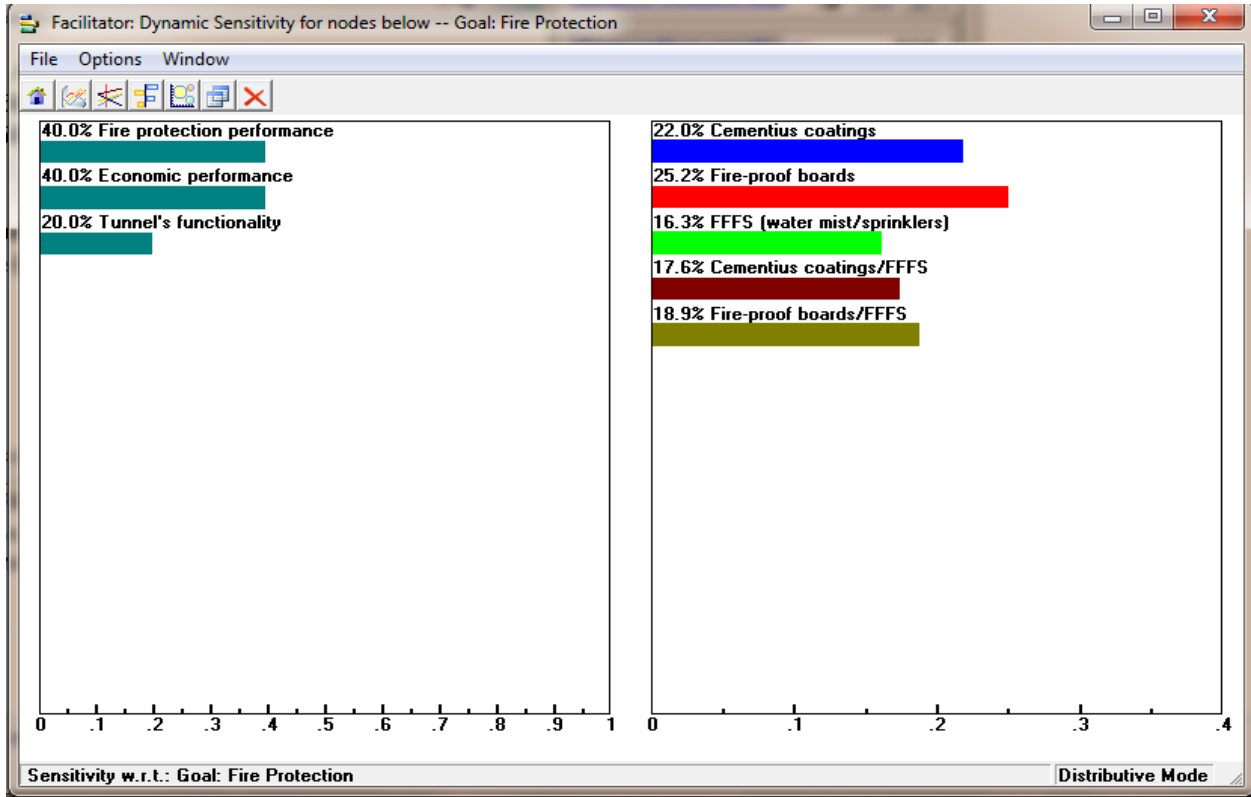


Εικόνα 4.8: Διαγραμματική απεικόνιση της βαθμολόγησης εναλλακτικών λύσεων πυροπροστασίας σε σήραγγα για κάθε ένα από τα κριτήρια εξέτασης

