

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΥΠ. ΥΠΟΔΟΜΩΝ, ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΓΕΝ. ΓΡΑΜ. ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ  
ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΧΩΡΙΣ  
ΕΜΠΛΟΚΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΥΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ  
ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΑ. – ΣΕΝΑΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**

## **Άρθρο 1. Αντικείμενο – Σκοπός- Πεδίο εφαρμογής**

Αντικείμενο της παρούσας είναι η καθιέρωση οδηγιών για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας από την εκδήλωση πυρκαγιάς (σε οχήματα που δεν εμπλέκουν μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων) εντός των οδικών σηράγγων οι οποίες εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ 230/2007 (ΦΕΚ/τ. Α/264/23-11-2007).

Οι σκοποί αυτής της ανάλυσης επικινδυνότητας είναι (οι παραπομπές αναφέρονται στα άρθρα του Π.Δ. 230/2007):

- ✓ Αιτιολόγηση εναλλακτικών μέτρων ισοδύναμου επιπέδου προστασίας (άρθρο 3.2 και παραρτ.Ι, 1.2)
- ✓ Για την διερεύνηση της επίδρασης ειδικών χαρακτηριστικών (παραρτ.Ι, 1.1.2 και 1.1.3)
- ✓ Διερεύνηση της επίδρασης μεγάλης κατά μήκος κλίσης (παραρτ.Ι, 2.2.3)
- ✓ Διερεύνηση της επίδρασης λωρίδων μικρού πλάτους (παραρτ.Ι, 2.2.4)
- ✓ Λήψη απόφασης για Σύστημα αερισμού (παραρτ.Ι, 2.9.3)
- ✓ Λήψη απόφασης για την θέση των υπηρεσιών διάσωσης (παραρτ.Ι, 3.4)
- ✓ Διερεύνηση της δυνατότητας να επιτρέπεται στα φορτηγά το προσπέρασμα σε σήραγγες που διαθέτουν περισσότερες από μία λωρίδες ανά κατεύθυνση (παραρτ.Ι, 3.8)
- ✓ Πληροφορίες για την κατάρτιση του ΣΑΕΚ
- ✓ Πληροφορίες για την επιλογή συστήματος αερισμού
- ✓ Διερεύνηση της επίδρασης της λειτουργικής απώλειας τμημάτων του εξοπλισμού
- ✓ Διερεύνηση διαφορετικών ανθρώπινων συμπεριφορών
- ✓ Επιλογή των οδών διαφυγής

## **Άρθρο 2. Περιεχόμενο της ανάλυσης επικινδυνότητας**

Τα περιεχόμενα της ανάλυσης επικινδυνότητας είναι:

- Κεφάλαιο 1: Το πεδίο ορισμού στο οποίο νοείται η ασφάλεια της σήραγγας
- Κεφάλαιο 2: Αποκλίσεις από ελάχιστες απαιτήσεις ασφάλειας, καθορισμός σήραγγας αναφοράς.
- Κεφάλαιο 3: Καθορισμός κινδύνων και επιλογή σεναρίων
- Κεφάλαιο 4: Εξέταση των σεναρίων
- Κεφάλαιο 5: Περίληψη – Συμπεράσματα - Προτάσεις

## Άρθρο 3. Κεφάλαιο 1: Το πεδίο ορισμού της ασφάλειας της σήραγγας

Περιλαμβάνει:

- Τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας της σήραγγας
- Την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας
- Την τεχνική διάρκεια ζωής των επί μέρους στοιχείων και υποσυστημάτων της σήραγγας
- Την χρονική περίοδο αναφοράς της διενεργηθείσόμενης ανάλυσης (όχι μικρότερη από 6 χρόνια)
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά
- Την θέση του κέντρου ελέγχου και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες (φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον)
- Τις συνθήκες του οδικού δικτύου προσέγγισης της σήραγγας
- Τον κυκλοφοριακό φόρτο και την σύνθεσή του
- Τις λειτουργικές και οργανωτικές διαρρυθμίσεις
- Τις κυκλοφοριακές διαρρυθμίσεις, καταστάσεις και κανονισμούς
- Τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό καθώς και τον εξοπλισμό έκτακτων καταστάσεων

Στο Παράρτημα Α δίνονται λεπτομέρειες για όλες τις παραπάνω συνιστώσες του πεδίου ορισμού της σήραγγας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης έχουν νόημα και χρησιμότητα στο βαθμό που το σύνολο των επί μέρους συνιστωσών του πεδίου ορισμού της ασφάλειας της σήραγγας ισχύουν, είναι έγκυρα και έχει διασφαλιστεί η υλοποίησή τους. Σε περίπτωση που αυτά δεν υλοποιούνται τούτο θα γνωστοποιείται αμέσως στη Διοικητική Αρχή, η οποία θα αποφασίζει για την ανάγκη εκπόνησης νέας ανάλυσης επικινδυνότητας.

Για τις σήραγγες που βρίσκονται στο στάδιο μελέτης, τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν την αρχική προσέγγιση και ο χρόνος αναφοράς τους αρχίζει από την πρώτη παράδοση της σήραγγας σε χρήση. Για τις σήραγγες αυτές η ανάλυση επικινδυνότητας θα διενεργείται (εφόσον απαιτείται) παράλληλα με το στάδιο της οριστικής μελέτης, ώστε τα συμπεράσματά της να ενσωματωθούν στη μελετητική διαδικασία.

Για τις σήραγγες που βρίσκονται στο στάδιο κατασκευής, τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν την αρχική προσέγγιση και ο χρόνος αναφοράς τους αρχίζει από την πρώτη παράδοση της σήραγγας σε χρήση. Για τις σήραγγες αυτές η ανάλυση επικινδυνότητας θα διενεργείται (εφόσον απαιτείται) πριν την παράδοση της σήραγγας σε πρώτη χρήση, ώστε τα συμπεράσματά της να ενσωματωθούν, μετά από αντίστοιχη μελέτη στην κατασκευαστική διαδικασία.

Για τις ήδη λειτουργούσες σήραγγες, για τις οποίες απαιτείται εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας, τα παραπάνω στοιχεία αναφέρονται στη σήραγγα που θα προκύψει μετά την αναβάθμισή της, για επίτευξη ισοδύναμου επίπεδου ασφαλείας, κατά την έννοια της παρ.2 του άρθρου 3 του Π.Δ. 230/2007.

## **Άρθρο 4. Κεφάλαιο 2: Αποκλίσεις από ελάχιστες απαιτήσεις ασφάλειας, καθορισμός σήραγγας αναφοράς**

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται οι αποκλίσεις των χαρακτηριστικών της σήραγγας από τις ελάχιστες απαιτήσεις που τίθενται με το Π.Δ. 230/2007 και την Οδηγία (αν δεν υπάρχουν τέτοιες αποκλίσεις, η εκπόνηση της ανάλυσης επικινδυνότητας δεν είναι υποχρεωτική, μπορεί όμως να γίνει για σκοπούς που αναφέρονται στο άρθρο 1 της παρούσας).

Ως σήραγγα αναφοράς ορίζεται μια σήραγγα, η οποία εκπληρώνει και ικανοποιεί το σύνολο των ελάχιστων απαιτήσεων ασφάλειας του Π.Δ. 230/2007 και της Οδηγίας, ενώ κατά τα λοιπά το πεδίο ορισμού της ασφάλειάς της, κατά την έννοια του άρθρου 3, ταυτίζεται με αυτό της υπό εξέταση σήραγγας.

## Άρθρο 5. Κεφάλαιο 3: καθορισμός κινδύνων και επιλογή σεναρίων

### 5.1. Η φύση και τα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων στις οδικές σήραγγες

Εξεταζόμενη από άποψη ασφάλειας μια οδική σήραγγα δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένα τμήμα δρόμου σε ένα περιορισμένο χώρο. Οι διακριτές διαφορές των ατυχημάτων στις σήραγγες και την ανοικτή οδοποιία, καθορίζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σήραγγων, που περιληπτικά είναι:

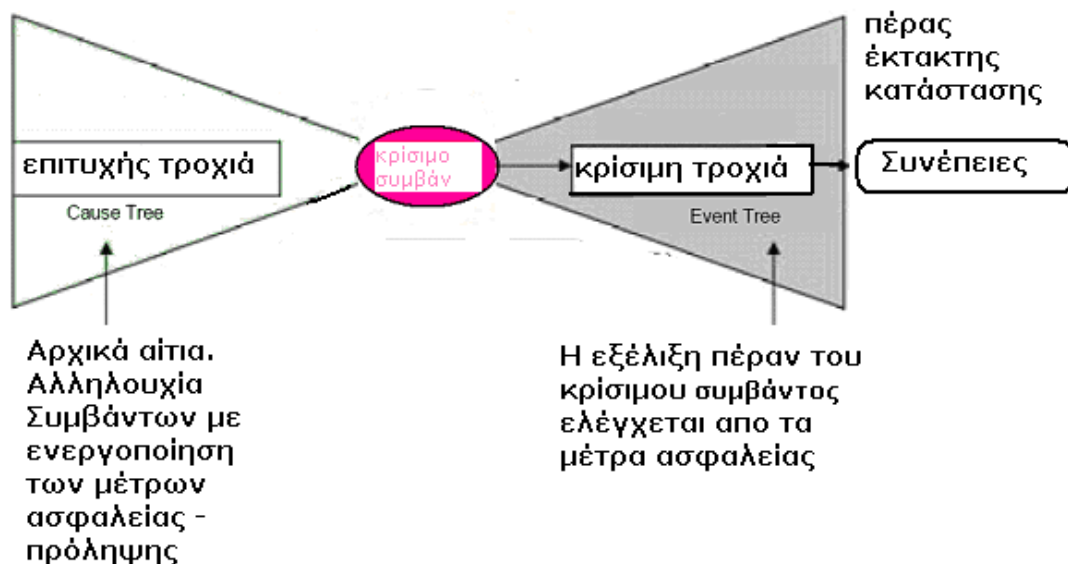
- ✓ Εισερχόμενη και εξερχόμενη κυκλοφορία πολύ σπανιότερα στις σήραγγες (γενικά στις σήραγγες λιγότεροι κόμβοι και διασταυρώσεις, ανυπαρξία παρόδιας κίνησης)
- ✓ Συνήθως απαγορεύεται η κυκλοφορία πεζών, μοτοποδηλάτων, γεωργικών ελκυστήρων
- ✓ Γενικά σταθερές κλιματικές συνθήκες (απουσία χιονιού, πάγου, ανέμου, βροχής, ομίχλης) και λιγότερο ολισθηρό οδόστρωμα,
- ✓ Φωτισμός επί εικοσιτετραώρου βάσεως, αλλά και απότομες αλλαγές συνθηκών φωτεινότητας στα στόμια
- ✓ Δυσκολία των χρηστών στην ορθή αντίληψη ανερχόμενων και κατερχόμενων κλίσεων και στην ορθή εκτίμηση της απόστασης από το προπορευόμενο όχημα (και γενικά των αποστάσεων)
- ✓ Γενικά δυσκολία στην προσέγγιση των Υπηρεσιών Έκτακτων Καταστάσεων
- ✓ Η ποιότητα του αέρα αν δεν ελέγχεται και δεν διατηρείται στα επιτρεπτά όρια μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά των χρηστών
- ✓ Οι συνέπειες κάποιων ατυχημάτων και ιδιαίτερα των πυρκαγιών είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερες στις σήραγγες

Συνοπτικά τα ατυχήματα στις σήραγγες, σε σχέση με τα ατυχήματα της ανοικτής οδοποιίας, μπορούν να διακριθούν:

- ✓ Ατυχήματα που δεν μπορούν να συμβούν σε σήραγγες
- ✓ Ατυχήματα που μπορούν να συμβούν και σε σήραγγες, αλλά με μειωμένες συνέπειες
- ✓ Ατυχήματα που μπορούν να συμβούν και σε σήραγγες, αλλά με αυξημένες συνέπειες
- ✓ Ατυχήματα που μπορούν να συμβούν και σε σήραγγες, αλλά με μειωμένες πιθανότητες
- ✓ Ατυχήματα που μπορούν να συμβούν και σε σήραγγες, αλλά με αυξημένες πιθανότητες
- ✓ Ατυχήματα που μπορούν να συμβούν μόνο σε σήραγγες

### 5.2. Καθορισμός κινδύνων

Για την ανάλυση της επικινδυνότητας η βασική ιδέα είναι ότι ένα ανεπιθύμητο γεγονός, δεν παρουσιάζεται ξαφνικά και από μόνο του, αλλά αρχίζει με κάποια, συνήθως μικρής κλίμακας, διαταραχή της κανονικής λειτουργίας, η οποία εξελίσσεται ανάλογα με την ύπαρξη μέτρων ασφάλειας, τεχνικών και οργανωτικών διαρρυθμίσεων, την απόκριση των υπηρεσιών έκτακτων καταστάσεων και την συμπεριφορά των εμπλεκόμενων προσώπων. Η ιδέα αυτή επεξηγείται στο παρακάτω διάγραμμα, γνωστό ως διάγραμμα “πεταλούδας”.



Το διάγραμμα αποτελείται από την κεντρική περιοχή που αντιστοιχεί στο κρίσιμο συμβάν, η οποία συνδέει το δένδρο σφαλμάτων (fault tree) των αιτίων που αντιστοιχεί στην αριστερή περιοχή, με το δένδρο γεγονότων (event tree) των συνεπειών της δεξιάς περιοχής. Το μοντέλο αυτό δίνει ένα επαρκές πλαίσιο για τη μείωση της επικινδυνότητας. Προσεγγίζει αμέσως την έννοια της αλυσίδας του ατυχήματος, με την έννοια της αλληλουχίας γεγονότων, η οποία στην απλούστερη έκφρασή της είναι:

#### **Αιτίες - Ατύχημα - Συνέπειες**

και μετασχηματίζεται στην ακολουθία διαχείρισης μιας έκτακτης κατάστασης:

#### **Πρόληψη – Ετοιμότητα – Μετριασμός – Απόκριση – Ανάκτηση**

Η εξέλιξη αυτής της αλυσίδας του ατυχήματος στις σήραγγες μπορεί να αποδειχθεί ότι εισάγει επικινδυνότητα για τους χρήστες, η οποία δεν εμφανίζεται στους πρώτους κρίκους της.

Για τον καθορισμό των κινδύνων δημιουργείται καταρχήν ένας όσο το δυνατόν εκτενέστερος και λεπτομερής κατάλογος των κρίσιμων συμβάντων ατυχημάτων. Ο καθορισμός των κινδύνων είναι το πρώτο κρίσιμο βήμα στη διαδικασία διαχείρισης της επικινδυνότητας που σχετίζεται με το πρώτο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί: "τι μπορεί να πάει λάθος?". Οι κίνδυνοι πρέπει να καταγράφονται σε κάθε υποσύστημα και σε κάθε σημείο του χρονικού διαστήματος για το οποίο εκτελείται η ανάλυση, αρχίζοντας από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού. Αν και δεν μπορεί να υπάρχει εξασφάλιση για την ανακάλυψη όλων των κινδύνων, ο καθορισμός τους πρέπει να γίνει με ένα οργανωμένο και διαρθρωμένο τρόπο.

Ο καθορισμός των κινδύνων και η ανακάλυψή τους πρέπει να ακολουθούν κάποιους κανόνες και αποδεδειγμένες μεθόδους:

- Ακολουθώντας την αρχή "τέσσερα μάτια είναι καλύτερα από δύο", η ανεύρεση των κινδύνων πρέπει να είναι ευθύνη μιας ομάδας. Brainstorming (καταιγισμός ιδεών, ή αλλιώς νοητικός καταιγισμός) προσεγγίσεις επίσης μπορούν να είναι χρήσιμες όταν εφαρμόζονται αποτελεσματικά.
- Ανασκόπηση όμοιων έργων σιράγγων, που έχουν καταγραφεί στην βιβλιογραφία.
- Χρήση άποψης εμπειρογνομόνων αποδεδειγμένης εμπειρίας.
- Ανασκόπηση κωδίκων, κανονισμών και προτύπων.
- Ανασκόπηση των απαιτήσεων επιτελεστικότητας.
- Ανασκόπηση του εν χρήσει και μελλοντικού σχήματος διαχείρισης. Διερεύνηση για πιθανά προβλήματα, ιδιαίτερα για προβλήματα επικοινωνίας και διαχείρισης
- Ανασκόπηση των προτεινόμενων μεθόδων και τεχνολογίας και ειδικότερα την εξοικείωση όλων των εμπλεκόμενων μερών.

- Έλεγχος για πηγές ενέργειας και διαδικασίες για επιβλαβείς και επικίνδυνες εκπομπές
- Θεώρηση όλων των σταδίων της τεχνικής ζωής της σήραγγας, από την προκαταρκτική μελέτη στη μελέτη εφαρμογής, τον τεχνικό έλεγχο, την αποδοχή των προσφορών, την κατασκευή, την ασφάλιση και αντασφάλιση, την απόδοση σε χρήση, τη λειτουργία και την απόσυρση της σήραγγας από τη χρήση.
- Καθορισμός όσο το δυνατόν περισσότερων κινδύνων.
- Συζητήσεις με πιστοποιημένο και έμπειρο προσωπικό από τους μελετητές ή/και κατασκευαστές.
- Οργάνωση των κινδύνων σε ομάδες.
- Αποφυγή σύγχυσης ενός κινδύνου με τις συνέπειές του. Η διατύπωση θα πρέπει να ακολουθεί την ακολουθία: Πηγή – Μηχανισμός – Συνέπειες (Ενδεικτικά: να μην χρησιμοποιείται η έκφραση “ζημιές από έκρηξη μεθανίου”. Προτείνουμε “συγκέντρωση μεθανίου από την περιβάλλουσα βραχομάζα με παρουσία πηγής έναυσης – εκπυρσοκρότηση – που μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμούς/θανάτους/ζημιές στην υποδομή ή/και τον εξοπλισμό”)
- Εφαρμογή τυπικών και τυποποιημένων προσεγγίσεων που μπορούν να χρησιμοποιούνται για να καθορίζονται οι κίνδυνοι. Αν και όλες αυτές οι διαρθρωμένες, οργανωμένες και ελέγξιμες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για άλλους τομείς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις σήραγγες χωρίς πολλές τροποποιήσεις και προσαρμογές. Περιληπτική καταγραφή τέτοιων προσεγγίσεων παρατίθεται στο Παράρτημα Β.
- Λήψη στοιχείων από καταλόγους ελέγχου. Ένας τέτοιος κατάλογος είναι αυτός του Παραρτήματος Γ και βοηθά ως οδηγός για τον καθορισμό των κινδύνων. Σημειώνουμε ότι ο κατάλογος θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως γενικός οδηγός και πρέπει να προσαρμόζεται στα ειδικά χαρακτηριστικά της σήραγγας.

Από τον κατάλογο των κρίσιμων συμβάντων ατυχημάτων, που έχει δημιουργηθεί για τη σήραγγα, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή ενός μικρού αριθμού (συνήθως τρία έως τέσσερα ή σε εξαιρετικές περιπτώσεις πέντε) τέτοιων συμβάντων που θα προωθηθούν για τα επόμενα στάδια της ανάλυσης. Η επιλογή θα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η διερεύνηση θεμάτων ασφαλείας να καλύπτει όλο το φάσμα των ατυχημάτων, δηλαδή τόσο ατυχήματα μικρής πιθανότητας να συμβούν και μεγάλων συνεπειών όσο και συχνά εμφανιζόμενα ατυχήματα με μικρές ή μέτριες συνέπειες. Πάντως τα κρίσιμα συμβάντα που προσεγγίζουν προσφορότερα τις πτυχές του σκοπού της ανάλυσης, όπως εκτίθεται στο άρθρο 1, αντιστοιχούν σε συμβάντα μικρής πιθανότητας να συμβούν και σημαντικών συνεπειών όταν αυτά συμβούν. Τούτο γιατί η μέθοδος εστιάζεται στη διαχείριση των συνεπειών του ατυχήματος, επομένως με μεγαλύτερες συνέπειες απαιτείται μεγαλύτερη συμμετοχή όλων των μέτρων ασφαλείας στη διαχείριση του ατυχήματος και η διερεύνηση της συμμετοχής και απόδοσης αυτών γίνεται ευκρινέστερα. Αντίθετα η θεώρηση των πιθανοτήτων γίνεται μόνο περιθωριακά, στην επιλογή των κρίσιμων συμβάντων και στην επιλογή μέτρων ασφαλείας με βάση οικονομική θεώρηση. Με βάση τα παραπάνω το αντικείμενο της επιλογής κρίσιμων συμβάντων ατυχημάτων εστιάζεται σε σημαντικό βαθμό στην ανάλυση συμβάντων που εμπλέκουν, καθ' οιονδήποτε τρόπο, πυρκαγιά στη σήραγγα. Πέραν αυτών τα κρίσιμα συμβάντα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αντιπροσωπευτικά και να διαφοροποιούνται όσο το δυνατόν σε μέγεθος και φύση.