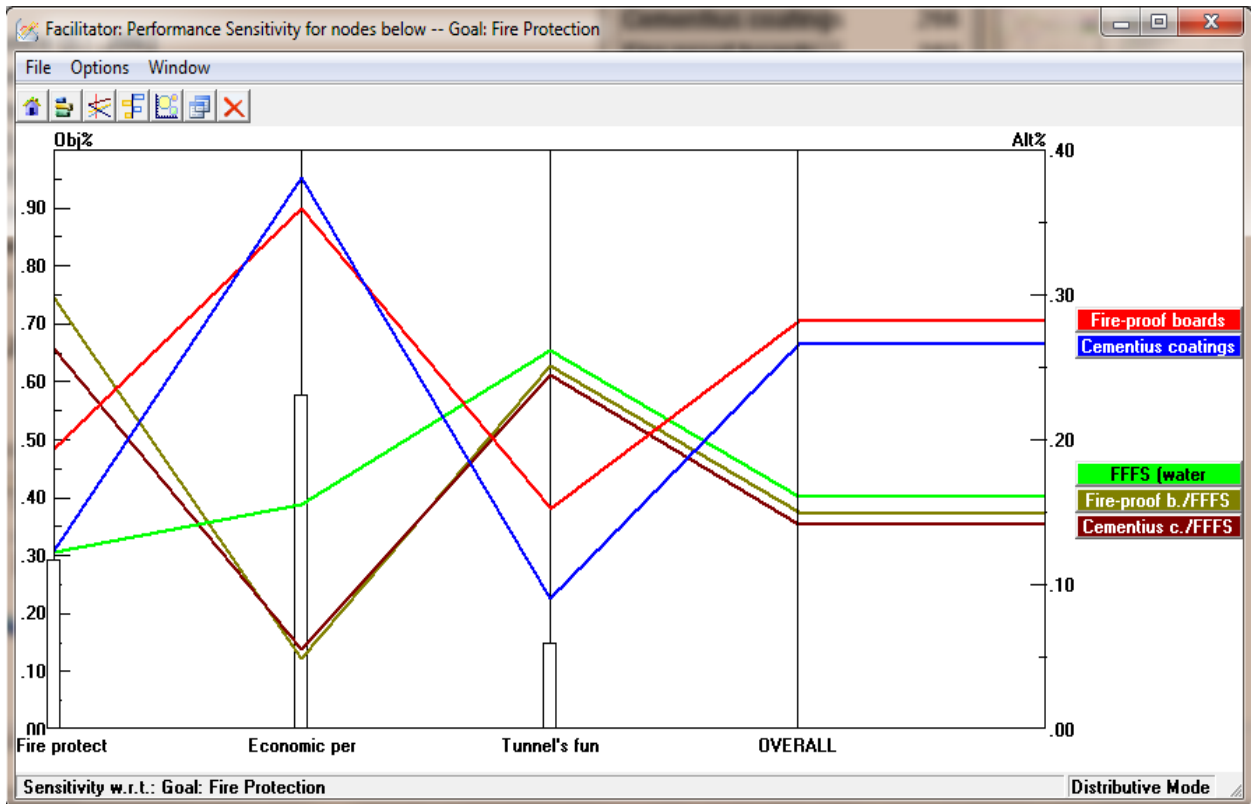
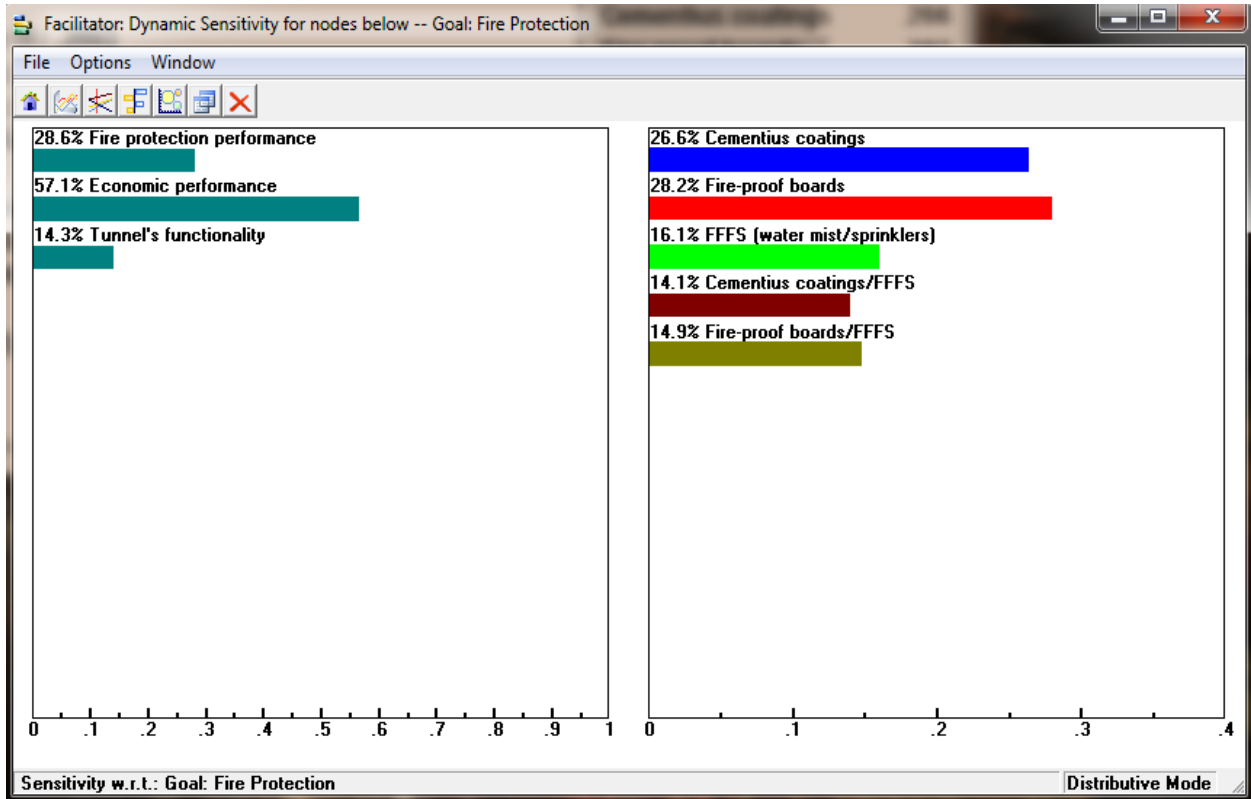
Η ανάλυση ευαισθησίας που παρουσιάζεται στις εικόνες 4.9(α,β) και 4.10(α,β) δείχνει την αλλαγή στη βαθμολογία και κατάταξη των λύσεων με την πιθανή αλλαγή στους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων εξέτασης. Με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα βάση των αρχικών εκτιμήσεων που έγιναν, πιο προτιμητέα λύση είναι η χρήση πυράντοχων πλακών (Fire-proof boards). Ωστόσο για την ανάλυση ευαισθησίας εκτελέστηκαν 2 επιπρόσθετες αναλύσεις στο λογισμικό Expert Choice όπου επιλέχθηκαν διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας στα κύρια κριτήρια εξέτασης.

1. Στην ανάλυση με συντελεστές βαρύτητας 0.40 (Fire protection performance), 0.40 (Economic performance) και 0.20 (Tunnel's functionality) οι λύσεις κατά φθίνουσα σειρά προτίμησης είναι: Fire-proof boards[0.252], Cementius coatings [0.220], Fire-proof boards/FFFS[0.189], Cementius coatings/FFFS[0.176] και FFFS (water mist/sprinklers)[0.163].
2. Στην ανάλυση με συντελεστές βαρύτητας 0.286 (Fire protection performance), 0.571 (Economic performance) και 0.143 (Tunnel's functionality) οι λύσεις κατά φθίνουσα σειρά προτίμησης είναι: Fire-proof boards[0.282], Cementius coatings[0.266], FFFS (water mist/sprinklers) [0.161], Fire-proof boards/FFFS [0.149] και Cementius coatings/FFFS [0.141].

Παρατηρείται ότι πιο προτιμητέα λύση εξακολουθεί να είναι η εφαρμογή πυράντοχων πλακών όσο αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου της οικονομικής απόδοσης.



Εικόνα 4.9(α,β): Επιπρόσθετη ανάλυση για συντελεστές 0.4,0.4,0.2 στα κύρια κριτήρια εξέτασης



Εικόνα 4.10(α,β): Επιπρόσθετη ανάλυση για συντελεστές 0.286,0.571,0.143 στα κύρια κριτήρια εξέτασης

4.3. Γενικά συμπεράσματα - Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Γενικά συμπεράσματα

Η πυρκαγιά σε σήραγγα αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα θέματα ασφάλειας παγκοσμίως και η μελέτη του ήδη απασχολεί έντονα τους μηχανικούς. Στην παρούσα εργασία διαπιστώθηκε, μέσα από περιγραφές τραγικών ατυχημάτων σε σήραγγες και επεξεργασία στατιστικών μελετών, το μέγεθος των κοινωνικών και οικονομικών συνεπειών που μπορεί να επιφέρει μια τέτοιου είδους πυρκαγιά. Όπως φάνηκε από τις αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία, σε όλες τις πυρκαγιές μεγάλης έκτασης που συνέβησαν σε σήραγγες ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών ήταν ανησυχητικά μεγάλος, το κόστος αποκατάστασης αρκετά εκατομμύρια ευρώ και ο χρόνος που απαιτήθηκε για να επαναλειτουργήσει η σήραγγα από μήνες έως και χρόνια. Εκτός όσων αναφέρθηκαν, θα ήταν φρόνιμο να εξετάζεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο το μέγεθος της καταστροφής που επιφέρει ένα τέτοιου βεληνεκούς ατύχημα. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 οι συνολικές οικονομικές απώλειες που εκτιμήθηκαν για την Ιταλική οικονομία στην περιοχή κοντά στη σήραγγα του Mont Blanc ξεπέρασαν το 1.500.000.000 € παρόλο που το κόστος επισκευής της σήραγγας ήταν 392.000.000 €. Γεγονότα όπως η πυρκαγιά του Mont Blanc, τόνισαν την ανάγκη εύρεσης μέτρων προστασίας της ανθρώπινης ζωής αλλά και των σηράγγων.

Για την αντιμετώπιση των πυρκαγιών σε σήραγγες προτείνεται η χρήση μέτρων ενεργητικής και παθητικής πυροπροστασίας. Η ενεργητική πυροπροστασία χρησιμεύει στην έγκαιρη ανίχνευση της πυρκαγιάς (μέσω αισθητήρων) αλλά και στην κατάσβεση της μέσω ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (ψεκαστήρες, σύστημα ομίχλης νερού κ.α.) που εγκαθίστανται στη σήραγγα. Ωστόσο, τέτοιες μέθοδοι πυροπροστασίας απαιτούν συχνή συντήρηση και έλεγχο έτσι ώστε το σύστημα να είναι σε θέση να ανταποκριθεί ανά πάσα στιγμή. Ταυτόχρονα η παθητική πυροπροστασία προσθέτει ασφάλεια στην κατασκευή της σήραγγας μέσω μεθόδων όπως η χρήση πυράντοχων πλακών (συγκεκριμένης σύστασης από γύψο, γυαλί κ.α.), η εφαρμογή πυράντοχων τσιμεντοειδών κονιαμάτων ως επίστρωση στην τελική επένδυση και ο σχεδιασμός πυράντοχου σκυροδέματος (με ίνες πολυπροπυλενίου, συγκεκριμένη σύσταση σε αδρανή ή άλλα πρόσθετα). Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο 3, υπάρχουν διαθέσιμα υλικά και μέθοδοι πυροπροστασίας που έχουν δοκιμαστεί σε πειράματα μεγάλης κλίμακας και είχαν επιτυχή αποτελέσματα ως προς τα πιο δυσμενή σενάρια πυρκαγιάς (RWS). Παρόλα αυτά γεγονός είναι ότι, παρά την μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα τα τελευταία χρόνια λίγες σήραγγες παγκοσμίως διαθέτουν συστήματα πυροπροστασίας αφού το κόστος των μεθόδων παραμένει υψηλό. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιχειρήθηκε η αξιολόγηση μεθόδων πυροπροστασίας που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε σήραγγες και προτάθηκε η χρήση των πυράντοχων πλακών. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω της

διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (AHP), που όπως διαπιστώθηκε είναι το πλέον κατάλληλο εργαλείο για τη λήψη απόφασης σε συστήματα ανάλογης πολυπλοκότητας.