### 5.3. Επιλογή σεναρίων

Μετά τον καθορισμό των κρίσιμων συμβάντων ακολουθεί η επιλογή του σεναρίου, για καθένα από αυτά. Το σενάριο είναι μια χρονική αλληλουχία γεγονότων που θα αρχίζει από τη διαταραχή της κανονικής λειτουργίας θα έχει ως κεντρικό σημείο αναφοράς την εμφάνιση του κρίσιμου συμβάντος και θα εξελίσσεται μέχρι τη λήξη της έκτακτης κατάστασης.

Η αναπαράσταση των πιθανών αιτίων του κρίσιμου συμβάντος θα γίνεται μέσω του δένδρου σφαλμάτων, για να καταστεί δυνατή και η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων ασφαλείας που αναφέρονται στην πρόληψη.

Η τεχνική του δένδρου γεγονότων θα χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της εξέλιξης των γεγονότων, με εκκίνηση το καθορισμένο κρίσιμο συμβάν και κάθε κλάδο να αποτελεί ένα πιθανό σενάριο εξέλιξης του ατύχηματος. Η επιλογή του πλέον κατάλληλου κλάδου θα γίνεται με ανάλογα κριτήρια με αυτά της προηγούμενης παραγράφου για τον καθορισμό του κρίσιμου συμβάντος και θα αποτελεί το προς εξέταση σενάριο.

Το ανωτέρω επιλεγμένο σενάριο θα συνοδεύεται από ένα πλαίσιο που θα καθιστά δυνατό το χωρικό και χρονικό προσδιορισμό του κρίσιμου συμβάντος για τη διερεύνηση της εξέλιξης της αλληλουχίας.

Τα γενικά κριτήρια που θα πρέπει να ικανοποιούν τα σενάρια είναι τα παρακάτω:

- ✓ Ρεαλιστικά και υλοποιήσιμα, δηλαδή φυσικώς εφικτά και δυνατά. Τονίζεται ότι η μέθοδος δεν αφορά οχήματα που εμπλέκουν επικίνδυνα εμπορεύματα συνεπώς θα πρέπει να αποφεύγεται η εμπλοκή τέτοιων οχημάτων. Επιπλέον σενάρια με εξαιρετικά χαμηλές πιθανότητες εμφάνισης πρέπει να επιλέγονται με πολλή προσοχή και επιφύλαξη (π.χ. φωτιά σε βαρύ φορτηγό, με παρουσία συνθηκών συμφόρησης σε υπεραστικό αυτοκινητόδρομο, σε περίοδο που απαγορεύεται η κίνηση τέτοιων οχημάτων, δεν μπορεί να αποκλειστεί, αλλά έχει εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα παρουσίας).
- ✓ Να δοκιμάζουν τις οριακές συνθήκες του συστήματος της σήραγγας, ελέγχοντας την επιτελεσματικότητα και αποτελεσματικότητα όλων των υποσυστημάτων της σήραγγας (π.χ. η επιλογή της θέσης μιας πυρκαγιάς μπροστά από μια έξοδο διαφυγής μπορεί να κρύψει τα οφέλη από την ύπαρξή της)
- ✓ Αναπαράξιμα, για αποφυγή αυθαίρετων προσεγγίσεων

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο πέρας του σεναρίου. Παραπάνω ως πέρας του σεναρίου θεωρήθηκε το πέρας της έκτακτης κατάστασης. Δεδομένου ότι οι συνέπειες της ανάλυσης εστιάζονται κατά κύριο λόγο στη ζωή και υγεία των ατόμων που βρίσκονται μέσα στη σήραγγα, ως πέρας της έκτακτης κατάστασης θα θεωρείται η χρονική στιγμή που το σύνολο των επιζώντων θα έχει μετακινηθεί σε ασφαλή θέση. Για τις συνέπειες σε άτομα που βρίσκονται εκτός της σήραγγας και επηρεάζονται από το ατύχημα θα γίνεται διακριτή προσέγγιση της ανάλυσης, εφόσον απαιτείται. Θέματα που σχετίζονται με την επαναλειτουργία της σήραγγας δεν αντιμετωπίζονται με την παρούσα ανάλυση, αλλά θα αποτελούν αντικείμενο των εγχειριδίων λειτουργίας και συντήρησης της σήραγγας.



## Άρθρο 6. Κεφάλαιο 4: Εξέταση των σεναρίων

Σε μία σεναριακή ανάλυση η κύρια δραστηριότητα εστιάζεται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και των συνεπειών του εξεταζόμενου σεναρίου.

Όπως αναφέρθηκε η αναπαράσταση των πιθανών αιτίων του κρίσιμου συμβάντος γίνεται μέσω του δένδρου σφαλμάτων, για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής, ώστε να καταστεί δυνατή και η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων ασφαλείας που αναφέρονται στην πρόληψη. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται σε ποιοτική θεώρηση παρακολουθώντας την “ανάστροφη” εξέλιξη του δένδρου σφαλμάτων, αρχίζοντας από το κρίσιμο συμβάν μέχρι να καθοριστεί η βασική αρχική αιτία του συμβάντος και να αναδειχτούν οι λογικές σχέσεις μεταξύ των βασικών αιτίων και του ατυχήματος, Ως αποτέλεσμα λαμβάνεται ένας κατάλογος συνδυασμένων συνόλων αστοχιών (εξοπλισμού και ανθρώπινων λαθών), που μπορούν να προκαλέσουν ένα ατύχημα.

Η εξέταση του δένδρου γεγονότων γίνεται με προσέγγιση “αναδυόμενης συμπερασματικής σκέψης”: δηλαδή αρχίζει με ένα εναρκτήριο γεγονός και αναπτύσσει τις ακολουθούσες αλληλουχίες γεγονότων, που περιγράφουν το πιθανό ατύχημα, λαμβάνοντας υπόψη και ενσωματώνοντας τόσο τις καταστάσεις αστοχίας όσο και τελεσφόρησης των λειτουργιών ασφάλειας καθώς η αλυσίδα του ατυχήματος εξελίσσεται. Η εξέταση των σεναρίων, που προσεγγίζονται από το δένδρο γεγονότων, γίνεται με ποσοτικό τρόπο και προσεγγίζει τελικά τις συνέπειες, δηλαδή τα αποτελέσματα στις ανθρώπινες ζωές. Τα αποτελέσματα και οι συνέπειες που μπορούν να συμβούν μετά από κάποιο κρίσιμο συμβάν εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το είδος του ατυχήματος και την εμπλοκή πηγών ενέργειας και επικίνδυνων ουσιών. Όπως αναφέρθηκε ήδη οι αναλύσεις εστιάζονται κατά κύριο λόγο σε ατυχήματα που εμπλέκουν εμφάνιση πυρκαγιάς. Οι αναλύσεις σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λάβουν υπόψη:

- Τις ιδιαίτερες συνθήκες του περιβάλλοντος της σήραγγας, οι οποίες παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην έκταση των συνεπειών. Ιδιαίτερο ρόλο παίζει ο περιορισμένος χώρος της σήραγγας, στην εξέλιξη των πυρκαγιών και όλων των φυσικών μεγεθών που συνδέονται με αυτές (π.χ. εξάπλωση και διασκόρπιση του καπνού, αύξηση της θερμοκρασίας, παρουσία υγρών και αέριων, κυρίως επιβλαβών για την υγεία και τη διατήρηση της ικανότητας διαφυγής, ουσιών) και θεώρηση της χωρικής και χρονικής κατανομής τους.
- Τις συνθήκες που μπορούν να δημιουργήσουν κατά την εξέλιξη του δένδρου γεγονότων, τα συστήματα της σήραγγας με την ενεργοποίησή τους.
- Τις συνθήκες που μπορούν να δημιουργήσουν οι κινήσεις των οχημάτων.
- Την προσομοίωση του πληθυσμού της σήραγγας από την εμφάνιση του κρίσιμου συμβάντος και μέχρι την κατάληξη του σεναρίου.
- Τη συμπεριφορά των χρηστών της σήραγγας κατά την εξέλιξη του σεναρίου.
- Τις οριακές τιμές για την ορατότητα, θερμότητα (ακτινοβολίας και μεταγωγής), τοξικότητα, θερμοκρασία, θόρυβο, στις οποίες οι προσβαλλόμενοι αρχίζουν να νοιώθουν πόνο ή να καθίσταται δύσκολη η διατήρηση της δυνατότητας εκκένωσης με την προσέγγιση ασφαλών θέσεων. Η αρχή της αυτό-διάσωσης θα πρέπει να βρίσκεται στο βασικό πυρήνα των στόχων της ανάλυσης, ενώ η υποβοηθούμενη διάσωση, από τις Υπηρεσίες Έκτακτων Καταστάσεων θα έχει επικουρικό και συμπληρωματικό ρόλο. Έτσι η δυνατότητα αυτό- διάσωσης θα πρέπει να εξασφαλίζεται τουλάχιστον όπως στη σήραγγα αναφοράς.

Η εξέταση των σεναρίων θα πρέπει να προσεγγίζει και να αποκαλύπτει τα παρακάτω:

- ✓ Τη λειτουργία κάθε συστήματος της σήραγγας και τη συνεισφορά του στην επίτευξη του ισοδύναμου επίπεδου ασφαλείας.

- ✓ Τη λειτουργία κάθε διαδικασίας της οργανωτικής δομής της σήραγγας και τη συνεισφορά της στην επίτευξη του ισοδύναμου επίπεδου ασφάλειας.
- ✓ Την αποκάλυψη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων συστημάτων και διαδικασιών.
- ✓ Τον καθορισμό των ασθενών σημείων (weak points) κάθε ανεξάρτητου συστήματος και του συνόλου της σήραγγας (δηλ. της υποδομής, του εξοπλισμού και των διαδικασιών)
- ✓ Τον εντοπισμό των περισσότερο ή λιγότερο επικίνδυνων περιοχών και του αριθμού των ανθρώπων που είναι πιθανό να βρεθούν σε κατάσταση με βλαβερές συνέπειες στην ζωή και υγεία.

Θα πρέπει να σημειωθεί και να τονιστεί ότι η μη αντιστοίχιση του κρίσιμου συμβάντος με την πυρκαγιά σχεδιασμού της μελέτης, για τη διαστασιολόγηση του συστήματος αερισμού, δεν συνεπάγεται τον επανασχεδιασμό των αντίστοιχων συστημάτων. Ο σκοπός της εξέτασης των σεναρίων και των αντίστοιχων αναλύσεων είναι να ελεγχθούν οι λειτουργικές διαδικασίες και η επιτελεσματικότητα του συστήματος ως σύνολο (δηλ. της υποδομής, του εξοπλισμού και των διαδικασιών), όπως έχει καθοριστεί στο κεφάλαιο 1 «Το πεδίο ορισμού της ασφάλειας της σήραγγας» και να υποδειχθούν πιθανές τροποποιήσεις και βελτιώσεις.

## **6.1. Προτυποποίηση χαρακτηριστικών και παραμέτρων που αφορούν την εξέταση των σεναρίων.**

Στη διαδικασία της εξέτασης των σεναρίων υπεισέρχονται δύο τύποι χαρακτηριστικών μεγεθών και παραμέτρων:

- ✓ Τα στοιχεία που εξαρτώνται από την «ταυτότητα» της σήραγγας. Τον καθορισμό αυτών αναλαμβάνει ο διενεργών την ανάλυση και ο διαχειριστής της σήραγγας.
- ✓ Τα στοιχεία που δεν εξαρτώνται από την «ταυτότητα» της σήραγγας. Στον καθορισμό αυτών ο διενεργών την ανάλυση και ο διαχειριστής της σήραγγας θα πρέπει να επιλέγουν από αντίστοιχους καταλόγους προτυποποιημένων στοιχείων. Η προτυποποίηση βοηθά τους εμπλεκόμενους όταν δεν διαθέτουν εξειδικευμένα στοιχεία που αναφέρονται στη συγκεκριμένη σήραγγα, ενώ διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σηράγγων απαλείφοντας τη διασπορά των αποτελεσμάτων λόγω διαφορετικών υποθέσεων.

Τα στοιχεία της δεύτερης περίπτωσης που πρέπει να προτυποποιηθούν είναι:

- Οι πυρκαγιές στα οχήματα. Η προτυποποίηση αυτών δίνεται στο παράρτημα Δ.
- Η συμπεριφορά των ανθρώπων μέσα στη σήραγγα. Η προτυποποίηση δίνεται στο Παράρτημα Ε.

## **6.2. Η προσομοίωση του πληθυσμού στη σήραγγα και η αρχή της αυτό-διάσωσης.**

Ο αριθμός των ανθρώπων που μπορεί να βρίσκονται μέσα στη σήραγγα κατά τη στιγμή της εκδήλωσης του κρίσιμου συμβάντος και η εξέλιξή του μέχρι το πέρας του σεναρίου είναι ένα κρίσιμο μέγεθος, από το οποίο εξαρτάται και ο αριθμός των θυμάτων που τελικά μπορούν να προκύψουν σαν συνέπειες του κρίσιμου γεγονότος. Ο αριθμός αυτός κάθε χρονική στιγμή είναι αποτέλεσμα της εισροής και εκροής ατόμων (κατά βάση επιβαινόντων στα οχήματα) στη σήραγγα.

Συνεχής ροή κυκλοφορίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των ατόμων μέσα στη σήραγγα. Η εισερχόμενη κυκλοφορία μπορεί εύκολα να διακοπεί, υπό την προϋπόθεση ότι προβλέπεται κατάλληλη διάταξη και αποτελεσματικές διαδικασίες λήψης της σχετικής απόφασης. Οι διατάξεις αυτές συνήθως περιλαμβάνουν φωτεινά σήματα, και μπάρες φραγής της κυκλοφορίας. Η αποτελεσματικότητα των δύο διατάξεων είναι διαφορετική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση. Οι μπάρες, με

την ενεργοποίησή τους, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποκόπτουν εντελώς την εισερχόμενη κυκλοφορία, ενώ με τα φωτεινά σήματα θα πρέπει να θεωρηθεί ότι για ένα χρονικό διάστημα T ένα ποσοστό της κυκλοφορίας εξακολουθεί να εισέρχεται στη σήραγγα. Για την θεώρηση αυτών των παραμέτρων, ελλείψει αντιπροσωπευτικών τιμών, θα λαμβάνονται υπόψη η διεθνής εμπειρία, οι ιδιαίτερες συνθήκες της σήραγγας, το επίπεδο εκπαίδευσης των οδηγών για οδήγηση σε σήραγγες, η γενική τάση συμμόρφωσης των οδηγών με τους κανόνες του Κ.Ο.Κ., η οργανωτική διαρρύθμιση και η δυνατότητα διάθεσης προσωπικού και κινητού εξοπλισμού για τον αποκλεισμό της κυκλοφορίας.

Η μείωση του αριθμού των ατόμων μέσα στη σήραγγα μπορεί να είναι αποτέλεσμα της κυκλοφοριακής εκροής (οχήματα που οδηγούνται εκτός σήραγγας), της διαδικασίας αυτό-διάσωσης και της οργανωμένης εκκένωσης η οποία διευθύνεται και καθοδηγείται είτε από το προσωπικό της σήραγγας, είτε από τις Υπηρεσίες Έκτακτων Καταστάσεων. Για τις ανάγκες της ανάλυσης ο υπολογισμός της κυκλοφοριακής εκροής απαιτεί ιδιαίτερη θεώρηση, ειδικά στην περίπτωση που αυτή διακοπεί λόγω συμφόρησης μεταξύ της θέσης του κρίσιμου συμβάντος και της εξόδου της σήραγγας ή και στην εγγύς περιοχή της εξόδου. Ο συνδυασμός πυρκαγιάς και συμφόρησης μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση του αριθμού των ατόμων μέσα στη σήραγγα, με συνεπακόλουθη αύξηση και του αριθμού των πιθανών θυμάτων.

Η αρχή της αυτό-διάσωσης αναφέρεται στους ανθρώπους (οδηγούς και επιβάτες) οι οποίοι αμέσως μετά το κρίσιμο συμβάν απομακρύνονται με τα ίδια μέσα, προσεγγίζοντας ασφαλείς, για επιβίωση και μη πρόκληση βλαβών στην υγεία, θέσεις, όπως αυτές προβλέπονται για κάθε σήραγγα. Τα δύο χαρακτηριστικά της αυτό-διάσωσης είναι τα παρακάτω:

- Ενέργειες αμέσως μετά την εκδήλωση του κρίσιμου συμβάντος, από τα άτομα που βρίσκονται εκείνη τη στιγμή μέσα στη σήραγγα.
- Ο όρος "με τα ίδια μέσα" υποδηλώνει την απουσία βοήθειας από τις Υπηρεσίες Έκτακτων Καταστάσεων, αλλά και το προσωπικό της σήραγγας.

Το κύριο μέγεθος που αναφέρεται στην αυτό-διάσωση είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να προσεγγίσει το άτομο μια ασφαλή θέση. Ο συνολικός αυτός χρόνος αποτελείται από δύο βασικές περιόδους:

- Την περίοδο συνειδητοποίησης του γεγονότος δηλαδή το χρόνο που απαιτείται στους χρήστες της σήραγγας να αντιληφθούν τη σοβαρότητα της κατάστασης και την ανάγκη ανάληψης από αυτούς συγκεκριμένων ενεργειών και την έναρξη ανάληψης αυτών των ενεργειών. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την κοινή αντίδραση των περισσότερων ατόμων που παρίστανται στην εκδήλωση μιας πυρκαγιάς, να δυσπιστούν για τη σοβαρότητα της κατάστασης και να υποεκτιμούν την επικινδυνότητά της. Αυτή η αντίδραση είναι ιδιαίτερα προφανής κατά την αρχική φάση εξέλιξης της πυρκαγιάς, κατά την οποία παρατηρείται ακόμη λίγος καπνός και φωτιά και η ορατότητα βρίσκεται σε επαρκή επίπεδα. Η περίοδος αυτή, όπως δείχνουν πειραματικές μελέτες και τα αποτελέσματα δοκιμών και ασκήσεων εκκένωσης, κυμαίνεται από 5 έως 15 λεπτά μέχρι το άτομο να αποφασίσει αν πρέπει να αναλάβει κάποια ενέργεια και να οριστικοποιήσει το είδος αυτής. Αυτό ισχύει ακόμη και στην περίπτωση που το άτομο παρακολουθεί την έναρξη της πυρκαγιάς και τον καπνό να εξέρχεται από το όχημα που καίγεται.
- Την περίοδο απομάκρυνσης δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για να διανυθεί η απόσταση μέχρι την ασφαλή θέση. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την ταχύτητα απομάκρυνσης και την απόσταση που πρέπει να διανυθεί μέχρι την προσέγγιση σε ασφαλή θέση. Στοιχεία για τα μεγέθη αυτά δίνονται στο Παράρτημα Ε. Γενικά ο χρόνος αυτός εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως: την ορατότητα στη διαδρομή, την ύπαρξη ευδιάκριτων σημάτων ένδειξης της κατάλληλης διαδρομής εκκένωσης στις συνθήκες ορατότητας, την ύπαρξη μεγαφωνικής εγκατάστασης με την οποία μπορεί να γίνει μεταβίβαση κατάλληλων πληροφοριών από το κέντρο της σήραγγας, τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά της όδευσης διαφυγής, την ύπαρξη στενώσεων στην όδευση διαφυγής που προξενεί καθυστερήσεις και συμφόρηση, την παρουσία ατόμων με μειωμένη ικανότητα κινητικότητας.

Από την άλλη πλευρά η υποβοηθούμενη εκκένωση από τις Υπηρεσίες Έκτακτων Καταστάσεων μπορεί να αρχίσει μόνο μετά την άφιξη αυτών στη θέση του κρίσιμου συμβάντος, την αναγνώριση της κατάστασης, τη λήψη των σχετικών αποφάσεων για τις εφαρμοζόμενες διαδικασίες και ενέργειες και την ενεργοποίηση των απαραίτητων πόρων (ανθρώπων και εξοπλισμού). Εκτιμάται ότι ο χρόνος έναρξης αυτής της υποβοηθούμενης εκκένωσης δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 20-30 λεπτά.

### **6.3. Προσομοίωση της κίνησης του καπνού**

Για την αποτίμηση των συνεπειών ενός σεναρίου πυρκαγιάς απαιτείται η όσο το δυνατό πληρέστερη και λεπτομερέστερη προσομοίωση της διαίτας του καπνού, ειδικότερα τουλάχιστον τα πρώτα τριάντα λεπτά μετά την έναρξη της πυρκαγιάς. Με την προσομοίωση αυτή, μέσω της αναπαράστασης της εξέλιξης της κίνησης του καπνού και της θερμότητας, επιδιώκεται η καταγραφή των περιοχών υψηλής επικινδυνότητας. Λεπτομερή στοιχεία για τις διαδικασίες προσομοίωσης της κίνησης του καπνού δίνονται στο Παράρτημα ΣΤ.