Σε επόμενο στάδιο της έρευνας εκτιμάται ότι πρέπει να διερευνηθεί ο καταλληλότερος και συντομότερος τρόπος εφαρμογής των υλικών/μεθόδων πυροπροστασίας στις σήραγγες. Το υψηλό τους κόστος επιτάσσει την αναζήτηση νέων μεθόδων ή την διεξαγωγή περαιτέρω δοκιμών με προσαρμοσμένα πάχη υλικών πυροπροστασίας ώστε οι μέθοδοι να καταστούν οικονομικά εφικτοί για ευρεία εφαρμογή. Τέλος, άλλο ένα ζήτημα που χρήζει διερεύνησης είναι το βέλτιστο σχήμα, η διατομή και γενικότερα ο τρόπος κατασκευής της σήραγγας έναντι πυρκαγιάς χωρίς να συνυπολογίζονται οι μέθοδοι πυροπροστασίας.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται αξιολόγηση των μεθόδων πυροπροστασίας ,που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα σε σήραγγες ,μέσω της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης (AHP). Η αξιολόγηση αυτή είχε ως βασικό στόχο να δώσει τη βέλτιστη λύση πυροπροστασίας σε σήραγγα με χρήση μίας ή περισσότερων μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να γίνουν συγκρίσεις όπου συμμετείχαν δύο παθητικές (Cementius coatings, Fire-proof boards) και μία ενεργητική μέθοδος (FFFS water mist/sprinklers) αλλά και συνδυασμοί αυτών. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν προκύπτουν τα παρακάτω:

1. Στην βασική ανάλυση με αυξημένο συντελεστή βαρύτητας στο τεχνικό κομμάτι κατατάσσεται πρώτη η λύση της εφαρμογής των πυράντοχων πλακών και δεύτερος ο συνδυασμός των πυράντοχων πλακών-ενεργητικού συστήματος, με τις δύο λύσεις να βρίσκονται κοντά στη βαθμολογία. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι πυράντοχες πλάκες παρουσιάζουν καλύτερα συνολικά αποτελέσματα στο κριτήριο της απόδοσης του συστήματος σε πυροπροστασία αφού εξασφαλίζουν το μέγιστο απαιτούμενο επίπεδο παθητικής πυροπροστασίας χωρίς να παρουσιάζουν προβλήματα συνάφειας με την κατασκευή της σήραγγας.
2. Στις δυο επιπρόσθετες αναλύσεις εξακολουθεί η λύση των πυράντοχων πλακών να παρουσιάζεται ως η βέλτιστη. Οι διαφορές των αναλύσεων αυτών με την βασική διακρίνονται στην δεύτερη πιο προτιμητέα λύση, καθώς εδώ συστήνεται η χρήση πυράντοχων τσιμεντοειδών κονιαμάτων, και στην μεγάλη βαθμολογική διαφορά που παρουσιάζουν οι δυο πρώτες λύσεις με τις υπόλοιπες. Αυτό προκύπτει επειδή πραγματοποιείται σταδιακή αύξηση του συντελεστή βαρύτητας του οικονομικού κριτηρίου όποτε και φθίνουν οι βαθμολογίες των συνδυαστικών λύσεων (Cementius coatings/FFFS, Fire-proof boards/FFFS) που έχουν μεγαλύτερες οικονομικές απαιτήσεις.