### **6.4. Γενικές αρχές**

Κατά την αποτίμηση των συνεπειών στην ανθρώπινη ζωή και υγεία από μία πυρκαγιά, το κρίσιμο κριτήριο για την επίτευξη αποδεκτής επικινδυνότητας είναι:  $T_{av} > T_{re}$   
όπου:  $T_{av}$  ο διαθέσιμος για εκκένωση χρόνος και

$T_{re}$  ο απαιτούμενος για εκκένωση χρόνος

Ο διαθέσιμος για εκκένωση χρόνος, είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής της έναυσης της πυρκαγιάς και της χρονικής στιγμής κατά την οποία οι συνθήκες του περιβάλλοντος των διόδων εκκένωσης, καθιστούν αδύνατη τη διατήρηση της δυνατότητας των ατόμων να συνεχίσουν την ανάληψη αποτελεσματικών ενεργειών για την συνέχιση και ολοκλήρωση της εκκένωσης. Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται στους παρακάτω παράγοντες:

- τον περιορισμό της ορατότητας λόγω της παρουσίας καπνού
- την εισπνοή τοξικών ουσιών (ασφυξιογόνα αέρια και ερεθιστικά αναπνευστικού συστήματος)
- την έκθεση σε θερμότητα (θερμότητα από ακτινοβολία και μεταγωγή)

## Άρθρο 7. Κεφάλαιο 5: Περίληψη – Συμπεράσματα – Προτάσεις

Για κάθε εξεταζόμενο σενάριο θα διενεργείται μια ανάλυση για την εξεταζόμενη σήραγγα και μια για τη σήραγγα αναφοράς, όπως αυτή ορίστηκε στο άρθρο 4 του παρόντος “ Κεφάλαιο 2: Αποκλίσεις από ελάχιστες απαιτήσεις ασφάλειας, καθορισμός σήραγγας αναφοράς”.

Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιάζονται σε περιληπτική μορφή τα παρακάτω:

- Περίληψη των σεναρίων που εξετάστηκαν με παραπομπή στην εξεταζόμενη σήραγγα και τη σήραγγα αναφοράς.
- Περιληπτική ανακεφαλαίωση του δομικού μέρους της σήραγγας, του εξοπλισμού και των οργανωτικών διαρρυθμίσεων που σχετίζονται με την ασφάλεια, περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1 και ενσωματώθηκαν στην εκπονηθείσα ανάλυση επικινδυνότητας.
- Ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων της ανάλυσης του δένδρου σφαλμάτων. Εντοπισμός των “αδύνατων σημείων” και σχολιασμός των υφιστάμενων μέτρων που σκοπεύουν στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του κρίσιμου συμβάντος. Διατύπωση πρότασης για πιθανή βελτίωση αυτών των μέτρων.
- Όταν ο σκοπός της ανάλυσης επικινδυνότητας είναι (κατά την έννοια των αναφερομένων στο Π.Δ 230/2007 (ΦΕΚ/τ. Α/264/23-11-2007):
  - ✓ Αιτιολόγηση εναλλακτικών μέτρων ισοδύναμου επιπέδου προστασίας (άρθρο 3.2 και παραρτ.1.2)
  - ✓ Για την διερεύνηση της επίδρασης ειδικών χαρακτηριστικών (παραρτ.Ι, 1.1.2 και 1.1.3)
  - ✓ Διερεύνηση της επίδρασης μεγάλης κατά μήκος κλίσης (παραρτ.Ι, 2.2.3)
  - ✓ Διερεύνηση της επίδρασης λωρίδων μικρού πλάτους (παραρτ.Ι, 2.2.4)
  - ✓ Λήψη απόφασης για Σύστημα αερισμού (παραρτ.Ι, 2.9.3)
  - ✓ Λήψη απόφασης για την θέση των υπηρεσιών διάσωσης (παραρτ.Ι, 3.4)
  - ✓ Διερεύνηση της δυνατότητας να επιτρέπεται στα φορτηγά το προσπέρασμα σε σήραγγες που διαθέτουν περισσότερες από μία λωρίδες ανά κατεύθυνση (παραρτ.Ι, 3.8)

τότε τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικινδυνότητας (ποσοτικά αποτελέσματα όπως π.χ. ανθρωπόωρες έκθεσης σε θερμότητα, τοξικά αέρια, μειωμένη ορατότητα) της υπό εξέταση σήραγγας, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο, θα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικινδυνότητας, της σήραγγας αναφοράς για το ίδιο σενάριο. Η απαίτηση ισοδύναμου επιπέδου προστασίας θεωρείται ότι επιτυγχάνεται όταν τα αποτελέσματα της ανάλυσης (π.χ. θύματα, ανθρωπόωρες έκθεσης) για την εξεταζόμενη σήραγγα δεν υπερβαίνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη σήραγγα αναφοράς, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

- Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα της ανάλυσης (π.χ. θύματα, ανθρωπόωρες έκθεσης) για την εξεταζόμενη σήραγγα υπερβαίνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη σήραγγα αναφοράς, για κάποιο εξεταζόμενο σενάριο, θα γίνεται τροποποίηση των στοιχείων του Κεφαλαίου 1, με προσθήκη κατάλληλων μέτρων ασφάλειας και θα επαναλαμβάνεται η ανάλυση.
- Ανασκόπηση της αποτελεσματικότητας των προταθέντων στο Κεφάλαιο 1 μέτρων ασφαλείας και πρόταση για τυχόν τροποποίησή τους με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- Για κάποιες μεταβλητές συνιστάται να γίνεται διερεύνηση της σημασίας και επιρροής τους με διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα αυτά θα δίνονται με κατάλληλο σχολιασμό σε ειδική παράγραφο και με την επιρροή των αντίστοιχων μέτρων (π.χ. η επιρροή της μεγαφωνικής εγκατάστασης στη συμπεριφορά των χρηστών με τη μείωση των χρόνων αντίδρασης)
- Ανασκόπηση των συνεπειών της λειτουργικής απώλειας τμημάτων του εξοπλισμού.

- Ανακεφαλαίωση των ευρημάτων της ανάλυσης που θα ενσωματωθούν στα εγχειρίδια λειτουργίας, στο Σχέδιο Αντιμετώπισης Έκτακτων Καταστάσεων και τα Σχέδια των Υπηρεσιών Αντιμετώπισης Έκτακτων Καταστάσεων.
- Κάθε άλλο στοιχείο που αποκαλύπτει η ανάλυση και θεωρείται χρήσιμο για την ασφάλεια της σήραγγας κατά την άποψη του αναλυτή.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

### ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

#### Α. Το περιεχόμενο του πεδίου ορισμού της ασφάλειας της σήραγγας

##### 1. Οι απαιτήσεις επιτελεσματικότητας της σήραγγας.

Απαιτήσεις επιτελεσματικότητας είναι οι απαραίτητες χαρακτηριστικές ιδιότητες που ορίζονται για μια σήραγγα πριν και κατά τη φάση της μελέτης. Η επιδίωξη και ο σκοπός του κυρίου του έργου είναι η θεμελιώδης απαίτηση από την οποία πηγάζουν όλες οι άλλες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις είναι δηλώσεις που προσδιορίζουν τις ουσιώδεις ανάγκες του συνολικού συστήματος της σήραγγας ώστε να έχει αξία και χρησιμότητα με ασφάλεια, λειτουργικότητα και αισθητική εμφάνιση. Οι απαιτήσεις επιτελεσματικότητας πρέπει να δηλώνουν τι πρέπει να κάνει η σήραγγα (τα ορθά πράγματα που πρέπει να κάνει και τα εσφαλμένα που δεν πρέπει), αλλά δεν πρέπει να υπεισέρχονται στον τρόπο που αυτά υλοποιούνται.

Η ανάπτυξη των απαιτήσεων επιτελεσματικότητας δεν είναι μια στατική διαδικασία αλλά εξελίσσεται με την ανάπτυξη των μελετητικών φάσεων. Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης θα καταγράφονται οι απαιτήσεις όπως αυτές διαμορφώνονται στην τελική φάση του αντίστοιχου σταδίου της μελέτης και θα συμπληρώνονται όσες πιθανώς απαιτούνται για την ανάλυση και εισάγονται για πρώτη φορά.

Για τις απαιτήσεις που εισάγονται για πρώτη φορά πρέπει να καθοριστούν τα πρόσωπα ή οι φορείς που έχουν δικαίωμα να επιβάλλουν και να εισάγουν τέτοιες για τη σήραγγα. Τέτοια πρόσωπα και φορείς είναι: ο κύριος του έργου, ο διαχειριστής της σήραγγας, ο αρμόδιος ασφαλείας, η Διοικητική Αρχή, υπηρεσίες περιβάλλοντος, υπηρεσίες έκτακτων αναγκών, ο μελετητής της σήραγγας (εφόσον υφίσταται), οργανώσεις τελικών χρηστών της σήραγγας, οι εμπλεκόμενοι οργανισμοί αυτοδιοίκησης, άλλες υπηρεσίες εμπλεκόμενες με τη λειτουργία του οδικού δικτύου, φορείς χρηματοδότησης, πολιτικοί οργανισμοί, οργανισμοί πολιτικής προστασίας, οργανισμοί ασφαλείας κ.λ.π.

Οι απαιτήσεις πρέπει να είναι:

- ✓ Απλές, όχι σύνθετες, σαφείς και ευκρινείς
- ✓ Εφικτές (δηλαδή τεχνικά επιτεύξιμες, υλοποιούμενες με εύλογα αποδεκτό κόστος και εντός αποδεκτού χρονοδιαγράμματος)
- ✓ Να μην επαναλαμβάνονται σε άλλες διατυπώσεις
- ✓ Προσβάσιμες (σε περίπτωση που χαρακτηρίζονται ως εμπιστευτικές θα καθορίζονται σαφείς διαδικασίες διαχείρισής τους)
- ✓ Ανιχνεύσιμες μέχρι την προέλευσή τους με το σκεπτικό της θέσπισής τους
- ✓ Ποσοτικές όσο είναι εφικτό
- ✓ Επαληθεύσιμες και ελέγξιμες

Σε περίπτωση που κάποια ποιοτικά διατυπωμένη απαίτηση πρέπει και μπορεί να μετασηματιστεί σε ποσοτική διατύπωση, αυτό θα γίνεται από φορέα ανεξάρτητο από τον διενεργούντα την ανάλυση επικινδυνότητας.

Όπως καθορίζεται στο ISO 8402:1994 ποιότητα είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών μιας οντότητας, τα οποία έχουν σχέση με την ικανότητα να εκπληρούν διατυπωμένες και συνεπαγόμενες ανάγκες και απαιτήσεις. Συνεπώς θα πρέπει να μην αγνοούνται και οι συνεπαγόμενες απαιτήσεις και να καταγράφονται μέχρι εξαντλήσεως. Αν και ορισμένες σημαντικές απαιτήσεις βασικού και γενικού χαρακτήρα περιλαμβάνονται στους κανονισμούς, για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης δεν θεωρείται πλεονασμός η ανακεφαλαίωσή τους και η επανάληψή τους στο αντίστοιχο κεφάλαιο της ανάλυσης.

Στις απαιτήσεις επιτελεσματικότητας θα περιλαμβάνεται και ο καθορισμός από τον κύριο του έργου ή το διαχειριστή, του αποδεκτού αριθμού και διάρκειας των διακοπών λειτουργίας της σήραγγας ή διαφοροποίησης του κανονικού τύπου κυκλοφοριακής διαρρυθμισμού, για ασφαλή εκτέλεση εργασιών κανονικής ή προληπτικής συντήρησης και επισκευαστικών εργασιών. Θα παρατίθενται επίσης οι στόχοι που η μελέτη εκλήθη να

βελτιστοποιήσει (π.χ. συνήθως η ελαχιστοποίηση του κόστους του συνολικού συστήματος της σήραγγας κατά την διάρκεια της τεχνικής ζωής του έργου).

Η επίτευξη περιβάλλοντος της σήραγγας με συνθήκες στις οποίες μπορεί να εξασφαλιστεί η διατήρηση της ικανότητας εκκένωσης των χρηστών, είναι επίσης βασική απαίτηση επιτελεσματικότητας και απαιτείται να εξασφαλιστεί κατά τη φάση εκκένωσης, σε συνδυασμό με τις προβλέψεις του Σχεδίου Αντιμετώπισης Έκτακτων Καταστάσεων (ΣΑΕΚ). Οι πυρκαγιές στις σήραγγες, οι οποίες αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης επικινδυνότητας, παράγουν υψηλές θερμοκρασίες, ακτινοβολία θερμότητας, αυξημένα επίπεδα τοξικών και ερεθιστικών αερίων, μειώνουν δε τα επίπεδα του οξυγόνου και την ορατότητα. Στον καθορισμό των συνεπειών ενός σεναρίου που περιλαμβάνει καθ' οιονδήποτε τρόπο πυρκαγιά σε σήραγγα, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη θεώρηση των επιπτώσεων από τις τρεις κύριες απειλές:

- την ορατότητα,
- την τοξικότητα (ασφυξιογόνα αέρια και ερεθιστικά αναπνευστικού συστήματος)
- τη θερμότητα (θερμότητα από ακτινοβολία και μεταγωγή)

Ο διαθέσιμος για εκκένωση χρόνος, είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής της έναυσης της πυρκαγιάς και της χρονικής στιγμής κατά την οποία οι συνθήκες του περιβάλλοντος των διόδων εκκένωσης, καθιστούν αδύνατη τη διατήρηση της δυνατότητας των ατόμων να συνεχίσουν την ανάληψη αποτελεσματικών ενεργειών για την συνέχιση και ολοκλήρωση της εκκένωσης. Επομένως απαιτείται θέσπιση σαφών κριτηρίων και οριακών τιμών για να εκτιμηθεί η επάρκεια των συστημάτων διαχείρισης των έκτακτων αυτών καταστάσεων και ο αριθμός των ανθρώπων που θα προσβληθούν από τις παραπάνω απειλητικές καταστάσεις. Οι οριακές τιμές είναι φυσικές τιμές για την ορατότητα, θερμότητα (ακτινοβολίας και μεταγωγής), τοξικότητα, θερμοκρασία, θόρυβο στις οποίες οι προσβαλλόμενοι αρχίζουν να νοιώθουν πόνο ή να καθίσταται δύσκολη η εκκένωση για την προσέγγιση ασφαλών θέσεων. Αυτές οι οριακές τιμές προσεγγίζονται σαν ειδική κατηγορία των απαιτήσεων επιτελεσματικότητας και αναλύονται παρακάτω:

## **1.1. Απαιτήσεις και κριτήρια ικανότητας διαφυγής**

### **1.1.1. Ορατότητα**

Η θολότητα και σκοτεινότητα από την παρουσία του καπνού μειώνει την ορατότητα και την ορθή αντίληψη της κατεύθυνσης των οδών διαφυγής. Η επίδραση του καπνού στην ορατότητα εκτιμάται μέσω της οπτικής πυκνότητας (OD). Η οπτική πυκνότητα (OD) ορίζεται σαν αδιάστατη παράμετρος από τη σχέση:  $OD = \text{Log}(I_0/I_L)$ , όπου  $I_0$  η ένταση μιας πρότυπης πηγής φωτός και  $I_L$  η ένταση του φωτός όταν η πηγή αυτή διανύσει απόσταση  $L$  μέσα στον καπνό.

Η εκτίμηση αυτής της επίδρασης μπορεί να γίνει και από τον συντελεστή απόσβεσης (extinction coefficient)  $K$ . Η σχέση των δύο μεγεθών OD και  $K$  δίνεται από τη σχέση  $K = (OD/L) * 2,303$ .

Η ορατότητα VIS θα προσεγγίζεται από τη σχέση  $VIS = (A/K)$  όπου  $A$ : αδιάστατη σταθερά αναλογικότητας με τιμή 6 για τα εσωτερικώς φωτιζόμενα σήματα και 2 για τα ανακλαστικά σήματα και τα τοιχώματα και τις πόρτες της σήραγγας.

Η ορατότητα θα διατηρείται συνεχώς σε τέτοια επίπεδα ώστε ένα εσωτερικώς φωτιζόμενο σήμα στα 80 lx θα διακρίνεται από τα 30 μ. ενώ τα τοιχώματα της σήραγγας και οι πόρτες θα διακρίνονται από τα 10 μ. Τα ανακλαστικά σήματα θα διακρίνονται από τα 15 μ.

Για τους πυροσβέστες ισχύουν οι παραπάνω τιμές. Αν προβλέπεται ο εξοπλισμός τους με υπέρυθρες κάμερες δεν υπάρχουν περιορισμοί.



### 1.1.2. Θερμότητα (λόγω ακτινοβολίας και μεταγωγής)

**1.1.2.1.** Η ακτινοβολία θερμότητας προέρχεται από την πηγή της φωτιάς αλλά και το θερμό στρώμα καπνού.

Υπάρχουν δύο γενικές προσεγγίσεις για τις οριακές τιμές της ακτινοβολίας θερμότητας. Η πρώτη προσέγγιση είναι το αποκαλούμενο “κατώφλι πόνου” (pain threshold) όπου η έκθεση στην ακτινοβολία θερμότητας είναι ισοδύναμη με την έκθεση σε 2,5 KW/m<sup>2</sup> για διάστημα 24 sec. Το σκεπτικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι το άτομο που έχει προσλάβει σωρευτική δόση ακτινοβολίας θερμότητας ισοδύναμη με την απαιτούμενη για την εκδήλωση του πόνου (χωρίς όμως να καίγεται) καθίσταται ανίκανο να συνεχίσει αποτελεσματικά τη διαδικασία εκκένωσης.

Η δεύτερη προσέγγιση είναι το “κατώφλι εξουδετέρωσης” (incapacitation threshold), που αντιστοιχεί σε έκθεση 8,25 KW/m<sup>2</sup> για διάστημα 60 sec. Το σκεπτικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι το άτομο που έχει προσλάβει τόσο σημαντική σωρευτική δόση ακτινοβολίας θερμότητας, είναι πιθανό να υποφέρει πλέον από εγκαύματα δευτέρου βαθμού, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να συνεχίσει την διαδικασία εκκένωσης.

Για την επιλογή της απαίτησης εδώ, θα θεωρήσουμε ότι η έκθεση ενός ατόμου στην ακτινοβολία θερμότητας, επηρεάζει πέραν της φυσικής του ικανότητας για διαφυγή και την συμπεριφορά του. Το άτομο που ήδη έχει εκτεθεί σε περιβάλλον φωτιάς και βρίσκεται σε διαδικασία διαφυγής είναι πιθανό να υπομένει μεγαλύτερη έκθεση από αυτή που αντιστοιχεί στο “κατώφλι πόνου” προτού καταστεί ανίκανο να συνεχίσει τη διαδικασία διαφυγής. Επομένως είναι ανεκτές μεγαλύτερες τιμές.

Η μέγιστη τιμή της θερμότητας από ακτινοβολία που μπορεί να είναι ανεκτή από ένα τυπικό μέσο άτομο, καθορίζεται σε 2,5 KW/m<sup>2</sup>. Για τιμές κάτω από αυτό το όριο, η έκθεση για χρονικό διάστημα 30 min μπορεί να είναι ανεκτή, χωρίς να επηρεάζει τη δυνατότητα διαφυγής (θεωρείται ότι στα 30 min θα έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εκκένωσης). Για τιμές πάνω από το όριο ο χρόνος δημιουργίας εγκαύματος δευτέρου βαθμού στο δέρμα (επομένως μη συνέχιση της διαδικασίας εκκένωσης) δίνεται από την εμπειρική εξίσωση:

$$t_{\text{rad}}=4 \cdot q^{-1,36}$$

όπου  $t_{\text{rad}}$ : ο χρόνος δημιουργίας εγκαύματος στο δέρμα (επομένως μη συνέχιση της διαδικασίας εκκένωσης) λόγω ακτινοβολίας θερμότητας σε min και  $q$ : η ροή ακτινοβολίας θερμότητας σε KW/m<sup>2</sup>. Η ακρίβεια της παραπάνω εξίσωσης είναι της τάξης του ±25%.

Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή της θερμότητας από ακτινοβολία που μπορεί να είναι ανεκτή από πυροσβέστες κατάλληλα εξοπλισμένους είναι 5 KW/m<sup>2</sup>.

**1.1.2.2.** Ο χρόνος εξουδετέρωσης ενός ατόμου λόγω επίδρασης θερμότητας μεταγωγής από αέρα με υγρασία μικρότερη από 10% θα υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$t_{\text{conv}}=(4,1 \cdot 10^8) T^{-3,61} \text{ για άτομα με πλήρη έως βαρύ ρουχισμό}$$

$$t_{\text{conv}}=(5 \cdot 10^7) T^{-3,4} \text{ για άτομα με ελαφρύ ρουχισμό}$$

$t_{\text{conv}}$ : ο χρόνος εξουδετέρωσης σε min και  $T$ : η θερμοκρασία σε °C.

Η ακρίβεια των παραπάνω εξισώσεων είναι της τάξης του ±25%.

Συνιστάται, αν δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία να χρησιμοποιείται η δεύτερη εξίσωση.