Συνεπώς με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού Expert Choice ως βέλτιστη λύση συστήματος πυροπροστασίας σε όλες τις αναλύσεις παρουσιάζεται η χρήση των πυράντοχων πλακών (Fire-proof boards).

Βιβλιογραφία

Andersen, T., 2002. Table 1: Road and Metro Tunnel Accidents.[Online] Available: http://www.lotsberg.net/artiklar/andersen/en_table_1.html [Accessed October 2014]

Andersen, T., Paaske, B., 2002. Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept.

ASTM E136- 12 Standard Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750°C.

Barbauskas, V., Peacock, R., 1992. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard. Fire Safety Journal:18, pp. 255-272.

Beard, A., Carvel, R., 2005. The Handbook of Tunnel Fire Safety. Thomas Telford Publishing: London.

Carvel, R., 2004. Fire size in tunnels. Ph.D thesis, Heriot-Watt University, School of the Built Environment, Division of Civil Engineering Riccarton , Edinburgh.

CEMBUREAU, 2004. Improving fire safety in tunnels: The concrete pavement solution. [Online] Available:<http://www.bibm.eu/Documenten/improving%20fire%20safety%20in%20tunnels%20document.pdf> [Accessed October 2014]

CETU, 2008. Datasheet of Meyco Fix Fireshield 1350.

CETU, 2010. WATER MISTS IN ROAD TUNNELS. State of knowledge and provisional assessment elements regarding their use.

Clement, F., Focaracci, A., 2011. “Fire Protection in Tunnels: Requirements, Solutions and Case histories” Proceedings of World Tunnel Congress.

Copier, W.J., 1979. The spalling of normalweight and lightweight concrete on exposure to fire. Heron, Vol.24, No 2.

Data sheet of Sikacrete 213F : www.sika.com

Davidson, M.T., Harik, I.E., Davis, D.B., 2013. Fire impact and passive fire protection of infrastructure: State of the Art. Journal of Performance of Constructed Facilities Vol 27, No 2, pp. 135-143.

Felicetti, R., Gambarova, P.G., Meda, A., 2006. Residual behaviour of steel rebars and R/C sections after a fire. Construction and Building Materials Vol 23, pp.3546-3555.

FireVu, 2014. Railway tunnel fires: the dangers, consequences, prevention and legislation. [Online] Available: <http://www.firevu.com/railway-tunnel-fires/> [Accessed October 2014]

Fletcher, I.A., Welch, S., Torero, J.L., Carvel, R.O., Usmani, A., 2007. BEHAVIOUR OF CONCRETE STRUCTURES IN FIRE. THERMAL SCIENCE: Vol.11, No.2, pp. 37-52.

Gabay, D., 2004. Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements: COMPARED FIRE SAFETY FEATURES FOR METRO TUNNELS. First International Symposium, Prague.

Haack, A.,2004. "Technical options for fireproof tunnel linings-Limits,advantages and disadvantages of the various solutions." Proceedings of the 1st Brazilian Congress on Tunnels and Underground Structures-International Seminar on South American Tunneling, Sao Paulo,Brazil.

<http://volzhsky-vgg.all.biz/el/polypropylenoy-nes-g3099080>

<http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/>

http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/fiche09-passive_fire-protection-fire_barrier_135_cle532f5a.pdf

http://www.ditzingen.de/fileadmin/Dateien/Dateien/Feuerwehr/Downloads/Einsatz_und_Unfall/A770080604729351_real_tunnel_fires.pdf

<http://www.fire-protection.gr/>

<http://www.iefimerida.gr/news/187291/synagermos-se-gallia-vretania-pyrkagia-se-fortigo-sti-siragga-tis-maghis-diakopikan-ta>

<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/mont.htm>

http://www.metal.ntua.gr/uploads/3915/760/course2_explosions.pdf

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:guide:73:ed-1:v1:en>

International Tunneling Association, 2004. Guidelines for structural fire resistance for road tunnels, Working Group No.6 Maintenance and Repair.