Για την απροστάτευτο δέρμα το όριο ανοχής είναι 120 °C, πάνω από το οποίο παρουσιάζεται έντονος πόνος, από μεταγωγή θερμότητας, εντός λίγων λεπτών και αδυναμία διαφυγής.

**1.1.2.3.** Ο συνδυασμός των ανωτέρω εξισώσεων μπορεί να δώσει την συνολική κλασματική δραστική δόση (Fractional Effective Dose FED) θερμότητας από την έκθεση, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$FED = \sum \left( \frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \Delta t_{t_1}^{t_2}$$

Η διαχείριση της αβεβαιότητας αυτής της εξίσωσης εξαρτάται από την αβεβαιότητα των προηγούμενων εξισώσεων. Όταν η ροή ακτινοβολίας είναι <2,5 KW/m<sup>2</sup> ο πρώτος όρος τίθεται μηδέν. Το κατώφλι εξουδετέρωσης είναι FED=0,3 και ο χρόνος που αντιστοιχεί αναφέρεται στο χρόνο που διατίθεται για διαφυγή από την έκθεση σε θερμότητα από ακτινοβολία και μεταγωγή.

**1.1.3. Τοξικότητα.** Κύριος μετρητής της τοξικότητας θεωρείται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Οι ανεκτές συγκεντρώσεις CO είναι:

- Μέγιστη 2000 ppm για λίγα δευτερόλεπτα
- Μέγιστη μέση 1150 ppm για τα πρώτα έξι λεπτά της έκθεσης
- Μέγιστη μέση 450 ppm για τα πρώτα δεκαπέντε λεπτά της έκθεσης
- Μέγιστη μέση 225 ppm για τα πρώτα τριάντα λεπτά της έκθεσης
- Μέγιστη μέση 50 ppm για τον υπολειπόμενο χρόνο της έκθεσης

Οι τιμές αυτές θα πρέπει να βαθμονομούνται κατάλληλα αν η πίεση του χώρου που εξετάζεται αντιστοιχεί σε απόλυτο υψόμετρο μεγαλύτερο των 1000m, ή αν για οποιοδήποτε λόγο ο χώρος βρίσκεται υπό πίεση.

**1.1.4. Θόρυβος.** Τα επίπεδα του θορύβου θα είναι μέγιστο τα 115dBA για λίγα δευτερόλεπτα και μέγιστο τα 92dBA για τον υπόλοιπο χρόνο της έκθεσης.

## 1.2. Απαιτήσεις για την δομοστατική επάρκεια της μόνιμης επένδυσης

Για την εξασφάλιση της δομοστατικής επάρκειας της τελικής επένδυσης της σήραγγας, μετά από έκθεση δύο ωρών σε πυρκαγιά ισχύουν τα εξής:

- ✓ Σε σήραγγες με επί τόπου έγχυτη από σκυροδέμα επένδυση, η θερμοκρασία της επιφάνειας του σκυροδέματος δεν θα υπερβαίνει τους 380 °C, ενώ η θερμοκρασία του σπλισμού τους 250 °C (με επικάλυψη 25 mm)
- ✓ Σε σήραγγες με επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος θα αποκλείεται η απολέπιση (spalling)

## 2. Τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας

Καταγράφεται η τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας όπως έχει θεωρηθεί στη μελέτη του έργου.

## 3. Τεχνική διάρκεια ζωής των επί μέρους στοιχείων των υποσυστημάτων της σήραγγας

Για τα υποσυστήματα της σήραγγας θα δίνεται η τεχνική διάρκεια ζωής τους και θα χαρακτηρίζονται ως επισκευάσιμα, εύκολα αντικαταστάσιμα, αντικαταστάσιμα με προσπάθεια και υφιστάμενα σε όλη την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας. Για καθένα υποσύστημα θα δίνονται οι απαιτήσεις σε χρονική διάρκεια και κυκλοφοριακές διαρρυθμίσεις για συντήρηση, επισκευές και αντικατάσταση.

## 4. Χρονική περίοδος αναφοράς της ανάλυσης επικινδυνότητας

Θα δηλώνεται με σαφήνεια η χρονική περίοδος για την οποία ισχύει η ανάλυση επικινδυνότητας, μετά το πέρας της οποίας και εφόσον δεν υπάρχουν άλλες εντολές, ο Διαχειριστής της σήραγγας υποχρεούται να υποβάλλει νέα επικαιροποιημένη ανάλυση. Η χρονική περίοδος στην οποία αναφέρεται η ανάλυση δεν θα είναι μικρότερη από έξι (6)

χρόνια. Η ανάλυση θα τροφοδοτείται για την χρονική περίοδο αυτή, με τις προβλέψεις και τα στοιχεία της μελέτης της σήραγγας (π.χ. στοιχεία κυκλοφοριακού φόρτου, προβλέψεις περιβαλλοντικών συνθηκών)

## 5. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Βασικά στοιχεία

- ✓ ταχύτητα σχεδιασμού. Διακρίβωση αν η τιμή της ταχύτητας μελέτης  $V_e$  εξισώνεται με το όριο ταχύτητας  $V_{επιτρ}$  και την λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ .
- ✓ διαφορά ταχυτήτων βαρέων οχημάτων και επιβατηγών οχημάτων
- ✓ μήκος σήραγγας
- ✓ οριζόντια χάραξη
- ✓ κατακόρυφη χάραξη

Διάταξη Περιοχής Στομίων Εισόδου – Εξόδου

- ✓ περιγραφή, χωροθέτηση
- ✓ πλατύσματα στάθμευσης
- ✓ πλατύσματα αναστροφής
- ✓ διακρίβωση της ομοιομορφίας και συνέχειας των λειτουργικών ταχυτήτων στα οδικά τμήματα που προηγούνται ή έπονται της σήραγγας και του τμήματος σε σήραγγα και του τρόπου της σταδιακής μείωσης της ταχύτητας.

Διατομή χρήσης.

- ✓ διαστάσεις περιτυπώματος και του πρόσθετου χώρου για τον λειτουργικό εξοπλισμό της σήραγγας, σε ευθυγραμμία και καμπύλη
- ✓ πλάτος λωρίδων κυκλοφορίας, λωρίδων καθοδήγησης, λωρίδας πολλαπλών χρήσεων (εφόσον υπάρχει ή προβλέπεται)
- ✓ πεζοδρόμια

Βοηθητικές εγκαταστάσεις εντός σήραγγας.

- ✓ έξοδοι διαφυγής οχημάτων – προσέγγιση οχημάτων έκτακτων καταστάσεων
- ✓ έξοδοι διαφυγής πεζών
- ✓ εσοχές έκτακτης στάθμευσης
- ✓ διάταξη εσοχών ΕΑΣ, ΕΔΕ και λοιπών Η/Μ εγκαταστάσεων
- ✓ διάταξη αποστράγγισης – αποχέτευσης των υγρών του οδοστρώματος
- ✓ διάταξη αποστράγγισης – αποχέτευσης των νερών της περιβάλλουσας βραχομάζας

Χωροθέτηση κτηρίων Η/Μ εγκαταστάσεων και σχεδιασμός αντίστοιχων προσβάσεων

Διατάξεις για επιθεώρηση και συντήρηση, έλεγχος ύψους οχημάτων.

Διατάξεις για αντιμετώπιση και διαχείριση Έκτακτων Περιστατικών.

Τα παραπάνω θα συνοδεύονται από λεπτομερή περιγραφή για την πλήρη κατανόηση των λειτουργικών δυνατοτήτων τους.

## 6. Θέση κέντρου ελέγχου και υπηρεσιών έκτακτης κατάστασης

Καταγράφεται η χωρική θέση του κέντρου ελέγχου της σήραγγας και οι δυνατότητες ελέγχου και χειρισμών από αυτό. Καταγράφεται λεπτομερώς ο απαιτούμενος χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στη σήραγγα (αφού έχει ληφθεί η σχετική απόφαση)

Οι υπηρεσίες έκτακτων καταστάσεων που μπορούν να κληθούν για συντονισμένη επέμβαση, ανάλογα με την έκτακτη κατάσταση και τις προβλέψεις του Σχεδίου Αντιμετώπισης Έκτακτων Καταστάσεων (ΣΑΕΚ), είναι:

- ✓ Πυροσβεστικό Σώμα,

- ✓ Ελληνική Αστυνομία,
- ✓ ΕΚΑΒ
- ✓ Υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας
- ✓ Αρμόδιες Υπηρεσίες και Τμήματα του Ε.Σ.Υ.
- ✓ Ο φορέας που τροφοδοτεί με νερό το δίκτυο της σήραγγας (αν υπάρχει)
- ✓ Ο διαχειριστής του οδικού δικτύου που εμπλέκεται στις προβλεπόμενες κινήσεις
- ✓ Διάφορες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας
- ✓ Οργανισμοί Αυτοδιοίκησης
- ✓ Ιδιωτικές επιχειρήσεις και ιδιώτες ιδιοκτήτες απαιτούμενου εξοπλισμού, που προβλέπεται να ενεργοποιείται με διαδικασία επίταξης.
- ✓ Λιμενικό Σώμα και Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας

Οι Υπηρεσίες αυτές θα κατονομάζονται ρητά, θα καταγράφεται η έδρα της επιχειρησιακής μονάδας και ειδικότερα για το Πυροσβεστικό, την Αστυνομία και το ΕΚΑΒ, θα καταγράφονται οι θέσεις εκκίνησης και θα εκτιμάται ο χρόνος άφιξής τους στον τόπο του συμβάντος, από την ειδοποίησή τους.

#### **7. Περιβαλλοντικές συνθήκες**

- ✓ Φυσικό περιβάλλον: γεωλογικές, γεωτεχνικές, υδραυλικές, μετεωρολογικές συνθήκες, φυτοκάλυψη της περιοχής, καταγραφή προστατευόμενων περιοχών, καταγραφή άγριας πανίδας.
- ✓ Ανθρωπογενές περιβάλλον: πληθυσμός και δραστηριότητες της περιοχής, εποχιακές διακυμάνσεις, σύνθεση του πληθυσμού, καταγραφή μονάδων που φιλοξενούν ευαίσθητα άτομα (νοσοκομεία, γηροκομεία, σχολεία, πανεπιστήμια, ξενώνες), καταγραφή πολιτιστικών μνημείων
- ✓ Καταγραφή και χάρτες χρήσεων γης.

#### **8. Συνθήκες οδικού δικτύου**

Καταγράφεται το οδικό δίκτυο των ανοικτών τμημάτων της οδού και οι γενικές συνθήκες κυκλοφορίας, με ιδιαίτερη αναφορά στις διατάξεις εισόδου και εξόδου στον αυτοκινητόδρομο. Επίσης τυχόν απαιτούμενες εναλλακτικές διαδρομές.

#### **9. Κυκλοφοριακός φόρτος**

Θα δίνεται είτε η πρόβλεψη της κυκλοφοριακής μελέτης με σαφή αναφορά στον χρόνο ισχύος της εκπονούμενης ανάλυσης επικινδυνότητας, είτε η πρόβλεψη για τον χρόνο αυτό με βάση τα στατιστικά στοιχεία από τις καταγραφές του συγκεκριμένου οδικού άξονα και για την υπό εξέταση σήραγγα. Η σύνθεση του κυκλοφοριακού φόρτου θα δίνεται με την πλέον λεπτομερή ανάλυση και θα περιλαμβάνει οπωσδήποτε τουλάχιστον το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.

#### **10. Λειτουργικές και οργανωτικές διαρρυθμίσεις**

Καταγράφονται οι κυκλοφοριακοί κανονισμοί και περιορισμοί για κανονική κυκλοφοριακή ροή, για ειδικές μετακινήσεις, για τακτική και έκτακτη συντήρηση και επισκευές, καθώς και για έκτακτες καταστάσεις (τροχαία ατυχήματα, συγκρούσεις, πυρκαγιές κ.λ.π.)

Καταγράφεται η οργανωτική δομή της λειτουργίας της σήραγγας και ο εξοπλισμός για την διεκπεραίωση αυτών των καθηκόντων (π.χ. οχήματα, κινητές κάμερες, μεγάφωνα):

- ✓ Διαχειριστής
- ✓ Αρμόδιος ασφαλείας
- ✓ Προσωπικό λειτουργίας και χρονική κατανομή του
- ✓ Διοικητικό και υποστηρικτικό τεχνικό προσωπικό
- ✓ Προσωπικό άμεσης επέμβασης σε έκτακτη κατάσταση (αν υπάρχει)

- ✓ Γραπτές διαδικασίες για τις ενέργειες που θα αναληφθούν σε κανονικές ή έκτακτες καταστάσεις (π.χ. καταγράφεται η ύπαρξη εγχειριδίων λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού, της διαδικασίας διακοπής της κυκλοφορίας στη σήραγγα)
- ✓ Καταγράφονται οι πραγματοποιηθείσες και προγραμματιζόμενες ασκήσεις με τις υπηρεσίες έκτακτων καταστάσεων

#### **11. Η/Μ εξοπλισμός και εξοπλισμός έκτακτων αναγκών**

Πλήρης καταγραφή των υποσυστημάτων της σήραγγας και των λειτουργικών δυνατοτήτων τους (σύστημα αερισμού κανονικών συνθηκών και έκτακτων καταστάσεων, σύστημα παροχής και διανομής ισχύος, παροχή ισχύος έκτακτης κατάστασης, σύστημα φωτισμού, συστήματα επιτήρησης και ελέγχου) καθώς και τα τυχόν κινητά συστήματα και εξοπλισμός έκτακτων καταστάσεων που διατίθενται επί τόπου.

### **B. Διαδικασία οριστικοποίησης των στοιχείων του Παραρτήματος Α.**

Για την πληρέστερη θεώρηση των στοιχείων που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α ο Διαχειριστής της σήραγγας, μετά από πρόταση του φορέα που εκπονεί την ανάλυση, θα συγκαλεί ad hoc σύσκεψη στην οποία θα συμμετέχουν (με ορισμένους εκπροσώπους) εκτός αυτών των δύο, ο αρμόδιος ασφαλείας της σήραγγας, οι Υπηρεσίες Έκτακτων Καταστάσεων (ειδικότερα το Πυροσβεστικό Σώμα, η Ελληνική Αστυνομία και το ΕΚΑΒ), ο Κύριος του έργου της σήραγγας και ο φορέας λειτουργίας της σήραγγας στην περίπτωση που είναι διαφορετικός από τον διαχειριστή (π.χ. διαφορετικός φορέας λειτουργίας από τον διαχειριστή της σήραγγας στη φάση της μελέτης). Ο εκπονών την ανάλυση θα εισηγείται στη σύσκεψη τις προτάσεις του επί του περιεχομένου του Παραρτήματος Α. Οι απόψεις των συμμετεχόντων θα καταγράφονται σε σχετικό πρακτικό το οποίο θα περιλαμβάνεται στα περιεχόμενα της ανάλυσης επικινδυνότητας.

Σκοπός της σύσκεψης είναι η ανταλλαγή των απόψεων όλων των φορέων που αποτελούν συνιστώσες στη διαχείριση μιας έκτακτης κατάστασης και η απευθείας κοινοποίηση αυτών σε όλους τους αμέσως εμπλεκόμενους. Στη σύσκεψη δεν λαμβάνονται αποφάσεις και δεν γίνονται ψηφοφορίες. Το σύνολο των απόψεων που καταγράφονται στο πρακτικό λαμβάνεται υπόψη και αξιολογείται από τον αναλυτή και το Διαχειριστή της σήραγγας, η δε τελική απόφαση αυτών των δύο κοινοποιείται σε όσους έχουν συμμετάσχει στη σύσκεψη.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.**

### **ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ**

Για τον καθορισμό των κινδύνων σε ένα σύστημα, διατίθενται διάφορες τεχνικές και μέθοδοι, οι οποίες με δομημένο και τυποποιημένο τρόπο, σε διάφορο βαθμό κάθε μια, προσεγγίζουν το αντικείμενο αυτό. Αν και οι μέθοδοι αυτές έλκουν σε μεγάλο βαθμό την καταγωγή τους από άλλα πεδία δραστηριότητας, κυρίως τη χημική, την αεροπορική και διαστημική βιομηχανία, με μικρές τροποποιήσεις και προσαρμογές μπορούν να εφαρμοστούν στον καθορισμό κινδύνων και στις σήραγγες (θεωρούμενες σαν συνολικό σύστημα που περιλαμβάνει την υποδομή, τον εξοπλισμό, τους χρήστες, τα οχήματα, την οργανωτική συγκρότηση και τις μεταξύ αυτών σχέσεις). Συνοπτική παράθεση ορισμένων τέτοιων τεχνικών και μεθόδων παρατίθεται παρακάτω. Η παράθεση αυτή είναι ενδεικτική για ενημερωτικούς λόγους και όχι αυστηρά περιοριστική.

#### ***Λίστες ελέγχου (checklist)***

Μια λίστα ελέγχου είναι ένα εργαλείο εκτίμησης εξοπλισμού, υλικών ή διαδικασιών. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε κάθε φάση ενός έργου για να καθοδηγήσει το χρήστη της σε θέματα κοινών κινδύνων (common hazards), χρησιμοποιώντας τυποποιημένες διαδικασίες. Η λίστα ελέγχου συνήθως επιφέρει συμμόρφωση με ελάχιστα πρότυπα και καθορίζει περιοχές που απαιτούν περαιτέρω εκτίμηση. Τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά, συνήθως του τύπου “ναι ή όχι” σχετικά με τη συμμόρφωση με πρότυπες διαδικασίες. Παράδειγμα τέτοιας λίστας είναι οι προβλέψεις της Οδηγίας 2004/54/ΕΚ.

#### ***Περιπτωσιολογία (casuistry)***

Ο καθορισμός των κινδύνων μπορεί να γίνει ανατρέχοντας σε δημοσιευμένες περιπτώσεις ατυχημάτων που έχουν συμβεί σε σήραγγες. Τέτοια ατυχήματα περιλαμβάνονται σε εκδόσεις της PIARC καθώς και σε ερευνητικά προγράμματα της Ε.Ε. (SafeT, Work Package 4, “Post accident investigation and evaluation”)

#### ***Ανάλυση τύπου “What if”***

Η διαδικασία τύπου “What if” αφορά τον καθορισμό ανεπιθύμητων συνεπειών, οι οποίες προκύπτουν από απόκλιση της προβλεπόμενης κανονικής διαδικασίας ενεργειών και λειτουργιών. Δεν είναι αυστηρά δομημένη διαδικασία όπως π.χ. οι τεχνικές HAZOP και FMECA, όμως όταν χρησιμοποιείται από άτομα με εμπειρία στη χρήση της, μπορεί να αποδειχθεί ευκολόχρηστη και δυνατή τεχνική.

Στη μελετητική ομάδα τίθεται το ερώτημα “Τι θα συμβεί αν ...”, για την απάντηση του οποίου οι απαντώντες πρέπει να είναι έμπειροι και εξειδικευμένοι στον αντίστοιχο τομέα. Δίνει συνήθως ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη διερεύνηση της λειτουργικής απώλειας στοιχείων των υποσυστημάτων της σήραγγας. Τα αποτελέσματα είναι ένας ποιοτικού χαρακτήρα κατάλογος σεναρίων ατυχημάτων, συνεπειών και πιθανών μέτρων μείωσης της προκύπτουσας επικινδυνότητας.

#### ***Προκαταρκτική ανάλυση κινδύνου (preliminary hazard analysis PHA)***

Η μέθοδος PHA εκπονείται συνήθως σε ποιοτική μορφή κατά τη διάρκεια του προκαταρκτικού σταδίου της μελέτης ενός έργου, με σκοπό τον καθορισμό των κύριων κινδύνων στο θεωρούμενο σύστημα, μαζί συγχρόνως με τον καθορισμό των αιτιών και την σοβαρότητα των συνεπειών τους. Πάντως μέθοδος PHA μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και σαν βάση για την επανεκτίμηση της επικινδυνότητας και αξιοπιστίας ήδη λειτουργούντων συστημάτων.

Τα αποτελέσματα συνήθως ανακεφαλαιώνονται σε πινακοποιημένη μορφή που περιέχει καταλόγους με:

- ✓ Επικίνδυνα στοιχεία
- ✓ Γεγονότα που μπορούν να εκκινήσουν την αλληλουχία επικίνδυνης κατάστασης
- ✓ Προσδιορισμός της επικίνδυνης κατάστασης
- ✓ Σενάρια γεγονότων που οδηγούν σε αποτυχίες σαν συνέπεια των επικίνδυνων καταστάσεων
- ✓ Προσδιορισμός των αστοχιών
- ✓ Προσδιορισμός των συνεπειών των αστοχιών
- ✓ Μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας

Λόγω της ποιοτικής φύσης της PHA τα υποσυστήματα και οι λοιπές συνιστώσες του συστήματος δεν βαθμολογούνται σε σχέση με την κρισιμότητά τους, αλλά τα αποτελέσματα της PHA χρησιμοποιούνται σαν βάση για άλλες μεθόδους (FMEA, FMECA, HAZOP), που μπορούν να κάνουν κάτι τέτοιο.

### **Μελέτη κινδύνου και λειτουργικότητας (Hazard and Operability Study HAZOP)**

Η μέθοδος HAZOP είναι μια από τις πλέον δομημένες τεχνικές για τον καθορισμό κινδύνων. Η μέθοδος αποσκοπεί στην ανεύρεση και εντοπισμό όλων των αποκλίσεων από το μελετημένο αντικείμενο της σήραγγας και την προβλεπόμενη λειτουργικότητα. Εφαρμόζεται καταρχήν με καθορισμό των αιτιών και των συνεπειών των αποκλίσεων αυτών, από διεπιστημονική ομάδα καταιγισμού ιδεών (brainstorming). Για την έναυση δημιουργικής σκέψης για τον καθορισμό των αποκλίσεων δημιουργείται ένας κατάλογος των αποκαλούμενων “λέξεων οδηγών”. Αν οι αιτίες και οι συνέπειες θεωρηθούν ως ρεαλιστικές και αξιολογηθούν ως σημαντικές καταγράφονται σε ένα πίνακα εργασίας για παραπέρα ενέργειες. Αυτές οι ενέργειες μπορούν να είναι είτε αλλαγές στη μελέτη ή τον εξοπλισμό, είτε περαιτέρω μελέτη των πιθανών συνεπειών π.χ. υπολογισμοί των συνεπειών.

Συνήθως τα αποτελέσματα είναι ποιοτικοί κατάλογοι κινδύνων και λειτουργικών προβλημάτων, συνιστώμενες αλλαγές στη μελέτη και διαδικασίες βελτίωσης των συνθηκών ασφαλείας και συστάσεις για περαιτέρω υπολογισμούς και μελέτες.

### **Ανάλυση του τύπου αστοχίας, αποτελεσμάτων και κρισιμότητας (FMECA)**

Η ανάλυση του τύπου αστοχίας, αποτελεσμάτων και κρισιμότητας (failure mode, effects and criticality analysis FMECA), είναι μια πινακοποίηση του εξοπλισμού του συστήματος της σήραγγας, των τύπων αστοχίας τους, των αποτελεσμάτων κάθε τύπου αστοχίας στο σύστημα και μια βαθμολογία κρισιμότητας για κάθε τύπο αστοχίας. Ο τύπος αστοχίας είναι μια περιγραφή για το πώς αστοχεί ο εξοπλισμός (συνήθως χρησιμοποιούνται χαρακτηρισμοί ανοικτός, κλειστός, on, off κ.λ.π.). Το αποτέλεσμα του τύπου αστοχίας είναι η απόκριση του συστήματος ή ατύχημα που προκύπτει από την αστοχία του εξοπλισμού. Η ανάλυση καθορίζει απλούς τύπους αστοχίας που είτε έχουν σαν αποτέλεσμα ατύχημα είτε συμβάλλουν σημαντικά σε αυτό. Η ανάλυση συνήθως δεν περιλαμβάνει ανθρώπινα σφάλματα χειρισμών του εξοπλισμού, όμως αυτά μπορούν να προσεγγιστούν εμμέσως με την θεώρηση της δυσλειτουργίας του εξοπλισμού. Η ανάλυση γενικά δυσκολεύεται να καθορίσει συνδυασμούς αστοχιών του εξοπλισμού που οδηγούν σε αστοχίες.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ένας ποιοτικός κατάλογος του εξοπλισμού του συστήματος, με τους τύπους αστοχίας του και τα πιθανά επικίνδυνα αποτελέσματα. Υπάρχει και η δυνατότητα να παρουσιάζεται η κρισιμότητα της αστοχίας με σχετική βαθμολόγηση της σπουδαιότητας

### **Ανάλυση δένδρου σφαλμάτων (fault tree analysis FTA)**

Η ανάλυση δένδρου σφαλμάτων (FTA) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο “εργαλείο”, για την ανάλυση ασφάλειας συστημάτων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα

και δυνατότητες της μεθόδου είναι η συστηματική και λογική ανάπτυξη των πολλών αστοχιών που συμβάλλουν ως κατάληξη σε ένα ατύχημα. Αυτός ο τύπος της ανάπτυξης απαιτεί από τον αναλυτή την πλήρη κατανόηση του συστήματος, των λειτουργιών του και των διαφόρων τύπων αστοχίας.

Η FTA αναλύει ένα ατύχημα στις συμβάλλουσες αστοχίες του εξοπλισμού και τα ανθρώπινα λάθη. Για το λόγο αυτό η μέθοδος είναι μια τεχνική “ανάστροφης σκέψης”: δηλαδή ο αναλυτής αρχίζει με ένα ατύχημα ή ανεπιθύμητη κατάσταση που πρέπει να αποφευχθούν και καθορίζει τις άμεσες αιτίες αυτού του συμβάντος. Κάθε μια από αυτές τις άμεσες αιτίες εξετάζεται διαδοχικά μέχρι ο αναλυτής να καθορίσει τη βασική αρχική αιτία του κάθε συμβάντος. Το δένδρο σφαλμάτων είναι ένα διάγραμμα που καταδεικνύει τις λογικές σχέσεις μεταξύ των βασικών αιτιών και του ατυχήματος,

Ως αποτέλεσμα της FTA λαμβάνεται ένας κατάλογος συνδυασμένων συνόλων αστοχιών (εξοπλισμού και ανθρώπινων λαθών), που μπορούν να προκαλέσουν ένα ατύχημα. Η μέθοδος δίνει συνήθως ποιοτικά αποτελέσματα, αλλά έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και για ποσοτικές αποτιμήσεις ενσωματώνοντας τις πιθανότητες κάθε κλάδου με βάση πιθανοτικούς δείκτες αστοχιών από κατάλληλες βάσεις δεδομένων.

### ***Ανάλυση δένδρου γεγονότων (event tree analysis)***

Η ανάλυση δένδρου γεγονότων εκτιμά την πιθανή έκβαση ενός ατυχήματος, που επέρχεται ως αποτέλεσμα μιας αστοχίας εξοπλισμού ή διαδικασίας (αποκαλούμενο και ως εναρκτήριο γεγονός). Γενικά έχει εφαρμογή σε φυσικά συστήματα με ή χωρίς προσωπικό λειτουργίας και σε διαδικασίες διαχείρισης και λήψης αποφάσεων. Αντίθετα από την ανάλυση δένδρου σφαλμάτων, η ανάλυση δένδρου γεγονότων είναι μια διαδικασία “αναδυόμενης συμπερασματικής σκέψης”: δηλαδή ο αναλυτής αρχίζει με ένα εναρκτήριο γεγονός και αναπτύσσει τις ακολουθούσες αλληλουχίες γεγονότων, που περιγράφουν το πιθανό ατύχημα, λαμβάνοντας υπόψη και ενσωματώνοντας τόσο τις καταστάσεις αστοχίας όσο και τελεσφόρησης των λειτουργιών ασφάλειας καθώς η αλυσίδα του ατυχήματος εξελίσσεται.

Το δένδρο γεγονότων παρέχει ένα ακριβή τρόπο για την καταγραφή της αλληλουχίας του ατυχήματος και καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ του εναρκτήριου γεγονότος και των επακόλουθων γεγονότων που συνδυάζονται για να σχηματίσουν ολοκληρωμένη την αλυσίδα του ατυχήματος. Έτσι με κατάταξη ή βαθμολόγηση των ατυχημάτων, ή μέσω μιας διαδοχικής ποσοτικής αποτίμησης, καθορίζονται τα πλέον σημαντικά ατυχήματα. Τα δένδρα γεγονότων ταιριάζουν στην ανάλυση εναρκτήριων γεγονότων που μπορούν να καταλήξουν σε ποικίλα αποτελέσματα. Ένα δένδρο γεγονότων δίνει έμφαση στην αρχική αιτία και ασχολείται από το εναρκτήριο γεγονός μέχρι το τελικό αποτέλεσμα του γεγονότος. Κάθε κλάδος του δένδρου γεγονότων αντιπροσωπεύει ένα διακριτό αποτέλεσμα, δηλαδή ένα σαφώς ορισμένο σύνολο λειτουργικών σχέσεων.

Και στο δένδρο γεγονότων τα ποιοτικά αποτελέσματα έχουν τη δυνατότητα όπως και στα δένδρα σφαλμάτων να πάρουν και ποσοτική μορφή, εφόσον είναι γνωστές οι πιθανότητες των διαφόρων γεγονότων.

### ***Ανάλυση αιτίων - συνεπειών***

Η ανάλυση αιτίων – συνεπειών συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της “σκέψης προς τα εμπρός” της ανάλυσης δένδρου γεγονότων, με την “ανάστροφη σκέψη” του δένδρου σφαλμάτων. Η τεχνική αυτή συσχετίζει τις συνέπειες ειδικών επιλεγμένων ατυχημάτων με τις πιθανές πολλές βασικές τους αιτίες.

Το αποτέλεσμα είναι ένα διάγραμμα αιτίων – συνεπειών, το οποίο εκθέτει τις σχέσεις μεταξύ συνεπειών και βασικών αιτιών ενός ατυχήματος. Η επίλυση του διαγράμματος αυτού για μια ιδιαίτερη αλληλουχία ατυχήματος είναι ένας κατάλογος ελάχιστων υποσυνόλων της αλληλουχίας του ατυχήματος, που αντιπροσωπεύουν όλους τους συνδυασμούς των βασικών αιτιών που μπορούν να καταλήξουν στην αλληλουχία του ατυχήματος. Η όλη τεχνική μπορεί να λάβει και ποσοτική μορφή.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

### ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ

Πρόκειται για τα “κρίσιμα συμβάντα” του μοντέλου πεταλούδας που συνδέουν το δένδρο σφαλμάτων με το δένδρο γεγονότων.

- ✓ Φωτιά σε επιβατηγό όχημα
- ✓ Φωτιά σε αυτοκινούμενο τροχόσπιτο
- ✓ Φωτιά σε λεωφορείο
- ✓ Φωτιά σε ελαφρύ φορτηγό
- ✓ Φωτιά σε βαρύ φορτηγό
- ✓ Σύγκρουση επιβατηγού οχήματος
- ✓ Σύγκρουση λεωφορείου
- ✓ Σύγκρουση ελαφρού φορτηγού
- ✓ Σύγκρουση βαρέως φορτηγού
- ✓ Τρομοκρατική δράση
- ✓ Φωτιά στη σήραγγα από πηγή άλλη εκτός οχημάτων και εξοπλισμού
- ✓ Φωτιά σε τμήματα του εξοπλισμού της σήραγγας
- ✓ Πτώση ανηρτημένων τμημάτων του εξοπλισμού
- ✓ Κατάκλυση της σήραγγας με νερά
- ✓ Σεισμός
- ✓ Παρουσία στο περιβάλλον της σήραγγας μη διαχειρίσιμων από το σύστημα αερισμού συγκεντρώσεων αερίων
- ✓ Παρουσία μη προβλεπόμενου, στη σύνθεση του κυκλοφοριακού φόρτου, τύπου

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.

### ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΙΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Η προτυποποίηση των σεναρίων πυρκαγιάς στις σήραγγες για τις ανάγκες και τους σκοπούς του παρόντος, γίνεται στη βάση του Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (Heat Release Rate ή HRR). Συνιστάται για τη θεώρηση της ανάλυσης επικινδυνότητας να χρησιμοποιούνται διάφορα σενάρια πυρκαγιάς. Δεδομένου ότι οι μικρού μεγέθους πυρκαγιές δίνουν διαφορετικά προβλήματα από τις μεγαλύτερες, στην ανάλυση επικινδυνότητας είναι σημαντικό να αποκαλύπτεται όλο το εύρος των πιθανών προβλημάτων, με θεώρηση διαφορετικών πυρκαγιών, οι οποίες θα καλύπτουν αντιπροσωπευτικά όλο το φάσμα της αντίστοιχης διακύμανσης. Για τους σκοπούς επίσης του παρόντος, οι καμπύλες Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας (HRR) θα πρέπει να συμπληρωθούν και με πρόβλεψη για Έκλυση Προϊόντων.

Η προτυποποίηση θα πρέπει να καλύπτει όλες τις κατηγορίες οχημάτων (όπως ορίζονται στον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας) και ειδικότερα να περιλαμβάνει:

- ✓ Επιβατηγά οχήματα
- ✓ Φορτηγά διαφόρων μέγιστων επιτρεπόμενων βαρών (πλην αυτών που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα)
- ✓ Λεωφορεία

#### Δ.1. Γενικές παραδοχές και υποθέσεις για τη μόρφωση των καμπυλών HRR.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να παρουσιαστεί ένα σενάριο πυρκαγιάς σχεδιασμού, χρησιμοποιώντας την HRR αιχμής και διάφορους τύπους ανάπτυξης της πυρκαγιάς (π.χ. γραμμική, εκθετική κ.λ.π.) και συνδυάζοντας αυτά με τη διατήρηση σταθερών επιπέδων και μία περίοδο εξασθένησης της πυρκαγιάς. Γενικά η πλήρης περιγραφή ενός σεναρίου πυρκαγιάς σχεδιασμού περιλαμβάνει τις παρακάτω φάσεις:

- Αρχική φάση – μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές προέλευσης, όπως, από μια υποβόσκουσα φωτιά χωρίς αρχική εκδήλωση φλόγας, από φλεγόμενο αντικείμενο ή από ακτινοβολούσα πηγή
- Φάση Ανάπτυξης – καλύπτει την περίοδο διάδοσης της πυρκαγιάς με πιθανά φαινόμενα γρήγορης εξάπλωσης της πυρκαγιάς (ανάφλεξη πυρκαγιάς (flashover), backdraft, ή ανάφλεξη αερίου πυρκαγιάς (fire gas ignition)) προς μια σχετικά σταθερή κατάσταση.
- Φάση Πλήρους Ανάπτυξης (σε περίπτωση σταθερή κατάσταση) που εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού ή τις παραμέτρους του καιόμενου υλικού.
- Φάση Εξασθένησης – που καλύπτει την περίοδο ύφεσης της φωτιάς
- Φάση εξάλειψης – όπου πλέον δεν εκλύεται άλλη ενέργεια

Για λόγους απλούστευσης και διαχειριστικής υπολογιστικής διευκόλυνσης και λαμβάνοντας υπόψη τα διατιθέμενα πειραματικά και εμπειρικά δεδομένα, είναι δυνατόν να συμπυκνωθούν οι δύο πρώτες φάσεις σε μία και το ίδιο να γίνει και για τις δύο τελευταίες.

Οι κυριότερες μεταβλητές που απαιτούνται για να περιγραφεί επαρκώς ένα σενάριο πυρκαγιάς και να δοθεί μονοσήμαντα και χρηστικά η «ταυτότητά» του είναι:

- Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας
- Ο ρυθμός παραγωγής τοξικών προϊόντων
- Ο ρυθμός παραγωγής καπνού
- Το μέγεθος της φωτιάς (μαζί και το μήκος της φλόγας)
- Ο χρόνος για κάποια κρίσιμα αποφασιστικά γεγονότα όπως η γρήγορη εξάπλωση της πυρκαγιάς και ειδικότερα η ανάφλεξη πυρκαγιάς (flashover)
- Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία
- Η εκπεμπτικότητα (emissivity)
- Η χωρική τοποθέτηση της πυρκαγιάς.

Επιπλέον παράγοντες που καθορίζουν την «ταυτότητα» του σεναρίου είναι:

- ✓ Ο τύπος, το μέγεθος και η θέση της εναυόμενης πηγής

- ✓ Ο τύπος και η κατανομή του καυσίμου του οχήματος
- ✓ Ο τύπος, η συσκευασία και η πυκνότητα του φορτίου
- ✓ Το σύστημα αερισμού της σήραγγας και οι συνθήκες αερισμού της φωτιάς
- ✓ Οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες στα στόμια της σήραγγας
- ✓ Οι ενέργειες από καθιονδήποτε τρόπο εμπλεκόμενους ανθρώπους (χρήστες, προσωπικό λειτουργίας της σήραγγας, το προσωπικό των Υπηρεσιών Έκτακτων Καταστάσεων)
- ✓ Οι παρεμβάσεις μέσω των διαφόρων συστημάτων της σήραγγας

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι τα προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς αναφέρονται στις συνήθειες σήραγγες του Ελληνικού χώρου όσον αφορά τις συνθήκες ύψους των σηράγγων (ελεύθερο ύψος περίπου 5μ.). Εφόσον παραστεί ανάγκη θεώρησης σηράγγων με ύψος σημαντικά χαμηλότερο ύψος π.χ. για διέλευση μόνο επιβατικών αυτοκινήτων θα γίνεται ιδιαίτερη θεώρηση κατά περίπτωση.

Η διαμόρφωση των σεναρίων πυρκαγιάς σχεδιασμού ακολουθεί τις παρακάτω αρχές:

- Διάκριση τριών φάσεων σε κάθε πυρκαγιά: Φάση Ανάπτυξης – Φάση Πλήρους Ανάπτυξης (με σταθερή κατάσταση) – Φάση Εξασθένησης
- Η σχέση της HRR με τον χρόνο τόσο στη Φάση Ανάπτυξης όσο και στη Φάση Εξασθένησης θεωρείται γραμμική. Η υιοθέτηση γραμμικής σχέσης βασίζεται στην απλοποίηση και διευκόλυνση της υπολογιστικής διαδικασίας. Σημαντικό ρόλο έπαιξε επίσης η ενσωματωμένη έτσι κι αλλιώς αβεβαιότητα στα χρησιμοποιούμενα λοιπά στοιχεία, η οποία σε σημαντικό βαθμό θα ακύρωνε τα οφέλη από την υιοθέτηση πολύπλοκων και εξεζητημένων σχέσεων.
- Η Φάση Ανάπτυξης θεωρείται ότι αρχίζει αμέσως μετά την ανάφλεξη και εξελίσσεται με γρήγορους ρυθμούς
- Η Φάση Πλήρους Ανάπτυξης (με σταθερή κατάσταση) έχει πρακτικά μηδενική διάρκεια στις περιπτώσεις πυρκαγιών σε μεμονωμένα οχήματα και ειδικότερα σε μεμονωμένα μικρά ή μεγάλα επιβατικά, σε μεμονωμένα βαριά φορτηγά κενά φορτίου ή ελαφρά φορτηγά.

## Δ.2. Προτυποποιημένες πυρκαγιές για τη σεναριακή ανάλυση επικινδυνότητας.

Παρακάτω παραθέτουμε τα προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς σχεδιασμού που θα χρησιμοποιούνται στις σεναριακές αναλύσεις επικινδυνότητας.

- **Σενάριο 1.** Εμπλοκή στη φωτιά 1-2 επιβατικών οχημάτων → HRR αιχμής 5 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=180$  sec,  $t_D=180$  sec και  $t_d=2.700$  sec.
- **Σενάριο 2.** Εμπλοκή στη φωτιά 2-3 επιβατικών οχημάτων, ή ενός μικρού ημιφορτηγού → HRR αιχμής 10 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=180$  sec,  $t_D=1.380$  sec και  $t_d=2.700$  sec.
- **Σενάριο 3.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός μεγάλου ημιφορτηγού, ή ενός λεωφορείου, ή πολλαπλών επιβατικών οχημάτων → HRR αιχμής 20 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=180$  sec  $t_D=1.980$  sec και  $t_d=3.000$  sec.
- **Σενάριο 4.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός λεωφορείου, ή κενού βαρέως φορτηγού → HRR αιχμής 30 MW με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=300$  sec,  $t_D=300$  sec και  $t_d=3.300$  sec.
- **Σενάριο 5.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός φορτηγού με καύσιμο φορτίο → HRR αιχμής 50 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=300$  sec,  $t_D=3.900$  sec και  $t_d=4.800$  sec

- **Σενάριο 6.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός βαρέως φορτηγού με καύσιμο φορτίο (περίπου 4 τόννοι) → HRR αιχμής 70 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=300$  sec,  $t_D=3.300$ sec και  $t_d=4.500$  sec.
- **Σενάριο 7.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός βαρέως φορτηγού (μέση τιμή) → HRR αιχμής 100 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=300$  sec,  $t_D=3.900$  sec και  $t_d=5.100$  sec.
- **Σενάριο 8.** Εμπλοκή στη φωτιά ενός βαρέως φορτηγού με καύσιμο φορτίο (περίπου 10 τόννοι) → HRR αιχμής 150 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=600$  sec,  $t_D=4.500$  sec και  $t_d=6.000$  sec.
- **Σενάριο 9.** Εμπλοκή στη φωτιά πολλαπλών βαρέων φορτηγών, (αντιστοιχεί και σε βυτιοφόρο με βενζίνη), → HRR αιχμής 200 MW, με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές:  $t_{max}=900$  sec,  $t_D=4.800$  sec και  $t_d=6.000$  sec.

Οι σχέσεις που διέπουν τα παραπάνω μεγέθη δίνονται στον επόμενο πίνακα, με τους σχετικούς συμβολισμούς:

$t_{max}$ : ο χρόνος που η HRR φτάνει την τιμή αιχμής (sec)

$t_D$ : ο χρόνος που η HRR εισέρχεται στη φάση εξασθένησης (sec)

$t_d$ : η συνολική χρονική διάρκεια της πυρκαγιάς (sec)

$a_{g,L}$ : γραμμικός συντελεστής αύξησης της HRR σε MW/sec

$a_{D,L}$ : γραμμικός συντελεστής εξασθένησης της HRR σε MW/sec

$E_{tot}$ : η συνολική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την πυρκαγιά (MJ)

HRR ως συνάρτηση του χρόνου $t$ (sec)	Χρονικά διαστήματα (sec)	Χρόνος για HRR αιχμής(sec)	Χρόνος έναρξης εξασθένησης $t_D$ και διάρκεια πυρκαγιάς $t_d$
$HRR=a_{g,L} * t$	$0 < t \leq t_{max}$	$t_{max} = Q_{max} / a_{g,L}$	$t_D = t_d - \{(2 / a_{D,L}) * ((a_{g,L} / 2) * t_{max}^2 + Q_{max} * (t_d - t_{max}) - E_{tot})\}$
$HRR=a_{g,L} * t_{max} = Q_{max}$	$t_{max} < t < t_D$		
$HRR = Q_{max} - a_{D,L} * (t - t_D)$	$t_D < t < t_d$		

Με βάση τις σχέσεις αυτές τα στοιχεία των παραπάνω σεναρίων διαμορφώνονται ως εξής:

$\alpha/\alpha$ Σεναρίου	$t_{max}$ (sec)	$t_D$ (sec)	$t_d$ (sec)	$a_{g,L}$ (MW/ sec)	$a_{D,L}$ (MW/ sec)	$Q_{max}$ (MW)	$E_{tot}$ (GJ)
1	180	180	2700	0,0278	0,002	5	7
2	180	1380	2700	0,0555	0,0076	10	20
3	180	1980	3000	0,1111	0,0196	20	52
4	300	300	3300	0,1	0,01	30	50
5	300	3900	4800	0,1667	0,0555	50	210
6	300	3300	4500	0,2333	0,0583	70	260
7	300	3900	5100	0,3333	0,0833	100	435
8	600	4500	6000	0,25	0,1	150	740
9	900	4800	6000	0,2222	0,1667	200	990

Τα παραπάνω σενάρια συνιστάται να χρησιμοποιούνται ως έχουν για τη διενέργεια των αναλύσεων. Στις περιπτώσεις που απαιτείται επαναπροσδιορισμός του σεναρίου η διάρκεια της πυρκαγιάς  $t_d$  θα καθορίζεται από την ποσότητα της προς καύση ύλης και την

προκύπτουσα ενέργεια  $E_{tot}$ . Η ποσότητα της καύσιμης ύλης θα εκτιμάται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση και θα λαμβάνεται υπόψη ο τύπος του οχήματος, το είδος του φορτίου και ο τρόπος φόρτωσης.

### **Δ.3. Παραγωγή τοξικών αερίων και καπνού κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.**

Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς στον περιορισμένο χώρο της σήραγγας ακολουθείται από τα φαινόμενα που περιγράφονται παρακάτω. Τα φαινόμενα αυτά είναι δυνατό να προκαλέσουν καταστάσεις που ενέχουν μεγάλη επικινδυνότητα για τη ζωή και την υγεία των ανθρώπων, τους οποίους επηρεάζουν. Για το λόγο αυτό η ποσοτική έκφραση αυτών των φαινομένων θα διευκολύνει τη διενέργεια των αναλύσεων και τη διερεύνηση των συνεπειών τους.

#### **Δ.3.1. Κατανάλωση $O_2$**

Η κατανάλωση  $O_2$  ανά μονάδα εκλυόμενης θερμότητας στηρίζεται στη γνωστή σχέση λόγου 13,1 MJ ανά Kgr καταναλωμένου  $O_2$ . Η ανάληψη του  $O_2$  περιορίζεται στο 45% του συνολικά διατιθέμενου  $O_2$  στον αέρα που προσάγεται από το σύστημα αερισμού.

#### **Δ.3.2. Παραγωγή $CO_2$**

Η παραγωγή του  $CO_2$  διέπεται από τη σχέση: 0,1 Kgr  $CO_2$  ανά MW.

#### **Δ.3.3. Παραγωγή CO**

Η παραγωγή του CO διέπεται από το λόγο των συγκεντρώσεων  $CO_2/CO$ , ο οποίος λαμβάνεται 25 για επαρκώς αεριζόμενες πυρκαγιές και 5 για υπο-αεριζόμενες.

#### **Δ.3.4. Παραγωγή άλλων τοξικών ουσιών**

Γενικά ως μετρητής της τοξικότητας του περιβάλλοντος της σήραγγας θεωρείται η συγκέντρωση του  $CO_2$ . Σε ορισμένες περιπτώσεις πάντως ειδικών φορτίων βαρέων φορτηγών οχημάτων, είναι δυνατόν να απαιτηθεί περαιτέρω θεώρηση και άλλων τοξικών παραγόντων. Τέτοια φορτία, που δεν θεωρούνται επικίνδυνα κατά την έννοια των προβλέψεων της συμφωνίας ADR, είναι συνήθως τα συνθετικά (βινυλοπολυχλωρίδια και ύλες για την παραγωγή υδροχλωρικού οξέος, πολυουρεθάνη και ύλες για παραγωγή υδροκυανικού οξέος και νιτρικών οξειδίων κ.λ.π.). Στις περιπτώσεις που στον καθορισμό των σεναρίων περιληφθεί και μεταφορά κάποιου αντίστοιχου φορτίου τότε στον καθορισμό της τοξικότητας θα συνεκτιμώνται και τα αντίστοιχα επιβλαβή προϊόντα της πυρκαγιάς όπως HCl, HCN,  $NO_x$ ,  $SO_2$ .

### **Δ.4. Μείωση της ορατότητας**

Η οπτική πυκνότητα (OD) σε ένα σημείο, υπολογίζεται από τη κατ' όγκο συγκέντρωση  $CO_2$  σύμφωνα με τη σχέση:

$OD = \alpha \cdot (T_0/T) \cdot [CO_2]$  όπου:

T: η θερμοκρασία σε Kelvin στο σημείο υπολογισμού

$T_0$ : 273 K

[  $CO_2$  ]: το ποσοστό ογκομετρικής συγκέντρωσης στο ίδιο σημείο

$\alpha$ : συντελεστής που λαμβάνει τις εξής τιμές, 1,3 για πυρκαγιά σε επιβατηγό, 0,5 για πυρκαγιά σε λεωφορείο και 0,8 για πυρκαγιά σε βαρύ φορτηγό.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Το παράρτημα αυτό περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία που επιτρέπουν την προσομοίωση της συμπεριφοράς των χρηστών της σήραγγας, τόσο εντός του οχήματος όσο και κατά τη διαδικασία της αυτό-διάσωσης.

#### Ε.1. Στοιχείοι οχημάτων

Η ανάγκη εκτίμησης του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται κάθε χρονική στιγμή μέσα στη σήραγγα και της επίδρασης της κυκλοφορίας στην κίνηση του καπνού, επιβάλλει την υιοθέτηση ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει τη δημιουργία στοιχίων οχημάτων. Το υιοθετούμενο μοντέλο αναγκαστικά περιλαμβάνει σημαντικές απλουστεύσεις, αφού ληφθούν υπόψη οι έμφυτες αβεβαιότητες του προβλήματος και τα διατιθέμενα δεδομένα. Ο στόχος είναι να προσομοιωθεί η ροή των οχημάτων μέσα στη σήραγγα ώστε να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός:

- ✓ Του αριθμού των οχημάτων και της κατανομής τους κατά μήκος της σήραγγας.
- ✓ Της συσσώρευσης των οχημάτων πίσω από τη θέση του κρίσιμου γεγονότος, δηλαδή τις ουρές των οχημάτων πίσω από αυτό ή σε άλλα ενδιάμεσα σημεία διακοπής της κυκλοφοριακής ροής.

#### Ε.1.1. Ομαλή κυκλοφοριακή ροή

Οι σχέσεις που παρατίθενται παρακάτω αναφέρονται σε συνθήκες ομαλής κυκλοφοριακής ροής, ομοιόμορφη αρχική κατανομή των οχημάτων μέσα στη σήραγγα (πριν την οποιαδήποτε διαταραχή της από το θεωρούμενο κρίσιμο γεγονός ή τα αίτια που μπορούν να εντοπιστούν στο δένδρο σφαλμάτων) και σημαντικό κυκλοφοριακό φόρτο ενώ υποθέτουν και συμμόρφωση των οδηγών με το όριο ταχύτητας και την τήρηση της απόστασης μεταξύ των οχημάτων. Οι παραπάνω προϋποθέσεις επιτρέπουν την υιοθέτηση απλών αναλογικών σχέσεων όπως αυτές που ακολουθούν. Για τη μαθηματική έκφραση αυτών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συμβολισμοί:

L το μήκος της σήραγγας σε m

V η ταχύτητα των οχημάτων σε m/sec

D η ροή των οχημάτων για μια συγκεκριμένη λωρίδα σε οχήματα/sec

N ο αριθμός των οχημάτων σε μια λωρίδα της σήραγγας

I η απόσταση μεταξύ των κινούμενων οχημάτων (από προφυλακτήρα σε προφυλακτήρα) σε m.

$I_{safe}$  η ασφαλής απόσταση μεταξύ των κινούμενων οχημάτων σε m και εξαρτάται από το μήκος του οχήματος και την ταχύτητα. Για τον υπολογισμό της λαμβάνεται η σχέση  $I_{safe}=8+0,2 V+0,003 V^2$  (η ταχύτητα στη σχέση αυτή δίνεται σε Km/h).

Υπό τις παραπάνω συνθήκες ισχύει:

$$I= V/ D$$

$$N= L/I$$

$$N=( L* D)/ V$$

$I < I_{safe}$  τότε η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι πολύ πιθανή.

Η μεθοδολογία ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Καθορισμός της ταχύτητας V
- Καθορισμός της  $I_{safe}$

- Επιλογή της I με βάση της συνθήκες ροής της κυκλοφορίας (ομαλή ή συμφόρηση)
- Υπολογισμός του N

### **E.1.2. Συσσώρευση οχημάτων (ουρές)**

Για την εξέταση του φαινομένου της συσσώρευσης των οχημάτων, γίνεται η υπόθεση ότι με την εκδήλωση της πυρκαγιάς στη χρονική στιγμή  $t=0$ , η κυκλοφορία ακινητοποιείται πλήρως στην εγγύς της θέσης εκδήλωσης περιοχή που βρίσκεται σε απόσταση  $d$  (m) από το στόμιο και η συσσώρευση των οχημάτων επεκτείνεται προς τα πίσω με ταχύτητα  $v$  (m/sec). Η ταχύτητα  $v$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v = D / (1/I(0) - D/V)$$

Όπου:  $I(0)$  η προτυποποιημένη απόσταση μεταξύ των ακινητοποιημένων οχημάτων και λαμβάνεται 10 m (μέσο μήκος οχήματος 8 m και κενό μεταξύ των οχημάτων 2 m).

$D$  η ροή των οχημάτων για μια συγκεκριμένη λωρίδα σε οχήματα/sec

$V$  η ταχύτητα των οχημάτων σε m/sec

Η συσσώρευση επεκτείνεται προς τα πίσω μέχρι το στόμιο της σήραγγας σε χρόνο  $T = d/v$ . Ο χρόνος αυτός συγκρίνεται με το χρόνο που απαιτείται για τη διακοπή της κυκλοφορίας και το κλείσιμο της σήραγγας.

Η ταχύτητα  $v$  με την οποία η συσσώρευση επεκτείνεται προς τα πίσω καθορίζει και την πιθανότητα καραμπόλας στο τέλος του στοίχου. Αν η ταχύτητα αυτή υπερβεί τα 15Km/h η πιθανότητα αυτή είναι μεγάλη και η αποτελεσματικότητα των περιπολικών πολύ μικρή.

### **E.1.3. Συνθήκες μη ομαλής κυκλοφοριακής ροής**

Όταν οι προϋποθέσεις που τίθενται στην παράγραφο E.1.1 δεν ικανοποιούνται η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι αμφισβητήσιμη. Στις περιπτώσεις χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου τα κυκλοφοριακά μεγέθη αντιστοιχούν σε συνθήκες μη ομοιόμορφης ροής επομένως δεν ισχύουν η υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής των οχημάτων μέσα στη σήραγγα και οι αναλογικές σχέσεις χρονοαποστάσεων και ρυθμού αφίξεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται κανονισμός για αυξημένες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων (με κύριο λόγο την αποφυγή διάδοσης τυχόν πυρκαγιάς και όχι την αποφυγή συγκρούσεων) γεγονός που σε συνδυασμό με το αναμενόμενο επίπεδο συμμόρφωσης των οδηγών έχει σημαντική επίδραση στα κυκλοφοριακά μεγέθη. Η ύπαρξη επίσης σταθμού διοδίων στην είσοδο της σήραγγας σε συνδυασμό με την περιορισμένη δυνατότητα επιτάχυνσης κάποιων οχημάτων, επηρεάζει καθοριστικά αυτά τα μεγέθη. Γενικότερα η ύπαρξη αργών οχημάτων επηρεάζει και αυτή τα κυκλοφοριακά μεγέθη. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν τα συστήματα ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής καθώς και τα τοπικά συστήματα ελέγχου και εξασφάλισης των απαιτούμενων αποστάσεων μεταξύ των οχημάτων (είτε στην είσοδο είτε μέσα στη σήραγγα).

Στις περιπτώσεις που παρουσιάζονται παρόμοιες με τις παραπάνω συνθήκες, η ανάλυση θα εφαρμόζει μερικές από τις διεθνώς εφαρμοζόμενες μεθόδους. Ενδεικτικά αναφέρονται η μεθοδολογία του "Highway Capacity Manual – Transportation Research Board", κατάλληλα τροποποιημένο μοντέλο LWR (Lighthill-Witham-Richards) με ανάλυση μεθόδου wave tracking.

## Ε.2. Εκκένωση χρηστών

Για την προσομοίωση των κινήσεων των ατόμων που καλούνται να εκκενώσουν τη σήραγγα, εγκαταλείποντας τα οχήματα στα οποία επέβαιναν και να βαδίζοντας προς τις εξόδους διαφυγής, υιοθετούνται κάποιες τυπικές τιμές για την εφαρμογή τους σε ένα απλοποιημένο μοντέλο.

- Χρόνος εντοπισμού του κρίσιμου γεγονότος και μεταβίβασης της πληροφορίας στους ανθρώπους που βρίσκονται στα οχήματα: 2-5 λεπτά για σήραγγες επιτηρούμενες από κέντρο ελέγχου.
- Χρόνος εκκένωσης του οχήματος (από τη στιγμή που το άτομο λαμβάνει την απόφαση να αφήσει το όχημα και να κινηθεί): 0,5 – 5 λεπτά, με τις μεγάλες τιμές να αντιστοιχούν σε λεωφορεία.
- Χρόνος συνειδητοποίησης της κατάστασης και λήψη απόφασης για εγκατάλειψη του οχήματος και διαφυγή: 2-10 λεπτά, ανάλογα με τον τρόπο μεταβίβασης της πληροφορίας από το κέντρο ελέγχου και την άμεση πρόσληψη της πραγματικής κατάστασης.
- Ταχύτητα βαδίσματος: 1 m/sec με καλή ορατότητα, 0,5 m/sec με μειωμένη ορατότητα, 0,3 m/sec χωρίς ορατότητα και για το 50% των διαφευγόντων (δεδομένου ότι το υπόλοιπο 50% κινείται προς λάθος κατεύθυνση). Η ταχύτητα μπορεί να αυξηθεί μέχρι 1,5 m/sec εφόσον υπάρχουν επαρκώς φωτιζόμενα σήματα και φωτισμός της οδού διαφυγής.
- Για όλα τα οχήματα, πλην λεωφορείων, ο μέσος αριθμός ατόμων ανά όχημα θα λαμβάνεται, εφόσον δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία, 1,5 άτομα/όχημα.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ.

### ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ

#### ΣΤ.1. Γενικά στοιχεία για τη δίαιτα του καπνού στις πυρκαγιές στις σήραγγες

Η ανάπτυξη και διασπορά του καπνού που προκύπτει από μια πυρκαγιά σε οδική σήραγγα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας (ιδιαίτερα η διατομή και η διαμήκης κλίση)
- Τη διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης στα στόμια της σήραγγας και τις λοιπές περιβαλλοντικές συνθήκες σε αυτά
- Την έκλυση θερμότητας της πυρκαγιάς
- Την πιθανή μείωση της τροφοδοσίας της πυρκαγιάς με οξυγόνο
- Τη μεταγωγή θερμότητας
- Το σύστημα αερισμού και την επιτελεσματικότητά του
- Τα χαρακτηριστικά και την θέση της πυρκαγιάς
- Την απώλεια θερμότητας στις παρειές της σήραγγας
- Την ώση στον αέρα που προκαλούν τα κινούμενα οχήματα
- Την παρουσία πιθανών εμποδίων στη διαδρομή του καπνού
- Τα αποτελέσματα της πιθανής επέμβασης των Υπηρεσιών Έκτακτων Καταστάσεων

Όταν μια πυρκαγιά εκδηλώνεται στο επίπεδο του δαπέδου μίας ευθύγραμμης και οριζόντιας σήραγγας και χωρίς την ενεργοποίηση συστήματος αερισμού, λόγω της θερμικής άνωσης ο καπνός κοντά στη θέση της πυρκαγιάς, ανέρχεται στην οροφή της σήραγγας μέσα στον περιβάλλοντα ψυχρότερο αέρα, αναπτύσσοντας μία λοφιοειδή διαμόρφωση (εικόνα 1 από M. Banjak, B. Nicolic: Numerical study of smoke flow control in tunnel fires usin ventilation systems 2008). Η λοφιοειδής αυτή διαμόρφωση όταν προσεγγίσει την οροφή σχηματίζει δύο συμμετρικά ρεύματα που ρέουν στις αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος της οροφής. Εφόσον οι θερμοδυναμικές και συννοριακές συνθήκες το επιτρέπουν, το στρώμα καπνού διατηρείται χωρίς να γεμίζει όλη τη διατομή.

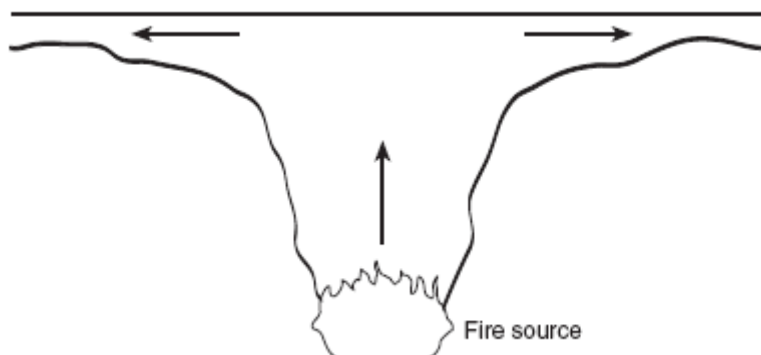


Εικόνα 1: Σχηματισμός καπνού σε σήραγγα από πυρκαγιά 15 KW

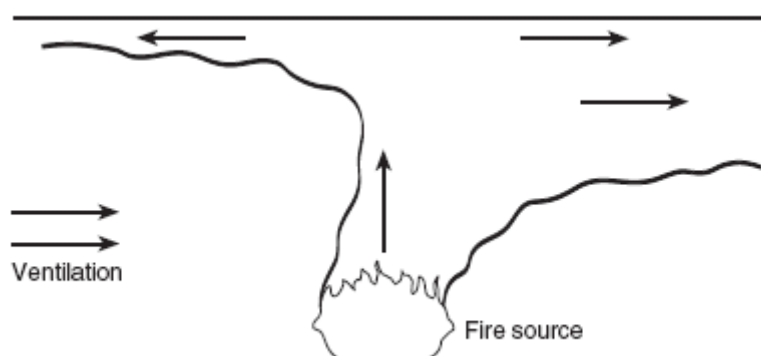
Με την ενεργοποίηση του συστήματος αερισμού και την παρουσία ενός ρεύματος αέρα η συμμετρία στο ανερχόμενο “λοφίο” και τους σχηματισμούς της οροφής παύει να υπάρχει. Το ρεύμα αέρα καμπυλώνει το “λοφίο” και το μήκος του στρώματος καπνού στο τμήματος οροφής που ρέει ενάντια στη ροή του αέρα, μειώνεται. Γενικά η παρουσία αυτού του στρώματος καπνού ανάντη της θέσης εκδήλωσης της πυρκαγιάς και αντίθετα προς τη ροή του ρεύματος αέρα που προσάγει στη θέση αυτή το σύστημα αερισμού, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διατήρηση της δυνατότητας εκκένωσης αλλά και την εξασφάλιση της

δυνατότητας στις Υψηρές Έκτακτων Καταστάσεων να προσεγγίσουν τη θέση της πυρκαγιάς. Το στρώμα αυτό καπνού καλείται "back layer" (αντιστρωμάτωση).

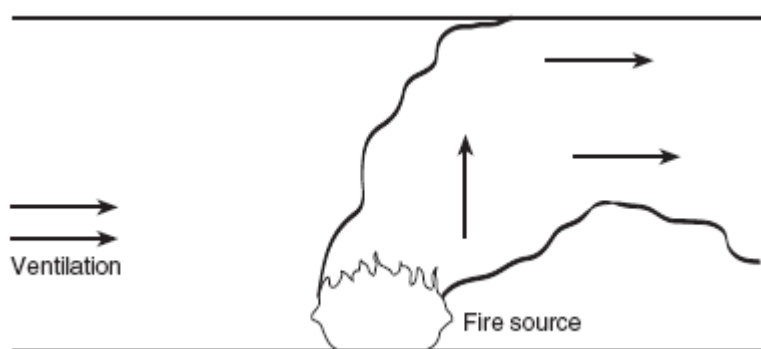
Για μια πυρκαγιά δεδομένης HRR το μήκος του back layer εξαρτάται από την ταχύτητα του προσαγόμενου αέρα. Αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται μείωση του μήκους. Ως κρίσιμη ταχύτητα αερισμού ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα αερισμού με την οποία επιτυγχάνεται η αποτροπή δημιουργίας back layer (θεωρείται ότι το μέτωπο του back layer παραμένει στη θέση εκδήλωσης της πυρκαγιάς). Στο σχήμα 1 δίνεται παραστατικά η παραπάνω αλληλουχία και οι προκύπτουσες έννοιες (από NFPA 502 2008)



Σχήμα 1 α: πυρκαγιά σε ευθύγραμμη και οριζόντια σήραγγα χωρίς μηχανικό αερισμό.



Σχήμα 1 β: πυρκαγιά σε ευθύγραμμη και οριζόντια σήραγγα με ανεπαρκή μηχανικό αερισμό



Σχήμα 1 γ: πυρκαγιά σε ευθύγραμμη και οριζόντια σήραγγα με επαρκή μηχανικό αερισμό για την αποτροπή δημιουργίας back layer

Με τα παραπάνω εκτεθέντα η μελέτη του συστήματος διαμήκους αερισμού σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης στοχεύει στην αποτροπή δημιουργίας back layer, ωθώντας τον καπνό προς μια κατεύθυνση και υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν άνθρωποι προς την ίδια αυτή κατεύθυνση.

Η ανωτέρω υπόθεση, έγκυρη για τις σήραγγες μονής κατεύθυνσης, παύει να ισχύει για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης ή για σήραγγες μονής κατεύθυνσης με παρουσία

κυκλοφοριακής συμφόρησης, όπου και στις δύο περιπτώσεις αναμένεται η παρουσία ανθρώπων και στις δύο πλευρές της πυρκαγιάς. Όσο το στρώμα καπνού παραμένει σε ικανό ύψος, υπάρχει η δυνατότητα διαφυγής των ανθρώπων και από την πλευρά αυτή. Όμως με την παρουσία υψηλής ταχύτητας αέρα το στρώμα καπνού στην οροφή της σήραγγας μπορεί να διασπαστεί και να κατακλύσει το σύνολο της διατομής. Στην περίπτωση αυτή με σύστημα διαμήκους αερισμού ο έλεγχος του καπνού επιτυγχάνεται με σταθεροποίηση της ροής αέρα σε χαμηλές ταχύτητες που δεν θα διασπάσουν τη στρωματοποίησή του.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε διαμήκη συστήματα αερισμού. Σε περιπτώσεις συστημάτων αερισμού με απαγωγή του καπνού με διακριτό αεραγωγό (εγκάρσιος αερισμός) θα πρέπει να διασφαλίζεται, υπό όλες τις συνθήκες, ότι ο καπνός θα οδηγείται στο σημείο απαγωγής και δεν θα το προσπερνά κατακλύζοντας τη σήραγγα.

## **ΣΤ.2. Η φυσική διάσταση των φαινομένων της πυρκαγιάς και οι μέθοδοι προσέγγισής τους**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ανάπτυξη και διασπορά του καπνού, αλλά και γενικά το φαινόμενο της πυρκαγιάς, εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό σημαντικών παραμέτρων. Η συμβολή κάθε μιας από αυτές τις παραμέτρους είναι αρκετά πολύπλοκη για να προσεγγιστεί με απλές αναλυτικές σχέσεις, η δε αλληλεπίδραση όλων αυτών για να διερευνηθεί με επάρκεια απαιτεί τη χρήση ισχυρών υπολογιστικών εργαλείων, όπως οι αριθμητικές αναλύσεις.

Τα φαινόμενα αυτά διέπονται από τις παρακάτω φυσικές εξισώσεις

- Εξισώσεις ισοστάθμισης μάζας (mass balance equations)
- Εξισώσεις ισοστάθμισης θερμότητας (heat balance equations)
- Εξισώσεις του ποσού ισοστάθμισης ορμής (αριθμητική ή διανυσματική ανάλογα με τον αριθμό των διαστάσεων) (the amount of momentum balance equations)
- Εξισώσεις μεταφοράς των ρυπαντών (pollutant transport equations)

Λόγω υψηλής πολυπλοκότητας και της αλληλεπίδρασης πολλών παραμέτρων είναι αναμενόμενο ότι ένας βαθμός απλουστεύσεων θα ενυπάρχει στη διαδικασία προσομοίωσης αυτών των φαινομένων. Η προσέγγιση των φαινομένων γίνεται με διάφορες μεθόδους. Η παράθεσή τους γίνεται με βαθμό μειούμενων απλουστεύσεων και παραδοχών και αυξανόμενο βαθμό πολυπλοκότητας και υπολογιστικών απαιτήσεων.

- ✓ Απλές εμπειρικές μέθοδοι και τύποι
- ✓ Φυσικά προσομοιώματα κλίμακας
- ✓ Προσομοιώματα ζωνών
- ✓ 1D προσομοιώσεις,
- ✓ 3D προσομοιώσεις, που κυρίως εστιάζονται σε εφαρμογή CFD προσομοιωμάτων

## **ΣΤ.3 Απλές μέθοδοι και τύποι για υπολογισμούς διαφόρων μεγεθών**

Πρόκειται για σχετικά απλές αλγεβρικές εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση διαφόρων μεγεθών, όπως η κρίσιμη ταχύτητα, η θερμοκρασία, η ορατότητα. Γενικά πρόκειται εμπειρικά προσομοιώματα που έχουν αναπτυχθεί από πειράματα και βασίζονται σε σχετικά απλές γεωμετρικές διαμορφώσεις. Η προβολή των προβλέψεών τους σε άλλες γεωμετρικές διαρρυθμίσεις και διαφορετικές πυρκαγιές από αυτές των πειραμάτων, πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς μπορεί να δώσει εντελώς αποκλίνοντα αποτελέσματα και να αποκρύψει σημαντικά θέματα και πτυχές του προβλήματος.

Η κρίσιμη ταχύτητα προσδιορίζεται με την ταυτόχρονη επαναληπτική επίλυση των παρακάτω συζευγμένων εξισώσεων, όπως έχουν προτείνει οι Danziger and Kennedy:

$$V_c = K_1 K_g \left( \frac{gHQ}{\rho C_p A T_f} \right)^{1/3}$$

$$T_f = \left( \frac{Q}{\rho C_p A V_c} \right) + T$$

όπου:

$V_c$ : κρίσιμη ταχύτητα (m/sec)

$K_1$ : 0,606 (παράγοντας αριθμού Froude) ( $Fr^{-1/3}$ )

$K_g$ : παράγοντας κλίσης (όπως στο σχήμα 2)

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας ( $m/sec^2$ )

$H$ : ύψος της σήραγγας ή του αγωγού στη θέση της πυρκαγιάς (m)

$Q$ : θερμότητα της πυρκαγιάς που προστίθεται απευθείας στον αέρα στη θέση της πυρκαγιάς – θερμότητα μεταγωγής (MW)

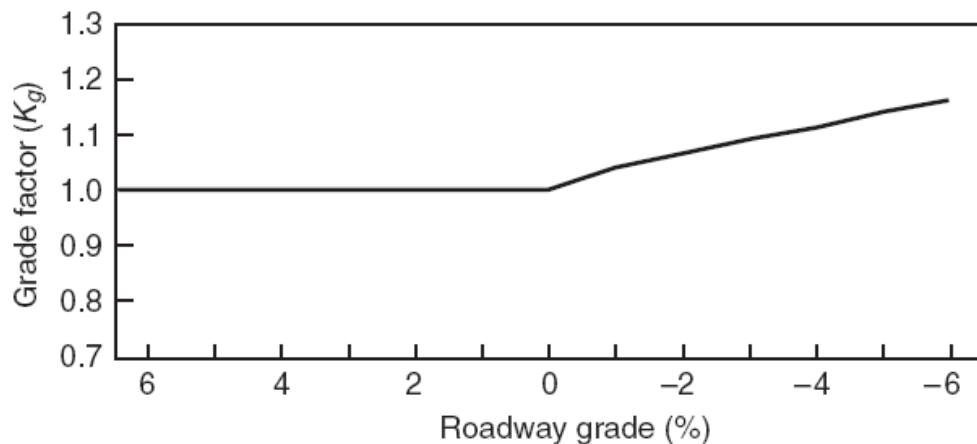
$\rho$ : μέση πυκνότητα του προσαγόμενου αέρα ( $Kgr/m^3$ )

$C_p$ : ειδική θερμότητα του αέρα ( $KJ/Kgr K$ )

$A$ : επιφάνεια κάθετα στη ροή ( $m^2$ )

$T_f$ : μέση θερμοκρασία των αερίων στη θέση της πυρκαγιάς (K)

$T$ : θερμοκρασία προσαγόμενου αέρα (K)



Σχήμα 2: Συσχέτιση  $K_g$  με την κατά μήκος κλίση της σήραγγας

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μέσα στη σήραγγα και στις διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος (όπως π.χ. οι διάδρομοι διαφυγής) γίνεται καταρχήν η υπόθεση ότι η θερμική ενέργεια της πυρκαγιάς  $Q_{tot}$  εκλύεται με άμεση ακτινοβολία στα τοιχώματα της σήραγγας και με μεταγωγή στον αέρα του εσωτερικού της. Η θερμότητα μεταγωγής  $Q$  λαμβάνεται  $Q=(2/3)* Q_{tot}$ . Η μέση θερμοκρασία του αέρα αμέσως μπροστά (κατά τη διεύθυνση του διαμήκους αερισμού) από την πυρκαγιά  $T_{max}$  μπορεί να υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση για την  $T_f$  θέτοντας αντί για  $V_c$  τη  $V_0$ . Η διαμήκης εξέλιξη της θερμοκρασίας μπροστά από την πυρκαγιά μπορεί να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T(x) = T_{\infty} + (T_{max} - T_{\infty}) e^{-x/x_e}$$

$$x_e = (C_p \rho V_0 / 4 h_{app}) D_H$$

όπου:

$x$ : η καμπυλόγραμμη (curvilinear) τετμημένη από τη θέση της πυρκαγιάς (m)

$D_H$ : η υδραυλική διάμετρος της σήραγγας (m)

$T_\infty$ : η θερμοκρασία της περιβάλλουσας βραχομάζας σε κάποια απόσταση από τις παρειές της σήραγγας (K)

$h_{app}$ : συντελεστής φαινόμενης ανταλλαγής θερμότητας ( $MW / m^2 K$ )

Ο συντελεστής φαινόμενης ανταλλαγής θερμότητας περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμότητας με μεταγωγή και ακτινοβολία και την προκύπτουσα αύξηση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων σαν συνάρτηση του χρόνου από την έναρξη της πυρκαγιάς και για διάφορες ταχύτητες του ρεύματος αέρα. Ενδεικτικά παρακάτω παρατίθεται πίνακας με κάποιες τιμές του συντελεστή αυτού.

Ταχύτητα ρεύματος αέρα	15 λεπτά	60 λεπτά	120 λεπτά
3 m/sec	10 W / m <sup>2</sup> K	7 W / m <sup>2</sup> K	6 W / m <sup>2</sup> K
4 m/sec	14 W / m <sup>2</sup> K	10 W / m <sup>2</sup> K	7 W / m <sup>2</sup> K

Σημείωση: Εφιστάται η προσοχή στη χρήση των κατάλληλων μονάδων, συμβατών με το κάθε χρησιμοποιούμενο σύστημα.

#### ΣΤ.4. Φυσικά προσομοιώματα

Η αναφορά τους εδώ γίνεται για λόγους πληρότητας, καθώς η εφαρμογή τους για την επίλυση των θεμάτων του παρόντος παραρτήματος είναι περιορισμένη. Τα κύρια προβλήματα και περιορισμοί τους αφορούν:

- το κόστος υλοποίησης
- τον αριθμό των νόμων ομοιότητας (similarity laws) και τον συσχετισμό τους με τα τεχνικά συμπεράσματα
- η αναπαράσταση, υπό κλίμακα, της HRR (heat release rate) παραμένει δυσεπίλυτο πρόβλημα με συνέπεια η ερμηνεία των αποτελεσμάτων να παρουσιάζει μη ρεαλιστικές καταστάσεις κατά την προβολή τους στην πλήρη κλίμακα

#### ΣΤ.5. Προσομοιώματα ζωνών

Η χρήση των προσομοιωμάτων ζωνών έχει μεγάλη εφαρμογή σε κτίρια, όπου ένα δωμάτιο ή ένας διάδρομος προσομοιώνεται σαν ομοιογενής ζώνη με ένα στρώμα καπνού να επικάθεται ενός στρώματος καθαρού αέρα. Στο σύνολο κάθε θεωρούμενης ζώνης κάθε στρώμα έχει τα δικά του σταθερά χαρακτηριστικά. Οι ανταλλαγές που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των στρωμάτων και των γειτονικών ζωνών διέπονται από εμπειρικές σχέσεις παρόμοιες με αυτές της παρ. ΣΤ.3.

Η χρήση τους είναι περιορισμένη σε αντίστοιχα προβλήματα σήραγγων καθώς δεν είναι σχεδιασμένα να προσεγγίσουν τα θέματα της εξέλιξης του καπνού (ειδικότερα της λοφιοειδούς διαμόρφωσης) σε ένα μεγάλο χώρο μίας ουσιαστικά ζώνης και το κυριότερο να αποτιμήσουν την επίδραση της ροής του ρεύματος αέρα που κρίνεται καθοριστική.

Η απευθείας εφαρμογή τέτοιων προσομοιωμάτων χωρίς προσαρμογές και βαθμονομήσεις συνιστάται να αποφεύγεται για τα αντίστοιχα προβλήματα στις σήραγγες.

#### ΣΤ.6. Προσομοιώματα 1D

Τα 1D προσομοιώματα είναι μια ομάδα αριθμητικών προσομοιωμάτων με προσανατολισμό τους μεταβατικούς υπολογισμούς δικτύων (transient calculations of

networks). Η επίλυση των βασικών εξισώσεων των θερμοδυναμικών θεωρήσεων της ροής γίνεται σε μια διάσταση (διαμήκης διάσταση της σήραγγας). Αυτό σημαίνει ότι οι φυσικές παράμετροι (ταχύτητα, θερμοκρασία, πίεση και συγκέντρωση ουσιών) είναι ομοιόμορφες και ομογενείς σε κάθε θεωρούμενη διατομή.

Τα εν χρήσει 1D προσομοιώματα διατίθενται σε διάφορα επίπεδα απλοποιήσεων και πολυπλοκότητας. Τα μεταβατικά και θερμικά φαινόμενα λαμβάνονται υπόψη σε διαφορετικό βαθμό και με αποκλίνουσες δυνατότητες. Μια αρχική ομαδοποίηση αυτών περιλαμβάνει: μόνιμα ισοθερμικά, μεταβατικά ισοθερμικά και μεταβατικά ανισοθερμικά προσομοιώματα. Προτείνεται η χρήση μεταβατικών ανισοθερμικών προσομοιωμάτων, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύουν το μικρότερο βαθμό απλοποιήσεων.

Για τη διαδικασία προσομοίωσης η σήραγγα ή το υπόγειο οδικό σύστημα διαιρείται σε ένα κύκλωμα μονο- διάστατων διαδρομών αερισμού. Επιλύοντας τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας σε κάθε κόμβο, το προσομοίωμα προβλέπει τις χρονικά συνηρητημένες κινήσεις του αέρα και του καπνού στο κύκλωμα. Το πλεονέκτημα των προσομοιωμάτων αυτών έγκειται στην ικανότητά τους να προβλέπουν την κίνηση του αέρα στο όλο κύκλωμα σε σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο και κόστος. Επιπλέον μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση του μηχανισμού της κίνησης του αέρα της σήραγγας, όχι μόνο για συστήματα διαμήκους αλλά και για συστήματα εγκάρσιου αερισμού, αλλά και να εκτιμήσουν επαρκώς τον χρόνο απόκρισης του συστήματος αερισμού.

Στα μειονεκτήματα θα πρέπει να τονιστεί η αδυναμία διαχείρισης του φαινομένου της στρωματοποίησης του καπνού και της διάσπασης (αποστρωματοποίηση) αυτής της δομής. Εξαιτίας της γενικής θεώρησης ομοιόμορφων και ομοιογενών παραμέτρων σε κάθε διατομή, οι τιμές που λαμβάνονται από την ανάλυση πρέπει να χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή. Π.χ. η θερμοκρασία που προκύπτει για μια διατομή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της διατήρησης της δυνατότητας διαφυγής, επομένως θα πρέπει να δώσει τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάλυση αυτή, με την κατανομή της θερμοκρασίας από την οροφή μέχρι το δάπεδο. Επιπλέον για ταχύτητες αέρα μικρότερες από την κρίσιμη ταχύτητα τα αποτελέσματα γενικά δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Η μελέτη των φαινομένων στην περιοχή της πυρκαγιάς δεν μπορεί να προσεγγιστεί με 1D προσομοιώματα, δεδομένου ότι απαιτείται η θεώρηση των τριδιάστατων φαινομένων που κυριαρχούν. Πάντως μακριά από τη θέση εκδήλωσης της πυρκαγιάς οι παραδοχές των 1D προσομοιωμάτων μπορούν να θεωρηθούν σε σημαντικό βαθμό έγκυρες και οι αναλύσεις τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απόληψη των συνοριακών συνθηκών για την ανάλυση των CFD προσομοιωμάτων.

## **ΣΤ.7. Προσομοιώματα 3D**

Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν θέματα μηχανικής ρευστών σε τριδιάστατο περιβάλλον αναφέρονται ως CFD (Υπολογιστικά Ρευστοδυναμικά προσομοιώματα).

Τα CFD προσομοιώματα είναι υπολογιστικά εργαλεία υψηλής υπολογιστικής ισχύος και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και πρόβλεψη της ροής ρευστών. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική διαιρεί τον όγκο της σήραγγας σε μικρά κελιά μέσα στα οποία επιλύονται οι βασικές εξισώσεις θερμοδυναμικής των ρευστών χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είτε συνηθέστερα τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η τεχνική μπορεί να δώσει μια προσεγγιστική, χρονικά συνηρητημένη, τριδιάστατη επίλυση των έντονα συζευγμένων διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την ροή των ρευστών.

Το κύριο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αναπαράστασης των φαινομένων της πυρκαγιάς σε πολύπλοκες γεωμετρικές διαμορφώσεις και η επίλυση των πολύπλοκων προβλημάτων ροής με βάση μια πιο θεμελιώδη προσομοίωση των εμπλεκόμενων φυσικών νόμων.

Πρέπει πάντως να γίνει κατανοητό ότι η ανάλυση με προσομοίωμα CFD δεν οδηγεί σε ακριβή επίλυση. Οι σημαντικές υποθέσεις και προσεγγίσεις που υπεισέρχονται τόσο στη διαδικασία δημιουργίας του προσομοιώματος όσο και στην κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή του, φαίνεται ότι επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Επιπλέον πολλές φορές γίνονται οι αναπόφευκτοι συμβιβασμοί για να προκύψει ανεκτός υπολογιστικός χρόνος. Για την υπερκέραση αυτών των προβλημάτων απαιτείται η πλήρης κατανόηση του χρησιμοποιούμενου κώδικα (ιδιαίτερα η επισήμανση των πιθανών «μαύρων κουτιών») και η εξοικείωση του αναλυτή με τα προβλήματα που ανακύπτουν από τις πυρκαγιές σε σήραγγες.

Η εφαρμογή ενός προσομοιώματος CFD για τη διενέργεια μιας ανάλυσης ροής καπνού σε σήραγγα, περιλαμβάνει μια αλληλουχία βημάτων που ο αναλυτής πρέπει να διανύσει:

- ✓ Καθορισμός της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πεδίου του σεναρίου που θα διερευνηθεί. Υπολογιστικό πεδίο νοείται η περιοχή που θα προσομοιωθεί και θα διενεργηθεί η ανάλυση. Για τους σκοπούς του παρόντος το ελάχιστο μήκος της σήραγγας που θα θεωρείται στο υπολογιστικό πεδίο θα είναι 1.000 μέτρα
- ✓ Επιλογή των φυσικών υπο-προσομοιωμάτων. Οι χρησιμοποιούμενες εξισώσεις ροής ρευστών σπάνια είναι οι ακριβείς εξισώσεις Navier-Stokes. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες απλοποιημένες προσομοιώσεις αποτελούνται από ένα σύνολο προσεγγιστικών εξισώσεων που προκύπτουν από εμπειρική και φυσική προσέγγιση και περιλαμβάνουν προσομοιώματα αντινοβολίας, καύσης και τυρβώδους ροής. Οι φυσικές προσομοιώσεις απαιτούν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο, συνεπώς η εφαρμογή τους θα πρέπει να περιορίζεται στο απολύτως απαραίτητο.
- ✓ Καθορισμός των συνοριακών συνθηκών. Κάθε μηχανισμός που βρίσκεται έξω από το υπολογιστικό πεδίο και μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά του καπνού, πρέπει να αντιπροσωπεύεται κατάλληλα.
- ✓ Διακριτοποίηση των μαθηματικών εξισώσεων, δηλαδή, δημιουργία ενός δικτύου που υποδιαιρεί το χώρο σε μικρούς όγκους, ορισμός των χρονικών βημάτων και επιλογή των αριθμητικών υπο-προσομοιωμάτων.
- ✓ Επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων.
- ✓ Ανάλυση της επίλυσης που έδωσαν τα αποτελέσματα.

Από την παραπάνω αλληλουχία και το περιεχόμενο των βημάτων της ανάλυσης προκύπτουν οι αβεβαιότητες που μπορούν να αναμένονται σε κάθε τέτοια ανάλυση και που οφείλονται:

- Στο βαθμό λεπτομέρειας περιγραφής της γεωμετρίας
- Την ανάλυση του δικτύου
- Την επιλογή των φυσικών υπο-προσομοιωμάτων
- Την επιλογή της χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης
- Τον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών
- Την επιλογή των κριτηρίων σύγκλησης
- Σφάλματα του αναλυτή
- Επιφανειακή, επιπόλαια και χωρίς εμπειρία ανάλυση των αποτελεσμάτων
- Λάθη του κώδικα, ανεπιτυχής επιλογή του
- Εμπειρία του αναλυτή

### **ΣΤ.7.1. Τα κρίσιμα σημεία που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των CFD αναλύσεων για την κίνηση του καπνού στις σήραγγες.**

Παρακάτω παρατίθενται τα πλέον κρίσιμα σημεία που επηρεάζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων των CFD αναλύσεων για την κίνηση του καπνού στις σήραγγες:

- Ο διενεργών την ανάλυση πρέπει να διαθέτει βαθιά γνώση τόσο των αρχών της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής όσο της δυναμικής της κίνησης του καπνού και της πυρκαγιάς. Γενικά απαιτείται μια μεταπτυχιακή εξειδίκευση στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική σαν ελάχιστο προσόν.
- Ο κώδικας CFD πρέπει να είναι επιβεβαιωμένος και διακριβωμένος για εφαρμογές σε κίνηση καπνού και πυρκαγιά
- Το υπολογιστικό πεδίο θα πρέπει να είναι τριδιάστατο και το ελάχιστο μήκος της ανάλυσης 1.000 μέτρα.
- Τα όρια του υπολογιστικού πεδίου θα επιλεγούν με τρόπο που κάποιο ανεπιθύμητο γεγονός δεν θα επηρεάσει τα αποτελέσματα, π.χ. θα διερευνάται ο αποκλεισμός της πιθανότητας επανεισόδου του καπνού από το στόμιο στο εσωτερικό της σήραγγας.
- Το επίπεδο της γεωμετρικής ανάλυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει μέσα στο υπολογιστικό πεδίο κάθε αναμενόμενο εμπόδιο, κυρίως τα αναμενόμενα οχήματα.
- Η διακριτοποίηση του καννάβου θα πρέπει να στηρίζεται σε εμπειρία από προηγούμενες επιτυχείς εφαρμογές
- Η πηγή της πυρκαγιάς θα πρέπει να διαιρείται σε ένα ελάχιστο αριθμό στοιχείων του καννάβου και όχι σαν τυπικό στοιχείο
- Στους μη-δομημένους καννάβους, σε επαφή με καμπύλες επιφάνειες της σήραγγας, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται καμπυλόγραμμα στοιχεία.
- Στους δομημένους καννάβους θα προβλέπεται σημαντικός αριθμός στρωμάτων στοιχείων κατά την έννοια της κατακόρυφης διεύθυνσης και ειδικότερα κοντά στην οροφή, για την προσομοίωση της στρωματοποίησης.
- Τα στοιχεία του καννάβου δεν θα πρέπει να είναι πολύ στρεβλά (ο λόγος των διαστάσεων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 50). Κοντά στην πηγή της πυρκαγιάς ο λόγος αυτός θα πρέπει να είναι της τάξης του 1.
- Συνιστάται διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας για τη διερεύνηση της επιροής του καννάβου στα αποτελέσματα.
- Για την προσομοίωση του φαινομένου της άνωσης και της πλευστότητας συνιστάται η αποφυγή χρήσης της προσεγγιστικής λύσης Boussinesq, εκτός και αν αποδεικνύεται ότι οι επιβαλλόμενες απλουστεύσεις έχουν αμελητέα επιρροή.
- Όπου ως συνήθως, χρησιμοποιούνται τα προσομοιώματα κ-ε τυρβώδους ροής, για τα αποτελέσματα της άνωσης θα εισάγονται οι αναγκαίες τροποποιήσεις τόσο στις εξισώσεις κ, όσο και στις ε.
- Δεν συνιστάται η χρήση απλούστερων προσομοιωμάτων, τα οποία επιλύουν μια ή καμία εξίσωση μεταφοράς για να χαρακτηρίσουν την τυρβώδη ροή.
- Όπου θεωρείται ότι η ανάπτυξη της “λοβιοειδούς” διαμόρφωσης του καπνού επηρεάζεται από τα τοιχώματα της σήραγγας και την οροφή της σήραγγας ή οι τοπικές συνθήκες ροής δεν μπορούν να καθοριστούν επαρκώς, συνιστάται η χρήση προσομοιώματος καύσης αντί για ογκομετρικό προσομοίωμα πηγής θερμότητας.
- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία της πυρκαγιάς με κατάλληλη τεχνική προσομοίωσης.
- Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην εξειδίκευση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την πυρκαγιά. Συνιστάται η εξέταση των τιμών θερμοκρασίας που προκύπτουν με τη σχέση της παρ.ΣΤ.3 ή άλλες διεθνώς αποδεκτές σχέσεις.
- Συνιστάται η απόληψη συνοριακών συνθηκών με χρήση μεθόδων και προσομοιωμάτων 1D.
- Στην περίπτωση που τα στόμια της σήραγγας δεν περιλαμβάνονται στο υπολογιστικό πεδίο, τα πιθανά φαινόμενα σε αυτά που μπορούν να επηρεάσουν τη ροή, θα λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση των συνοριακών συνθηκών.
- Οι συνοριακές συνθήκες πίεσεως που επιβάλλονται στα σύνορα θα πρέπει να εξετάζονται με προσοχή, ιδιαίτερα αν βρίσκονται κοντά στην πηγή της πυρκαγιάς.
- Θα εξετάζονται οι απώλειες θερμότητας στα τοιχώματα της σήραγγας. Οι προσεγγίσεις άλλων πεδίων που θεωρούν μηδενική απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα, δηλαδή



αδιαβατικές συνθήκες, δεν θα εφαρμόζεται στις σήραγγες, δεδομένου ότι ο καπνός βρίσκεται σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα.

## **ΣΤ.7.2. Επιλογή του επιπέδου προσομοίωσης**

Όπως αναφέρθηκε, οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης και τα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα της κίνησης του καπνού, χαρακτηρίζονται από διαφορετικό επίπεδο πολυπλοκότητας. Για τις ανάγκες του παρόντος διακρίνονται τρία επίπεδα:

- Επίπεδο 1: ποιοτική ανάλυση, με χρήση εξισώσεων, γραφημάτων ή νομογραμμάτων.
- Επίπεδο 2: ποιοτική ανάλυση +1D προσομοίωμα
- Επίπεδο 3: ποιοτική ανάλυση +1D προσομοίωμα +3D προσομοίωμα

Οι παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται κατά την επιλογή του κατάλληλου επιπέδου είναι:

- ✓ Η επιλεγμένη στρατηγική για την απαγωγή του καπνού
- ✓ Το σχέδιο εκκένωσης των χρηστών
- ✓ Κατά πόσο το εξεταζόμενο σενάριο πυρκαγιάς καλύπτεται από τη μελέτη της σήραγγας
- ✓ Τα πορίσματα που αναμένονται από την εκπόνηση της ανάλυσης επικινδυνότητας

Η διατομή της σήραγγας είναι ο παράγοντας που εξετάζεται καταρχήν για την επιλογή του κατάλληλου επιπέδου:

- ✓ Για σήραγγες με τρεις ή λιγότερες λωρίδες και με το σύννηθες ύψος της διατομής (ύψος χώρου ελεύθερου εμποδίων περίπου 5 μέτρα), θα επιλέγεται επίπεδο 2.
- ✓ Για σήραγγες, με ύψος οροφής 7 έως 10 μέτρα, ή με περισσότερες από τρεις λωρίδες, ή για περιπτώσεις που υπάρχουν σύνθετες υπόγειες διασταυρώσεις, κόμβοι, συμβολές ή έξοδοι, θα επιλέγεται επίπεδο 3.

Τα παραπάνω αποτελούν καταρχήν συστάσεις για τις περιπτώσεις που απαιτείται η εφαρμογή επιπέδου 3 και δεν απαγορεύουν τη χρήση CFD προσομοιωμάτων και σε σχετικά απλές περιπτώσεις. Θα πρέπει πάντως να τονιστεί ότι η χρήση ενός προσομοιώματος CFD για τις ανάγκες μιας σεναριακής ανάλυσης, συνιστάται να συνοδεύεται από προκαταρκτικό υπολογισμό 1D. Ο υπολογισμός 1D, βοηθά στον καθορισμό των συννοριακών συνθηκών και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της CFD ανάλυσης. Στο περιεχόμενο της σεναριακής ανάλυσης επικινδυνότητας θα περιλαμβάνεται ένα παράρτημα, που θα επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού αξιοπιστίας και ρεαλισμού των παραδοχών και στοιχείων της CFD ανάλυσης, στα πρότυπα της επόμενης παραγράφου ΣΤ.7.3.

## **ΣΤ.7.3. Τυπικό περίγραμμα των παραδοχών και στοιχείων της CFD ανάλυσης που θα περιλαμβάνονται σε ειδικό παράρτημα**

Οι πληροφορίες που θα περιλαμβάνει το υπόψη παράρτημα θα είναι λεπτομερείς τουλάχιστον για ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια. Το σενάριο αυτό θα επιλέγεται με τη δυνατότητα να μπορεί να αντιστοιχηθεί με καταγραφές της βιβλιογραφίας ώστε να εκτιμηθεί η ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης.

Το παράρτημα ενδεικτικά θα περιέχει τα στοιχεία που παρατίθενται παρακάτω.

**A.** Θα παρατίθενται όλες οι πληροφορίες που αναφέρονται στα στοιχεία της παρ. ΣΤ.7.1

**B.** Όλα τα επί πλέον απαιτούμενα στοιχεία επί των αρχών της φυσικής προσομοίωσης

- Υποθέσεις για τους προσομοιούμενους τύπους ροής
- Μεταβλητές που έχουν υιοθετηθεί και χρησιμοποιηθεί

- Οι εξισώσεις που έχουν επιλυθεί
  - Λεπτομέρειες για τα προσομοιώματα αντινοβολίας, καύσης και τυρβώδους ροής
- Γ. Τις αρχές της επίλυσης, ειδικότερα την αριθμητική επίλυση στο χώρο και το χρόνο, τον αλγόριθμο επίλυσης, τη χρονική διακριτοποίηση και τα κριτήρια σύγκλισης (για να επιβεβαιωθεί ότι έχουν υλοποιηθεί οι απαιτούμενες επαναλήψεις).
- Δ. Επιλογή, περιγραφή, επεξήγηση και αιτιολόγηση των υποθέσεων. Αφορά όλες τις υποθέσεις που γίνονται για τα στοιχεία της παρ. ΣΤ.7.1 και όσες άλλες υποθέσεις πιθανώς εισάγονται στην ανάλυση.
- Ε. Ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών που χρησιμοποιούνται για να εξεταστούν οι κίνδυνοι:
- ✓ Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της στρωματοποίησης του καπνού.
  - ✓ Τη μέθοδο για τον υπολογισμό της ορατότητας.
  - ✓ Το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμότητας μεταγωγής και θερμότητας ακτινοβολίας
  - ✓ Λεπτομέρειες για τους τύπους ροής (κατεύθυνση, μεταβλητές τυρβώδους ροής) επιπλέον των χαρακτηριστικών θερμοκρασίας – συγκέντρωσης σε διακριτές χρονικές στιγμές
  - ✓ Η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων σε σημαντικές θέσεις της σήραγγας (π.χ. έξοδοι διαφυγής)
  - ✓ Η έκταση της περιοχής καύσης όταν χρησιμοποιείται αντίστοιχο προσομοίωμα
  - ✓ Κάθε άλλο στοιχείο που κρίνεται απαραίτητο για τη διαμόρφωση της τελικής άποψης.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ. ΟΡΙΣΜΟΙ

- Όχημα και σχετιζόμενοι ορισμοί : θεωρούνται οι ορισμοί του Ν. 2696/1999 (ΦΕΚ 57/Α/23-3-1999) Κύρωση του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας.
- Επικίνδυνα εμπορεύματα: οι ύλες και τα αντικείμενα των οποίων η οδική μεταφορά απαγορεύεται ή επιτρέπεται μόνο υπό ορισμένους όρους, βάσει των παραρτημάτων Α και Β του Π.Δ. 104/1999 (ΦΕΚ 113 Α) όπως αυτά τροποποιήθηκαν, συμπληρώθηκαν και ισχύουν κάθε φορά.
- Σχέδιο Αντιμετώπισης Έκτακτων Καταστάσεων: το συγκροτημένο σύνολο προκαθορισμένων διαδικασιών, ενεργειών και δραστηριοτήτων για την αποτροπή ανάπτυξης συνθηκών έκτακτης κατάστασης, την έγκαιρη αναγνώρισή τους εφόσον εκδηλωθούν, την αντιμετώπισή τους με στόχο την εξάλειψη ή ελαχιστοποίηση των επιδράσεων σε ανθρώπινες ζωές, υλικές απώλειες, στο φυσικό και δομημένο περιβάλλον.
- Κίνδυνος: ένα πιθανό γεγονός ή συνθήκη ή κατάσταση που μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στην ανθρώπινη ζωή ή υγεία, το περιβάλλον, τις ιδιοκτησίες, την οικονομία και την ζωή του έργου ή σε συνδυασμό αυτών.
- Επικινδυνότητα: η δυνατότητα υλοποίησης ανεπιθύμητων αρνητικών συνεπειών στο μέλλον. Η επικινδυνότητα από ένα κίνδυνο εκφράζεται σε μαθηματικούς όρους σαν το γινόμενο της πιθανότητας να συμβεί ο κίνδυνος και των συνεπειών αν αυτός συμβεί.
- Ανάλυση επικινδυνότητας: μια συστηματικά δομημένη διαδικασία που καθορίζει την πιθανότητα να συμβεί ένας κίνδυνος και το μέγεθος των αναμενόμενων συνεπειών από μία δραστηριότητα, ενώ περιλαμβάνει επίσης τον καθορισμό των κινδύνων και την περιγραφή της επικινδυνότητας. Γενικότερα θα θεωρήσουμε ότι απαντά στο ερώτημα “Τι μπορεί να συμβεί και ποιες είναι οι συνέπειες?”.
- Αξιολόγηση επικινδυνότητας: η σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης επικινδυνότητας με τα κριτήρια αποδοχής της επικινδυνότητας.
- Αποτίμηση επικινδυνότητας: περιλαμβάνει την ανάλυση και αξιολόγηση της επικινδυνότητας.
- Απαιτήσεις επιτελεστικότητας: Απαιτήσεις επιτελεστικότητας είναι οι απαραίτητες χαρακτηριστικές ιδιότητες που ορίζονται για μια σήραγγα πριν και κατά την φάση της μελέτης. Οι απαιτήσεις είναι δηλώσεις που προσδιορίζουν τις ουσιώδεις ανάγκες του συνολικού συστήματος της σήραγγας ώστε να έχει αξία και χρησιμότητα με ασφάλεια, λειτουργικότητα και αισθητική εμφάνιση.
- Αντιστρωμάτωση (backlayering): Η αναστροφή της κίνησης του καπνού και των θερμών αερίων της πυρκαγιάς προς την αντίθετη κατεύθυνση της ροής του αερισμού
- Κρίσιμη ταχύτητα: Η ελάχιστη ταχύτητα της ροής του συστήματος αερισμού με κατεύθυνση κατευθείαν προς την πυρκαγιά, η οποία απαιτείται για την αποτροπή εμφάνισης αντιστρωμάτωσης (backlayering)
- Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας Πυρκαγιάς (Fire Heat Release Rate ή HRR): η ταχύτητα με την οποία παράγεται η θερμική ενέργεια από μια πηγή (πυρκαγιά) εκφρασμένη σε MW
- Ταχύτητα ανάπτυξης πυρκαγιάς: η ταχύτητα αλλαγής της έκλυσης θερμότητας

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. PIARC Technical Committee C3.3 Road tunnel Operation, *Risk Analysis for Road tunnels*, 2008 ISBN 2-84060-202-4 (<http://piarc.org>)
2. PIARC, 05.05B-1999, *Fire and smoke control in road tunnels* (<http://piarc.org>)
3. PIARC Committee C3.3 Road tunnel Operation, *Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels*, 2008 ISBN 2-84060-175-3 (<http://piarc.org>)
4. PIARC Committee C3.3 Road tunnel Operation, *Human factors and road tunnel safety regarding users*, 2008 ISBN 2-84060-218-0 (<http://piarc.org>)
5. CETU, *Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Booklet 4, Specific Hazard Investigations*, September 2003 ([www.cetu.equipement.gouv.fr/](http://www.cetu.equipement.gouv.fr/))
6. NFPA 502-2008, *Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways*,
7. ISO 13571: 2007 (E), *Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data*
8. ISO 16733:2006 *Fire Safety Engineering – Selection of Design Fire Scenarios and Design Fires*
9. Haukur Ingason, *Design fire curves for tunnels*, Fire Safety Journal 44 (2009) pp 259-265
10. Haukur Ingason, *Design fire in tunnel*, Safe & Reliable Tunnels Innovative European Achievements, Second International Symposium Lausanne 2006.
11. Lemaire T. Kenyon Y. *Large Scale fire tests in the second Benelux tunnel*, Fire Technology 42 (2006), pp. 329-350
12. UPTUN Workpackage 2 Fire development and mitigation measures D212 (version September 2008), *Explosion effects in traffic tunnels*
13. UPTUN Workpackage 2 Fire development and mitigation measures D214 (version September 2008), *CFD modeling of tunnel fires*
14. UPTUN Workpackage 2 Fire development and mitigation measures D215(version September 2008), *Design fire scenarios*
15. UPTUN Workpackage 2 Fire development and mitigation measures D221(version September 2008), *Target criteria*
16. Thematic Network FIT Fires in Tunnels, *General report*
17. Thematic Network FIT Fires in Tunnels, *Design fire scenarios*
18. Thematic Network FIT Fires in Tunnels *Fire safe design*
19. Thematic Network FIT Fires in Tunnels *Fire response management*
20. Henn V. Lesort J.P. *Continuum traffic flow modeling inside the Mont Blanc tunnel* Presentation at TRISTAN VI conference June 10-15 2007
21. Banjac M. Nolic B. *Numerical study of smoke flow control in tunnel fires using ventilation systems*, FME Transactions 36 (2008) pp.145-150
22. Kumar S. *Recent achievements in modeling the transport of smoke and toxic gases in tunnel fires* Safe & Reliable Tunnels Innovative European Achievements, First International Symposium Prague 2004.
23. HSL/2002/29 *Guidance for HSE Inspectors: "Smoke movement in complex enclosed spaces Assessment of Computational Fluid Dynamics"*.
24. HSL/2004/04 *Human Vulnerability to thermal radiation offshore*
25. Tarada F. *Critical velocities for smoke control in tunnel cross-passages*, First International Conference on Mayor Tunnel and Infrastructure Projects 22-24 May 2000 Taipei, Taiwan
26. Carvel R. Beard A. Jowirt P. Drysdale D. *Fire size and fire spread in tunnels with longitudinal ventilation systems* Journal of Fire Sciences Vol 23 (2005) pp. 485-517
27. Weger D. *Scenario Analysis for road tunnels*, Safety and Reliability ESREL ISBN 90 5809 551 7, 2003