ISO Guide 73, 2009. Risk management-Vocabulary.

Khoury, G.A., 2000. Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in Structural Engineering and Materials Vol. 2, pp. 429-447, Imperial College, London.

Khoury, G.A., 2003. Passive fire protection in tunnels. Concrete for the construction industry Vol. 37, No 2, Imperial College, London.

Khoury, G.A., Anderberg, Y., 2000. Fire safety design: Concrete spalling review. Report submitted to the Swedish National Road Administration.

Kunishima, M., Horikawa, K., 1972. Failure Knowledge Database/100 Selected Cases: The fire disaster in the Tokyo-Nagoya Nihon-zaka tunnel. Graduate School of Frontier Science, University of Tokyo.

Lönnermark, A., 2005. On the characteristics of Fire in Tunnels. Ph.D thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University.

Millet, I., Saaty, T.L., 2000. On the relativity of relative measures-accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP. European Journal of Operational Research 121(1): 205-212.

NFPA 502, 2011. Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.

Peng, G.F., Yang, W.W., Zhao, J., Liu, Y.F., Bian, S.H, Zhao, L.H., 2006. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. Cement and Concrete Research Vol.36, pp. 723-727.

Phan, L.T., 2008. Pore pressure and explosive spalling in concrete. Materials and structures Vol 41, pp.1623-1632.

PIARC, 1999. Committee on Road Tunnels, Report on "Fire and smoke control in road tunnels".

Promat, 2008. Tunnel Fire Protection For Tunnel Structures & Services.

Saaty, T.L., 1980. "The Analytic Hierarchy Process." McGraw-Hill, New York.

theguardian, 2004. 16 cleared over ski train fire. Associated Press in Salzburg, Austria. [Online] Available: <http://www.theguardian.com/world/2004/feb/19/austria> [Accessed October 2014]

UPTUN research program, 2008. Workpackage 4, Fire effects and tunnel performance: system structural response, Spalling review: types, assessment and prevention.

www.promat-tunnel.com

www.tunneltalk.com

www.ultrafog.com

Αγγελόπουλος, Γ., Γιοκάρης, Σ.,2005. Επίδραση πυρκαγιάς σε σήραγγα- Μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης. 11^ο Φοιτητικό Συνέδριο «Ενισχύσεις – επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και ανασχεδιασμός υφιστάμενων κατασκευών».

Δηλαβέρης, Κ., 2004. «Σύστημα Παθητικής Πυροπροστασίας MEYCO Fix Fireshield 1350», Ημερίδα Νέες Τεχνολογίες στα Υπόγεια Έργα, Αθήνα.

Ζαφειρίου, Σ., 2012. Fire Rescue News: Ατυχήματα πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες. [Διαδικτυακή πηγή] Διαθέσιμη σε: <http://www.fire.gr/?p=1703> [Πρόσβαση Οκτώβριος 2014]

Προεδρικό Διάταγμα 264/2007 Τεύχος Πρώτο.

Σακκάς, Κ., 2014. Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ: Προστασία των μέτρων στήριξης σηράγγων από πυρκαγιά.

Σακκάς, Κ., Νομικός, Π., Πάνιας, Δ., Σοφιανός, Α., 2010. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής: Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά.

Σιαμπίρη, Α., 2010. «Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Αξιολόγησης», Μεταπτυχιακή Μελέτη Ειδίκευσης Ραδιοηλεκτρολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Σιδέρης, Κ., 2010. Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. *ΤΣΕΛΚΑ-4Μ Εκδοτική*.

Τάσιος, Θ., Δεοδάτης Γ., 1984. Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών έναντι πυρκαγιάς. [Διαδικτυακή πηγή] Διαθέσιμη σε:

http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/anasigr/files/keflfysikiTisPyrkagias.pdf [Πρόσβαση Νοέμβριος 2014]

Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διοικητική Αρχή Σηράγγων., 2009. Μέθοδος Ανάλυσης Επικινδυνότητας Οδικών Σηράγγων χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα.