



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ &**  
**ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

**Ανάλυση της επιρροής της αβεβαιότητας των παραμέτρων  
στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων**

**Διπλωματική εργασία**

Παππάς Άρης

**Επιβλέπων καθηγητής**

Κηρυτόπουλος Κωνσταντίνος, Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013



***Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.***

***Άρης Παππάς***

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	6
ΕΠΟΨΗ – ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT .....	8
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>9</b>
<b>2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>	<b>13</b>
<b>3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>15</b>
3.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ, ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ.....	15
3.1.1 Ποσοτικές/Ποιοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας.....	18
3.1.2 Ποσοτική Αποτίμηση Επικινδυνότητας (QRA) .....	18
3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	19
3.2.1 Μέθοδοι αποτίμησης επικινδυνότητας.....	22
3.2.2 Δείκτες Επικινδυνότητας .....	23
3.3 ΣΥΣΤΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ.....	29
3.3.1 Γενικές αρχές συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας.....	29
3.3.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες ...	39
<b>4 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΙΣ ΠΟΣΟΤΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ</b> <b>ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....</b>	<b>44</b>
4.1 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΙΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	44
4.2 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....	48
4.2.1 Αβεβαιότητα στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας .....	48
4.2.2 Αβεβαιότητα στο τρίτο βήμα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας.....	58
4.2.3 Αβεβαιότητα στο τέταρτο βήμα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας.....	66
<b>5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>67</b>
5.1 ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ CREAM .....	68
5.1.1 Γενικές αρχές ασαφούς λογικής.....	68
5.1.2 Περιγραφή του μοντέλου CREAM .....	71
5.1.3 Χρήση της ασαφούς λογικής στο μοντέλο CREAM .....	74
5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO .....	77
<b>6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ .....</b>	<b>81</b>
6.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	81
6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ DG-QRAM.....	81

6.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ DG-QRAM.....	83
6.3.1	<i>Ανάλυση παραμετρικής αβεβαιότητας μέσω ασαφούς λογικής και CREAM.....</i>	<i>84</i>
6.3.2	<i>Ανάλυση παραμετρικής αβεβαιότητας μέσω προσομοίωσης Monte Carlo .....</i>	<i>88</i>
6.4	ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ DG-QRAM .....	90
<b>7</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>99</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>101</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α –ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO.....</b>	<b>107</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας.....	14
Σχήμα 3.1: Διαδικασία διαχείρισης επικινδυνότητας .....	15
Σχήμα 3.2: Η διαχείριση επικινδυνότητας στη λήψη αποφάσεων .....	17
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας ....	20
Σχήμα 3.4: Ολιστική προσέγγιση των αναλύσεων επικινδυνότητας .....	21
Σχήμα 3.5: Πίνακας επικινδυνότητας .....	24
Σχήμα 3.6 Ατομική και κοινωνική επικινδυνότητα .....	26
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών.....	27
Σχήμα 3.8: Παράγοντες αποστροφής επικινδυνότητας.....	28
Σχήμα 3.9: Τα βήματα των συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας .....	31
Σχήμα 3.10: Δένδρο γεγονότων .....	32
Σχήμα 3.11: Δένδρο Σφαλμάτων.....	34
Σχήμα 3.12: Διάδοση φωτιάς στον χρόνο και χώρο.....	36
Σχήμα 3.13: Διάστημα επικινδυνότητας.....	37
Σχήμα 4.1: Πραγματικές συνθήκες συστήματος και αβεβαιότητες.....	46
Σχήμα 4.2: Μοντελοποίηση δένδρου σφαλμάτων με/χωρίς α.κ.α .....	56
Σχήμα 4.3: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω θερμοκρασίας.....	63
Σχήμα 4.4: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω τοξικότητας .....	63
Σχήμα 4.5: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω ακτινοβολίας.....	63
Σχήμα 5.1: Σύστημα ασαφούς λογικής .....	69
Σχήμα 5.2: Συναρτήσεις συμμετοχής.....	75
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα προσδιορισμού του τρόπου ελέγχου του διαχειριστή..	76
Σχήμα 5.4: Κανονική κατανομή παραμέτρου X.....	78
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης Monte Carlo .....	79
Σχήμα 6.1: Επιλογή παραμέτρων από το υπολογιστικό φύλλο TUNNEL .....	83
Σχήμα 6.2: Συναρτήσεις συμ/χής ασαφών συνόλων της μεταβλητής εξόδου..	86
Σχήμα 6.3: Κατανομή του μέσου αριθμού ατόμων των επιβατικών οχημάτων	89
Σχήμα 6.4: Κατανομές λοιπών των υπόλοιπων παραμέτρων.....	90
Σχήμα 6.5: Στάδια εισαγωγής των δεδομένων των αναλύσεων αβεβαιότητας	91
Σχήμα 7.1: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας διαχειριστή .....	92
Σχήμα 7.2: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας κυκλ.δεδομένων (60s) .....	93
Σχήμα 7.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες εύρους των καμπυλών Σ-Α.α.α (60s)..	94
Σχήμα 7.4: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας κυκλ. δεδομένων (420s) ....	95
Σχήμα 7.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες εύρους των καμπυλών Σ-Α.α.α (420s)	95
Σχήμα 7.6: Επιρροή της αβεβαιότητας του συνόλου των παραμέτρων.....	96

Σχήμα 7.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες συν. εύρους των καμπυλών Σ.-Α.α.α.	97
Σχήμα 7.8: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας στις αναμενόμενες τιμές επικινδυνότητας .....	98

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Σημαντικότερα ατυχήματα οδικών σηράγγων .....	10
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μοντέλων προσομοίωσης ζωνών .....	61
Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ενδεικτικής σήραγγας .....	81
Πίνακας 6.2: Μέθοδος ανάλυσης επιλεχθέντων παραμέτρων.....	84
Πίνακας 6.3: Οι ασαφείς κανόνες του συστήματος .....	87
Πίνακας 6.4: Στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων .....	89



## ΕΠΟΨΗ – ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετά την επιτυχημένη εφαρμογή των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας (QRA's) σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, οι συγκεκριμένες διαδικασίες εισήχθησαν στον τομέα της ασφάλειας των οδικών σηράγγων, προκειμένου να γίνει δυνατός ο προσδιορισμός και η διαχείριση της, σχετιζόμενης με τις οδικές σήραγγες, επικινδυνότητας. Παρότι η χρήση των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες οδήγησε σε μια καλύτερη κατανόηση της δομής του συστήματος των οδικών σηράγγων, και των παραγόντων που επηρεάζουν την επικινδυνότητα των εν λόγω συστημάτων, ένα νέο πεδίο έρευνας και αντιπαράθεσης αναδύθηκε, σχετικά με τις αβεβαιότητες που εισάγονται στις διάφορους μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τα διάφορα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας που έχουν εφαρμοστεί μέχρι στιγμής στο πεδίο των οδικών σηράγγων, καθώς επίσης τα είδη και τις πηγές αβεβαιότητας που συναντώνται στα συγκεκριμένα μοντέλα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ζήτημα της διαφορετικής αντιμετώπισης που απαιτείται όσον αφορά τον τρόπο ανάλυσης και αναπαράστασης των διαφόρων τύπων αβεβαιότητας, ενώ προτείνεται μια μέθοδος ανάλυσης της διάδοσης της παραμετρικής αβεβαιότητας στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων.

Η συγκεκριμένη ανάλυση βασίζεται σε δυο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης αβεβαιότητας, από τη μια σε ένα συνδυασμό της θεωρίας ασαφούς λογικής και του μοντέλου αποτίμησης ανθρώπινης αξιοπιστίας CREAM και από την άλλη στη προσομοίωση Monte Carlo. Σκοπός της ανάλυσης της παραμετρικής αβεβαιότητας είναι ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο επηρεάζει η αβεβαιότητα των παραμέτρων τις προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας ενός μοντέλου αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων.

Έπειτα, εξετάζεται μια ενδεικτική μελέτη περίπτωσης οδικής σήραγγας του Ελληνικού οδικού δικτύου, όπου χρησιμοποιώντας το μοντέλο αποτίμησης επικινδυνότητας DG-QRAM, γίνεται ανάλυση αβεβαιότητας σε 8 παραμέτρους του μοντέλου. Τέλος, παρουσιάζονται οι προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας του μοντέλου, εκφρασμένες μέσω των καμπυλών Συχνότητων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών και των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας, και αυτό που προκύπτει ως συμπέρασμα είναι η δημιουργία ενός εύρους μέσα στο οποίο εντοπίζονται οι τιμές επικινδυνότητας του μοντέλου.

## **ABSTRACT**

Following the successful implementation of Quantitative Risk Assessments in various industrial fields, the concept of these processes was introduced in road tunnels safety in order to identify and manage the associated risk of the aforementioned infrastructures. Although the use of QRA's led to a better understanding of road tunnels system's structure as well as of the factors affecting the risk of such systems, a great discussion has emerged concerning the uncertainties that are linked with several QRA processes.

This study reviews the several QRA models that have been applied in the road tunnel field, as well as the various aspects and sources of uncertainty that are introduced in these models. Thereafter, the challenges involved in the representation and treatment of the different aspects/sources of uncertainty are discussed, whereas an analysis of parameter uncertainty propagation is proposed.

The analysis of parameter uncertainty propagation is based on two different methods of uncertainty analysis, a method that combines the fuzzy logic theory with the human reliability assessment model CREAM and a Monte Carlo Simulation respectively. The purpose of this analysis is to address how parameter uncertainty is propagated in the resulting risk values of a road tunnel QRA model.

Onwards, an illustrative case study of a Greek road tunnel is applied by using DG-QRAM model, and choosing 8 model parameters. Finally, the resulting risk values are presented, expressed in terms of FN curves and Expected Values, and the study concludes that a substantial range is created, in which the aforementioned resulting risk values of DG-QRAM can be located.

# 1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συνεχής αύξηση των οδικών μεταφορών τόσο ανθρώπων όσο και αγαθών παγκοσμίως. Ιδιαίτερα στην Ευρώπη, η αύξηση των επενδύσεων στα έργα υποδομής των οδικών δικτύων των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς επίσης η ελεύθερη μετακίνηση ανθρώπων και εμπορευμάτων, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής ενοποίησης, οδήγησε σε μια σημαντική αύξηση στη ζήτηση μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων. Ως αποτέλεσμα, το Ευρωπαϊκό οδικό δίκτυο αναδείχτηκε σε καθοριστικό παράγοντα για την οικονομία των χωρών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οι οδικές σήραγγες παρότι αποτελούν ένα μικρό μόνο μέρος του συνολικού Ευρωπαϊκού οδικού δικτύου (Beard and Core, 2008) λογίζονται ως ζωτικής σημασίας εγκαταστάσεις των οδικών δικτύων, καθώς συμβάλουν στη σύνδεση γεωγραφικά δύσβατων περιοχών, όπως οι ορεινές περιοχές, και στην υπόγεια σύνδεση πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών (Meng et al., 2009), μειώνοντας συγχρόνως αισθητά τις αποστάσεις. Η συνεχής βελτίωση των τεχνικών κατασκευής τους καθιστά τις οδικές σήραγγες οικονομικά αποδοτικές λύσεις, όπου σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και αυξανόμενη κατασκευή οδικών σηράγγων τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως.

Παρά την αδιαμφισβήτητη χρησιμότητα και συμβολή τους, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των οδικών σηράγγων και κυρίως το γεγονός ότι αποτελούν ένα κλειστό περιβάλλον εγείρει ερωτήματα όσον αφορά την ασφάλεια τους, ιδιαίτερα κατά την διέλευση μέσω αυτών οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα. Τυχόν ατύχημα σε οδικές σήραγγες, στο οποίο εμπλέκονται επικίνδυνα εμπορεύματα, μπορεί να έχει πολλαπλές συνέπειες όπως ανθρώπινες απώλειες, ζημιές στη δομή των σηράγγων καθώς επίσης οικονομικές απώλειες στον τομέα της μεταφοράς αγαθών (PIARC 2008a).

Τα διαδοχικά ατυχήματα σε οδικές σήραγγες στα τέλη του εικοστού και στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα (**Πίνακας 1.1**), με κυριότερα τα ατυχήματα στο Mont Blanc και στο Tauern το 1999 και το ατύχημα στο St. Gotthard το 2001 στα οποία έχασαν την ζωή τους 39, 12 και 11 άτομα αντίστοιχα, ανέδειξαν την ανάγκη να αποφευχθούν και να μετριαστούν παρόμοια ατυχήματα στο μέλλον.

Ωθούμενη από το γενικότερο κλίμα που είχε διαμορφωθεί από την κοινωνία αλλά και την επιστημονική κοινότητα σε σχέση με την ασφάλεια των οδικών σηράγγων, η Ευρωπαϊκή Ένωση εισήγαγε το 2004 την Κοινοτική Οδηγία 2004/54/EC με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας των Ευρωπαϊκών οδικών σηράγγων.

**Πίνακας 1.1: Σημαντικότερα ατυχήματα οδικών σηράγγων**

Έτος	Σήραγγα	Ανθρώπινες απώλειες
1995	Pfander (Αυστρία) – 6,8 χλμ	3 νεκροί
1996	Isola delle Femine (Ιταλία) -148 μ	5 νεκροί - 10 τραυματίες
1999	Mont Blanc (Γαλλία-Ιταλία) - 11,6 χλμ	39 νεκροί - 25 τραυματίες
1999	Tauern (Αυστρία) - 6 χλμ	12 νεκροί
2001	Gleinalm (Αυστρία) - 8,8 χλμ	5 νεκροί
2001	St. Gotthard (Ελβετία) - 16,9 χλμ	11 νεκροί
2005	Frejus (Γαλλία-Ιταλία) - 12,9 χλμ	2 νεκροί - 11 τραυματίες
2006	Viamala (Ελβετία) - 750 μ	9 νεκροί - 6 τραυματίες

πηγή: PIARC, 2007

Μέσω της κοινοτικής οδηγίας ορίστηκαν οι ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας των οδικών σηράγγων καθώς επίσης απαιτήθηκε η διενέργεια αποτίμησης επικινδυνότητας σε συγκεκριμένες περιπτώσεις οδικών σηράγγων. Οι κύριοι στόχοι της κοινοτικής οδηγίας σύμφωνα με την PIARC (2007) συνοψίζονται:

1. Στην αποφυγή επικίνδυνων συμβάντων τα οποία μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή, το περιβάλλον και τη δομή των οδικών σηράγγων
2. Στον μετριασμό των συνεπειών ατυχημάτων που σχετίζονται κυρίως με τη φωτιά, με τη δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων έτσι ώστε:
  - Άτομα τα οποία εμπλέκονται σε ατύχημα να είναι σε θέση να σώσουν τους εαυτούς τους
  - Οι χρήστες των οδικών σηράγγων να μπορούν να επέμβουν άμεσα ούτως ώστε να αποφεύγονται μεγαλύτερες συνέπειες
  - Να διασφαλίζεται η αποτελεσματική παρέμβαση των σωστικών συνεργείων
  - Να προστατεύεται το περιβάλλον
  - Να περιορίζονται οι υλικές ζημιές

Ακόμη, σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία, σκοπός των αποτιμήσεων επικινδυνότητας είναι να αποτελέσουν μια βάση για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, καθώς επίσης ένα μέτρο καθορισμού του επιπέδου ασφαλείας των οδικών σηράγγων, ενώ με βάση το άρθρ.13, §2, «Τα Κράτη-Μέλη πρέπει να διασφαλίσουν σε εθνικό επίπεδο, ότι γίνεται χρήση μιας λεπτομερούς και επακριβούς

μεθοδολογίας που να ανταποκρίνεται στις βέλτιστες διαθέσιμες πρακτικές και να ενημερώσουν την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τη μεθοδολογία που εφαρμόζουν». Με βάση λοιπόν την κοινοτική οδηγία ο ακριβής τρόπος διενέργειας των αποτιμήσεων επικινδυνότητας καθορίζεται από το νομοθετικό πλαίσιο κάθε Κράτους-Μέλους, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη μιας σειράς από μοντέλα, η μεγάλη πλειοψηφία των οποίων βασίζεται στις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας (QRA's) (PIARC, 2008a).

Στην Ελλάδα έγινε προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην κοινοτική οδηγία μέσω του Προεδρικού Διατάγματος 230/2007 το οποίο σύμφωνα με το Άρθρο 1 «εφαρμόζεται σε όλες τις σήραγγες τις Ελληνικής Επικράτειας που ανήκουν στο διευρωπαϊκό οδικό δίκτυο και έχουν μήκος άνω των 500 μέτρων είτε αυτές λειτουργούν, είτε βρίσκονται σε στάδιο μελέτης ή και κατασκευής και αποσκοπεί να διασφαλίσει στους χρήστες των σηράγγων στοιχειώδες επίπεδο ασφαλείας». Επίσης στο διάταγμα ορίζονται οι παράμετροι ασφαλείας των σηράγγων, ενώ σύμφωνα με το άρθρ.16, §1.1.3, «Όταν μια σήραγγα έχει ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις προαναφερόμενες παραμέτρους, διεξάγεται αποτίμηση επικινδυνότητας. Τέλος, οι αποτιμήσεις επικινδυνότητας με βάση το άρθρ.13, §1, «διενεργούνται από φορέα λειτουργικώς ανεξάρτητο του διαχειριστή της σήραγγας», ενώ συστάθηκε η Διοικητική Αρχή Σηράγγων (ΔΑΣ), η οποία και ανέλαβε την ανάπτυξη μιας μεθόδου αποτίμησης επικινδυνότητας, έτσι όπως όριζε το προαναφερθέν άρθρο της κοινοτικής οδηγίας.

Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία ποσοτικής αποτίμησης επικινδυνότητας θεωρείται ως μια συστηματική και ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας<sup>1</sup> που σχετίζεται με κάθε πτυχή του κύκλου ζωής μιας σύνθετης επικίνδυνης εγκατάστασης (Stamatelatos, 2000), είναι κοινά αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα παγκοσμίως ότι η αβεβαιότητα αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο κατά την διενέργεια των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας (Démotier et al., 2003). Ακόμη, κατά τον Apostolakis (2004), μια από τις πολλές χρήσεις των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας είναι η ποσοτικοποίηση των αβεβαιότητας που υπεισέρχονται στα τελικά αποτελέσματα των συγκεκριμένων διαδικασιών.

Ως εκ τούτου, κατέστη ζωτικής σημασίας ανάγκη, η εξεύρεση μεθόδων μέσω των οποίων η αβεβαιότητα να αναπαρίστανται και να αντιμετωπίζεται με σαφή τρόπο, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί πως και σε τι βαθμό επηρεάζει τις

---

<sup>1</sup> Δεν υπάρχει ακόμη μια κοινή προσέγγιση ως προς τη μετάφραση του αγγλικού όρου «risk» στην Ελληνική βιβλιογραφία, καθώς πολλές φορές εκφράζεται με τον όρο «διακινδύνευση» ενώ άλλες με τον όρο «επικινδυνότητα». Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ο όρος «επικινδυνότητα», όπως έχει οριστεί και από τη ΔΑΣ.

προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας των διαδικασιών ποσοτικής αποτίμησης επικινδυνότητας. Παρόλα αυτά η έρευνα στο συγκεκριμένο ζήτημα είναι αρκετά περιορισμένη, όσον αφορά τις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των οδικών σηράγγων.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διπλός, καθώς από τη μια γίνεται προσπάθεια για τον προσδιορισμό του συνόλου των αβεβαιοτήτων που συναντώνται στις διάφορες μεθόδους από τις οποίες αποτελούνται οι αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, ενώ από την άλλη παρουσιάζεται μια μέθοδος για την ανάλυση της παραμετρικής αβεβαιότητας των συγκεκριμένων διαδικασιών, ούτως ώστε να προσδιοριστεί πως αυτή η αβεβαιότητα επηρεάζει τις προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής: Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η μέθοδος έρευνας, ενώ στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των αποτιμήσεων επικινδυνότητας τόσο σε γενικό πλαίσιο όσο και στο πεδίο των οδικών σηράγγων. Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 4** ορίζεται το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσονται οι αβεβαιότητες των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, ενώ προσδιορίζονται οι διάφοροι τύποι αβεβαιότητας που εισάγονται σε κάθε ένα από τα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων. Ακολουθεί το **Κεφάλαιο 5**, όπου παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των δυο μεθόδων ανάλυσης αβεβαιότητας που χρησιμοποιούνται στη μελέτη περίπτωσης του **Κεφαλαίου 6**. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, καθώς στο **Κεφάλαιο 8**, σχολιάζονται τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της έρευνας.

## 2 Μέθοδος έρευνας

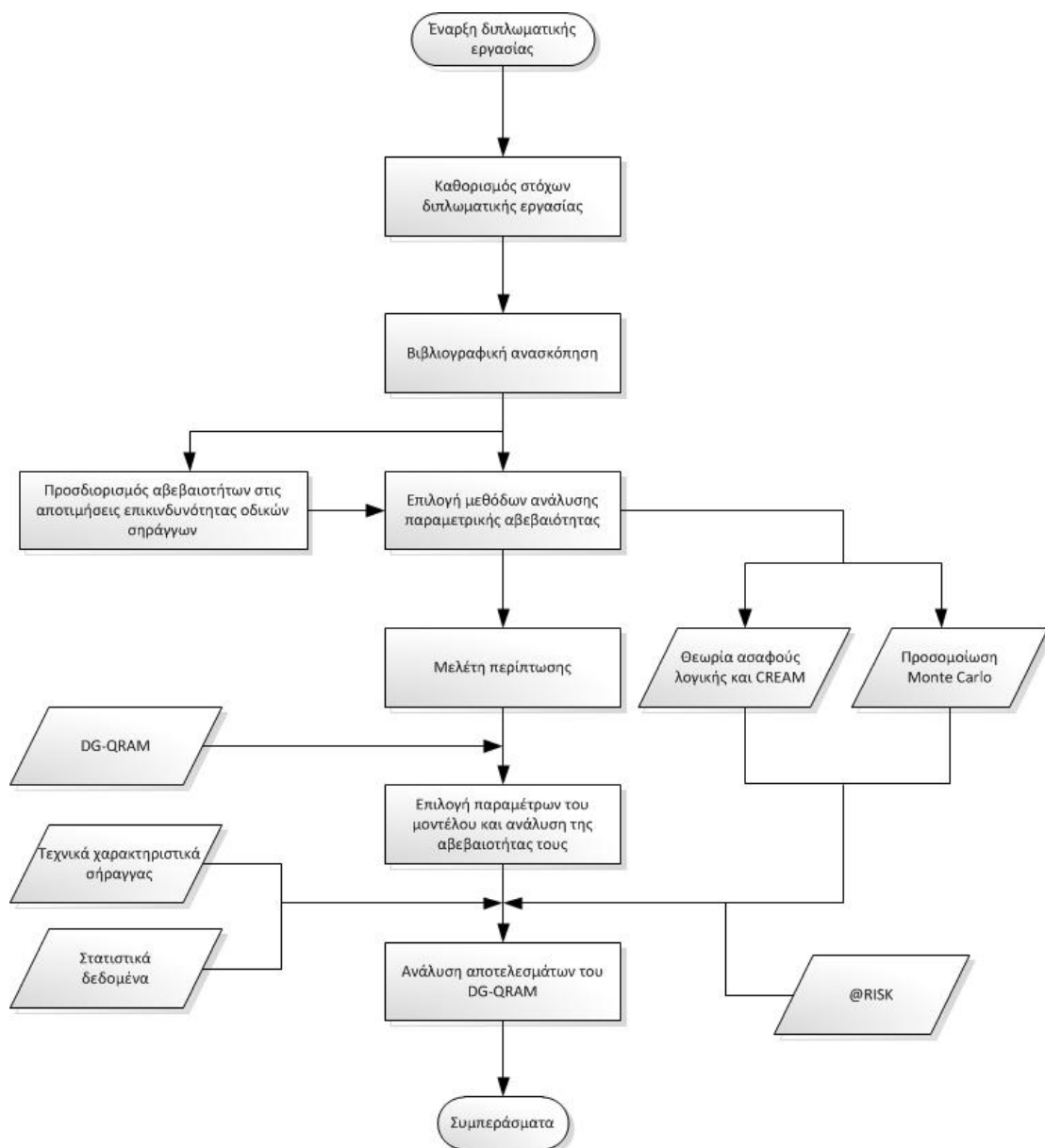
Για την ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας και την εκπλήρωση του πρώτου στόχου της, δηλαδή του προσδιορισμού των αβεβαιοτήτων που συναντώνται στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά τη διενέργεια των αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, αρχικά ήταν απαραίτητη η κατανόηση των βασικών αρχών των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, των διαφόρων τρόπων μέσω των οποίων μπορεί να εκφραστεί η επικινδυνότητα, καθώς επίσης και του συνόλου των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων.

Αυτό επετεύχθη μέσω μιας ευρείας βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η οποία περιελάμβανε, εκτός των διαφόρων μελετών και επιστημονικών άρθρων, την αξιοποίηση του συνόλου των δημοσιεύσεων της Παγκόσμιας Ένωσης Οδοποιίας (PIARC/ World Road Association), στον τομέα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων. Επίσης, αναγκαία κρίθηκε και η δημιουργία ενός γνωστικού πλαισίου, όσον αφορά τη σχέση μεταξύ των αβεβαιοτήτων και των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας, καθώς επίσης και των διαφορετικών τύπων/ ειδών/ πηγών αβεβαιότητας που εισάγονται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας.

Στη συνέχεια, και αφού προσδιορίστηκαν οι διάφοροι τύποι αβεβαιότητας που εισάγονται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάλυση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις παραμέτρους των εν λόγω διαδικασιών. Από τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης αβεβαιότητας που εντοπίστηκαν στη σχετική βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν δυο συγκεκριμένοι μέθοδοι, οι οποίοι κρίθηκαν ως οι καταλληλότεροι για την αναπαράσταση της παραμετρικής αβεβαιότητας. Αναλυτικότερα, η μια μέθοδος που επιλέχθηκε συνδυάζει τη θεωρία ασαφούς λογικής με το μοντέλο αποτίμησης ανθρώπινης αξιοπιστίας CREAM, ενώ η άλλη μέθοδος ήταν η προσομοίωση Monte Carlo.

Αφού λοιπόν, μελετήθηκαν οι βασικές αρχές που διέπουν τις δυο μεθόδους, καθώς επίσης η δομή τους, ακολούθησε η μελέτη περίπτωσης, κατά την οποία διενεργήθηκε αποτίμηση επικινδυνότητας μέσω του μοντέλου DG-QRAM σε σήραγγα του Ελληνικού οδικού δικτύου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οχτώ παράμετροι του μοντέλου, των οποίων η αβεβαιότητα αναλύθηκε μέσω των δυο προαναφερθέντων μεθόδων ανάλυσης αβεβαιότητας, ενώ λήφθηκαν υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τα διάφορα στατιστικά δεδομένα. Ακόμη έγινε χρήση του προγράμματος @RISK, τόσο για την ανάλυση των στατιστικών δεδομένων, όσο και για την προσομοίωση Monte Carlo.

Έπειτα, τα δεδομένα που προέκυψαν από τις αναλύσεις αβεβαιότητας εισήχθησαν στο μοντέλο DG-QRAM, από τα οποία προέκυψαν οι τιμές επικινδυνότητας του μοντέλου, οι οποίες και παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 7**. Τέλος, έγινε σχολιασμός των αποτελεσμάτων του DG-QRAM, καθώς προέκυψαν συμπεράσματα για το κατά πόσο η μέθοδος που επιλέχθηκε για την ανάλυση της διάδοσης της παραμετρικής αβεβαιότητας εκπληρώνει τον δεύτερο στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο οποίος είναι ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο επηρεάζει τα αποτελέσματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων η παραμετρική αβεβαιότητα. Ακολουθεί ένα επεξηγηματικό διάγραμμα ροής των σταδίων ανάπτυξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας (**Σχήμα 2.1**):



**Σχήμα 2.1:** Διάγραμμα ροής ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας

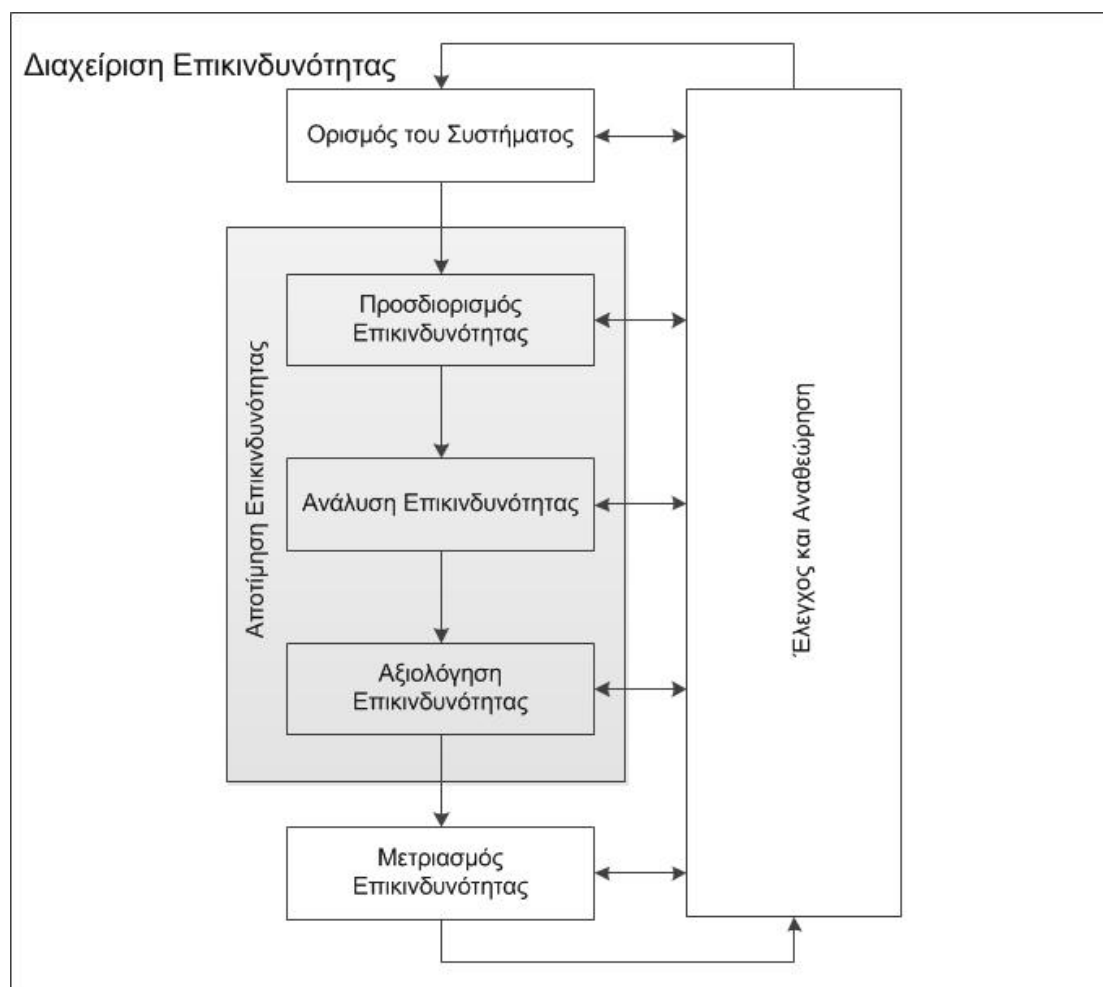


### 3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

#### 3.1 Διαχείριση, αποτίμηση και ανάλυση επικινδυνότητας

Οι αναλύσεις επικινδυνότητας αποτελούν βασικό εργαλείο των μελετητών στην προσπάθεια τους να ερευνήσουν αν ένα σύστημα είναι ασφαλές. Γενικά, κάθε ανάλυση επικινδυνότητας σκοπό έχει να προσδιορίσει τόσο τις αρνητικές συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει ένα σύστημα σε κατάσταση αστοχίας, όσο και τις πιθανότητες εμφάνισης αυτών των συνεπειών.

Κάθε ανάλυση επικινδυνότητας αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης διαδικασίας, γνωστής ως Αποτίμησης Επικινδυνότητας (Risk Assessment) η οποία με την σειρά της αποτελεί μέρος της διαδικασίας Διαχείρισης Επικινδυνότητας (Risk Management). Στο **Σχήμα 3.1**, παρουσιάζεται σε απλοποιημένη μορφή η διαδικασία διαχείρισης επικινδυνότητας, έτσι όπως έχει οριστεί από το ISO 31000:2009.



Σχήμα 3.1: Διαδικασία διαχείρισης επικινδυνότητας

πηγή: ISO (2009)

Σύμφωνα με τον Aven (2009), διενεργώντας ανάλυση επικινδυνότητας, κάποιος μπορεί να:

- Ορίσει ένα πλαίσιο επικινδυνότητας (risk picture)
- Συγκρίνει διάφορες εναλλακτικές επιλογές και λύσεις σχετιζόμενες με την επικινδυνότητα
- Προσδιορίσει παράγοντες, καταστάσεις, δραστηριότητες, συστήματα, στοιχεία και γενικότερα οτιδήποτε είναι σημαντικό (κρίσιμó) όσον αφορά την επικινδυνότητα
- Παρουσιάσει την επίδραση διαφόρων μέτρων πάνω στην επικινδυνότητα

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικινδυνότητας αξιολογούνται συγκρίνοντας τα, είτε με μια τιμή αναφοράς, είτε με εναλλακτικές επιλογές κατά την διαδικασία Αξιολόγησης Επικινδυνότητας (Risk Evaluation). Ως αποτίμηση επικινδυνότητας ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία ορίζονται κριτήρια αποφάσεων, τα οποία κριτήρια χρησιμοποιούνται στα αποτελέσματα της ανάλυσης και αξιολόγησης επικινδυνότητας (Høj & Kröger, 2002)<sup>2</sup>.

Από την άλλη κατά τον Abrahamsson (2002) ως αποτίμηση επικινδυνότητας λογίζεται κάθε δομημένη διαδικασία που σκοπό έχει να εντοπίσει και να αναλύσει τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλουν στην συνολική επικινδυνότητα, την οποία θέτει μια εγκατάσταση ή δραστηριότητα στους ανθρώπους, στο περιβάλλον ή σε κάθε άλλο κομμάτι της κοινωνίας.

Η αποτίμηση επικινδυνότητας μαζί με την διαδικασία λήψης μέτρων μείωσης της επικινδυνότητας αποτελούν την διαχείριση της επικινδυνότητας. Υπάρχουν πολλοί ορισμοί της διαχείρισης επικινδυνότητας στη διεθνή βιβλιογραφία ωστόσο στη παρούσα εργασία προτιμάται ο ορισμός των Høj & Kröger (2002), όπου διαχείριση επικινδυνότητας είναι η εφαρμογή των στοιχείων επικινδυνότητας ως αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας διοίκησης ενός οργανισμού.

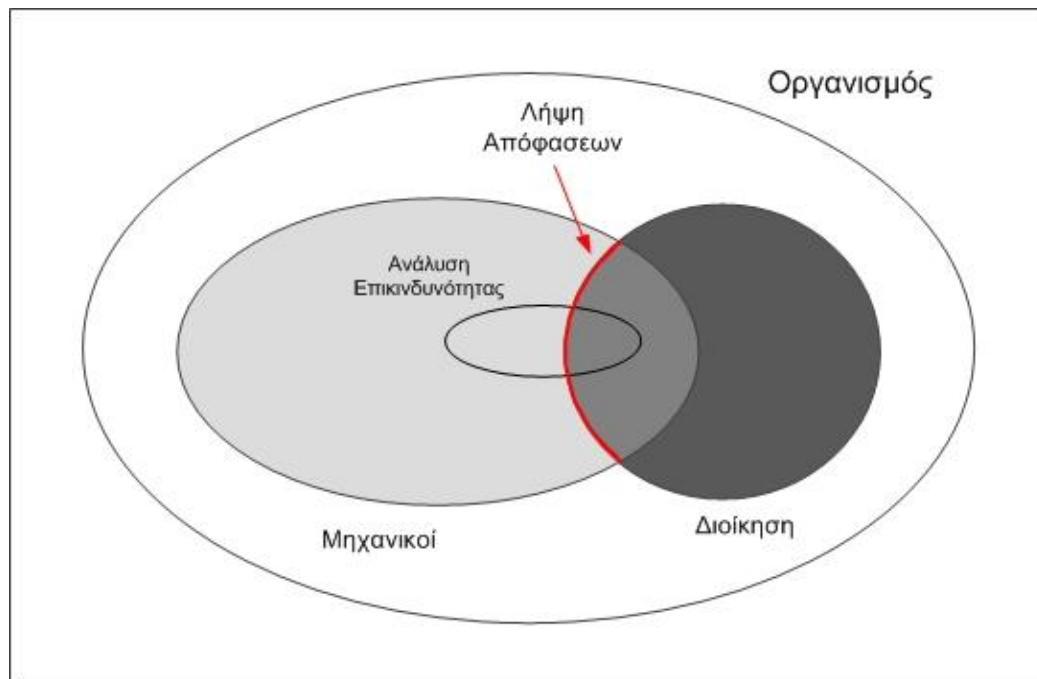
---

<sup>2</sup>Παρότι οι αναλύσεις επικινδυνότητας αποτελούν μέρος των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, πολλές φορές στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των δύο αυτών διαδικασιών. Αυτό είναι λογικό καθώς η ανάλυση επικινδυνότητας αποτελεί το σημαντικότερο και πιο απαιτητικό κομμάτι της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας. Από την άλλη, αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάλυση επικινδυνότητας δεν έχει κανένα απολύτως νόημα αν δεν συνδυαστεί με τις υπόλοιπες διαδικασίες, μαζί με τις οποίες ορίζει την αποτίμηση επικινδυνότητας.

Σύμφωνα λοιπόν με το ISO 31000:2009, για να είναι πιο αποδοτική η διαχείριση επικινδυνότητας πρέπει να διέπεται από τους παρακάτω κανόνες:

- I. Να δημιουργεί προστιθέμενη αξία
- II. Να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των διαδικασιών οργάνωσης
- III. Να αποτελεί μέρος της λήψης αποφάσεων
- IV. Να αντιμετωπίζει με σαφή τρόπο τις αβεβαιότητες
- V. Να είναι διαδικασία συστηματική, δομημένη και έγκαιρη
- VI. Να βασίζεται στις καλύτερες διαθέσιμες πληροφορίες
- VII. Να προσαρμόζεται
- VIII. Να λαμβάνει υπόψη ανθρώπινους και πολιτιστικούς παράγοντες
- IX. Να είναι διαφανής και να περιλαμβάνει όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη
- X. Να είναι δυναμική, επαναληπτική και να ανταποκρίνεται στις αλλαγές
- XI. Να διευκολύνει την συνεχή βελτίωση και ενίσχυση του οργανισμού

Η σημαντικότητα της διαχείρισης επικινδυνότητας στην λήψη αποφάσεων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2**, όπου κατά τον Privara (2009) η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελείται από δύο κύρια μέρη τα οποία αντιστοιχούν στα τμήματα Διοίκησης και Μηχανικών ενός οργανισμού/επιχείρησης. Το τμήμα μηχανικών διενεργεί τις τεχνικές αναλύσεις οι οποίες πρέπει να παρέχουν σαφές και κατανοητό γνωστικό πλαίσιο στην διοίκηση του οργανισμού έτσι ώστε να λάβει τις καταλληλότερες αποφάσεις.



**Σχήμα 3.2: Η διαχείριση επικινδυνότητας στη λήψη αποφάσεων**

πηγή: Privara (2009)

### 3.1.1 Ποσοτικές/Ποιοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τις αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η διαχωρισμός των αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις δύο αυτές κατηγορίες έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο εκφράζονται οι συνέπειες, καθώς και οι πιθανότητες εμφάνισής τους. «Αν τόσο η σοβαρότητα των συνεπειών όσο και οι πιθανότητες εμφάνισής τους εκφράζονται ποιοτικά (π.χ. μέσω λέξεων όπως υψηλός, μέτριος ή χαμηλός) η αποτίμηση επικινδυνότητας ονομάζεται **ποιοτική αποτίμηση επικινδυνότητας**. Αντίστοιχα, στην **ποσοτική αποτίμηση επικινδυνότητας** οι συνέπειες εκφράζονται αριθμητικά (π.χ. αριθμός ανθρώπινων απωλειών) και οι πιθανότητες εμφάνισής τους εκφράζονται μέσω πιθανοτήτων ή συχνοτήτων (π.χ. αριθμός εμφάνισής τους ή πιθανότητα να εμφανιστούν ανά χρονική μονάδα)» (Stamatelatos, 2000).

Προφανώς κάθε κατηγορία έχει τα θετικά και τα αρνητικά της. Πολλές φορές η ποιοτική αποτίμηση είναι χρήσιμη όταν έχουμε δεδομένα τα οποία δεν μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε. Από την άλλη μας απαλλάσσει από το άγχος για ακρίβεια στα αποτελέσματά μας, μέσω της ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων. Ωστόσο η ανάγκη για αποτελέσματα τα οποία να είναι κατανοητά από όλες τις ενδιαφερόμενες πλευρές, απαιτεί την χρήση ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας.

### 3.1.2 Ποσοτική Αποτίμηση Επικινδυνότητας (QRA)

Η ποσοτική ή πιθανοκρατική (probabilistic) αποτίμηση επικινδυνότητας είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό του επιπέδου ασφάλειας ενός συστήματος καθώς σύμφωνα με τους Karlan & Garrick (1981) ως διαδικασία, απαντάει σε τρία ουσιώδη ερωτήματα:

- i. Τι μπορεί να πάει λάθος;
- ii. Πόσο πιθανό είναι;
- iii. Ποίες είναι οι συνέπειες;

Για κάθε ένα από αυτά τα ερωτήματα γίνεται χρήση μιας μεγάλης γκάμας μεθόδων και διαδικασιών έτσι ώστε να μπορέσουν να απαντηθούν. Για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται τόσο ιστορικά δεδομένα όσο και η κρίση των ειδικών, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια.

Κατά τον Apostolakis (2004) οι ποσοτική αποτίμηση επικινδυνότητας έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη επειδή:

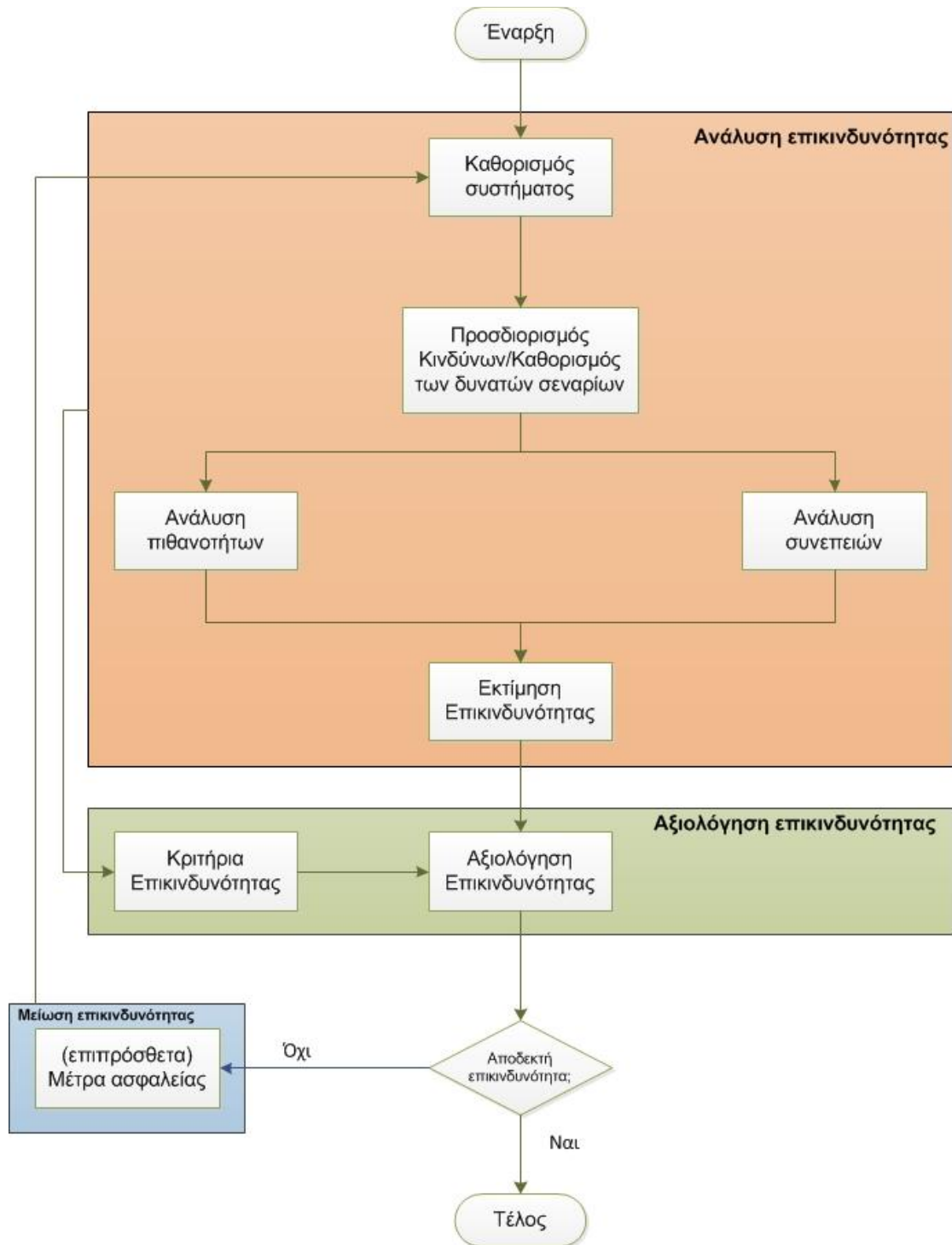
1. Λαμβάνει υπόψη χιλιάδες σενάρια τα οποία περιλαμβάνουν πολλαπλές αστοχίες, και έτσι παρέχει μια εις βάθος κατανόηση των διαφόρων καταστάσεων αστοχίας του συστήματος.
2. Αυξάνει τις πιθανότητες προσδιορισμού των σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ γεγονότων/συστημάτων/διαχειριστών.
3. Παρέχει μια κοινή αντίληψη του προβλήματος, που διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερόμενων μερών.
4. Είναι μια ολιστική προσέγγιση, μέσω της οποίας γίνεται ορατή η ανάγκη για συνεισφορά διαφορετικών επιστημονικών κλάδων όπως των τεχνικών, των κοινωνικών και των συμπεριφορικών επιστημών.
5. Εστιάζει στην ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων και δημιουργεί μια καλύτερη εικόνα του τι η κοινότητα των επιστημόνων γνωρίζει ή δεν γνωρίζει πάνω σε ένα συγκεκριμένο θέμα. Έτσι παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στην λήψη αποφάσεων σχετικά με την έρευνα που απαιτείται στους διαφόρους επιστημονικούς κλάδους, π.χ. στα φυσικά φαινόμενα ή στα ανθρώπινα λάθη.
6. Διευκολύνει την διαχείριση επικινδυνότητας μέσω του προσδιορισμού των κυρίαρχων σεναρίων ατυχημάτων έτσι ώστε να μην σπαταλούνται πόροι σε πράγματα που συνεισφέρουν ελάχιστα στην επικινδυνότητα.

### **3.2 Αναλύσεις και αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων**

Λόγω των πολλαπλών οφελών των αναλύσεων επικινδυνότητας, κρίθηκε σημαντική η χρήση τους στις οδικές σήραγγες στην προσπάθεια βελτίωσης της ασφάλειας τους. Οι αναλύσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, αντίστοιχα με τις αναλύσεις σε άλλα πεδία, αποτελούν μέρος της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων. Στο **Σχήμα 3.3** δίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας, όπου διακρίνονται οι παρακάτω διαδικασίες:

- *Η ανάλυση επικινδυνότητας* όπου μελετώνται όλοι οι δυνατοί τρόποι αστοχίας της υπό μελέτη σήραγγας, καθώς επίσης οι συνέπειες τους.
- *Η αξιολόγηση επικινδυνότητας* όπου αξιολογείται κατά πόσο είναι αποδεκτή η επικινδυνότητα που έχει υπολογιστεί κατά την ανάλυση επικινδυνότητας. Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την επικινδυνότητα, καθορίζονται όρια επικινδυνότητας. Αυτό απαιτεί τη χρήση διαφόρων κριτηρίων αποδοχής της επικινδυνότητας.

- Η μείωση επικινδυνότητας, όπου σχεδιάζονται (επιπρόσθετα) μέτρα ασφαλείας έτσι ώστε η επικινδυνότητα της υπό μελέτη σήραγγας να μην ξεπερνάει τα όρια επικινδυνότητας



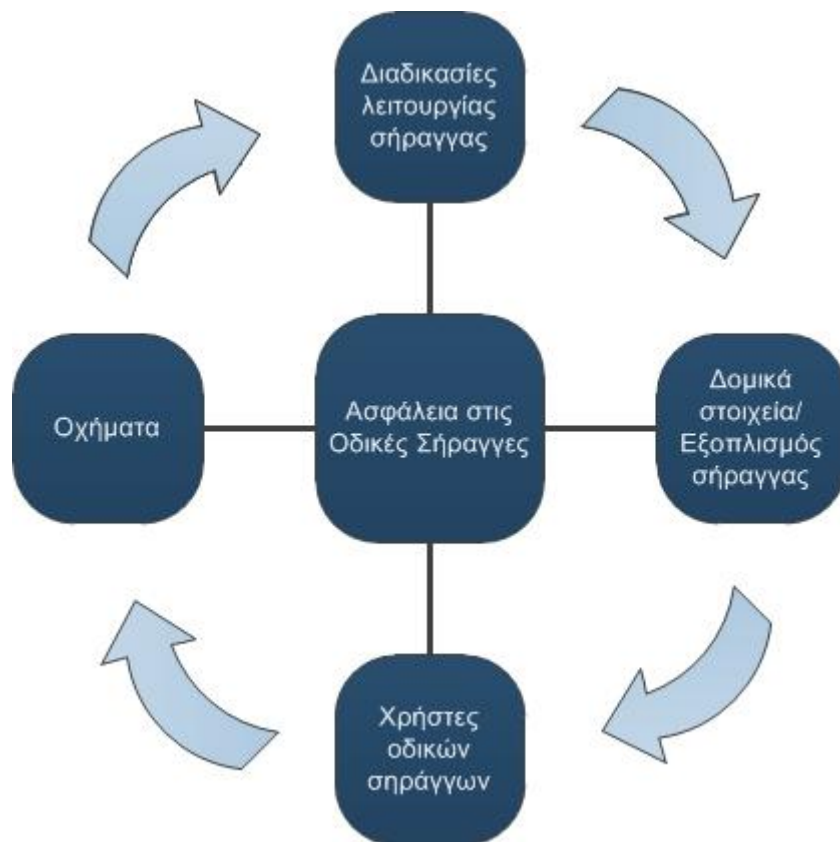
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας

πηγή: PIARC, 2008a

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η διαδικασία της ανάλυσης επικινδυνότητας στις σήραγγες μπορεί να χωριστεί σε τρία βήματα τα οποία δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- Προσδιορισμός των κινδύνων: Συστηματική διαδικασία εντοπισμού όλων των σχετικών κινδύνων, και ανάλυσης των συσχετιζόμενων τους επιδράσεων
- Ανάλυση πιθανοτήτων: Υπολογισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης των σχετικών συμβάντων/σεναρίων
- Ανάλυση συνεπειών: Διερεύνηση των συνεπειών των σχετικών σεναρίων

Η εφαρμογή των αναλύσεων επικινδυνότητας στις σήραγγες, βασίζεται στις αρχές των αναλύσεων επικινδυνότητας στις πυρηνικές και χημικές εγκαταστάσεις, με μερικές απαραίτητες διαφοροποιήσεις. Ως εκ τούτου, μια γενική βασική αρχή όλων των ειδών των αναλύσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων πρέπει να είναι η ολιστική προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τα δομικά στοιχεία/εξοπλισμό της σήραγγας, τα οχήματα, τις διαδικασίες λειτουργίας της σήραγγας και τους χρήστες των οδικών σηράγγων (PIARC, 2008a), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.4**.



**Σχήμα 3.4: Ολιστική προσέγγιση των αναλύσεων επικινδυνότητας**

πηγή:PIARC, 2008a

Αντίστοιχα με τον Aven, σύμφωνα με την PIARC (2008a) οι αναλύσεις επικινδυνότητας σε σήραγγες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- Να ελεγχθεί η γενική συνοχή του σχεδιασμού ασφάλειας των σηράγγων
- Να επιλεγεί η καλύτερη ανάμεσα σε εναλλακτικές επιλογές
- Να καταδειχθεί ότι εκπληρώνονται οι απαιτήσεις ασφάλειας
- Να βελτιωθεί ο σχεδιασμός ασφάλειας

### 3.2.1 Μέθοδοι αποτίμησης επικινδυνότητας

Στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, συναντάται μια πληθώρα μεθόδων για κάθε μια από τις διαδικασίες ανάλυσης, αξιολόγησης και μείωσης επικινδυνότητας. Όπως ακριβώς σε κάθε αποτίμηση επικινδυνότητας, έτσι και στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε σήραγγες διακρίνονται δυο κύριες κατηγορίες μεθόδων, οι ποσοτικές και οι ποιοτικές μέθοδοι. Εκτός από τον γνωστό διαχωρισμό των δυο αυτών κατηγοριών, όπου ισχύει ότι έχει αναφερθεί στην **Ενότητα 3.1.1**, οι ποιοτικές μέθοδοι διακρίνονται για την απλότητα τους καθώς επίσης για τον υποκειμενικό τους χαρακτήρα καθώς βασίζονται σε αυθαιρέτως ορισμένα πρότυπα αξιολόγησης. Οι ποσοτικές μέθοδοι από την άλλη προσπαθούν να υπολογίσουν την επικινδυνότητα των κρίσιμων συμβάντων, δηλαδή των συμβάντων που μπορεί να οδηγήσουν σε ένα ατύχημα, με τρόπο λογικό και ολοκληρωμένο (PIARC, 2008a).

Πέρα από την κατηγοριοποίηση των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε κάθε βήμα της αποτίμησης επικινδυνότητας σε ποσοτικές/ποιοτικές, μια ακόμη κατηγοριοποίηση συναντάται στις μεθόδους προσέγγισης της επικινδυνότητας. Έτσι λοιπόν, μπορούμε να τις διαχωρίσουμε σε σεναριακές και συστημικές.

- Στη σεναριακή προσέγγιση επικινδυνότητας «ορίζεται μια σειρά σχετικών σεναρίων ατυχημάτων, υπολογίζεται η πιθανότητα κάθε σεναρίου και αναλύονται οι πιθανές τελικές συνέπειες. Η αποτίμηση επικινδυνότητας γίνεται ξεχωριστά για κάθε σενάριο» (PIARC, 2008a). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολύ σημαντική, όταν θέλουμε να μελετήσουμε σε βάθος ένα στοιχείο του εξοπλισμού με σκοπό την βελτίωση του, ή την βελτίωση της διαδικασίας εκκένωσης της σήραγγας. Κατ' ουσίαν, με τη συγκεκριμένη μέθοδο αυτό που επιδιώκεται είναι η ανάλυση των σεναρίων ως μιας χρονικής αλληλουχίας γεγονότων. Για τον προσδιορισμό αυτής της χρονικής αλληλουχίας που θα οδηγήει στις τελικές συνέπειες χρησιμοποιούνται



δέντρα γεγονότων, δυναμικά υπολογιστικά μοντέλα, καθώς επίσης αναλύσεις εκκένωσης.

- Στη συστημική προσέγγιση επικινδυνότητας το σύστημα της σήραγγας μελετάται στο σύνολο του. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη μέθοδο «*οι τιμές επικινδυνότητας υπολογίζονται για όλο το σύστημα. Έτσι λαμβάνονται υπ' όψιν όλα τα πιθανά σενάρια ατυχημάτων στην υπό μελέτη σήραγγα. Η αποτίμηση επικινδυνότητας γίνεται για όλη τη σήραγγα, με βάση τις τιμές επικινδυνότητας όλου του συστήματος*» (PIARC, 2008a). Ως τιμές επικινδυνότητας λογίζονται τόσο οι αναμενόμενες τιμές, όσο οι καμπύλες Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών. Για τον εντοπισμό των σεναρίων ατυχημάτων και των πιθανοτήτων καθενός σεναρίου χρησιμοποιούνται δέντρα γεγονότων και σφαλμάτων.

Όπως παρατηρούμε οι δυο μέθοδοι προσέγγισης της επικινδυνότητας είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους καθώς στην σεναριακή προσέγγιση επικινδυνότητας εξετάζουμε αναλυτικότερα, μερικά από τα σενάρια ατυχημάτων που έχουμε εντοπίσει στη συστημική προσέγγιση επικινδυνότητας. Στην **Ενότητα 3.3** γίνεται αναλυτική περιγραφή των συστημικών μεθοδολογιών αποτιμήσεων επικινδυνότητας. Πριν όμως από την περιγραφή των ανωτέρω διαδικασιών κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναφορά στους δείκτες επικινδυνότητας.

### 3.2.2 Δείκτες Επικινδυνότητας

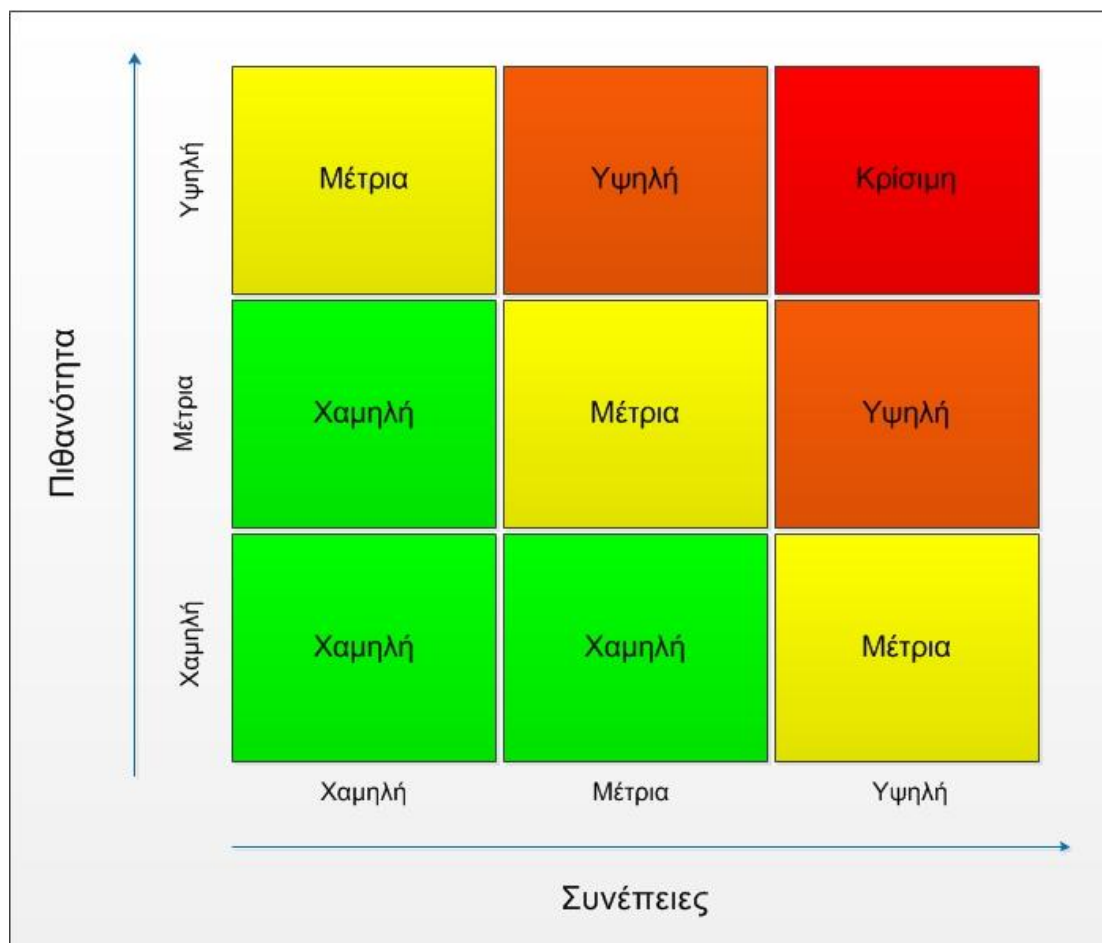
Η επικινδυνότητα μπορεί να εκφραστεί και να παρασταθεί μέσω ποιοτικών ή ποσοτικών δεικτών, ανάλογα με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά την διενέργεια της ανάλυσης επικινδυνότητας (ποιοτικές ή ποσοτικές μέθοδοι). Αυτοί οι δείκτες είναι που μελετώνται κατά την διαδικασία αξιολόγησης επικινδυνότητας.

#### 3.2.2.1 Ποιοτικοί δείκτες επικινδυνότητας

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κατηγοριοποίησης της επικινδυνότητας ποιοτικά είναι ο πίνακας επικινδυνότητας. Στο **Σχήμα 3.5** δίνεται η μορφή ενός πίνακα επικινδυνότητας όπου η πιθανότητα εμφάνισης μιας συνέπειας καθώς επίσης η σοβαρότητα της κατηγοριοποιείται σε χαμηλή, μέτρια και υψηλή. Ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης με την σοβαρότητα των συνεπειών καθορίζει ποιοτικά την επικινδυνότητα η οποία μπορεί να είναι:

- Χαμηλή
- Μέτρια

- Υψηλή
- Κρίσιμη



**Σχήμα 3.5: Πίνακας επικινδυνότητας**

πηγή: PIARC, 2010

Ο καθορισμός τόσο της πιθανότητας εμφάνισης όσο και της σοβαρότητας μιας συνέπειας σε μια από τις τρεις κατηγορίες, εξαρτάται από την κρίση ειδικών. Το γεγονός ότι ο καθορισμός ποιοτικά της επικινδυνότητας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην προσωπική ή/και ομαδική κρίση των ειδικών, εγείρει ερωτήματα για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, παρότι οι αποφάσεις τους είναι απαραίτητο να συνοδεύονται από επεξηγήσεις κατανοητές και αξιόπιστες. Ωστόσο η παραπάνω μέθοδος μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμη ως πρώτο βήμα κατά την διαδικασία αποτίμησης επικινδυνότητας, όπου τα στοιχεία χαμηλής επικινδυνότητας αμελούνται και δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στα στοιχεία υψηλής επικινδυνότητας έτσι ώστε αυτά να αναλυθούν ποσοτικά στη συνέχεια (PIARC 2010).

### 3.2.2.2 Ποσοτικοί δείκτες επικινδυνότητας

Με την χρήση ποσοτικών μεθόδων κατά την ανάλυση επικινδυνότητας, είναι δυνατός ο υπολογισμός ποσοτικά της επικινδυνότητας. Υπό αυτό το πρίσμα, η επικινδυνότητα  $R$  ορίζεται ως μια συνάρτηση της πιθανότητας  $p$  εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου σεναρίου και των  $C$  συνεπειών του:

$$R = f(p, C)$$

Ο μαθηματικός τύπος της συνάρτησης  $f$  εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται και εξετάζεται η επικινδυνότητα. Συγκεκριμένα, μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους επικινδυνότητας, την ατομική και την κοινωνική επικινδυνότητα (individual and societal risk).

*Ατομική επικινδυνότητα* κατά την PIARC (2010) είναι «η επικινδυνότητα που αντιμετωπίζει ένα μεμονωμένο άτομο το οποίο αναμένεται να υποστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο τραυματισμού λόγω της πραγματοποίησης συγκεκριμένων κινδύνων σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο αριθμός των ατόμων που είναι εκτεθειμένοι στον κίνδυνο δεν επηρεάζουν την τιμή της ατομικής επικινδυνότητας».

Η μαθηματική αναπαράσταση της ατομικής επικινδυνότητας  $r_i$  βασίζεται στην προσθήκη, πέρα από την πιθανότητα  $p_s$  εμφάνισης ενός σεναρίου, της πιθανότητας  $p_e$  έκθεσης στο συγκεκριμένο σενάριο. Έτσι προκύπτει η εξίσωση:

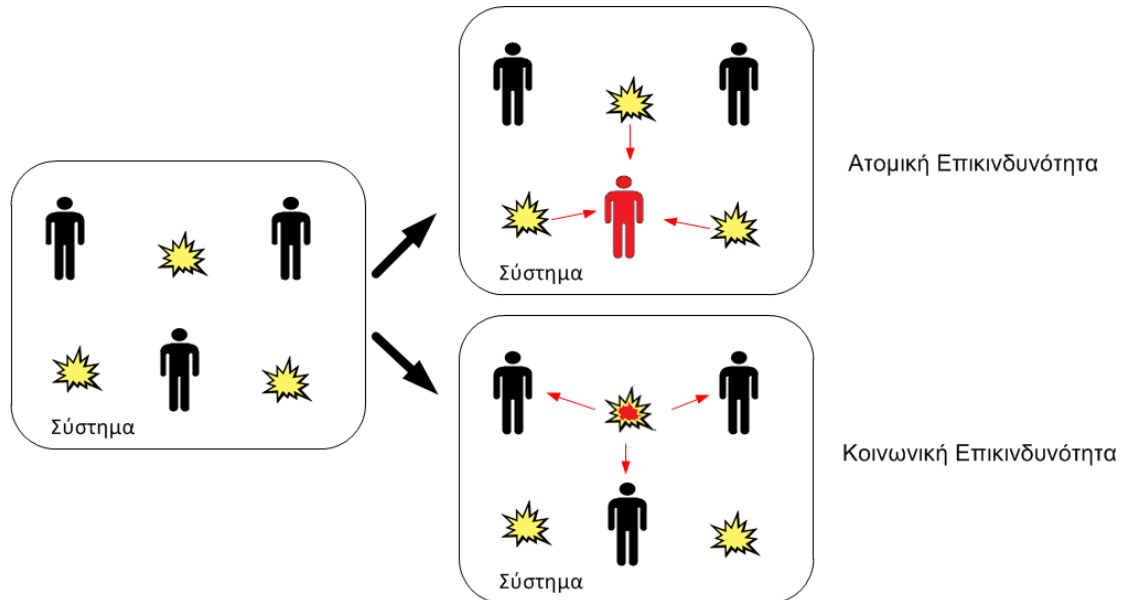
$$r_i = p_s \times p_e \times C_i$$

Οι συνέπειες μπορεί να εκφράζουν απώλεια ζωής, τραυματισμό ή ακόμη και υλική απώλεια. Η ατομική επικινδυνότητα είναι χρήσιμη κατά των εντοπισμό των διαφόρων ζωνών επικινδυνότητας γύρω από μια εγκατάσταση υψηλής επικινδυνότητας. Ωστόσο οι περισσότερες ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας και κυρίως οι συστημικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες εστιάζουν στον προσδιορισμό της κοινωνικής επικινδυνότητας.

Ως *κοινωνική επικινδυνότητα* ορίζεται «η σχέση μεταξύ της συχνότητας πραγματοποίησης συγκεκριμένων κινδύνων και του αριθμού των ανθρώπων που δύναται να υποφέρουν από τις συνέπειες της πραγματοποίησης των κινδύνων» (ICChem, 1985). Εν ολίγοις κοινωνική επικινδυνότητα είναι η επικινδυνότητα προς μια ομάδα ανθρώπων λόγω του συνόλου των κινδύνων που αναδύονται από μια δραστηριότητα. Στο **Σχήμα 3.6** παρουσιάζεται γραφικά η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων επικινδυνότητας.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αναπαράστασης της κοινωνικής επικινδυνότητας, ωστόσο οι σημαντικότεροι και πιο διαδεδομένοι δείκτες κοινωνικής επικινδυνότητας είναι:

- Διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών (FN Diagram)
- Αναμενόμενη Τιμή επικινδυνότητας (Expected Value/EV)
- Αντιλαμβανόμενη Επικινδυνότητα (Perceived risk)
- Νομισματική Επικινδυνότητα (Monetary risk)



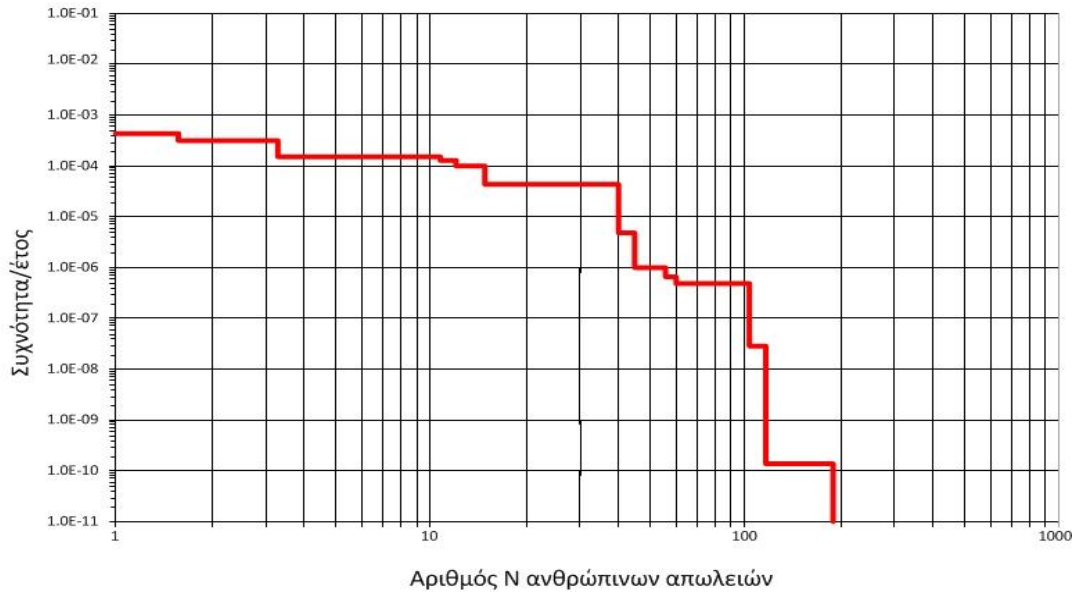
**Σχήμα 3.6 Ατομική και κοινωνική επικινδυνότητα**

πηγή: PIARC, 2010

Κάθε ένας από τους ανωτέρω δείκτες κοινωνικής επικινδυνότητας εκφράζει και έναν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης της όπως γίνεται αντιληπτό και στην συνοπτική περιγραφή των δεικτών που ακολουθεί, σύμφωνα με την PIARC (2010).

Διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών: Τα διαγράμματα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών, είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης της κοινωνικής επικινδυνότητας. Στο **Σχήμα 3.7** παριστάνεται ένα τυπικό διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών.

Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν ουσιαστικά μια γραφική παράσταση όπου οι δυο άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Ο κατακόρυφος άξονας (y) εκφράζει την συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων, ενώ ο οριζόντιος άξονας (x) τον αριθμό N των ανθρώπινων απωλειών. Η προκύπτουσα καμπύλη, η οποία ονομάζεται καμπύλη Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών (FN Curve), εκφράζει την αθροιστική συχνότητα κατανομής ατυχημάτων με N ή περισσότερες ανθρώπινες απώλειες. Παραδείγματος χάρη, με βάση το διάγραμμα του **Σχήματος 3.7**, ένα ατύχημα με συνέπεια 15 ή παραπάνω ανθρώπινες απώλειες έχει συχνότητα εμφάνισης  $1 \cdot 10^{-4}$ .



**Σχήμα 3.7: Διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρώπινων απωλειών**

Αναμενόμενη Τιμή επικινδυνότητας: Η αναμενόμενη τιμή επικινδυνότητας αποτελεί έναν απλό τρόπο αναπαράστασης της κοινωνικής επικινδυνότητας. Εκφράζει ουσιαστικά την μέση τιμή των αναμενόμενων ανθρώπινων απωλειών εξαιτίας ενός συγκεκριμένου κινδύνου, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα. Εστιάζοντας σε ένα δεδομένο σενάριο ατυχήματος, η τιμή αυτή ισούται με το γινόμενο της πιθανότητας/συχνότητας ( $p_i$ ) να συμβεί το σενάριο αυτό, επί την μονάδα μέτρησης των συνεπειών ( $C_i$ ), όπως οι ανθρώπινες απώλειες. Αθροίζοντας όλα τα σχετικά σενάρια προκύπτει η συνολική αναμενόμενη τιμή επικινδυνότητας ( $EV$ ) για ολόκληρο το σύστημα:

$$EV = \sum_1^n p_i \times C_i = \int_0^\infty p(C) \times C dC$$

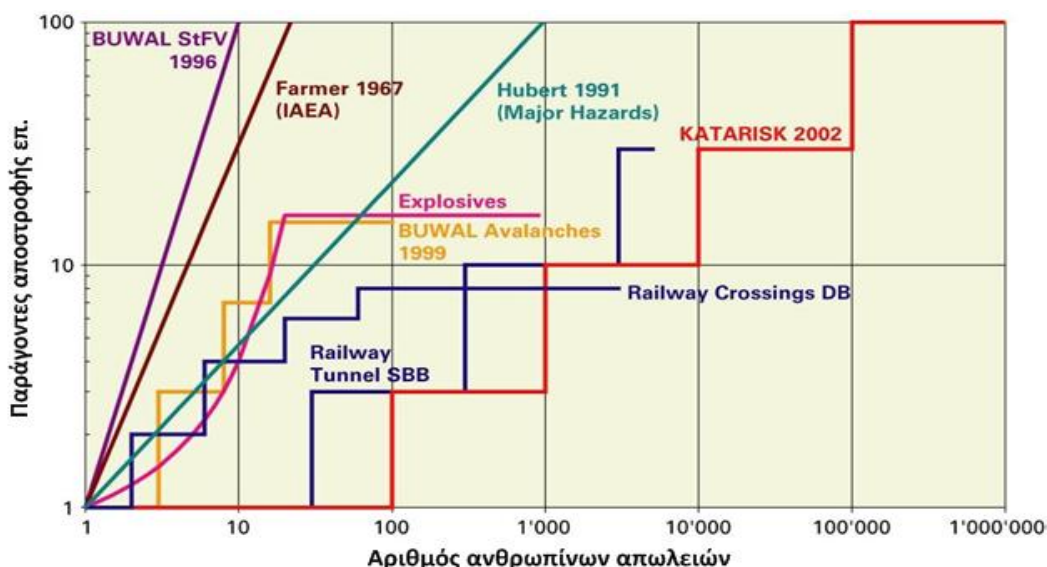
Η αναμενόμενη τιμή παρότι αποτελεί έναν απλό και αρκετά κατανοητό τρόπο αναπαράστασης της κοινωνικής επικινδυνότητας μέσω ενός και μόνο αριθμού, αδυνατεί να δημιουργήσει ένα συγκεκριμένο πλαίσιο επικινδυνότητας καθώς θεωρεί όλες τις συνέπειες ως ισότιμες, μη λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των συνεπειών κάθε σεναρίου σε αντιπαράθεση με τα διαγράμματα Συχνοτήτων-Ανθρώπινων απωλειών τα οποία αναδεικνύουν ακριβώς αυτή την διαφορά μεταξύ των ατυχημάτων.

Αντιλαμβανόμενη επικινδυνότητα: Η σοβαρότητα ενός ατυχήματος όπως γίνεται αντιληπτό από τα προαναφερθέντα, εκφράζεται κυρίως μέσω του αριθμού

ανθρωπίνων απωλειών. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις η κοινωνία αντιλαμβάνεται ένα ατύχημα ως πολύ πιο σοβαρό από ότι υποδεικνύουν οι υπολογισμένες συνέπειες. Για παράδειγμα ένα ατύχημα μικρής έκτασης σε επιβατικό τρένο με ελάχιστες ανθρώπινες απώλειες, από την κοινωνία μπορεί να θεωρηθεί πιο σοβαρό από ένα τροχαίο ατύχημα με παραπάνω από τις ίδιες ακριβώς ανθρώπινες απώλειες. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται αποστροφή επικινδυνότητας. Για να αντισταθμιστεί η αποστροφή επικινδυνότητας, προστίθεται στην εξίσωση της αναμενόμενης τιμής ο παράγοντας αποστροφής επικινδυνότητας  $\varphi$ , ως συνάρτηση των συνεπειών  $C$  ενός σεναρίου. Η εξίσωση που προκύπτει αναπαριστά την αντιλαμβανόμενη (από το κοινωνικό σύνολο) επικινδυνότητα:

$$R_p = \sum_1^n p_i \times C_i \times \varphi(C_i)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, όσο πιο σοβαρές και μεγάλες είναι οι συνέπειες ενός ατυχήματος, τόσο πιο μεγάλη είναι και η αποστροφή της κοινωνίας προς αυτό. Συνεπώς θεωρώντας ως συνέπειες τον αριθμό ανθρωπίνων απωλειών, οι συνέπειες και ο παράγοντας αποστροφής επικινδυνότητας είναι ανάλογοι όροι. Γενικά στην βιβλιογραφία παρατηρείται μια γκάμα παραγόντων ή συναρτήσεων αποστροφής, που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε διάφορα βιομηχανικά πεδία. Το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.8) αναπαριστά μερικούς από αυτούς τους παράγοντες αποστροφής επικινδυνότητας.



Σχήμα 3.8: Παράγοντες αποστροφής επικινδυνότητας

πηγή: PIARC (2010)

**Νομισματική επικινδυνότητα:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την αξιολόγηση επικινδυνότητας χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια αποδοχής της επικινδυνότητας. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται στην αρχή της βέλτιστης διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων. Επομένως είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί κάποιος όρος που να εκφράζει την σχέση μεταξύ του κόστους των επιπρόσθετων μέτρων μείωσης της επικινδυνότητας, με τα εξαγόμενα οφέλη αυτών των μέτρων. Αυτός ο όρος ουσιαστικά προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας, με το οριακό κόστος (marginal cost)  $\omega_i$ , και ονομάζεται νομισματική επικινδυνότητα. Ως οριακό κόστος ορίζεται το χρηματικό ποσό που είναι κάποιος διατεθειμένος να πληρώσει για μια οριακή αύξηση της ασφάλειας (ή μείωση της επικινδυνότητας). Στο πλαίσιο των συνεπειών, εκφρασμένων σε αριθμό ανθρωπίνων απωλειών, αυτός όρος αποτελεί ουσιαστικά την προθυμία κάποιου να πληρώσει για να σώσει μια ανθρώπινη ζωή.

Η μαθηματική αναπαράσταση της νομισματικής επικινδυνότητας δίνεται παρακάτω:

$$R_m = \sum_1^n p_i \times C_i \times \omega_i$$

### **3.3 Συστημικές μέθοδοι αποτίμησης επικινδυνότητας**

Οι συστημικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους αποτίμησης της επικινδυνότητας οδικών σηράγγων. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της δυνατότητας, που προσφέρουν οι συγκεκριμένες αποτιμήσεις επικινδυνότητας, σύγκρισης του συνολικού επιπέδου επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων (PIARC, 2008a). Όπως γίνεται κατανοητό, η συστημική προσέγγιση της επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων απαιτεί την χρήση ποσοτικών μεθόδων, στα διάφορα επιμέρους στάδια των αποτιμήσεων επικινδυνότητας. Πρακτικά λοιπόν, οι συστημικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, αποτελούν το ανάλογο των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε άλλους βιομηχανικούς κλάδους.

#### **3.3.1 Γενικές αρχές συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας**

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, σκοπός των συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης των σεναρίων ατυχημάτων καθώς επίσης των σχετιζόμενων συνεπειών τους.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, η προσέγγιση που ακολουθείται είναι ο διαχωρισμός ολόκληρου του συστήματος σε υποσυστήματα και στοιχεία. Ο

διαχωρισμός αυτός σταματάει στο σημείο όπου περαιτέρω δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, ή τα διαθέσιμα δεδομένα δεν είναι ουσιώδη. Παρότι υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις διάφορες συστημικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας, η μεγάλη πλειοψηφία αυτών των μεθόδων αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα, τα οποία δίνονται γραφικά στο **Σχήμα 3.9** (Høj & Kröger, 2002; Kazaras et al 2012):

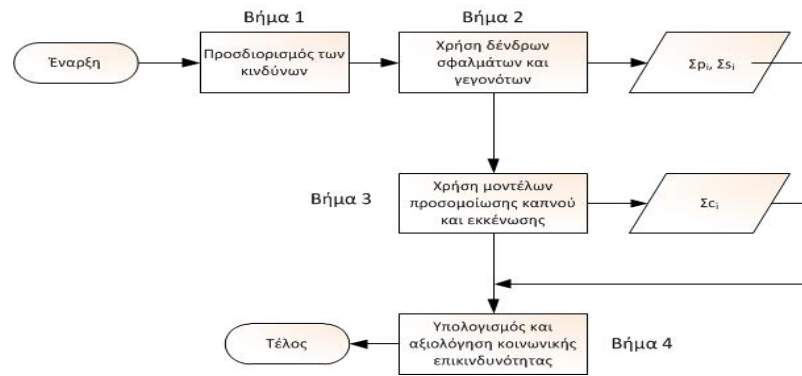
1. Προσδιορισμός των κινδύνων (π.χ. πυρκαγιά, έκρηξη, διαρροή, πλημμύρα, κτλ) και επιλογή των σχετικών κρίσιμων συμβάντων.
2. Χρήση των δένδρων συμβάντων και των δένδρων σφαλμάτων για την περιγραφή της αλληλουχίας γεγονότων τα οποία μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα της οδικής σήραγγας από ένα κρίσιμο συμβάν (trigger event) σε μια μη επιθυμητή τελική κατάσταση (end state). Εν ολίγοις, σε αυτό το βήμα γίνεται καθορισμός των δυνατών σεναρίων ατυχημάτων και υπολογισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης τους.
3. Χρήση μοντέλων εκτίμησης των συνεπειών, για τον υπολογισμό του αναμενόμενου αριθμού ανθρωπίνων απωλειών για τα σενάρια ατυχημάτων που έχουν ήδη προσδιοριστεί. Συγκεκριμένα, μοντέλα υπολογισμού της διασποράς του καπνού χρησιμοποιούνται για τα σενάρια στα οποία εμπλέκεται εμφάνιση πυρκαγιάς, έτσι ώστε να εκτιμηθεί το εύρος των περιοχών όπου μπορούν να προκληθούν θάνατοι στον εκτεθειμένο πληθυσμό. Στη συνέχεια εισάγονται μοντέλα υπολογισμού εκκένωσης των οδικών σηράγγων ούτως ώστε να προβλεφθεί αυτός ακριβώς ο εκτεθειμένος πληθυσμός.
4. Αφού υπολογισθούν η πιθανότητα εμφάνισης και οι συνέπειες κάθε σεναρίου, οι δείκτες κοινωνικής επικινδυνότητας υπολογίζονται και αξιολογούνται.<sup>3</sup>

Αρχική απαίτηση κατά την διενέργεια ποσοτικής αποτίμησης επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες είναι η κατανόηση του ίδιου του συστήματος της σήραγγας που μελετάται. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού των διαφόρων κινδύνων. Από τους κινδύνους μπορούν έπειτα να καθοριστούν τα κρίσιμα συμβάντα. Όπως γίνεται αντιληπτό, στο πρώτο βήμα γίνεται προσπάθεια να απαντηθεί το πρώτο από τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει κάθε ποσοτική

---

<sup>3</sup>Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα παραπάνω βήματα τα τρία πρώτα ουσιαστικά αποτελούν την διαδικασία ανάλυσης επικινδυνότητας, έτσι όπως ορίστηκε παραπάνω.





Σχήμα 3.9: Τα βήματα των συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας

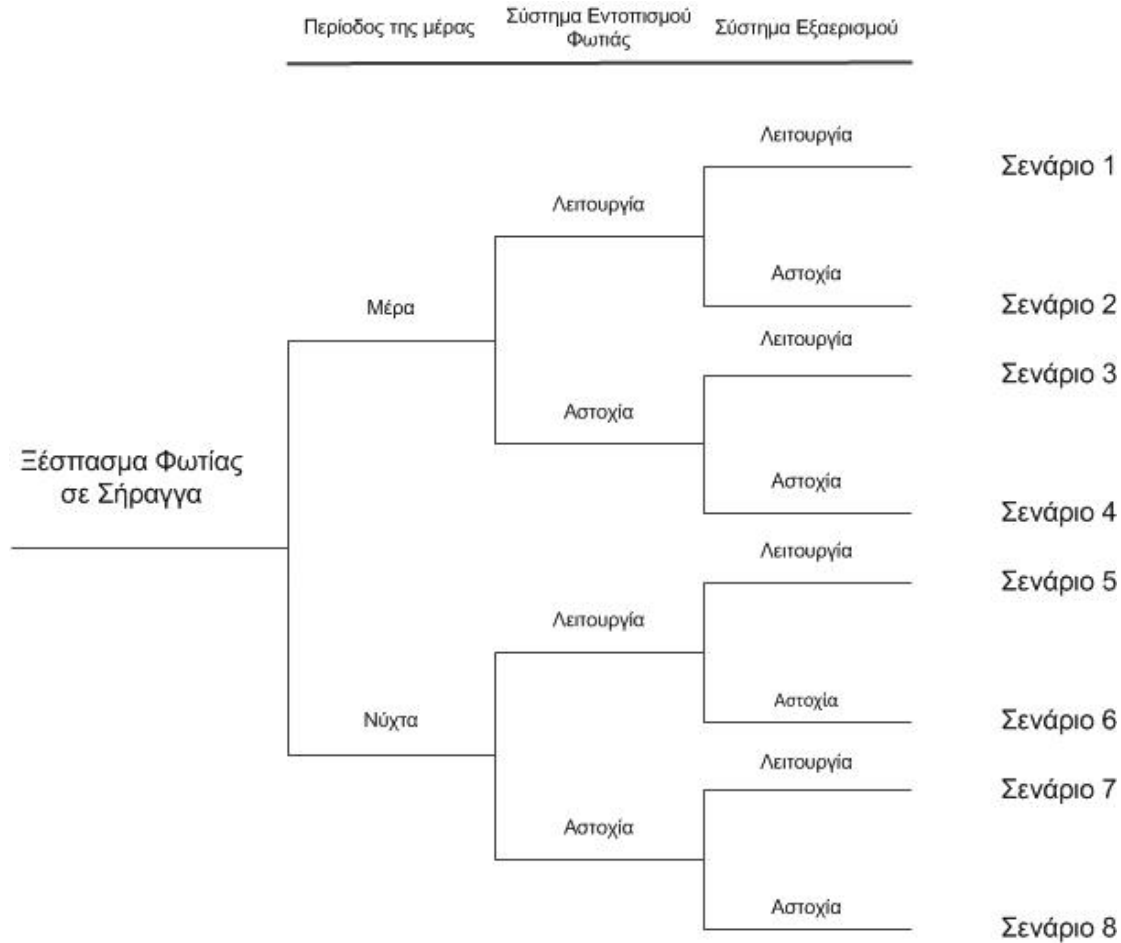
αποτίμηση επικινδυνότητας και στα οποία αναφερθήκαμε σε προηγούμενη ενότητα, δηλαδή στο «Τι μπορεί να πάει λάθος;». Η απάντηση αυτή δίνεται μέσω ενός εύρους μεθόδων, όπως της ανάλυσης τι-αν (what-if analysis), της Ανάλυσης Αποτυχίας και Αποτελεσμάτων (FMEA), της μελέτης Κινδύνου και Λειτουργικότητας (HAZOP) και λιστών ελέγχου (checklist).

Αφού καθοριστούν τα κρίσιμα συμβάντα στο δεύτερο βήμα προσδιορίζονται όλα τα πιθανά σενάρια ατυχημάτων με την χρήση δένδρων γεγονότων. Τα δένδρα γεγονότων είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο κατά την ανάλυση επικινδυνότητας, καθώς αποτελούν την βάση για τον υπολογισμό τόσο των πιθανοτήτων όσο και των συνεπειών του κάθε σεναρίου.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ο όρος σενάριο. Στην βιβλιογραφία ο όρος αυτός χρησιμοποιείται από πολλούς μελετητές για να δηλώσει το κάθε αποτέλεσμα ενός δένδρου γεγονότων, ενώ άλλοι μελετητές ορίζουν ως σενάριο το σύνολο των αποτελεσμάτων/τελικών καταστάσεων που προκύπτουν από ένα δένδρο γεγονότων. Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας προτιμήθηκε η πρώτη ερμηνεία, η οποία ταυτίζεται με την ερμηνεία του σεναρίου κατά την Παγκόσμια Ομοσπονδία Οδοποιίας (PIARC).

Το δένδρο γεγονότων λοιπόν αναπαριστά γραφικά όλα τα πιθανά σενάρια, που προκύπτουν από ένα κρίσιμο συμβάν, μέσα από μια σειρά γεγονότων τα οποία ονομάζονται διαδοχικά συμβάντα (sequential events). Στο **Σχήμα 3.10** βλέπουμε την μορφή ενός δένδρου γεγονότων, με κρίσιμο συμβάν το ξέσπασμα φωτιάς και διαδοχικά συμβάντα την περίοδο της μέρας, το σύστημα αυτόματου εντοπισμού φωτιάς και το σύστημα εξαερισμού. Κάθε σενάριο σύμφωνα με τους Karlan & Garrick (1981) περιγράφεται από την τριάδα επικινδυνότητας  $\{s_i, p_i, c_i\}$ , όπου για κάθε σενάριο  $s_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  ορίζεται η πιθανότητα  $p_i$  εμφάνισης του σεναρίου και

οι συνέπειες  $c_i$  του σεναρίου. Από το σύνολο των τριάδων επικινδυνότητας των σεναρίων ενός δένδρου γεγονότων θα προκύψει η συνολική επικινδυνότητα.



**Σχήμα 3.10: Δένδρο γεγονότων**

Η πιθανότητα κάθε σεναρίου  $p_i$  προκύπτει ως το γινόμενο της πιθανότητας του κρίσιμου συμβάντος και των πιθανοτήτων λειτουργίας ή αστοχίας των διαδοχικών συμβάντων,  $p_i = p_{tr} \times (p_{seq_k} \times p_{seq_{k-1}} \times \dots \times p_{seq_1})$ , όπου  $p_{tr}$  είναι η πιθανότητα του κρίσιμου συμβάντος και  $p_{seq}$  η πιθανότητα 1 έως  $k$  διαδοχικών συμβάντων. Οι πιθανότητες των διαδοχικών συμβάντων είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους και ισχύει  $p_{λειτ} = 1 - p_{αστ}$ <sup>4</sup>. Άρα για την πιθανότητα του  $k$  διαδοχικού συμβάντος ισχύει:

$$p_{seq_k} = \begin{cases} p_{λειτ} \\ 1 - p_{λειτ} \end{cases}$$

<sup>4</sup> Στο παράδειγμα του **Σχήματος 3.10**, στην περίπτωση του διαδοχικού συμβάντος περίοδος της μέρας οι πιθανότητες δεν έχουν να κάνουν με λειτουργία ή αστοχία, καθώς έτσι γίνεται αναφορά σε πιθανότητες συμβάντων που σχετίζονται με τον εξοπλισμό, άλλα για χάριν ευκολίας θεωρούμε ότι ο συγκεκριμένος συμβολισμός εκφράζει τις συμπληρωματικές πιθανότητες όλων των διαδοχικών συμβάντων.

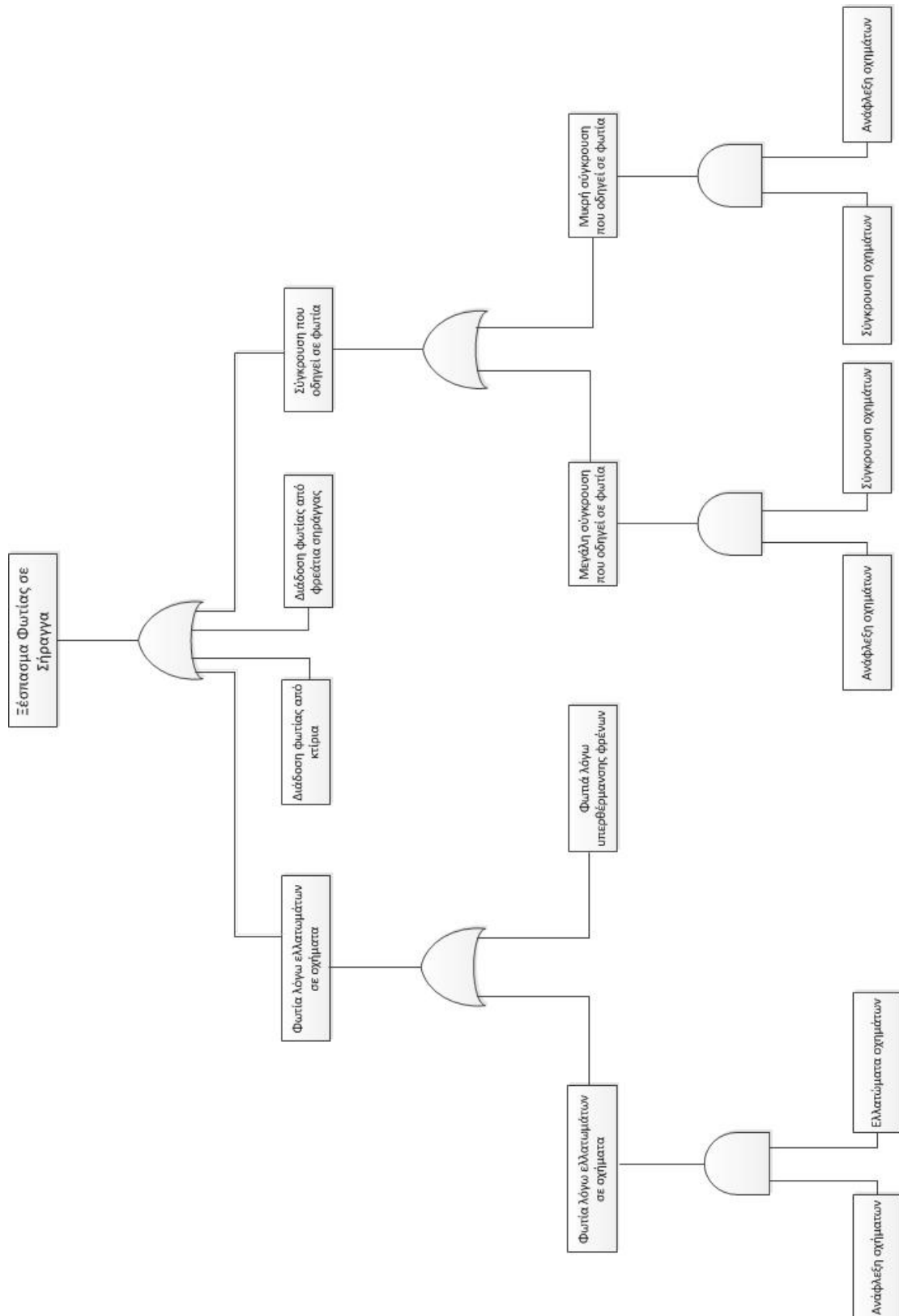
Σε αυτό το σημείο είναι καλό να αναφέρουμε λίγα λόγια για τις παραμέτρους  $p_i$  και  $c_i$  των σεναρίων. Ουσιαστικά στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει κυρίως τις αβεβαιότητες που δημιουργούνται κατά τον υπολογισμό αυτών των δυο παραμέτρων. Αναδεικνύοντας τις αβεβαιότητες αυτές, συγχρόνως αναδεικνύεται και το γιατί είναι προτιμότερο να οριστούν αυτές οι παράμετροι με τρόπους πέρα από μια αυστηρά καθορισμένη τιμή.

Αφού καθοριστούν τα σενάρια ατυχημάτων, ακολουθεί ο υπολογισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης τόσο του κρίσιμου συμβάντος όσο και των διαδοχικών συμβάντων του δένδρου γεγονότων, ούτως ώστε να προκύψουν οι πιθανότητες του κάθε σεναρίου. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την χρήση των δένδρων σφαλμάτων. Διενεργώντας την ανάλυση των δένδρων σφαλμάτων γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν οι λόγοι που οδήγησαν στην εμφάνιση ενός κρίσιμου συμβάντος ή στην αστοχία ενός διαδοχικού συμβάντος. Στα δένδρα σφαλμάτων ακολουθείται ουσιαστικά μια πορεία προς τα πίσω, με σκοπό τον εντοπισμό των αρχικών αιτιών που οδήγησαν στο κρίσιμο συμβάν ή στην αστοχία του διαδοχικού συμβάντος.

Σύμφωνα με τους Meng & Qu (2010) τα δένδρα σφαλμάτων είναι διαγράμματα που μας δείχνουν πως αναλύονται οι ανεπιθύμητες καταστάσεις ενός συστήματος χρησιμοποιώντας την άλγεβρα Boole έτσι ώστε να συνδυαστούν όλα τα υπό-επίπεδα συμβάντων, από το κρίσιμο συμβάν μέχρι τα αρχικά αίτια. Στο **Σχήμα 3.11**, παρουσιάζεται ένα δένδρο σφαλμάτων με κρίσιμο συμβάν το ξέσπασμα φωτιάς σε σήραγγα. Κάθε συμβάν στο δένδρο σφαλμάτων, σύμφωνα με τον Frantzych (1998), συνδέεται με τα αμέσως προηγούμενα και επόμενα του μέσω δύο συγκεκριμένων λογικών συμβόλων/ πυλών. Υπάρχουν λοιπόν οι AND και OR πύλες, όπου όταν χρησιμοποιούνται οι μεν AND πύλες, για να εμφανιστεί ένα συμβάν θα πρέπει να έχουν κάνει την εμφάνιση τους όλα τα προηγούμενα συμβάντα, τα οποία οδηγούν σε αυτό, ενώ όταν χρησιμοποιούνται οι πύλες OR για να εμφανιστεί ένα συμβάν αρκεί να έχει λάβει χώρα ένα από τα συμβάντα που μπορούν να οδηγήσουν σε αυτό.

Αφού δημιουργηθεί το δένδρο σφαλμάτων υπολογίζεται η πιθανότητα του κρίσιμου συμβάντος ή του διαδοχικού συμβάντος. Ξεκινώντας λοιπόν από τον υπολογισμό της πιθανότητας των συμβάντων στο τελευταίο επίπεδο υπολογίζουμε ακολουθώντας μια πορεία προς τα πάνω την πιθανότητα εμφάνισης του κρίσιμου συμβάντος ή αστοχίας του διαδοχικού συμβάντος.

Έχοντας υπολογίσει την εξέλιξη καθώς επίσης τις πιθανότητες εμφάνισης των σεναρίων ατυχημάτων, το επόμενο βήμα της αποτίμησης επικινδυνότητας είναι ο εντοπισμός των δυνατών συνεπειών του κάθε σεναρίου. Μπορούν να εντοπιστούν



Σχήμα 3.11: Δένδρο Σφαλμάτων

τρεις παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι συνέπειες (Καζάρας, 2013):

- i. Τη διάδοση του καπνού ή/και της φωτιάς κατά μήκος της σήραγγας
- ii. Τη συμπεριφορά των χρηστών της σήραγγας
- iii. Την εφαρμογή των μέτρων ασφαλείας

Για να προσδιοριστεί η εξέλιξη μιας πυρκαγιάς στο εσωτερικό μιας οδικής σήραγγας, διάφορα μοντέλα προσομοίωσης τίθενται στη διάθεση των μελετητών. Ωστόσο ένα χαρακτηριστικό όλων των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε σήραγγες είναι οι αρχές στις οποίες βασίζονται. Συγκεκριμένα, όλα τα χρησιμοποιούμενα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης είναι αιτιοκρατικά. Σύμφωνα με τον Beard (1992), τα αιτιοκρατικά μοντέλα προσομοιώνουν μόνο μια δυνατή εξέλιξη της πυρκαγιάς. Σε αντίθεση με τα αιτιοκρατικά μοντέλα, υπάρχουν και τα πιθανοκρατικά μοντέλα προσομοίωσης καπνού, τα οποία λαμβάνουν υπόψη όλους τους πιθανούς τρόπους εξέλιξης της φωτιάς. Ωστόσο τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας των σηράγγων, και γι αυτόν τον λόγο δεν θα γίνει κάποιος περαιτέρω σχολιασμός.

Γενικά η εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε μια οδική σήραγγα βασίζεται σε μια σειρά από παραμέτρους, όπως (ΔΑΣ, 2011):

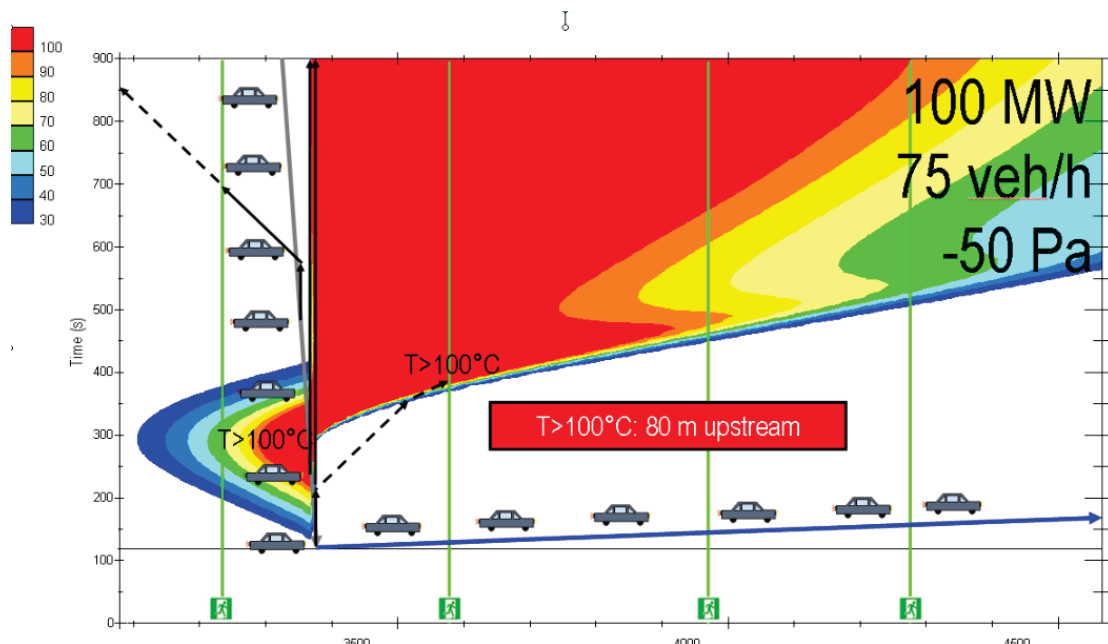
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας
- Τη διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης στα στόμια της σήραγγας και τις λοιπές περιβαλλοντικές συνθήκες σε αυτά
- Την έκλυση θερμότητας της πυρκαγιάς
- Την πιθανή μείωση της τροφοδοσίας της πυρκαγιάς με οξυγόνο
- Την μεταγωγή θερμότητας
- Το σύστημα αερισμού και 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

Τα αιτιοκρατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσπαθούν να προσδιορίσουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε οδική σήραγγα, με βάση τις παραπάνω παραμέτρους. Τα κυριότερα αιτιοκρατικά μοντέλα προσομοίωσης που

χρησιμοποιούνται παρατίθενται παρακάτω, με σειρά από τα πιο απλουστευμένα μέχρι τα πιο πολύπλοκα:

- Απλές εμπειρικές μέθοδοι και τύποι
- Φυσικά μοντέλα προσομοίωσης κλίμακας
- Μοντέλα προσομοίωσης ζωνών
- 1D Προσομοιώσεις
- 3D προσομοιώσεις, ή αλλιώς προσομοιώσεις Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics/CFD)

Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα προσομοίωσης, γίνεται προσπάθεια να οριστούν οι περιοχές εκείνες, της υπό μελέτης οδικής σήραγγας, στις οποίες εμφανίζονται μη υποφερτές συνθήκες περιβάλλοντος (untenable conditions) καθώς και ο χρόνος εμφάνισης αυτών των συνθηκών. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα (CO και CO<sub>2</sub>), της θερμοκρασία του καπνού αλλά και των επίπεδων ορατότητας, κατά μήκος του τούνελ, σε διάφορα χρονικά διαστήματα κατά την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή γραφημάτων χρόνου και χώρου, όπως στο **Σχήμα 3.12**.



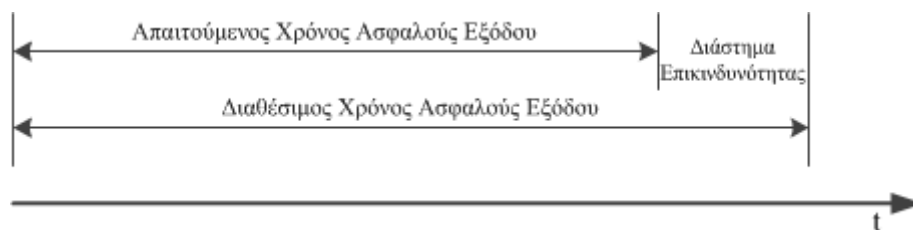
**Σχήμα 3.12: Διάδοση φωτιάς στον χρόνο και χώρο**

πηγή: PIARC, 2008a

Αφού προσδιοριστεί και η εξέλιξη της πυρκαγιάς, ο επόμενος στόχος είναι να εκτιμηθεί ο αριθμός των ατόμων που μπορεί να βρίσκονται εκτεθειμένοι σε περιοχές στις οποίες επικρατούν μη υποφερτές συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται

με προσομοίωση της συσσώρευσης των οχημάτων μέσα στη σήραγγα, σε συνθήκες ομαλής και μη ομαλής κυκλοφοριακής ροής οχημάτων. Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση των κινήσεων των χρηστών που καλούνται να εκκενώσουν την σήραγγα, εγκαταλείποντας τα οχήματα στα οποία επέβαιναν και βαδίζοντας προς τις εξόδους διαφυγής (ΔΑΣ, 2011). Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η διαδικασία έκτακτης εκκένωσης μιας οδικής σήραγγας, αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο φαινόμενο, οπότε κατά την προσομοίωση εκκένωσης, εκτός από τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη σήραγγας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ανθρώπινη συμπεριφοράς.

Έτσι ώστε να υπολογίσουμε πλέον το σύνολο των ανθρώπινων απωλειών σε περίπτωση εμφάνισης του κάθε σεναρίου στην υπό μελέτη σήραγγα, στο επόμενο βήμα εξετάζεται αν ο Απαιτούμενος Χρόνος Ασφαλούς Εξόδου (Required Safe Egress Time/RSET) των χρηστών της οδικής σήραγγας, από μια περιοχή στην οποία εμφανίζονται μη υποφερτές συνθήκες, είναι μεγαλύτερος από τον Διαθέσιμο Χρόνο Ασφαλούς Εξόδου (Available Safe Egress Time/ASET), ο οποίος αποτελεί ουσιαστικά ένα χρονικό όριο εξουδετέρωσης. Στην περίπτωση που όντως ο ΑΧΑΕ είναι μεγαλύτερος του ΔΧΑΕ, κάποιοι άνθρωποι δεν είναι σε θέση να φτάσουν σε ασφαλή περιοχή της σήραγγας, πριν από την εμφάνιση των μη υποφερτών συνθηκών. Ωστόσο και στην περίπτωση που ο ΑΧΑΕ είναι μικρότερος του ΔΧΑΕ, σύμφωνα με τους Gaunquan & Jinhui (2012), ανθρώπινες απώλειες και τραυματισμοί μπορούν να εμφανιστούν στο λεγόμενο «διάστημα επικινδυνότητας», όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.13**.



**Σχήμα 3.13: Διάστημα επικινδυνότητας**

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης επικινδυνότητας, υπολογίζεται η κοινωνική επικινδυνότητα, η οποία αναπαρίσταται συνήθως μέσω των διαγραμμάτων/καμπυλών Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών ή/και της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας (PIARC 2008a).

Ακολουθεί το τέταρτο βήμα της αποτίμησης επικινδυνότητας, όπου αξιολογούνται οι δείκτες επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των καμπυλών, η αξιολόγηση επικινδυνότητας γίνεται είτε βάση σύγκρισης με

εναλλακτικές διαδρομές ή κάποια σήραγγα αναφοράς (πρότυπη σήραγγα), είτε σύμφωνα με την θέση των καμπυλών Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών, σε σχέση με την θέση των ορίων αποδοχής.

Μια βασική και αρκετά συνηθισμένη αρχή που σχετίζεται με τα όρια αποδοχής είναι η αρχή *Τόσο Χαμηλά Όσο Λογικά Εφαρμόσιμο* (As Low As Reasonably Practicable/ALARP), όπου ουσιαστικά ορίζει ότι η επικινδυνότητα ενός συστήματος θα πρέπει να μειωθεί τόσο, όσο είναι λογικά εφαρμόσιμο (Kyritopoulos et al., 2010). Ωστόσο, αξίζει να τονιστεί ότι πολλές φορές παρατηρείται μια τεράστια αναντιστοιχία στην ερμηνεία αυτής της αρχής από τα εκάστοτε ενδιαφερόμενα μέρη (Jones-Lee & Aven, 2011).

Όταν η κοινωνική επικινδυνότητα εκφράζεται μέσω της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας, η αξιολόγηση επικινδυνότητας βασίζεται στην σύγκριση της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας που προκύπτει με ένα προκαθορισμένο ανώτατο κατώφλι, το οποίο ορίζει το αποδεκτό επίπεδο επικινδυνότητας. Αν η αναμενόμενη τιμή επικινδυνότητας είναι μικρότερη από το κατώφλι, τότε η επικινδυνότητα της υπό μελέτη σήραγγας θεωρείται αποδεκτή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θεωρείται μη αποδεκτή.

Τέλος, όταν πλέον το επίπεδο επικινδυνότητας έχει καθοριστεί και αξιολογηθεί, γίνεται η επιλογή των μέτρων ασφαλείας, αν αυτό κριθεί αναγκαίο. Τα μέτρα ασφαλείας που επιλέγονται, πρέπει να είναι ικανά να επιτύχουν είτε την μείωση της πιθανότητας εμφάνισης των ατυχημάτων που μελετήθηκαν στα σενάρια, είτε την μείωση των συνεπειών σε περίπτωση εμφάνισης αυτών των ατυχημάτων.

Η λήψη προληπτικών μέτρων, δηλαδή μέτρων τα οποία αφορούν την μείωση των πιθανοτήτων εμφάνισης των σεναρίων ατυχημάτων, μπορεί να περιλαμβάνει την μείωση των ορίων ταχυτήτων, τον έλεγχο των ταχυτήτων, την απαγόρευση αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας, την απαγόρευση μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων μέσω της υπό μελέτη οδικής σήραγγας, την επιθεώρηση στα στόμια της σήραγγας, κλπ. Για τη μείωση των συνεπειών των ατυχημάτων, χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα μέτρα μείωσης, τα οποία σχετίζονται με συστήματα εξαερισμού της σήραγγας, τον πυροσβεστικό εξοπλισμό, συστήματα τηλεπικοινωνιών, συστήματα υποστήριξης κατά την εκκένωση της σήραγγας, διαδικασίες για το κλείσιμο της σήραγγας, συστήματα αποχέτευσης, συστήματα φωτισμού καθώς επίσης με της διαδικασίες έκτακτης ανάγκης.



### 3.3.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες

Η διαδικασία των συστημικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας, έτσι όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, βρίσκει πρακτική εφαρμογή στο πεδίο των οδικών σηράγγων μέσα από διάφορα χρησιμοποιούμενα μοντέλα. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, γίνεται αναλυτική περιγραφή του Αυστριακού μοντέλου επικινδυνότητας σηράγγων TuRisMo, του Ολλανδικού μοντέλου TUNPRIM RWS-QRA, του μοντέλου QRAFT, καθώς επίσης του DG-QRAM μοντέλου, του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ/ΟΕCD) σε συνεργασία με την Παγκόσμια Ομοσπονδία Οδοποιίας (PIARC) (Καζάρας, 2013).

#### 3.3.2.1 TuRisMo

Στο μοντέλο TuRisMo (PIARC, 2008a) μελετώνται κυρίως μηχανικά ατυχήματα (π.χ. ατυχήματα τα οποία σχετίζονται με τον τεχνικό εξοπλισμό των οδικών σηράγγων) καθώς επίσης ατυχήματα τα οποία περιλαμβάνουν την εκδήλωση πυρκαγιάς μικρής και μεσαίας έντασης. Οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη από το συγκεκριμένο μοντέλο, σχετίζονται με:

- I. Τις κυκλοφοριακές συνθήκες της σήραγγας
- II. Τα χαρακτηριστικά της υποδομής
- III. Το σύστημα εξαερισμού της σήραγγας
- IV. Την διαδικασία εκκένωσης της σήραγγας

Στο μοντέλο χρησιμοποιείται ένα δένδρο γεγονότων για να περιγραφεί η αλληλουχία των γεγονότων, η οποία ξεκινά από ένα κρίσιμο συμβάν, όπως η σύγκρουση δυο οχημάτων, και καταλήγει σε μια μη επιθυμητή τελική κατάσταση. Για να καθοριστούν οι πιθανότητες εμφάνισης των κρίσιμων συμβάντων και των τελικών καταστάσεων, εισάγονται στο μοντέλο ποσοστά εμφάνισης ατυχημάτων στο εσωτερικό της υπό μελέτη σήραγγας, τα οποία μπορούν να προκύψουν από στατιστική μελέτη διαφόρων βάσεων δεδομένων. Για τον υπολογισμό των συνεπειών των σεναρίων ατυχημάτων, το TuRisMo συνδυάζει ένα μοντέλο διασποράς καπνού με ένα μοντέλο εκκένωσης. Η διάδοση του καπνού βασίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης του εξαερισμού για διαφόρων εντάσεων πρότυπες φωτιές, όπως των 5MW και των 30MW, και για διάφορα συστήματα εξαερισμού. Η προσομοίωση της εκκένωσης της οδικής σήραγγας συνοδεύεται από ένα λογισμικό πακέτο το οποίο προσδιορίζει την επίδραση του καπνού στους χρήστες της οδικής σήραγγας,

σύμφωνα με την συνολική κλασματική δραστική δόση (Fractional Effective Dose/FED).

Στην περίπτωση σεναρίων ατυχημάτων στα οποία υπάρχει τροχαίο ατύχημα χωρίς την εκδήλωση πυρκαγιάς, οι συνέπειες εκτιμούνται με την χρήση στατιστικών στοιχείων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων σχετιζόμενες με τις συνέπειες των τροχαίων ατυχημάτων.

Η προκύπτουσα επικινδυνότητα εκφράζεται μέσω της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας, ενώ τα ποσοστά συνεισφοράς των μηχανικών ατυχημάτων στη συνολική επικινδυνότητα παρουσιάζονται χωριστά από τα ατυχήματα που σχετίζονται με την εκδήλωση πυρκαγιάς. Η αναμενόμενη τιμή επικινδυνότητας που εξάγεται από το μοντέλο, κατά την διαδικασία αξιολόγησης επικινδυνότητας, συγκρίνεται είτε με μια πρότυπη σήραγγα, δηλαδή μια σήραγγα με τα ίδια χαρακτηριστικά και η οποία πληροί τις προϋποθέσεις της Κοινοτικής Οδηγίας 2004/54/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είτε με απόλυτα κριτήρια επικινδυνότητας.

#### 3.3.2.2 *TURNPRIM RWS-QRA*

Το μοντέλο TURNPRIM RWS-QRA (Brussard et al., 2001) είναι ουσιαστικά ένα υπολογιστικό φύλλο (spreadsheet) το οποίο εστιάζει στην εκτίμηση του επιπέδου επικινδυνότητας οδικών σηράγγων μονής κατεύθυνσης. Το μοντέλο βασίζεται σε κρίσιμα συμβάντα, τα οποία σχετίζονται με τροχαία ατυχήματα, την εμφάνιση πυρκαγιάς, εκρήξεις και έκλυση τοξικών ουσιών. Η πιθανότητες εμφάνισης των κρίσιμων συμβάντων προκύπτουν από στατιστικά στοιχεία, ενώ γίνεται χρήση ενός δένδρου γεγονότων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των τελικών καταστάσεων. Συγκεκριμένα οι αρχικές διακλαδώσεις του δένδρου περιγράφουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα την περίοδο της μέρας ή/και την κυκλοφοριακή συμφόρηση, ενώ οι επόμενες διακλαδώσεις καθορίζουν την θέση μέσα στη σήραγγα, στην οποία έγινε το ατύχημα, και στον τύπο των εμπλεκόμενων οχημάτων.

Κατά τον προσδιορισμό των συνεπειών, λαμβάνονται υπόψη τρεις κατηγορίες ανθρωπίνων απωλειών. Η πρώτη κατηγορία σχετίζεται με τα θύματα των τροχαίων ατυχημάτων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα θύματα τα οποία τραυματίζονται σοβαρά λόγω εγκλωβισμού σε φλεγόμενα οχήματα, και η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα θύματα λόγω πυρκαγιών, εκρήξεων και έκλυση τοξικών ουσιών. Ο αριθμός των ανθρωπίνων απωλειών και των τραυματισμένων χρηστών από τα τροχαία ατυχήματα εξάγεται από στατιστικά στοιχεία, ενώ ο αντίστοιχος των ατυχημάτων που σχετίζονται με τον εγκλωβισμό σε φλεγόμενα οχήματα, την εμφάνιση πυρκαγιάς και την έκλυση τοξικών ουσιών υπολογίζεται μέσω στατιστικών στοιχείων σε συνδυασμό με την χρήση δεσμευμένων πιθανοτήτων.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου εκφράζονται μέσω της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας καθώς επίσης από τις καμπύλες Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών (Brussard et al., 2011).

### 3.3.2.3 QRAFT

Το μοντέλο QRAFT (Meng et al., 2011) προτάθηκε από το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης, σε συνεργασία με την Αρχή Επίγειων Μεταφορών της Σιγκαπούρης. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας μη ομοιογενών οδικών σιδηρόδρομων, δηλαδή σιδηρόδρομων των οποίων τα διάφορα χαρακτηριστικά, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος ή ακόμη η γεωμετρία της ίδιας της σιδηρόδρομου, διαφοροποιούνται στα επιμέρους τμήματα στα οποία χωρίζεται η σιδηρόδρομος. Το μοντέλο QRAFT αποτελείται από επτά κρίσιμα συμβάντα:

1. ξέσπασμα πυρκαγιάς
2. πλημμύρα στη σιδηρόδρομος
3. διασπορά τοξικών αερίων
4. κατάρρευση μέρους της σιδηρόδρομου
5. τροχαίο ατύχημα
6. έκρηξη
7. διαρροή επικίνδυνων εμπορευμάτων

Με βάση τα παραπάνω κρίσιμα συμβάντα, το δένδρο γεγονότων εισάγεται έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα πιθανά σενάρια ατυχημάτων. Για την εκτίμηση των συνεπειών του κάθε σεναρίου ατυχημάτων, γίνεται χρήση μιας σειράς διαδικασιών, καθώς λαμβάνεται υπόψη η απόδοση δεκαεννέα ηλεκτρομηχανολογικών εξαρτημάτων. Η συνολική επικινδυνότητα εκφράζεται μέσω των καμπυλών Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών.

### 3.3.2.4 DG-QRAM

Το μοντέλο ποσοτικής αποτίμησης επικινδυνότητας επικίνδυνων εμπορευμάτων (Dangerous Goods QRA Model/DG-QRAM) ποσοτικοποιεί την επικινδυνότητα που σχετίζεται με την μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων σε συγκεκριμένες οδικές διαδρομές. Για μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, απαιτείται να εξεταστούν όλα τα είδη επικίνδυνων υλικών, καθώς επίσης άλλες πιο γενικές μεταβλητές, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες. Καθώς είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να καλυφθούν όλες οι δυνατές συνθήκες, το μοντέλο αυτό αποτελείται από 13 διαφορετικά σενάρια ατυχημάτων. Αυτά τα σενάρια είναι αντιπροσωπευτικά των κατηγοριών επικίνδυνων εμπορευμάτων, όπως ορίζονται από την Ευρωπαϊκή

Συμφωνία για τη Διεθνή Οδική Μεταφορά Επικίνδυνων Εμπορευμάτων (ADR). Ακόμη, τα εν λόγω σενάρια έχουν επιλεγεί κατά αυτόν τον τρόπο, έτσι ώστε να εξετάζουν διάφορες σοβαρές επιπτώσεις όπως η υπερπίεση, καθώς επίσης οι θερμικές και τοξικές επιδράσεις (PIARC 2008a). Τα σενάρια που εξετάζονται από το DG-QRAM είναι τα εξής (ΔΑΣ, 2011):

1. Πυρκαγιά σε φορηγό χωρίς επικίνδυνα εμπορεύματα έντασης 20MW
2. Πυρκαγιά σε φορηγό χωρίς επικίνδυνα εμπορεύματα έντασης 100MW
3. BLEVE<sup>5</sup> 50 κιλών LPG σε φιάλες
4. Λίμνη πυρκαγιάς βενζίνης
5. Έκρηξη νέφους ατμών βενζίνης σε βυτίο
6. Διαφυγή χλωρίου
7. BLEVE φορτίου χύδην LPG
8. Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην LPG
9. Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην LPG
10. Διαφυγή αμμωνίας
11. Διαφυγή φορτίου χύδην ακρολεΐνης
12. Διαφυγή ακρολεΐνης σε κυλίνδρους
13. BLEVE μη αναφλέξιμου αερίου (CO<sub>2</sub>)

Η ποσοτική ανάλυση των συνεπειών του μοντέλου βασίζεται στην χρήση στατιστικών στοιχείων (ποσοστά ατυχημάτων) και δεσμευμένων πιθανοτήτων. Η ανάλυση των συνεπειών στηρίζεται σε ένα υπολογιστικό φύλλο, το οποίο ονομάζεται «pre-conditioner» και προσδιορίζει τις περιοχές της οδικής σήραγγας που επηρεάζονται από κάθε σενάριο, καθώς επίσης τις σχετιζόμενες συνέπειες.

Το αποτέλεσμα του DG-QRAM εκφράζεται μέσω της αναμενόμενης τιμής επικινδυνότητας και των καμπυλών Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών, ενώ η αξιολόγηση επικινδυνότητας γίνεται είτε συγκρίνοντας εναλλακτικές οδικές διαδρομές είτε σύμφωνα με την αρχή «Τόσο Χαμηλά Όσο Λογικά Εφαρμόσιμο» (Kirytopoylos et al., 2009; Kirytopoulos & Kazaras, 2011).

### 3.3.2.5 Λοιπά μοντέλα αποτίμησης επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες

Στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφορα μοντέλα αποτίμησης επικινδυνότητας, παρόμοια με τα παραπάνω. Συγκεκριμένα άλλα μοντέλα που έχουν προταθεί για την αποτίμηση της επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων είναι το Ιταλικό Μοντέλο Ανάλυσης Επικινδυνότητας (Italian Risk Analysis Model/ IRAM), το γερμανικό

<sup>5</sup> Έκρηξη διαστελλόμενων ατμών αναβράζοντος υγρού (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion/BLEVE)

μοντέλο BAST (PIARC, 2008a), ένα πιθανοκρατικό μοντέλο αποτίμησης επικινδυνότητας που προτάθηκε από τον Nyvlt (et al., 2011), το μοντέλο «Διαδικασία ποσοτικής ανάλυσης επικινδυνότητας» (Quantitative Risk Analysis Procedure/QRAP) που προτάθηκε από τους Persson και Tusi (PIARC 2008a).

Ακόμη, οι Saccomanno & Haastруп (2002) εισήγαγαν μια μέθοδο για την αξιολόγηση της επίδρασης των μέτρων ασφαλείας κατά την μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων μέσα από οδικές σήραγγες, η οποία ουσιαστικά αποτελεί βελτίωση του DG-QRAM καθώς λαμβάνονται υπόψη επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας, ενώ ο Bubbico (et al., 2009) πρότεινε μια απλοποιημένη μέθοδο για την ανάλυση της μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων μέσω οδικών σηράγγων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, στην βιβλιογραφία συναντάται μια πληθώρα δημοσιεύσεων και ερευνών που σχετίζονται με τις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες. Ωστόσο, οι δημοσιεύσεις που εστιάζουν στις αβεβαιότητες που συναντώνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας είναι συγκριτικά λίγες. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας γίνεται μια προσπάθεια να προσδιοριστούν αυτές οι αβεβαιότητες.

## 4 Αβεβαιότητα στις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων

### 4.1 Αβεβαιότητα στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε γενικό πλαίσιο

Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, κάθε αποτίμηση επικινδυνότητας αποτελεί μια αρκετά περίπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Παρόλα αυτά οι συγκεκριμένες διαδικασίες βασίζονται σε μια σειρά από υποθέσεις και απλοποιήσεις. Γι αυτόν τον λόγο η αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως αναπόσπαστο στοιχείο κατά την διενέργεια αποτίμησης επικινδυνότητας (Démotier et al. 2003). Ακόμη, σύμφωνα με τον Apostolakis (2004), μια από τις πολλές χρήσεις των ποσοτικών αποτιμήσεων επικινδυνότητας είναι η ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που εμφανίζονται στα αποτελέσματα της ανάλυσης<sup>6</sup>.

Στην ενότητα αυτή, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στους διάφορους τρόπους κατηγοριοποίησης της αβεβαιότητας με στόχο να γίνει κατανοητή η έννοια της αβεβαιότητας, καθώς επίσης και οι τρόποι αναπαράστασης της. Στην βιβλιογραφία συναντάται μια μεγάλη γκάμα κατηγοριοποιήσεων της αβεβαιότητας, κυρίως λόγω της προσπάθειας των μελετητών να διαχειριστούν την αβεβαιότητα με έναν οργανωμένο και συγκροτημένο τρόπο. Ωστόσο, στη παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν οι δυο σημαντικότερες κατηγοριοποιήσεις της αβεβαιότητας.

Μια από τις παλαιότερες κατηγοριοποιήσεις της αβεβαιότητας προτάθηκε από τον Hickman (et al., 1983) στο πλαίσιο της δημοσίευσης του Οδηγού για τις διαδικασίες πιθανοκρατικής αποτίμησης επικινδυνότητας, της Αμερικάνικης Ρυθμιστικής Επιτροπής Πυρηνικής Ενέργειας (U.S. Nuclear Regulatory Commission). Σύμφωνα με τον Hickman, η αβεβαιότητα μπορεί να χωριστεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Αβεβαιότητα μοντέλου (Model uncertainty)
- Παραμετρική αβεβαιότητα (Parameter uncertainty)
- Αβεβαιότητα πληρότητας (Completeness uncertainty)

Αβεβαιότητα μοντέλου: Σύμφωνα με τον Abrahamsson (2002), η χρήση μοντέλων είτε εννοιολογικών είτε μαθηματικών, είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος αναπαράστασης της πραγματικότητας στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας. Από την

---

<sup>6</sup> Βλέπε **Ενότητα 3.1.2**

στιγμή που είναι πρακτικά αδύνατον να δημιουργηθεί ένα «τέλειο» μοντέλο, δηλαδή ένα μοντέλο που θα μιμείται την πραγματικότητα επακριβώς, ακόμη και στην ελάχιστη δυνατή λεπτομέρεια, πάντα θα υπάρχουν περιορισμοί στην χρήση οποιουδήποτε υπάρχοντος μοντέλου. Ένα ανάλογο παράδειγμα για την επεξήγηση του προβλήματος είναι τα έργα ζωγραφικής, τα οποία, ηθελημένα ή μη, αδυνατούν να αναπαραστήσουν την πραγματικότητα στην παραμικρή της λεπτομέρεια. Το σύνολο των υποθέσεων και απλοποιήσεων της πραγματικότητας, στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας, δημιουργεί αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου, η οποία ονομάζεται αβεβαιότητα μοντέλου.

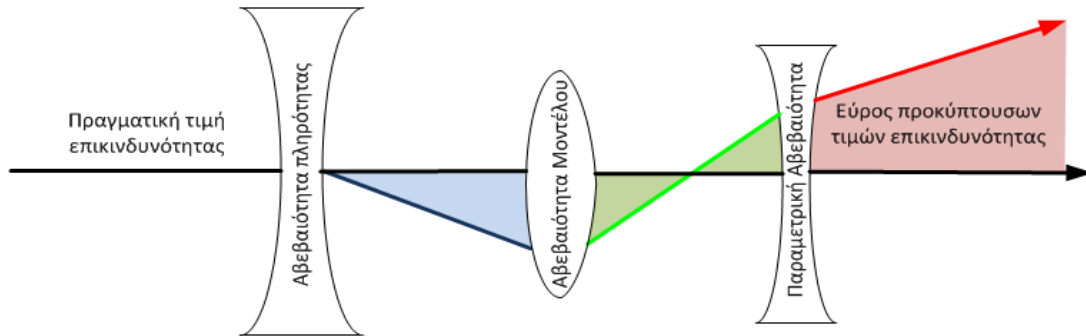
Παραμετρική αβεβαιότητα: Όλα τα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας βασίζονται σε μια σειρά από παραμέτρους, όπως προκύπτει και από το προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα, βασίζονται συνήθως σε στατιστικά δεδομένα, τα οποία μπορεί να είναι ανακριβή, ελλιπή ή ακόμη και ακατάλληλα. Από την άλλη, πολλές φορές οι τιμές των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων μπορεί να εξαρτώνται από την φυσική μεταβλητότητα των εν λόγω παραμέτρων. Ως παραμετρική αβεβαιότητα, μπορεί να θεωρηθεί η αβεβαιότητα που συναντάται κατά την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων των μοντέλων.

Αβεβαιότητα πληρότητας: Η αβεβαιότητα πληρότητας, σχετίζεται με τον βαθμό στον οποίο μια αποτίμηση επικινδυνότητας λαμβάνει υπόψη όλα τα δεδομένα και χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάται (Parry, 1996). Λόγω της περιπλοκότητας των περισσότερων συστημάτων, για τα οποία διενεργείται αποτίμηση επικινδυνότητας, οι μελετητές πολλές φορές καλούνται να κάνουν μια επιλογή, σχετικά με τους τομείς του συστήματος που θα μελετηθούν περαιτέρω. Έτσι υπάρχει περίπτωση να αμελούνται σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επικινδυνότητα του συστήματος, και εν τέλει να δημιουργείται αβεβαιότητα.

Σύμφωνα με τον Abrahamsson (2002), είναι πολύ σημαντικό να είναι σε θέση οι μελετητές να γνωρίζουν τους τύπους αβεβαιότητας, οι οποίες συναντώνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας, καθώς έτσι είναι σε θέση διαχειριστούν καλύτερα τις αβεβαιότητες που εισάγονται. Αυτό συμβαίνει για δυο λόγους:

- ✓ Διαφορετικοί τύποι αβεβαιότητας απαιτούν και διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης
- ✓ Αν είναι γνωστές οι αβεβαιότητες καθώς και ο τύπος τους, υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί η κατάλληλη μέθοδος για την μείωση τους

Για να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα παραπάνω, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα επεξηγηματικό παράδειγμα, όπως αυτό του **Σχήματος 4.1**. Εν ολίγοις, η πραγματική τιμή της επικινδυνότητας ορίζεται από τη μαύρη γραμμή, η οποία διαθλάται όταν περνάει μέσα από τους προαναφερθέντες τύπους αβεβαιότητας, οι οποίοι απεικονίζονται σχηματικά μέσω συγκλινόντων και αποκλινόντων φακών.



**Σχήμα 4.1: Πραγματικές συνθήκες συστήματος και αβεβαιότητες**

Πέρα από την παραπάνω κατηγοριοποίηση, μια από τις πιο διαδεδομένες κατηγοριοποιήσεις της αβεβαιότητας, είναι η κατηγοριοποίηση σε στοχαστική αβεβαιότητα (stochastic uncertainty) και επιστημική αβεβαιότητα (epistemic uncertainty). «Η στοχαστική αβεβαιότητα αναφέρεται στην τυχαιότητα (randomness) λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας του συστήματος, ενώ η επιστημική, ή αλλιώς βασισμένη στη γνώση αβεβαιότητα (knowledge-based uncertainty) αναφέρεται στην ανακρίβεια λόγω της έλλειψης γνώσεων και πληροφοριών για το σύστημα» (Aven & Zio, 2011).

Πρακτικά, η στοχαστική αβεβαιότητα σχετίζεται με την μεταβλητότητα του συστήματος, δηλαδή το εύρος των δυνατών αποτελεσμάτων του υπό μελέτη συστήματος, ενώ η επιστημική αβεβαιότητα σχετίζεται με το επίπεδο γνώσης μας πάνω στο σύστημα, όπως π.χ. σε τι βαθμό έχουμε εντοπίσει όλες τις παραμέτρους ή όλα τα πιθανά αποτελέσματα του υπό μελέτη συστήματος. Από τα παραπάνω προκύπτει η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δυο αβεβαιοτήτων, αφού ενώ η επιστημική αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί όσο μεγαλύτερη είναι η γνώση του μελετητή για το σύστημα, η στοχαστική αβεβαιότητα είναι αδύνατον να μειωθεί.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στο παράδειγμα του Hofer (1996), στο οποίο αναδεικνύονται αυτά τα δύο διαφορετικά είδη αβεβαιότητας. Στο παράδειγμα αυτό ο Hofer έκανε την υπόθεση ότι «υπάρχουν δύο ζάρια σε ένα τραπέζι. Το A (πρώτο) ζάρι, θεωρείται ότι στριφογυρνάει συνεχώς πάνω στο τραπέζι. Το B (δεύτερο) ζάρι, βρίσκεται ακίνητο πάνω στο τραπέζι και είναι καλυμμένο με ένα



καπάκι, χωρίς να είναι γνωστό ποίος είναι ο αριθμός της πάνω μεριάς του. Σε κάθε στιγμή ο αριθμός που δείχνει το Β ζάρι και ο αριθμός που θα δείξει το Α ζάρι είναι *αβέβαιοι*». Η αβεβαιότητα για το αποτέλεσμα του Α ζαριού λογίζεται ως στοχαστική αβεβαιότητα, καθώς η τιμή του ζαριού υπόκεινται στη φυσική μεταβλητότητα του ίδιου του συστήματος, ενώ στην τιμή του Β ζαριού εισάγεται επιστημική αβεβαιότητα λόγω έλλειψης πληροφοριών για το σύστημα.

Ο πιο διαδεδομένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος για να αναπαραστήσουμε τις αβεβαιότητες είναι ο μαθηματικός τύπος των πιθανοτήτων. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ακόμη και στον ορισμό της πιθανότητας, δεν υπάρχει ομοφωνία ανάμεσα στα μέλη της επιστημονικής κοινότητας καθώς αυτός γίνεται αντιληπτός με ποικίλους τρόπους.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Paté-Cornell (1996) υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον ορισμό της πιθανότητας. Ο πρώτος τρόπος προσέγγισης ορίζει την πιθανότητα μέσω της οριακής σχετικής συχνότητας (limiting frequency) εμφάνισης ενός γεγονότος Α μέσα σε ένα n αριθμό επαναλήψεων, και η οποία είναι εφαρμόσιμη μόνο όταν οι επαναλήψεις του συστήματος που μελετάται είναι τόσο ανεξάρτητες μεταξύ τους όσο και ταυτόσημες. Ο μαθηματικός τύπος της συγκεκριμένης πιθανότητας, η οποία ονομάζεται *αντικειμενική πιθανότητα*, δίνεται παρακάτω:

$$P_A = n_A/n$$

Από τη άλλη, όταν η πιθανότητα ορίζεται κατά Bayes, ουσιαστικά προσδιορίζεται μέσω ενός βαθμού πίστης (degree of belief). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εκτός από τα στατιστικά δεδομένα λαμβάνεται υπόψη και η γνώμη των ειδικών κατά τον προσδιορισμό της πιθανότητας. Καθώς η συγκεκριμένη πιθανότητα βασίζεται στη γνώμη των ειδικών, η οποία είναι υποκειμενική, η κοινή της ονομασία είναι *υποκειμενική πιθανότητα*. Η υποκειμενική πιθανότητα βασίζεται στην χρήση του θεωρήματος Bayes, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P_{A|B} = \frac{P_{B|A} \times P_A}{P_B}$$

Κατ' επέκταση η ανάλυση κατά Bayes δίνει την δυνατότητα επικαιροποίησης των αποτελεσμάτων όταν νέα στατιστικά δεδομένα είναι διαθέσιμα.

Οι δυο προσεγγίσεις της πιθανότητας, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, σχετίζονται άμεσα με τη στοχαστική και την επιστημική αβεβαιότητα. Επιστρέφοντας στο παράδειγμα του Hofeg, «η στοχαστική αβεβαιότητα που εισάγεται στην τιμή που θα δείξει το Α ζάρι, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την χρήση αντικειμενικών

πιθανοτήτων, μελετώντας την μεταβλητότητα του συστήματος, ενώ για την διαχείριση της επιστημικής αβεβαιότητας του ζαριού  $B$ , από την στιγμή που αυτό μπορεί να έχει μόνο μια πραγματική τιμή, οι οριακές σχετικές συχνότητες δεν έχουν νόημα στην προκειμένη περίπτωση, οπότε πρέπει να εισαχθούν βαθμοί πίστης, για την περίπτωση που κάθε ένα από τα έξι νούμερα του ζαριού είναι από την πάνω μεριά. Κατά αυτόν τον τρόπο ποσοτικοποιείται το επίπεδο γνώσης του μελετητή για το  $B$  ζάρι».

Παρά την χρησιμότητα τους, τόσο οι αντικειμενικές όσο οι υποκειμενικές πιθανότητες παρουσιάζουν κάποια προβλήματα στην αναπαράσταση της αβεβαιότητας. Η έλλειψη ιστορικών δεδομένων, εγείρει πολλές φορές ερωτήματα για την χρήση των αντικειμενικών πιθανοτήτων, ενώ από την άλλη, η κρίση των ειδικών, στην οποία βασίζονται οι υποκειμενικές πιθανότητες, μπορεί να είναι κακή ή βασισμένη σε λάθος παραδοχές (Aven & Zio, 2011). Έτσι μια σειρά από διαφορετικούς τρόπους αναπαράστασης της αβεβαιότητας έχει προταθεί, όπως τα διαστήματα πιθανοτήτων (interval probabilities) και η θεωρία της ασαφούς λογικής.

Παρότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι πολύ σημαντικό να γίνονται γνωστά τα είδη αβεβαιότητας που εισάγονται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας, αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές φορές είναι πολύ δύσκολο να γίνει διαχωρισμός των αβεβαιοτήτων σε κατηγορίες, όπως θα γίνει αντιληπτό και στην επόμενη ενότητα.

## **4.2 Αβεβαιότητα στο πεδίο των οδικών σηράγγων**

Όπως σε κάθε αποτίμηση επικινδυνότητας έτσι και στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων εισάγεται αβεβαιότητα. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν όσο το δυνατόν καλύτερα όλες αυτές οι πηγές αβεβαιότητας που συναντώνται στις συγκεκριμένες διαδικασίες. Η μελέτη γίνεται με βάση τα βήματα, που ακολουθούνται από τους μελετητές κατά την διενέργεια αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, και τα οποία παρουσιάστηκαν στην **Ενότητα 4.3.1**.

### **4.2.1 Αβεβαιότητα στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας**

Στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, εισάγεται αβεβαιότητα που σχετίζεται, αφενός με τον προσδιορισμό των κινδύνων και των κρίσιμων συμβάντων καθώς επίσης με την επιλογή των κρίσιμων συμβάντων που θα εξεταστούν σε βάθος, και αφετέρου με τα μοντέλα των δένδρων

γεγονότων και σφαλμάτων, και τον προσδιορισμό της εξέλιξης των σεναρίων ατυχημάτων και των πιθανοτήτων εμφάνισης κάθε σεναρίου. Σε αυτήν την ενότητα, γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού αυτής της αβεβαιότητας μέσω της κατηγοριοποίησης σε αβεβαιότητα μοντέλου, πληρότητας ή παραμέτρων.

#### 4.2.1.1 Αβεβαιότητα πληρότητας

Τόσο κατά τον προσδιορισμό των κινδύνων και κρίσιμων συμβάντων όσο και κατά την επιλογή των σεναρίων ατυχημάτων, εισάγεται αβεβαιότητα σχετικά με την επάρκεια της έρευνας που διενεργήθηκε για τον προσδιορισμό των ανωτέρω. Αυτή η αβεβαιότητα συναντάται κυρίως στους περιορισμούς των αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες που σχετίζονται με (Καζάρας, 2013):

- Τον ανθρώπινο παράγοντα
- Οργανωσιακά θέματα
- Το σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων
- Τη φθορά του συστήματος οδικών σηράγγων

Ανθρώπινος Παράγοντας: Οι όροι ανθρώπινος παράγοντας και ανθρώπινο σφάλμα συχνά χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν το ίδιο ακριβώς πράγμα, χωρίς πάντα να είναι κατανοητό το νόημα τους. Παρότι ο παραδοσιακός ορισμός του ανθρώπινου παράγοντα είναι *«η επιστημονική μελέτη της διάδρασης μεταξύ ανθρώπου και μηχανής»*, στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά μόνο στον ανθρώπινο παράγοντα που σχετίζεται με την διαδικασία διαχείρισης επικινδυνότητας. Ως εκ τούτου, θα δοθεί έμφαση στον προσδιορισμό της συνεισφοράς του ανθρώπου στην εμφάνιση και εξέλιξη ενός ατυχήματος.

Στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες, η αβεβαιότητα πληρότητας που σχετίζεται με τον ανθρώπινο παράγοντα, αφορά τόσο τα σφάλματα των οδηγών/ χρηστών της σήραγγας, όσο και την απόδοση των διαχειριστών των οδικών σηράγγων.

Τα σφάλματα των οδηγών/χρηστών των σηράγγων ανήκουν στην κατηγορία των ανθρωπίνων σφαλμάτων. Σύμφωνα με τον Larsson (et al, 2009) το ανθρώπινο σφάλμα θεωρείται ο βασικός παράγοντας των περισσότερων οδικών ατυχημάτων. Η δυσκολία εντοπισμού αυτών των σφαλμάτων από τους μελετητές έγκειται στο *«απρόβλεπτο της ανθρώπινης συμπεριφοράς, καθώς ακόμη και αν ήταν γνωστή η συμπεριφορά όλων των οδηγών/ χρηστών των σηράγγων στο παρελθόν, και πάλι η πρόβλεψη για το τι μπορεί να συμβεί δεν θα ήταν ακριβής»* (Kirytopoulos and Kazaras, 2011). Παρότι για την ανάλυση της ανθρώπινης συμπεριφοράς και τον προσδιορισμό των ανθρωπίνων σφαλμάτων είναι πολύ συνηθισμένη η χρήση

Αναλύσεων Ανθρώπινης Αξιοπιστίας (Human Reliability Analyses) κατά την διενέργεια των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, στο πεδίο των οδικών σηράγγων δεν ισχύει κάτι τέτοιο, καθώς τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας δεν είναι εξοπλισμένα με τέτοιου είδους διαδικασίες. Έτσι εγείρονται ερωτήματα κατά πόσο μπορούν να εντοπιστούν όλα τα δυνατά κρίσιμα συμβάντα που σχετίζονται με την συμπεριφορά των χρηστών των οδικών σηράγγων.

Από την άλλη, ο ρόλος των διαχειριστών των οδικών σηράγγων στην ασφαλή λειτουργία τους, είναι καθοριστικής σημασίας αφού μεταξύ άλλων περιλαμβάνει:

1. Τον συνεχή έλεγχο και διαχείριση της κυκλοφορίας των οχημάτων
2. Τον εντοπισμό τυχόν κρίσιμων συμβάντων
3. Την παροχή βοήθειας κατά την διαδικασία εκκένωσης και την επιχείρηση διάσωσης

Ωστόσο αυτή η σημαντική συνεισφορά των διαχειριστών στην ασφάλεια των οδικών σηράγγων και κυρίως ο ρόλος τους στην εξέλιξη ενός ατυχήματος φαίνεται να υποτιμάται στις υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας, καθώς η συμπεριφορά του διαχειριστή λαμβάνεται υπόψη μόνο όσον αφορά κάποιες παραμέτρους του μοντέλου, όπως ο χρόνος που ο διαχειριστής κλείνει την σήραγγα σε περίπτωση έκτακτης κατάστασης ή/και ο χρόνος που ενεργοποιεί τον εξαερισμό έκτακτης κατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο σημαντικές διαδικασίες όπως οι μηχανισμοί διαμόρφωσης της απόδοσης των διαχειριστών μένουν έξω από το πλαίσιο μελέτης των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, και έτσι ελλοχεύει ο κίνδυνός να μην προσδιορίζονται σημαντικά συμβάντα ενός δένδρου σφαλμάτων ή/και γεγονότων.

Οργανωσιακά θέματα: Οι ελλείψεις στις διαδικασίες διαχείρισης, τα οργανωσιακά θέματα καθώς επίσης η κουλτούρα ασφάλειας (safety culture) έχουν αναγνωριστεί ως κύριοι παράγοντες στην εμφάνιση ατυχημάτων σε σύνθετα συστήματα (Leveson, 2004; Rasmussen, 1997; Reason, 1997). Γι' αυτόν τον λόγο η επιρροή των οργανωσιακών παραγόντων στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών μελετητών, ενώ συγχρόνως αποτελεί ένα απαιτητικό πεδίο έρευνας τόσο των τεχνικών όσο και των κοινωνικών επιστημών. Παρόλα αυτά, στις ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων, δεν έχει ακόμη οριστεί κάποιο πλαίσιο για την περιγραφή των οργανωσιακών παραγόντων. Οι οργανωσιακές υποχρεώσεις στο πεδίο των οδικών σηράγγων μπορεί να διαφοροποιούνται από χώρα σε χώρα, ωστόσο υπάρχουν κοινά οργανωσιακά θέματα τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ασφάλεια των σηράγγων. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Τη διαχείριση της κυκλοφορίας των οχημάτων
- Την συντήρηση και επιθεώρηση των οδικών σηράγγων
- Την εκπαίδευση του προσωπικού των οδικών σηράγγων και τις διαδικασίες εκπαίδευσης
- Την προετοιμασία των σχεδίων έκτακτης κατάστασης
- Τον σχεδιασμό των ασκήσεων έκτακτης κατάστασης και την συνεργασία με τις Υπηρεσίες Έκτακτης Κατάστασης.
- Την ανάλυση παλιών ατυχημάτων

Το γεγονός ότι οι υφιστάμενες ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, δεν καλύπτουν επαρκώς τις προαναφερθείσες οργανωσιακές υποχρεώσεις, εγείρει ερωτήματα σχετικά με τον εντοπισμό των κρίσιμων και διαδοχικών συμβάντων.

Σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων: Τα συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition/ SCADA) χρησιμοποιούνται ευρέως στις σύγχρονες οδικές σήραγγες για τον έλεγχο του τεχνολογικού εξοπλισμού των σηράγγων. Τα συστήματα αυτά δίνουν την δυνατότητα στους διαχειριστές των σηράγγων να συντηρούν αποτελεσματικά τον εξοπλισμό των σηράγγων, καθώς επίσης να αντιδρούν με τον καταλληλότερο τρόπο σε περίπτωση έκτακτης κατάστασης. Συνήθως τα SCADA ελέγχουν τα παρακάτω τεχνολογικά συστήματα των οδικών σηράγγων:

- ✓ Το σύστημα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος
- ✓ Το σύστημα εξαερισμού
- ✓ Το σύστημα φωταγώγησης
- ✓ Το σύστημα πυρόσβεσης
- ✓ Το σύστημα εντοπισμού φωτιάς
- ✓ Το σύστημα επικοινωνίας
- ✓ Το σύστημα διαχείρισης της κυκλοφοριακής ροής

Για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία των SCADA, το λογισμικό τους απαιτείται να συμβαδίζει με την πιο πρόσφατη έκδοση ενός διεθνώς αναγνωρισμένου συνόλου κανόνων σχετικά με τα SCADA. Ωστόσο μια τέτοια απαίτηση ενώ διασφαλίζει την αξιοπιστία του λογισμικού, δεν διασφαλίζει απαραίτητα και την ασφάλεια των SCADA. Σύμφωνα με τους Garret & Apostolakis (1999), οι διαδικασίες αποτίμησης αξιοπιστίας του λογισμικού και αποτίμησης της επικινδυνότητας του

λογισμικού δεν σχετίζονται σε καμία περίπτωση. Από την μια, η αποτίμηση αξιοπιστίας προσδιορίζει την πιθανότητα η εκτέλεση του κώδικα του λογισμικού να διαφοροποιηθεί από τις προδιαγραφές του, ενώ από την άλλη η αποτίμηση επικινδυνότητας υπολογίζει την πιθανότητα εμφάνισης μια ενέργειας του λογισμικού που θα οδηγήσει στην εμφάνιση μια επικίνδυνης κατάστασης. Γι' αυτόν τον λόγο οι ποσοτικές αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες πρέπει να ερευνούν ποιες λειτουργίες των SCADA συστημάτων μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση ή στη κλιμάκωση ενός σεναρίου ατυχήματος.

Ωστόσο είναι απορίας άξιο κατά πόσο μπορούν να εντοπιστούν ατυχήματα που προκύπτουν από την λειτουργία του λογισμικού των SCADA, στις υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων. Με βάση τα λεγόμενα της Leveson (2004) «*το συμβάν Αστοχία Λογισμικού που εμφανίζεται πολλές φορές στα δένδρα ασφαμάτων των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, μπορεί να είναι ένα σημάδι ότι οι διαδικασίες αυτές έχουν αγγίξει πλέον τα όρια της αποτελεσματικότητας τους στην ανάλυση ατυχημάτων που σχετίζονται με την αστοχία του λογισμικού. Η προσπάθεια υπολογισμού της πιθανότητας του συμβάντος Αστοχία Λογισμικού στα δένδρα ασφαμάτων και γεγονότων, δεν έχει νόημα χωρίς πρώτα να γίνουν κατανοητοί οι τρόποι με τους οποίους το λογισμικό μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση ή/και κλιμάκωση ενός ατυχήματος*».

Από τα παραπάνω, προκύπτει ως συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του λογισμικού των SCADA δεν είναι τυχαία, και υπό αυτήν την έννοια δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μια πηγή αβεβαιότητας που μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση στοχαστικών διαδικασιών (όπως είναι οι πιθανότητες). Ουσιαστικά τα συστήματα SCADA θα ενεργήσουν ακριβώς έτσι όπως έχουν σχεδιαστεί να ενεργήσουν, και ως εκ τούτου η αβεβαιότητα τους εμπεριέχεται στο ερώτημα «Τι μπορεί να οδηγήσει το λογισμικό στο να παράγει επικίνδυνα αποτελέσματα;». Το ζητούμενο λοιπόν είναι να μπορεί να δοθεί απάντηση σε αυτό το ερώτημα. Ωστόσο, απ' ότι φαίνεται υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί στην απάντηση αυτού του ερωτήματος από τις αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, κυρίως επειδή κανένα λογισμικό δεν ακολουθεί τους φυσικούς κανόνες φθοράς και αστοχίας που ισχύουν για τα μηχανολογικά εξαρτήματα (Zio, 2009).

Φθορά του συστήματος οδικών σηράγγων: Τέλος, στο πεδίο της αβεβαιότητας πληρότητας που εισάγεται στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, εισάγεται αβεβαιότητα και στον τρόπο που προσαρμόζουν οι υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας το σύστημα των οδικών σηράγγων στην πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα, δεν φαίνεται να υπάρχει καμία

σύνδεση μεταξύ των συνθηκών των οδικών σηράγγων κατά το στάδιο του σχεδιασμού τους και των συνθηκών που επικρατούν πραγματικά σε αυτές. Αυτή η στατική απεικόνιση του συστήματος των οδικών σηράγγων ουσιαστικά συνεπάγεται ότι τόσο ο τεχνολογικός εξοπλισμός των σηράγγων, όσο και τα μέτρα ασφαλείας δεν φθείρονται με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Rasmussen (1997), η προσαρμογή ή η αλλαγή με την πάροδο του χρόνου αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι κάθε συστήματος, και ιδιαίτερα αυτών που περιλαμβάνουν ανθρώπινα και οργανωσιακά στοιχεία. Αυτή η αλλαγή των συστημάτων με την πάροδο του χρόνου προφανώς δεν αποτελεί κάποια στοχαστική διαδικασία, αλλά είναι αποτέλεσμα συγκεκριμένων παραγόντων, οι οποίοι μπορεί να οδηγήσουν στην υποβάθμιση της συνολικής ασφάλειας ή ακόμη στην εμφάνιση και κλιμάκωση σεναρίων ατυχημάτων. Ο προσδιορισμός αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητος για τον εντοπισμό τυχόν κρίσιμων συμβάντων.

#### 4.2.1.2 Αβεβαιότητα μοντέλου

Η αβεβαιότητα μοντέλου στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, σχετίζεται με τα δένδρα σφαλμάτων και γεγονότων. Στα δένδρα σφαλμάτων όπως και στα δένδρα γεγονότων, η κύρια πηγή αβεβαιότητας εντοπίζεται στις αλληλεξαρτήσεις των γεγονότων που λαμβάνονται υπόψη καθώς επίσης στις αστοχίες κοινής αιτίας (Common Cause Failures/ CFF's). Αυτή η αβεβαιότητα επηρεάζει τόσο τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των κρίσιμων συμβάντων όσο και των διαδοχικών συμβάντων, και συνεπώς τις τιμές των πιθανοτήτων των σεναρίων ατυχημάτων.

Σύμφωνα με τον Privara (2009) δυο γεγονότα είναι εξαρτημένα μεταξύ τους όταν:

$$p(x, y) \neq p(x) \times p(y).$$

Μπορούν να διακριθούν δυο μεγάλες κατηγορίες εξάρτησης :

1. Ενδογενής εξάρτηση (Intrinsic dependency). Στην ενδογενή εξάρτηση η λειτουργικότητα ενός εξαρτήματος επηρεάζεται από την λειτουργικότητα ενός άλλου εξαρτήματος. Η ενδογενής εξάρτηση μπορεί να διακριθεί σε υποκατηγορίες:
  - i. Εξάρτηση λειτουργικών απαιτήσεων (Functional requirement dependency) , όπου η λειτουργική κατάσταση του εξαρτήματος X καθορίζει τις λειτουργικές απαιτήσεις Y, π.χ. Το Y δεν απαιτείται όταν το X λειτουργεί ή το Y απαιτείται όταν το X λειτουργεί κλπ.

- ii. Εξάρτηση λειτουργικής εισόδου (Functional input dependency), όπου η λειτουργική κατάσταση του Y είναι άμεσα εξαρτώμενη από την λειτουργική κατάσταση του X, π.χ. Το Y δουλεύει αν το X δουλεύει.
  - iii. Αστοχία αλληλουχίας (Cascade failure), όπου η αστοχία ενός εξαρτήματος προκαλεί την αστοχία ενός άλλου.
2. Εξωγενής εξάρτηση (Extrinsic dependency). Οι εξωγενείς εξαρτήσεις δεν προέρχονται από το σύστημα αλλά προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες. Διακρίνονται οι:
- i. Εξαρτήσεις φυσικών φαινομένων, δηλαδή οι εξαρτήσεις λόγω κοινών περιβαλλοντικών παραγόντων.
  - ii. Εξαρτήσεις ανθρώπινης αλληλεπίδρασης, π.χ. Ένα σφάλμα συντήρησης μπορεί να προκαλέσει πολλαπλές αστοχίες ίδιας προέλευσης.

Κατά την μοντελοποίηση των δένδρων γεγονότων και σφαλμάτων, είναι σημαντικό αυτές οι εξαρτήσεις να αναπαρίστανται αποτελεσματικά, καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι προκύπτουσες πιθανότητες μπορεί να διαφέρουν κατά πολύ από τις πραγματικές.

Στο πεδίο των οδικών σηράγγων συναντάται μια σειρά από εξαρτήσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εξαρτημάτων του τεχνολογικού εξοπλισμού των οδικών σηράγγων (Καζάρας, 2013). Ακολουθούν μερικά παραδείγματα απρόβλεπτων και επικίνδυνων αλληλοεπιδράσεων που μπορούν να συμβούν στις οδικές σήραγγες:

- ❖ Μη ασφαλής αλληλεπίδραση μεταξύ των συστημάτων πυρόσβεσης και εξαερισμού, π.χ. τα σταγονίδια του νερού (πυρόσβεσης) μπορεί να επηρεαστούν από την ροή του αέρα που παρέχεται από το σύστημα εξαερισμού της σήραγγας (Carvel, 2009).
- ❖ Το σύστημα επικοινωνίας της οδικής σήραγγας μπορεί να έχει μειωμένη απόδοση εξαιτίας του υψηλού θορύβου που παράγεται από την λειτουργία του συστήματος εξαερισμού.
- ❖ Η υψηλή ταχύτητα εξαερισμού στη σήραγγα μπορεί να επηρεάζει την ικανότητα των συστημάτων εντοπισμού φωτιάς να εντοπίζουν έγκαιρα την ύπαρξη καπνού (Arralt & Nilsen, 2009).

Στα προαναφερθέντα παραδείγματα κανένα από τα εξαρτήματα δεν αποτυγχάνει να εκπληρώσει τις απαιτήσεις του. Απεναντίας, είναι ακριβώς αυτή η εξάρτηση μεταξύ των εξαρτημάτων και κυρίως η σωστή λειτουργία τους που



δημιουργεί επικίνδυνες καταστάσεις στο σύστημα. Για παράδειγμα, η μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων εξαερισμού για να εκπληρώσουν τις λειτουργικές τους απαιτήσεις, δηλαδή για να ελέγξουν τον καπνό, πρέπει να παράγουν υψηλές ταχύτητες αέρα. Ωστόσο, τα περισσότερα συστήματα εντοπισμού φωτιάς έχει αποδειχθεί ότι λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε χαμηλές ταχύτητες εξαερισμού.

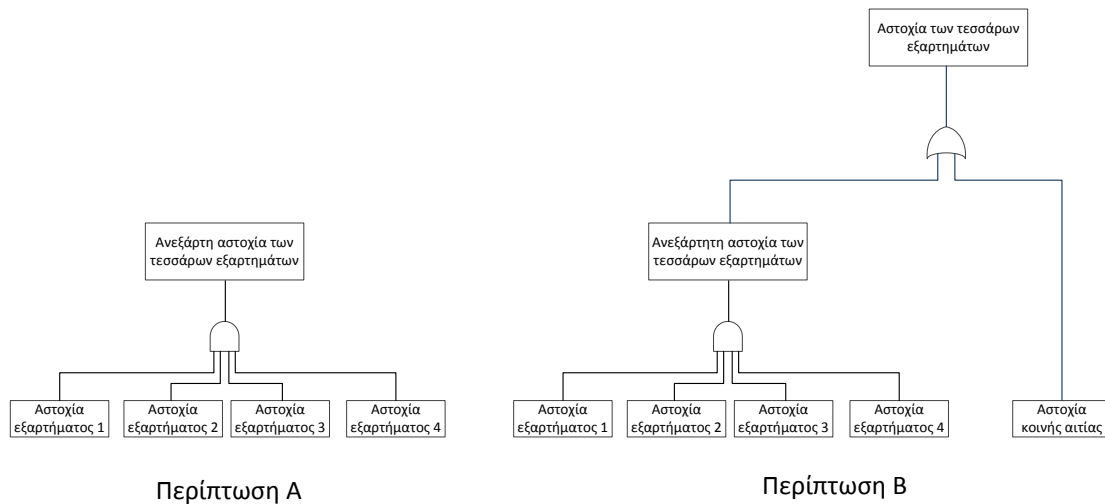
Πέρα από τις παραπάνω αλληλεξαρτήσεις, σημαντικό ρόλο στην μοντελοποίηση των δένδρων γεγονότων και σφαλμάτων παίζουν οι αστοχίες κοινής αιτίας, δηλαδή οι αστοχίες δυο ή περισσότερων εξαρτημάτων λόγω της ίδιας αιτίας. Τυπικές αστοχίες κοινής αιτίας συναντώνται:

- Στη χρήση ελαττωματικών υλικών σε διάφορα εξαρτήματα του συστήματος, που μπορεί να οδηγήσει στη δυσλειτουργία των εν λόγω εξαρτημάτων.
- Στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η ύπαρξη σκόνης, ραδιενέργειας ή κραδασμών μπορεί να προκαλέσει την ταυτόχρονη αστοχία πολλαπλών εξαρτημάτων.
- Σε κοινά λάθη εγκατάστασης του εξοπλισμού, που οφείλονται σε εσφαλμένη διαδικασία εγκατάστασης.
- Σε κοινά λάθη συντήρησης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι πολύ σημαντικό να αναπαριστώνται γραφικά στα δένδρα σφαλμάτων και γεγονότων των αποτιμήσεων επικινδυνότητας τόσο οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των εξαρτημάτων όσο και οι αστοχίες κοινής αιτίας. Ωστόσο, στις υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες τα συμβάντα λογίζονται ως ανεξάρτητα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των σεναρίων ατυχημάτων.

Για να γίνει πλήρως κατανοητή η αβεβαιότητα που εμφανίζεται σε αυτό το στάδιο λόγω της απλοποιημένης μοντελοποίησης των δένδρων γεγονότων και σφαλμάτων, αξίζει να γίνει αναφορά στο παράδειγμα του Privara (2009). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ερευνάται η επίδραση μιας αστοχίας κοινής αιτίας στον υπολογισμό της πιθανότητας ενός κρίσιμου συμβάντος, σε ένα δένδρο σφαλμάτων. Γι αυτόν τον λόγο διακρίνονται δυο περιπτώσεις, η μοντελοποίηση του δένδρου σφαλμάτων με και χωρίς την αστοχία κοινής αιτίας, ενώ λαμβάνονται υπόψη τέσσερα εξαρτήματα (**Σχήμα 3.2**). Η πιθανότητα αστοχίας των τεσσάρων εξαρτημάτων είναι κοινή και ίση με  $10^{-3}$ , ενώ η πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας κοινής αιτίας είναι  $10^{-8}$ . Έτσι η πιθανότητα του κρίσιμου συμβάντος (ανεξάρτητη αστοχία και των τεσσάρων εξαρτημάτων) στην περίπτωση A είναι:

$$p_{tr} = p_{ind}^4 = 10^{-12}$$



**Σχήμα 4.2: Μοντελοποίηση δένδρου σφαλμάτων με/χωρίς αστοχία κοινής αιτίας**

πηγή: Privara, 2009

Στην περίπτωση B, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη και η αστοχία κοινής αιτίας η πιθανότητα του το κρίσιμου συμβάντος (αστοχία τεσσάρων εξαρτημάτων) θα ισούται με:

$$p_{tr} = p_{ind}^4 + p_{CCF} - p_{ind}^4 \times p_{CCF} = 10^{-12} + 10^{-8} - 10^{-12} \times 10^{-8} = 1.0001 \times 10^{-8}$$

Παρότι οι υποθέσεις του παραδείγματος ήταν αρκετά απλοϊκές, αυτό που παρατηρείται στο παράδειγμα είναι μια μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών της πιθανότητας του κρίσιμου συμβάντος στις δυο διαφορετικές περιπτώσεις, η οποία αναδεικνύει την σημαντικότητα των αστοχιών κοινής αιτίας, καθώς επίσης την αβεβαιότητα που εισάγεται όταν τόσο οι αστοχίες κοινής αιτίας όσο και οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των εξαρτημάτων δεν λαμβάνονται υπόψη.

#### 4.2.1.3 Παραμετρική αβεβαιότητα

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στόχος στα δυο πρώτα βήματα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες είναι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης των σεναρίων ατυχημάτων, ο οποίος βασίζεται στον υπολογισμό των πιθανοτήτων εμφάνισης των κρίσιμων και διαδοχικών συμβάντων.

Εστιάζοντας στα κρίσιμα συμβάντα είναι κοινώς αποδεκτό ότι η πλειοψηφία αυτών σχετίζεται με το ξέσπασμα φωτιάς μέσα στη σήραγγα (Meng & Qu, 2010). Σε δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, πάνω από το 90% των περιπτώσεων εκδήλωσης φωτιάς μέσα σε οδικές σήραγγες οφείλεται σε σύγκρουση οχημάτων (Beard & Carvel, 2005). Γι' αυτόν τον λόγο, τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας υπολογίζουν ουσιαστικά τις πιθανότητες εμφάνισης

φωτιάς αφού έχει προηγηθεί ατύχημα. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων όλες οι χρησιμοποιούμενες αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες<sup>7</sup> κάνουν χρήση βάσεων ιστορικών δεδομένων, και συνεπώς υπολογίζουν τις αντικειμενικές πιθανότητες.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι αντικειμενικές πιθανότητες (ή αλλιώς οι οριακές σχετικές συχνότητες) ουσιαστικά προσδιορίζουν το ποσοστό των φορών που εκδηλώνεται φωτιά έπειτα από σύγκρουση οχημάτων στην υπό μελέτη οδική σήραγγα, θεωρώντας ότι εξετάζεται ένας άπειρος αριθμός χρόνων λειτουργίας της υπό μελέτη σήραγγας ή παρόμοιων σηράγγων (Bjelland & Aven, 2013).

Όμως, η χρήση των οριακών σχετικών συχνοτήτων δικαιολογείται μόνο στις περιπτώσεις που ένα επαναλαμβανόμενο πείραμα μπορεί να οριστεί (Paté-Cornell, 1996; Aven & Reniers, 2013). Παρόλα αυτά, στο πεδίο των οδικών σηράγγων είναι αρκετά δύσκολο να οριστεί ένα επαναλαμβανόμενο πείραμα, δηλαδή ένα πείραμα του οποίου οι επαναλήψεις να γίνονται στις ίδιες ακριβώς συνθήκες (Καζάρας, 2013). Αυτό συμβαίνει επειδή οι οδικές σήραγγες αποτελούν δυναμικά συστήματα τα οποία μεταβάλλονται συνεχώς. Όντως, πολλά στοιχεία των σηράγγων όπως, τα συστήματα ασφαλείας, η διαδικασίες που ακολουθούνται, οι υπηρεσίες έκτακτης κατάστασης, ο κυκλοφοριακός φόρτος, τα οχήματα, κλπ., δεν μπορούν να θεωρηθούν ότι παραμένουν σταθερά με την πάροδο του χρόνου, οπότε ο υπολογισμός των οριακών σχετικών συχνοτήτων εμφάνισης ατυχημάτων μέσω βάσεων ιστορικών δεδομένων μπορεί να αποτυγχάνει να αναπαραστήσει τις πραγματικές πιθανότητες εμφάνισης ατυχημάτων, ακόμη και στην περίπτωση που τα ιστορικά δεδομένα προέρχονται από την υπό μελέτη σήραγγα.

Από την άλλη, οι βάσεις ιστορικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας είναι αρκετά περιορισμένες, κυρίως λόγω του ότι ένα γεγονός, όπως η εκδήλωση φωτιάς μέσα σε μια οδική σήραγγα, είναι αρκετά ασυνήθιστο να συμβεί (Meng & Qu, 2012). Αυτό οδηγεί πολλές φορές στη χρήση βάσεων δεδομένων από σήραγγες παρόμοιες με την υπό μελέτη σήραγγα. Ωστόσο, στατιστικά στοιχεία, τα οποία έχουν υπολογιστεί για μια συγκεκριμένη οδική σήραγγα, μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα σε κάποια άλλη σήραγγα, καθώς μπορεί να συναντώνται διαφοροποιήσεις στα στοιχεία που απαρτίζουν το συνολικό σύστημα των σηράγγων, ακόμη και αν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σηράγγων είναι ίδια.

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε σχέση με τις βάσεις ιστορικών δεδομένων, είναι ότι πολύ λίγοι οργανισμοί

---

<sup>7</sup> Στο σύνολο των αποτιμήσεων επικινδυνότητας που ερευνήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας

ακολουθούν ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο και υποχρεωτικό σύστημα καταγραφής ατυχημάτων και κρίσιμων συμβάντων στις οδικές σήραγγες (Beard & Core, 2008). Όπως γίνεται αντιληπτό, όλες οι προαναφερθείσες αδυναμίες των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες, εισάγουν αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των παραμέτρων των δένδρων γεγονότων και σφαλμάτων, δηλαδή των πιθανοτήτων εμφάνισης ατυχημάτων.

#### **4.2.2 Αβεβαιότητα στο τρίτο βήμα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας**

Όπως αναλύθηκε και στην **Ενότητα 3.3.1**, στο τρίτο βήμα προσδιορίζονται οι συνέπειες των σεναρίων ατυχημάτων, μέσω προσομοίωσης τόσο της διαίτας της φωτιάς, όσο και της διαδικασίας εκκένωσης της σήραγγας από τους χρήστες/οδηγούς, με σκοπό τον υπολογισμό του απαιτούμενου και διαθέσιμου χρόνου ασφαλούς εξόδου. Σε αυτό το βήμα λοιπόν, εντοπίζεται επίσης αβεβαιότητα που σχετίζεται με την πληρότητα και τις απλοποιήσεις των μοντέλων, καθώς επίσης με τις τιμές των παραμέτρων.

##### **4.2.2.1 Αβεβαιότητα πληρότητας**

Και σε αυτό το βήμα παρουσιάζεται αβεβαιότητα πληρότητας που σχετίζεται με τον ανθρώπινο παράγοντα. Συγκεκριμένα, κατά την προσομοίωση της εκκένωσης των οδικών σηράγγων από τους χρήστες εισάγεται αβεβαιότητα λόγω της κοινωνικής επίδρασης που ασκεί στους χρήστες η *συμπεριφορά του πλήθους*.

Σύμφωνα με τους Muse & Thalmann (1997), ως πλήθος ορίζεται ένα σύνολο ατόμων που βρίσκονται σε κοινό φυσικό περιβάλλον και μοιράζονται έναν κοινό στόχο. Από την άλλη, η *συμπεριφορά του πλήθους* προσδιορίζει την δυναμική του συνόλου των ανθρώπων που αποτελούν το πλήθος. Στο πεδίο των οδικών σηράγγων, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς ενός πλήθους ανθρώπων που τρέπονται σε φυγή, και η οποία παρουσιάζει μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, καθώς επηρεάζει άμεσα το αποτέλεσμα των συνεπειών.

Αρχικά, στον τομέα της κοινωνικής ψυχολογίας η συλλογική απόδοση μιας ευρείας ομάδας ατόμων, που τρέπεται σε φυγή, είναι εξαρτημένη από τις φυσικές και ψυχολογικές αλληλεπιδράσεις της ομάδας, με τον χώρο και τον χρόνο (Le Bon, 1971). Αυτές οι αλληλεπιδράσεις διαμορφώνονται από την γεωμετρία του κλειστού περιβάλλοντος από το οποίο προσπαθούν να απομακρυνθούν, καθώς επίσης από εξωτερικές διαταραχές, όπως η διάδοση φωτιάς. Όσον αφορά την ψυχολογία των ατόμων ενός πλήθους που τρέπεται σε φυγή, αυτά κυριεύονται από διαφορά αισθήματα, όπως πανικός, φόβος και ανυπομονησία. Ωστόσο, πιθανόν το σημαντικότερο χαρακτηριστικό στη συμπεριφορά ενός πλήθους που τρέπεται σε

φυγή είναι η επιρροή που αυτό ασκεί στα άτομα. Σύμφωνα λοιπόν με τους Zarboutis & Marmaras (2005), η υποταγή των ατόμων ενός πλήθους που τρέπεται σε φυγή στον κοινό στόχο (δηλαδή τη μετακίνηση σε μια ασφαλή περιοχή), οδηγεί σε μια διανοητική ενότητα ανάμεσα στα άτομα του πλήθους. Μόλις αυτή η ομογενοποίηση εδραιωθεί, χάνονται όλα τα προσωπικά χαρακτηριστικά που τα άτομα κατέχουν έξω από το πλήθος, ενώ εμφανίζονται τρεις κύριοι μηχανισμοί: η ανωνυμία, η μετάδοση και η υποβλητικότητα, μέσω των οποίων «*το άτομο γίνεται ένα ρομπότ του οποίου η θέληση είναι δύσκολα διαχειρίσιμη*».

Ως αποτέλεσμα των μηχανισμών υποβλητικότητας και μετάδοσης, τα χαρακτηριστικά και οι κανόνες της κοινωνίας δεν έχουν καμία επίδραση στα άτομα του πλήθους, τα οποία συχνά μοιάζουν ανίκανα να φέρουν εις πέρας απλά καθήκοντα, που απαιτούν έναν συγκριμένο βαθμό νοημοσύνης για την εκτέλεση τους, όπως η χρήση πυροσβεστήρων, ενώ η κριτική τους σκέψη μειώνεται. Ακόμη, ως αποτέλεσμα της ανωνυμίας, τα άτομα του πλήθους διαφυγής είναι ικανά να καταφύγουν σε ενέργειες που δεν υπόκεινται σε καμία ηθική αναστολή, όπως για παράδειγμα το ποδοπάτημα.

Παρότι για την προσομοίωση της διαδικασίας εκκένωσης έχουν προταθεί διάφορα αξιολογικά μοντέλα (π.χ. Cellular automata μοντέλα, Agent based μοντέλα, Flow based μοντέλα), η συμπεριφορά του πλήθους είναι πάντα πρωτότυπη, καθώς διαμορφώνεται κάτω από ένα μοναδικό κάθε φορά σύνολο περιβαλλοντολογικών συνθηκών, και γι' αυτό είναι απρόβλεπτη, αλλά όχι τυχαία (Zarboutis and Marmaras, 2005). Εξάλλου, πάρα την ανάπτυξη που παρατηρείται στο, δύσκολο σε κάθε περίπτωση, εγχείρημα της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του πλήθους, η έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και απαιτούνται περαιτέρω πειράματα σε σχέση με τις διαδικασίες εκκένωσης, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των υπάρχοντων μοντέλων (Ronchi et al, 2013). Άλλωστε το πρόβλημα βρίσκεται ακόμη μακριά από το να λυθεί (Zarboutis and Marmaras, 2005).

#### 4.2.2.2 Αβεβαιότητα μοντέλου

Τόσο στα μοντέλα προσομοίωσης της εξέλιξης της φωτιάς, όσο και στα μοντέλα προσομοίωσης της διαδικασίας εκκένωσης εισάγεται αβεβαιότητα μοντέλου. Αυτή η αβεβαιότητα σχετίζεται κυρίως με τις υποθέσεις στις οποίες βασίζονται τα μοντέλα, καθώς επίσης με τις μαθηματικές και λογικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες αυτές, οι οποίες είναι αρκετά απλοποιημένες. Τέλος, σε αυτό το βήμα μπορεί να εντοπιστεί αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό του Διαθέσιμου Χρόνου Ασφαλούς Εξόδου.

Μοντέλα προσομοίωσης φωτιάς/καπνού: Στα μοντέλα διάδοσης καπνού που χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες, η ίδια η χρήση τους είναι πηγή αβεβαιότητας, καθώς, όπως επισημάνθηκε και στην **Ενότητα 3.3.1**, τα συγκεκριμένα μοντέλα βασίζονται σε μια αιτιοκρατική ανάλυση της εξέλιξης της πυρκαγιάς. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μένει εκτός του πλαισίου μελέτης η μεταβλητότητα του συστήματος, και οπότε υπάρχει κίνδυνος η προσομοίωση της πυρκαγιάς να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς διάφορες περιπτώσεις εξέλιξης της φωτιάς δεν λαμβάνονται υπόψη, και άρα οι συνέπειες της να υποτιμούνται ή και να υπερτιμούνται.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω είναι η έρευνα του Beard (1997), όπου μελέτησε την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης τεσσάρων αιτιοκρατικών μοντέλων (τριών μοντέλων προσομοίωσης ζωνών και ενός CFD μοντέλου), σε σχέση με τα αποτελέσματα τριών πειραμάτων που διεξήγε, σε μια κατασκευή από αφρολέξ, σε ένα σπίτι και σε πολυκατάστημα. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν ότι οι προβλέψεις των μοντέλων προσομοίωσης ήταν αρκετά διαφοροποιημένες από τα πραγματικά αποτελέσματα των πειραμάτων.

Ωστόσο, το πιο σημαντικό στοιχείο που προέκυψε από την έρευνα, ήταν ότι η σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου και των πειραμάτων δεν ήταν σταθερή, καθώς οι τιμές του κάθε μοντέλου άλλοτε ήταν υψηλότερες και άλλοτε χαμηλότερες σε σχέση με τις τιμές των πειραμάτων. Το παραπάνω στοιχείο αναδεικνύει συγχρόνως την μεταβλητότητα του συστήματος και την αδυναμία των χρησιμοποιούμενων μοντέλων προσομοίωσης να την διαχειριστούν. Αν όντως η εξέλιξη μιας πυρκαγιάς μπορούσε να περιγραφεί αιτιοκρατικά, τότε τα αποτελέσματα των μοντέλων θα έπρεπε να ακολουθούν μια αναλογία σε σχέση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Αφού αυτό δεν συμβαίνει, εγείρονται ερωτήματα σχετικά με την χρήση αυτών των μοντέλων.

Πέρα από το εγγενές πρόβλημα των αιτιοκρατικών μοντέλων προσομοίωσης, αξίζει να σημειωθεί ένα ακόμη αποτέλεσμα της έρευνας του Beard, το οποίο σχετίζεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων μεταξύ τους. Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών των τριών μοντέλων προσομοίωσης ζωνών. Αυτό που προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι παρά την χρήση των ίδιων δεδομένων εισόδου (στον βαθμό που αυτό ήταν εφικτό) σε κάθε προσομοίωση οι τιμές των θερμοκρασιών που προκύπτουν από κάθε μοντέλο διαφέρουν, ενώ επίσης δεν υπάρχει συνοχή στα αποτελέσματα των μοντέλων. Ο πίνακας ουσιαστικά αναδεικνύει την αβεβαιότητα που εισάγεται σε κάθε μοντέλο, λόγω της χρήσης διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μοντέλων προσομοίωσης ζωνών

Κατάταξη Θερμοκρασιών	Προσομοίωση		
	Κατασκευή από αφρολέξ	Σπίτι	Πολυκατάστημα
Υψηλότερη	FIRST	FAST	ASET
Μεσαία		ASET	FAST
Χαμηλότερη	FAST	FIRST	FIRST

πηγή: Beard, 1996

Μοντέλα προσομοίωσης εκκένωσης: Όπως και τα μοντέλα προσομοίωσης καπνού, έτσι και τα διάφορα μοντέλα εκκένωσης που χρησιμοποιούνται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας στις οδικές σήραγγες, βασίζονται σε μια σειρά από μεθοδολογίες και μαθηματικές εξισώσεις. Έτσι το αποτέλεσμα των διαδικασιών αυτών, δηλαδή ο Απαιτούμενος Χρόνος Ασφαλούς Εξόδου από την σήραγγα, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται.

Πράγματι, σύμφωνα με την έρευνα του Ronchi (et al, 2013), όπου έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την χρήση τεσσάρων μοντέλων εκκένωσης (FDS+Evac, STEPS, Simulex, Pathfinder), παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην τιμή των υπολογισθέντων ΑΧΑΕ. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορεί, εκτός από την αβεβαιότητα πληρότητας (έτσι όπως περιγράφηκε παραπάνω) και τη παραμετρική αβεβαιότητα (όπως περιγράφεται στη συνέχεια), να μπορεί να σχετίζεται με την αβεβαιότητα που εισάγεται κατά την μοντελοποίηση των συγκεκριμένων διαδικασιών.

Υπολογισμός Διαθέσιμου Χρόνου Ασφαλούς Εξόδου: Ο υπολογισμός του Διαθέσιμου Χρόνου Ασφαλούς Εξόδου από την σήραγγα, βασίζεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της εξέλιξης της φωτιάς. Συγκεκριμένα, οι προκύπτουσες τιμές θερμοκρασίας, συγκέντρωσης τοξικών ουσιών και ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί ο χρόνος που έχει στην διάθεση του ένας χρήστης για να εκκενώσει τη σήραγγα μέχρι οι συνθήκες του περιβάλλοντος να καταστούν ανυπόφορες για τον ίδιο. Εν ολίγοις, ο ΔΧΑΕ είναι ένα κατώφλι θνησιμότητας του ανθρώπινου οργανισμού, σε συγκεκριμένες περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Ωστόσο, το ερώτημα που δημιουργείται είναι αρχικά πως καθορίζεται αυτό το κατώφλι θνησιμότητας, καθώς επίσης κατά πόσο λαμβάνει υπόψη το συγκεκριμένο κατώφλι το σύνολο του πληθυσμού.

Σύμφωνα με τον Abrahamsson (2002), κατά την μοντελοποίηση των επιδράσεων που έχει στον ανθρώπινο οργανισμό η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες,

τοξικές ουσίες, κλπ., κυρίαρχη προσέγγιση είναι η χρήση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τεστ δόσης-απόκρισης (dose-response tests), που πραγματοποιούνται σε πειραματόζωα. Στα συγκεκριμένα τεστ «μια ομάδα πειραματόζωων εκτίθεται σε συγκεκριμένες συνθήκες, και με βάση τις συνέπειες που έχουν αυτές οι συνθήκες στα πειραματόζωα, είτε οι συνθήκες δυσχεραίνονται μέχρι να κάνουν την εμφάνισή τους παρατηρήσιμες επιδράσεις, είτε μειώνονται εωςότου καμία επίδραση δεν είναι παρατηρήσιμη». Κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται οι διάφορες συναρτήσεις δόσης-απόκρισης και καθορίζονται τα όρια θνησιμότητας των πειραματόζωων, ενώ στη συνέχεια γίνεται αναγωγή αυτών των δεδομένων στον ανθρώπινο οργανισμό.

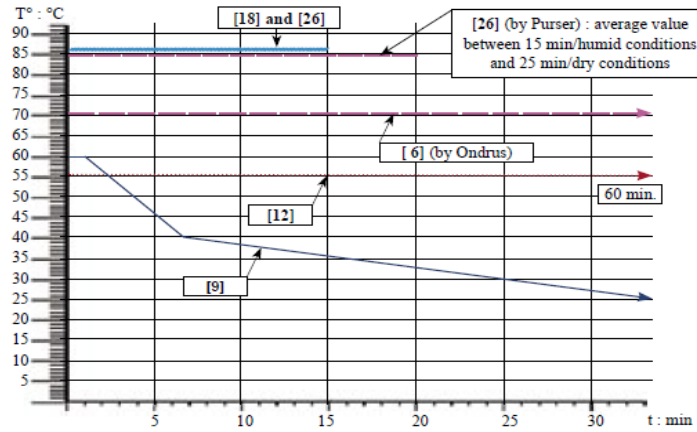
Όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να εισάγεται αβεβαιότητα κατά την αναγωγή των δεδομένων που προκύπτουν από τα πειράματα σε ζώα, στον ανθρώπινο οργανισμό. Η υπερτίμηση ή υποτίμηση των επιδράσεων και, κατά συνέπεια, των χρόνων εξουδετέρωσης του ανθρώπινου οργανισμού, εξαιτίας συγκεκριμένων περιβαλλοντολογικών συνθηκών, μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό εντελώς διαφορετικών συνεπειών των σεναρίων ατυχημάτων.

Από την άλλη, η ίδια η χρήση συγκεκριμένων κατωφλιών θνησιμότητας, μπορεί να είναι μια πηγή αβεβαιότητας, καθώς η χρήση τους συνεπάγεται ότι αυτά ενσωματώνονται και εκφράζουν το σύνολο του πληθυσμού. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση αφήνει εκτός πλαισίου ανάλυσης την μεταβλητότητα που μπορεί να υπάρχει στα συμπτώματα του γενικού πληθυσμού. Πράγματι, σύμφωνα με τον Abrahamsson, «σε κάθε πληθυσμό που εκτίθεται στις ίδιες επικίνδυνες συνθήκες περιβάλλοντος, υπάρχει μια σημαντική απόκλιση στις αποκρίσεις που παρατηρούνται».

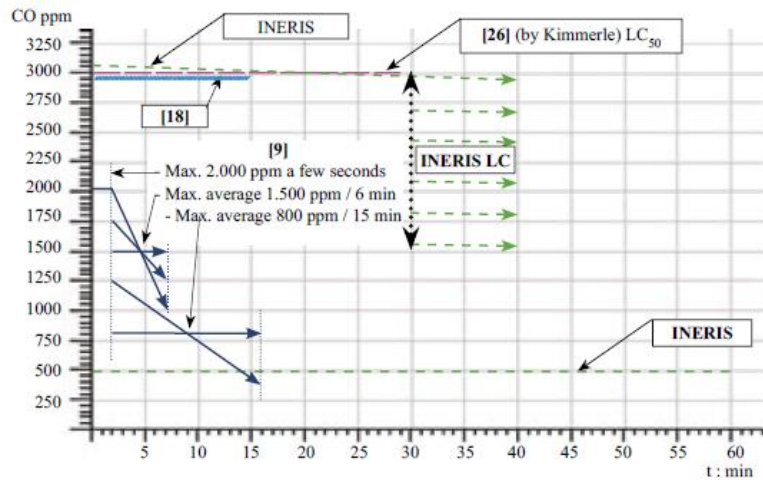
Ως ενίσχυση των παραπάνω, παρατίθενται τα **Σχήματα 4.3-4.5** (PIARC, 2008b) τα οποία αναπαριστούν τα όρια θνησιμότητας λόγω θερμοκρασίας, τοξικότητας (CO) και ακτινοβολίας, που έχουν καθοριστεί από διάφορες αρχές και οργανισμούς. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει εξετάζοντας τα παρακάτω σχήματα είναι η έλλειψη ομοφωνίας σχετικά με τα όρια θνησιμότητας ανάμεσα στους διάφορους οργανισμούς, ενώ οι αποκλίσεις ανάμεσα στα όρια σε κάποιες περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλες. Όπως φαίνεται, ούτε η επιστημονική κοινότητα έχει κατορθώσει να καταλήξει σε μια ευρέως αποδεκτή λύση σχετικά με τις τιμές που πρέπει να έχουν τα όρια θνησιμότητας.

Τέλος, όσον αφορά το ζήτημα της ποικιλίας των συμπτωμάτων που συναντάται σε έναν πληθυσμό που έχει εκτεθεί σε επικίνδυνες καταστάσεις, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα φαίνεται να είναι γνωστό στους μελετητές.

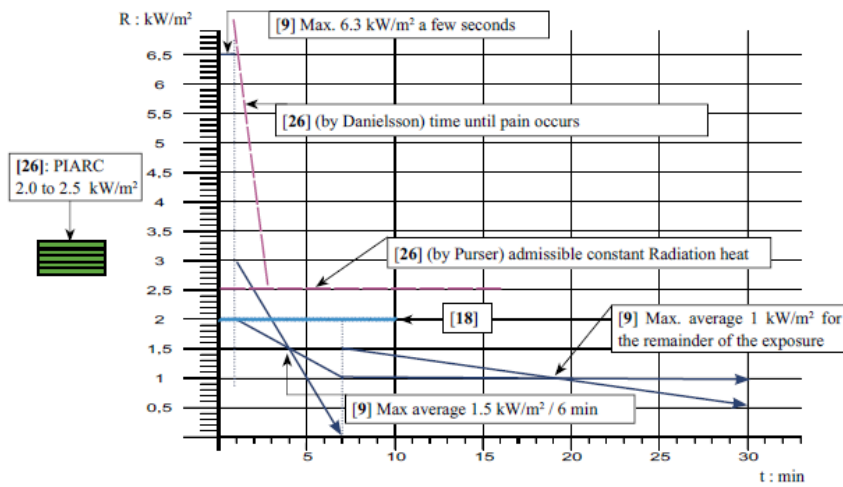




Σχήμα 4.3: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω θερμοκρασίας



Σχήμα 4.4: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω τοξικότητας



Σχήμα 4.5: Κατώφλια θνησιμότητας λόγω ακτινοβολίας

Χαρακτηριστικά, η Δ.Α.Σ. (2011) αναφέρει ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ΔΧΑΕ, έχουν ακρίβεια της τάξης του 25%. Παρόλα αυτά, ακόμη δεν έχει προταθεί κάποιος λογικά δομημένος τρόπος αντιμετώπισης της αβεβαιότητας που συναντάται σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης των υπαρχόντων μοντέλων αποτίμησης επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες.

#### *4.2.2.3 Παραμετρική αβεβαιότητα*

Αβεβαιότητα εισάγεται επίσης και στις παραμέτρους των μοντέλων προσομοίωσης της φωτιάς καθώς επίσης και αυτών της εκκένωσης. Κυρίως σε αυτό το βήμα η αβεβαιότητα σχετίζεται με τους χρόνους προ-εκκένωσης (pre-evacuation time) και εκκένωσης (evacuation time), καθώς επίσης με τα διάφορα κυκλοφοριακά δεδομένα (Καζάρας, 2013).

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του Απαιτούμενου Χρόνου Ασφαλούς Εξόδου από την σήραγγα, πρακτικά γίνεται υπολογισμός τόσο του χρόνου προ-εκκένωσης, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται πριν οι χρήστες αρχίσουν να εκκενώνουν την σήραγγα, όσο και του χρόνου εκκένωσης της σήραγγας από τους χρήστες. Ο χρόνος προ-εκκένωσης μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε:

- i. Χρόνο ανίχνευσης (Detection time)
- ii. Χρόνο αντίδρασης (Reaction time)

Ο χρόνος ανίχνευσης ουσιαστικά προσδιορίζει τον χρόνο που χρειάζονται οι χρήστες των οδικών σηράγγων για να αντιληφθούν ότι κάτι έχει συμβεί, ενώ ο χρόνος αντίδρασης σχετίζεται με το διάστημα κατά το οποίο οι χρήστες μελετάνε τις επιλογές τους, μέχρι να αποφασίσουν να εκκενώσουν τη σήραγγα. Οι δυο αυτοί χρόνοι, επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τα τεχνολογικά συστήματα των σηράγγων, όπως είναι ο συναγερμός, οι σειρήνες, τα μεγάφωνα, τα μηνύματα που μεταδίδονται από το ραδιόφωνο ή/και τα διάφορα μηνύματα των πινακίδων. Η συμπεριφορά του πλήθους, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, επηρεάζει επίσης τους χρόνους προ-εκκένωσης<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Πρέπει να διασαφηνιστεί ότι στην **Ενότητα 4.2.2.1**, έγινε αναφορά στον ρόλο που παίζει η συμπεριφορά του πλήθους στη πληρότητα της έρευνας σχετικά με τη διαδικασία εκκένωσης, δηλαδή σχετικά με τον εντοπισμό όλων αυτών των πιθανών αντιδράσεων και ενεργειών των χρηστών. Στη συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζεται πως επηρεάζει η αλληλεπίδραση των μελών του πλήθους τις προκύπτουσες τιμές των χρόνων προ-εκκένωσης. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι, όπως και να χαρακτηριστεί η αβεβαιότητα αυτή, η πηγή αβεβαιότητας είναι κοινή: η συμπεριφορά του πλήθους.

Από την άλλη, ο υπολογισμός του χρόνου εκκένωσης είναι επίσης μια δύσκολη αποστολή, καθώς η ταχύτητα βαδίσματος των χρηστών επηρεάζεται από μια σειρά από παράγοντες, όπως τα δημογραφικά και ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά των χρηστών (ηλικία, φύλο, βάρος, κλπ), τα επίπεδα ορατότητας της σήραγγας, τη κλίση της σήραγγας δηλαδή αν είναι ανηφορικό ή κατηφορικό το διάστημα που καλούνται να διανύσουν οι χρήστες (Norén & Winér, 2003), καθώς επίσης από τα επίπεδα θερμοκρασίας, τοξικότητας και ακτινοβολίας που επικρατούν στο εσωτερικό της σήραγγας. Είναι αξιοσημείωτο, ότι λόγω μόνο της επίδρασης των επιπέδων θερμοκρασίας, τοξικότητας και ακτινοβολίας, η ταχύτητα βαδίσματος μπορεί να ποικίλει από 0.3 m/s έως 1,25 m/s (Ronchi et al, 2013).

Με βάση τα παραπάνω, είναι απορίας άξιο κατά πόσο οι τιμές των παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ΑΧΑΕ, μπορούν να εκφραστούν με ένα συγκεκριμένο νούμερο, όπως συμβαίνει στις υπάρχουσες αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων.

Εκτός όμως από την αβεβαιότητα στη τιμή του ΑΧΑΕ, μπορεί να εντοπιστεί αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα. Συγκεκριμένα, τόσο στα μοντέλα προσομοίωσης της διαδικασίας εκκένωσης όσο και στα μοντέλα προσομοίωσης της εξέλιξης της φωτιάς, χρησιμοποιούνται μια σειρά από σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα που επικρατούν στην υπό μελέτη σήραγγα. Αυτά περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων:

- Τον κυκλοφοριακό φόρτο
- Το ποσοστό των οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα
- Τον αριθμό των ανθρώπων που βρίσκονται στα οχήματα
- Την ταχύτητα των οχημάτων

Οι συγκεκριμένες παράμετροι, όπως και στην περίπτωση των πιθανοτήτων εμφάνισης ενός ατυχήματος των δυο πρώτων βημάτων των αποτιμήσεων επικινδυνότητας, προκύπτουν μέσω βάσεων ιστορικών δεδομένων. Όποτε και σε αυτό το βήμα της ανάλυσης, εισάγεται αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων, που σχετίζεται με την χρήση αυτών των βάσεων δεδομένων, έτσι όπως περιγράφηκε στη συγκεκριμένη ενότητα. Από την άλλη, η δυναμική φύση των συστημάτων των οδικών σηράγγων, εισάγει μια εγγενή μεταβλητότητα στις τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων. Αυτή η μεταβλητότητα ωστόσο φαίνεται πως δεν λαμβάνεται υπόψη στα υπάρχοντα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας, καθώς οι τιμές των παραμέτρων καθορίζονται από τη μέση τιμή του συνόλου των τιμών που

παρατηρούνται κατά την καταγραφή των κυκλοφοριακών δεδομένων σε διάρκεια ενός έτους.

Τέλος, αβεβαιότητα εισάγεται και στον καθορισμό του χρόνου που κλείνει την σήραγγα σε περίπτωση έκτακτης κατάστασης και του χρόνου που ενεργοποιεί τον εξαερισμό έκτακτης κατάστασης, ο διαχειριστής της σήραγγας. Οι συγκεκριμένοι χρόνοι, λαμβάνονται επίσης ως μέσες τιμές, θεωρώντας ότι ο χρόνος αντίδρασης του εκάστοτε διαχειριστή μπορεί να εντοπιστεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, όπως συζητήθηκε εκτενώς και σε προηγούμενη ενότητα, σημαντικό ρόλο στην αντίδραση του διαχειριστή παίζουν μια σειρά από τομείς όπως τα οργανωσιακά θέματα, η επάρκεια στην εκπαίδευση των διαχειριστών κλπ, παρότι οι προαναφερθείσες παράμετροι μπορεί να εξαρτώνται και από τη τυχαιότητα της συμπεριφοράς του διαχειριστή. Οπότε, πριν τον καθορισμό των χρόνων αντίδρασης των διαχειριστών των οδικών σηράγγων, ίσως είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο οι παραπάνω τομείς επηρεάζουν τις συγκεκριμένες παραμέτρους.

#### **4.2.3 Αβεβαιότητα στο τέταρτο βήμα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας**

Στο τέταρτο βήμα των αποτιμήσεων επικινδυνότητας γίνεται αξιολόγηση των υπολογισθέντων δεικτών επικινδυνότητας. Η αξιολόγηση, όπως έχει ήδη επισημανθεί, γίνεται είτε μέσω σύγκρισης των τιμών επικινδυνότητας, με την επικινδυνότητα μιας πρότυπης σήραγγας, είτε με τη χρήση ορίων αποδοχής της επικινδυνότητας. Στη πρώτη περίπτωση η αβεβαιότητα που εισάγεται σχετίζεται με την ίδια την χρήση των πρότυπων σηράγγων, και κυρίως με την παραδοχή ότι οι πρότυποι κανόνες σχεδιασμού των συγκεκριμένων σηράγγων συνιστούν, αδιαμφισβήτητα, μια ασφαλή σήραγγα. Ωστόσο αυτή η υπόθεση σπάνια ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα (Καζάρας, 2013).

Όσον αφορά τα όρια αποδοχής, αβεβαιότητα εντοπίζεται κατά τον προσδιορισμό των κατάλληλων ορίων επικινδυνότητας, και συγκεκριμένα κατά την επιλογή ενός συγκεκριμένου επιπέδου αποδοχής της επικινδυνότητας, το οποίο να πληροί τις απαιτήσεις ασφαλείας. Η ερώτηση που ουσιαστικά αναδύεται κατά την διαδικασία αυτή είναι «Για ποιόν είναι αποδεκτό το επιλεγμένο επίπεδο επικινδυνότητας;». Ακόμη, σε σχέση με την αρχή *Τόσο Χαμηλά Όσο Λογικά Εφαρμόσιμο*, σύμφωνα με τον Melchers (2001) συναντάται μια σειρά από τομείς προβληματισμού και αντιπαράθεσης όσον αφορά την εγκυρότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης.

## 5 Ανάλυση αβεβαιότητας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δυο μέθοδοι ανάλυσης της αβεβαιότητας που εισάγεται κατά τη διενέργεια των αποτιμήσεων επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες, και προσδιορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, αξίζει να τονιστεί ότι δεν είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση όλων των τύπων αβεβαιότητας των αποτιμήσεων επικινδυνότητας. Πράγματι, από τις τρεις κατηγορίες αβεβαιότητας οι παραμετρική αβεβαιότητα είναι διαχειρίσιμη μέσω της χρήσης μιας σειράς από μεθόδους, όπως η προσομοίωση Monte Carlo. Σε ότι αφορά την αβεβαιότητα μοντέλου, οι μέθοδοι για την διαχείριση του συγκεκριμένου είδους αβεβαιότητας είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, ενώ απαιτείται περαιτέρω ερεύνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων (Parry & Drouin, 2009). Τέλος, η αβεβαιότητα πληρότητας φαίνεται να μην μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω κάποιου κατάλληλου τρόπου, ωστόσο θα μπορούσε να γίνει μια ποιοτική ανάλυση αυτής, όπως αυτή που προτείνει ο Abrahamsson (2002). Παρόλα αυτά, ο Parry (1996) θέτει υπό αμφισβήτηση αν όντως είναι απαραίτητη η διαχείριση αυτού του τύπου αβεβαιότητας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην διαχείριση της παραμετρικής αβεβαιότητας. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα παρουσιαστούν οι δυο μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν και στη μελέτη περίπτωσης του επόμενου κεφαλαίου. Πριν όμως από αυτό, είναι σημαντικό να επισημανθεί για ποιον λόγο γίνεται χρήση δυο διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης της παραμετρικής αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζει δυο διαφορετικά μοτίβα. Συγκεκριμένα, από την μια εντοπίστηκε η αβεβαιότητα που εισάγεται στις τιμές των παραμέτρων λόγω της ανακρίβειας ή ακαταλληλότητας των βάσεων ιστορικών δεδομένων καθώς επίσης της εγγενούς μεταβλητότητας των συγκεκριμένων παραμέτρων, ενώ από την άλλη έγινε προσδιορισμός της αβεβαιότητας των παραμέτρων που σχετίζονται με τους διαχειριστές των οδικών σηράγγων, και συνεπώς οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα.

Η αβεβαιότητα της πρώτης περίπτωσης λόγω της φύσης της μπορεί να παρασταθεί μέσω των αντικειμενικών και υποκειμενικών πιθανοτήτων, έτσι όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και έπειτα να αναλυθεί μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τους χρόνους αντίδρασης των διαχειριστών των σηράγγων. Όπως τονίστηκε και στην **Ενότητα 4.2.2.3**, ίσως να είναι αρκετά αυθαίρετη η θεώρηση ότι η συμπεριφορά των διαχειριστών των οδικών σηράγγων

μπορεί να αναλυθεί στοχαστικά, καθώς οι χρόνοι αντίδρασης των διαχειριστών σχετίζονται με μια σειρά από οργανωσιακούς παράγοντες. Γι' αυτόν τον λόγο, κρίθηκε σκόπιμο για την αναπαράσταση αυτής της αβεβαιότητας να γίνει χρήση της θεωρίας *ασαφούς λογικής* (Fuzzy logic theory), σε συνδυασμό με το μοντέλο ανθρώπινης αξιοπιστίας CREAM.

## 5.1 Ασαφής λογική και μοντέλο CREAM

Σύμφωνα με την Konstandinidou (et al, 2006), η θεωρία της ασαφούς λογικής πρωτοπαρουσιάστηκε πριν από περίπου πενήντα χρόνια (Zadeh, 1965), ωστόσο κατά την τελευταία δεκαετία αναδείχθηκε σε σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση διαδικασιών, των οποίων η πολυπλοκότητα κάνει πολύ δύσκολη την χρήση των συμβατικών μεθόδων ποσοτικοποίησης. Η ταχεία ανάπτυξη των *ασαφών συστημάτων*, δηλαδή των συστημάτων που αναλύονται μέσω της ασαφούς λογικής, οφείλεται στην δυνατότητα, που παρέχει η συγκεκριμένη θεωρία, προσδιορισμού των ποιοτικών πληροφοριών σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό, καθώς αντικατοπτρίζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι βγάζουν συμπεράσματα και παίρνουν αποφάσεις.

Η θεωρία της ασαφούς λογικής βρίσκει πρακτική εφαρμογή στον τομέα της ανάλυσης της ανθρώπινης αξιοπιστίας καθώς χρησιμοποιείται σε μια σειρά από μοντέλα υπολογισμού της ανθρώπινης αξιοπιστίας με χαρακτηριστικό παράδειγμα το μοντέλο CREAM, που θα αναλυθεί στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

### 5.1.1 Γενικές αρχές ασαφούς λογικής

Η ασαφής λογική στηρίζεται στην έννοια των *ασαφών συνόλων*. Ως *ασαφές σύνολο* ορίζεται ένα σύνολο το οποίο δεν έχει σαφώς ορισμένα και ξεκάθαρα όρια. Η ειδοποιός διαφορά της ασαφούς λογικής σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές μοντελοποίησης βασίζεται σε αυτόν ακριβώς τον ορισμό των συνόλων. Ο παραδοσιακός ορισμός της θεωρίας των συνόλων βασίζεται στην δισθενή λογική (bivalent logic), σύμφωνα με την οποία ένα αριθμός ή ένα αντικείμενο, είτε είναι μέλος ενός συνόλου, είτε δεν είναι. Σε αντίθεση με αυτή τη προσέγγιση, η ασαφής λογική επιτρέπει σε έναν αριθμό ή ένα αντικείμενο να είναι μέλος σε παραπάνω από ένα σύνολα, και κυρίως εισάγει την έννοια της μερικής συμμετοχής (Klir & Yuan, 1995). Σε αυτό το πλαίσιο, ορίζεται ένας βαθμός συμμετοχής ενός αριθμού ή αντικειμένου σε ένα σύνολο, σε κλίμακα από το 0 έως το 1, όπου τα δυο όρια εκφράζουν στη πλήρη μη συμμετοχή (ο αριθμός σίγουρα δεν ανήκει στο σύνολο) και τη πλήρη συμμετοχή (ο αριθμός είναι σίγουρα μέλος του συνόλου) αντίστοιχα του συγκεκριμένου αριθμού στο εν λόγω σύνολο.

Ο επίσημος μαθηματικός ορισμός των ανωτέρω, καθορίζει ένα ασαφές σύνολο  $A$ , σε ένα ευρύτερο σύνολο αναφοράς  $X$  (το οποίο ονομάζεται *σύμπαν*, με στοιχεία  $x$ ), και το οποίο εκφράζεται μέσω της συνάρτησης συμμετοχής του:

$$A : X \rightarrow [0,1]$$

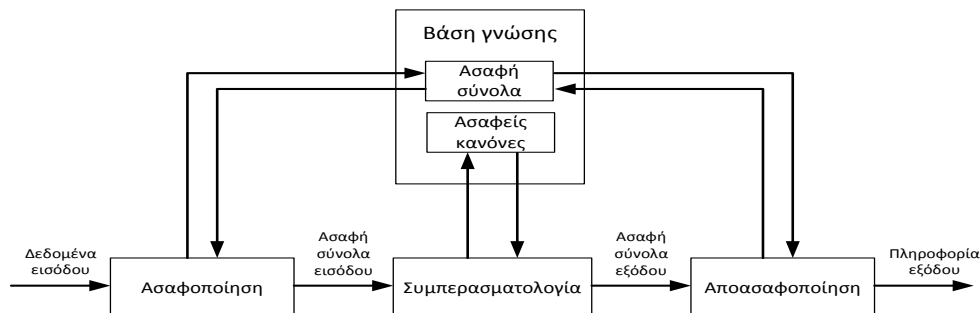
όπου, ο βαθμός συμμετοχής  $A(x)$  εκφράζει το ποσοστό στο οποίο ένα στοιχείο  $x$  εκπληρώνει τις απαιτήσεις του συνόλου  $A$ . Η συνθήκη  $A(x) = 1$  προσδιορίζει όλα τα στοιχεία  $x$  του σύμπαντος  $X$  τα οποία είναι *πλήρως συμβατά* με το σύνολο  $A$ , δηλαδή όλα τα στοιχεία που αποτελούν μέλη του συνόλου  $A$ . Από την άλλη, η συνθήκη  $A(x) = 0$  ορίζει τα στοιχεία του σύμπαντος που δεν ανήκουν στο σύνολο  $A$ . Κατ' επέκταση στα ασαφή σύνολα, η έννοια του συμβόλου « $\in$ », το οποίο στον παραδοσιακό ορισμό της θεωρίας των συνόλων ορίζει ότι ένας αριθμός ή αντικείμενο είναι στοιχείο ενός συνόλου, ουσιαστικά γενικεύεται, με την αποδοχή της μερικής συμμετοχής σε ένα σύνολο. Η κλασική ένωση και τομή των συνόλων μπορεί να επεκταθεί στα ασαφή σύνολα, ως εξής:

- $(A \cup B)(x) = \max(A(x), B(x)), \quad \forall x \in X$
- $(A \cap B)(x) = \min(A(x), B(x)), \quad \forall x \in X$

ενώ το συμπλήρωμα  $\bar{A}$  του συνόλου  $A$  ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{A}(x) = 1 - A(x), \quad \forall x \in X$$

Κατά την ανάλυση της ροής της πληροφορίας διαμέσου των ασαφών συστημάτων, εντοπίζονται τρεις κύριοι μετασχηματισμοί, στους οποίους υπόκεινται οι τα δεδομένα εισόδου προτού εξέλθουν από το σύστημα ως πληροφορία εξόδου. Οι τρεις αυτοί μετασχηματισμοί, ο οποίος είναι γνωστοί ως *ασαφοποίηση* (fuzzification), *ασαφής συμπερασματολογία* (fuzzy inference) και *αποασαφοποίηση* (defuzzification), παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.1** που ακολουθεί, το οποίο αναπαριστά τη δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής:



**Σχήμα 5.1:** Σύστημα ασαφούς λογικής

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι διαδικασίες ασαφопоίησης, ασαφούς συμπερασματολογίας και αποασαφопоίησης:

- *Ασαφопоίηση*: Κατά την διαδικασία αυτή οι μεταβλητές εισόδου ενός συστήματος αναλύονται σε ένα ή περισσότερα ασαφή σύνολα. Έτσι προκύπτει μια σειρά από ασαφείς αντιλήψεις σχετικά με τα δεδομένα εισροών.
- *Ασαφής συμπερασματολογία*: Αφού οι διάφορες μεταβλητές αποσυντεθούν σε ασαφή σύνολα, μια ομάδα από ασαφείς συμπερασματικούς (επαγωγικούς) κανόνες (if-then-else) για την επεξεργασία των ασαφών δεδομένων εισόδου (δηλαδή των ασαφών συνόλων εισόδου). Από την διαδικασία αυτή προκύπτουν τα ασαφή σύνολα εξόδου. Κάθε κανόνας αποτελείται από μια συνθήκη (condition) και μια δράση (action), όπου η συνθήκη προκύπτει από τα ασαφή σύνολα εισόδου, ενώ η δράση καθορίζει τα ασαφή σύνολα εξόδου. Εν ολίγοις, η ασαφής συμπερασματολογία είναι μια μέθοδος που ερμηνεύει τις τιμές των ασαφών συνόλων εισόδου, και με βάση ένα σύνολο κανόνων, προσδίδει τιμές στα ασαφή σύνολα εξόδου.
- *Αποασαφопоίηση*: Ως αποασαφопоίηση ορίζεται η διαδικασία στάθμισης των δεδομένων που προκύπτουν από όλους τους ανεξάρτητους ασαφείς κανόνες σε μια ενιαία απόφαση, πληροφορία ή σήμα εξόδου. Το σήμα εξόδου το οποίο εξέρχεται από το σύστημα είναι μια ακριβής, και σαφώς ορισμένη τιμή.

Για την ανάπτυξη της *βάσης γνώσης (knowledge base)* δηλαδή τόσο των ασαφών κανόνων, όσο και των ασαφών συνόλων και των συναρτήσεων συμμετοχής, χρησιμοποιείται η γνώση ειδικών, οι οποίοι δομούν το σύστημα βασιζόμενοι στη διαίσθηση, τη γνώση και την εμπειρία τους. Σε αυτό το πλαίσιο, για τον προσδιορισμό των ασαφών συνόλων και των συναρτήσεων συμμετοχής γίνεται χρήση της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος (trial and error method). Από την άλλη, η δομή των κανόνων στηρίζεται στον τρόπο με τον οποίο οι ειδικοί ερμηνεύουν τα χαρακτηριστικά των μεταβλητών του συστήματος.

Το πιο γνωστό μοντέλο ασαφούς λογικής προτάθηκε από τον Mamdani (1974), και έχει την ακόλουθη τυποποίηση:

$$\forall r \in R: \quad \text{if } \bigwedge_{1 \leq i \leq n} (x_i \in A_i^r) \quad \text{then } \bigwedge_{1 \leq j \leq m} (y_j \in B_j^r)$$



όπου:

- $n$ , είναι το σύνολο των μεταβλητών εισόδου
- $m$ , είναι το σύνολο των μεταβλητών εξόδου
- $x_i, 1 \leq i \leq n$  είναι οι μεταβλητές εισόδου
- $A_i^r, 1 \leq i \leq n$  είναι τα ασαφή σύνολα που προσδιορίζονται για τις μεταβλητές εισόδου, καθορισμένα στα αντίστοιχα σύμπαντα
- $y_j, 1 \leq j \leq m$  είναι οι μεταβλητές εξόδου
- $B_j^r, 1 \leq j \leq m$  είναι τα ασαφή σύνολα που καθορίζονται για τις μεταβλητές εξόδου.

### 5.1.2 Περιγραφή του μοντέλου CREAM

Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους ανθρώπινης αξιοπιστίας είναι η *Μέθοδος Ανάλυσης Γνωστικής Αξιοπιστίας Σφάλματος* (Cognitive Reliability Error Analysis Method-CREAM). Το μοντέλο CREAM λοιπόν, είναι μια συνεκτική μέθοδος ταξινόμησης των σφαλμάτων, που η οποία ενσωματώνει διαφόρους τεχνολογικούς και οργανωσιακούς παράγοντες (Hollnagel, 1998). Το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει την δυνατότητα περιγραφής, βήμα προς βήμα, του τρόπου με τον οποίο αυτή η ταξινόμηση μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση καθώς επίσης τον προσδιορισμό της ανθρώπινης απόδοσης. Η μεθοδολογία του CREAM, προήλθε από το Μοντέλο Συναφούς Ελέγχου (Contextual Control Model-COCOM), σκοπός του οποίου ήταν να παράσχει την απαιτούμενη εννοιολογική και πρακτική βάση για την ανάπτυξη μοντέλων που προσδιορίζουν την απόδοση των διαχειριστών διαφόρων πολύπλοκων εγκαταστάσεων. Η βασική αρχή του COCOM είναι ότι η ανθρώπινη συμπεριφορά καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση, την οποία οι άνθρωποι καλούνται να αντιμετωπίσουν, ενώ στόχος του είναι να εξηγήσει με ποιους τρόπους ένας διαχειριστής είναι ικανός να διατηρήσει τον έλεγχο αυτής της κατάστασης.

Το σύστημα ταξινόμησης του CREAM, χρησιμοποιεί αυτές τις αρχές που αναπτύχθηκαν από μοντέλο COCOM. Συγκεκριμένα, στο CREAM εισάγεται η έννοια των *τρόπων ελέγχου* (control modes), οι οποίοι συνδυάζονται με μια λεπτομερή ταξινόμηση των λανθασμένων δράσεων του διαχειριστή, μέσω της χρήσης των *κοινών συνθηκών απόδοσης*.

Τρόποι ελέγχου: Όταν οι διαχειριστές μιας εγκατάστασης καλούνται να αντιμετωπίσουν μια μη επιθυμητή κατάσταση, είναι απαραίτητος ο έλεγχος αυτής της κατάστασης, έτσι ώστε οι διαχειριστές να είναι σε θέση να οργανώσουν τις ενέργειες

τους μέσα σε έναν συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Ωστόσο, ο έλεγχος μιας κατάστασης από ένα άτομο επηρεάζεται από τον τρόπο με τον οποίο βιώνει αυτή την κατάσταση, από την αλληλουχία των δράσεων του, από τις προσδοκίες του σχετικά με την εξέλιξη της κατάστασης, και κυρίως από τους πόρους που έχει στην διάθεση του. Έτσι αναγνωρίζονται τέσσερις χαρακτηριστικοί *τρόποι ελέγχου*:

- Αναμεμειγμένος τρόπος ελέγχου (scrambled control mode): Η επιλογή, από τον διαχειριστή, της επόμενης ενέργειας του είναι φαινομενικά παράλογη ή τυχαία. Στον αναμεμειγμένο τρόπο ελέγχου περιλαμβάνεται και η ακραία κατάσταση του μηδενικού ελέγχου.
- Ευκαιριακός τρόπος ελέγχου (opportunistic control mode): Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της κατάστασης καθορίζουν και την επιλογή της επόμενης ενέργειας. Ο ευκαιριακός έλεγχος εφαρμόζεται όταν η γνώση του διαχειριστή για το σύστημα είναι ανεπαρκής, είτε λόγω απειρίας και κακής εκπαίδευσης, είτε λόγω ασυνήθιστης κατάστασης του περιβάλλοντος.
- Τακτικός τρόπος ελέγχου (tactical control mode): Ο τακτικός έλεγχος περιγράφει καταστάσεις, στις οποίες η απόδοση του διαχειριστή προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό μια γνωστή διαδικασία. Ο χρονικός ορίζοντας των ενεργειών του διαχειριστή επεκτείνεται πέρα από τις αναγκαίες ενέργειες που επιτελεί κάθε στιγμή, ωστόσο ο σχεδιασμός των επόμενων ενεργειών είναι περιορισμένου εύρους. Ακόμη επιλογή μερικών αναγκαίων ενεργειών μπορεί να επιβάλλεται από συγκεκριμένες εξωτερικές καταστάσεις.
- Στρατηγικός τρόπος ελέγχου (strategic control mode): Ο διαχειριστής χρησιμοποιεί έναν πιο ευρύ χρονικό ορίζοντα δράσης και προσβλέπει σε υψηλότερου επιπέδου στόχους. Ο στρατηγικός έλεγχος παρέχει μια πιο αποτελεσματική απόδοση του διαχειριστή, σε σχέση με τους άλλους τρόπους ελέγχου. Η πραγματοποίηση του στρατηγικού ελέγχου επηρεάζεται από τις γνώσεις και τις ικανότητες του διαχειριστή.

Κοινές συνθήκες απόδοσης: Στο μοντέλο CREAM γίνεται χρήση των *κοινών συνθηκών απόδοσης* (Common Performance Conditions-CPC's), για τον προσδιορισμό των πιθανών σφαλμάτων καθώς επίσης και των αιτιών τους. Οι κοινές συνθήκες απόδοσης παρέχουν μια κατανοητή και καλά δομημένη βάση για τον χαρακτηρισμό των συνθηκών, σύμφωνα με τις οποίες η απόδοση των διαχειριστών αναμένεται να λάβει χώρα. Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των κοινών συνθηκών απόδοσης:

- I. Επάρκεια οργάνωσης: Καθορίζει την ποιότητα των ρόλων και των αρμοδιοτήτων του προσωπικού της εγκατάστασης, της οργάνωσης των συστημάτων επικοινωνίας, του συστήματος διαχείρισης ασφάλειας της εγκατάστασης, των οδηγιών και των κατευθυντήρων γραμμών σχετικά με τις εξωτερικά προσανατολισμένες δραστηριότητες, καθώς επίσης τον ρόλο των εξωτερικών οργανισμών.
- II. Συνθήκες εργασίας: Περιγράφει τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εργασίας, όπως τον φυσικό ή τεχνητό φωτισμό, το θάμπωμα στις οθόνες, τον θόρυβο από τους συναγερμούς κλπ.
- III. Επάρκεια διεπαφής επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής (Man-Machine Interface-MMI) και εργασιακής υποστήριξης: Καθορίζει τη διεπαφή επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής σε γενικό πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών σχετικά με τη MMI και τους πινάκες ελέγχου, καθώς επίσης τη λειτουργική υποστήριξη που παρέχεται από ειδικά σχεδιασμένα βοηθήματα λήψης αποφάσεων.
- IV. Διαθεσιμότητα διαδικασιών: Περιγράφει τις διαδικασίες που ακολουθούνται, τόσο σε συνθήκες κανονική λειτουργίας, όσο και σε περιπτώσεις έκτακτης κατάστασης.
- V. Σύνολο ταυτόχρονων στόχων: Απαριθμεί το σύνολο των καθηκόντων που ένα άτομο απαιτείται να επιτελέσει ταυτόχρονα (όπως είναι η αξιολόγηση των επιδράσεων των ενεργειών του, η συλλογή νέων πληροφοριών, κλπ).
- VI. Διαθέσιμος χρόνος: Αναπαριστά τον διαθέσιμο χρόνο για την πραγματοποίηση μια ενέργειας.
- VII. Περίοδος της μέρας: Περιγράφει την ώρα κατά την οποία ένα άτομο πραγματοποιεί μια εργασία, και συγκεκριμένα κατά πόσο αυτό το άτομο είναι προσαρμοσμένο στην τρέχουσα ώρα (σирκαδικός ρυθμός<sup>9</sup>). Είναι γεγονός ότι η ώρα της μέρας (ή της νύχτας) έχει επίδραση στη ποιότητα της δουλειάς ενός ατόμου, και ότι η απόδοση του είναι λιγότερο αποτελεσματική εάν ο κανονικός σирκαδικός αριθμός διαταραχθεί.

---

<sup>9</sup> Σε μια σειρά από λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού παρατηρούνται περιοδικές διακυμάνσεις μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης ενεργοποίησης τους. Η περίοδος των διακυμάνσεων αυτών μπορεί να είναι της τάξης των δευτερολέπτων, των ωρών, του εικοσιτετραώρου, του μηνός ή του έτους. Οι αυτές περιοδικές βιολογικές διακυμάνσεις ονομάζονται βιολογικοί ρυθμοί. Οι βιολογικοί ρυθμοί με περίοδο 24 ωρών ονομάζονται ημερονύκτιοι ή σирκαδικοί ρυθμοί (Μαρμαράς, 2002).

- VIII. Επάρκεια εκπαίδευσης και εμπειρίας: Περιγράφει το επίπεδο και τη ποιότητα εκπαίδευσης που παρέχεται στους διαχειριστές, όπως είναι η εξοικείωση με νέες τεχνολογίες, ή επανάκτηση παλιών δεξιοτήτων, κλπ. Αναφέρεται επίσης και στο επίπεδο εργασιακής εμπειρίας.
- IX. Ποιότητα συνεργασίας προσωπικού: Προσδιορίζει την ποιότητα συνεργασίας μεταξύ των μελών του προσωπικού μιας εγκατάστασης. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την αλληλοεπικάλυψη μεταξύ της επίσημης και της ανεπίσημης δομής, το επίπεδο εμπιστοσύνης και το γενικό κλίμα που επικρατεί ανάμεσα στα μέλη.

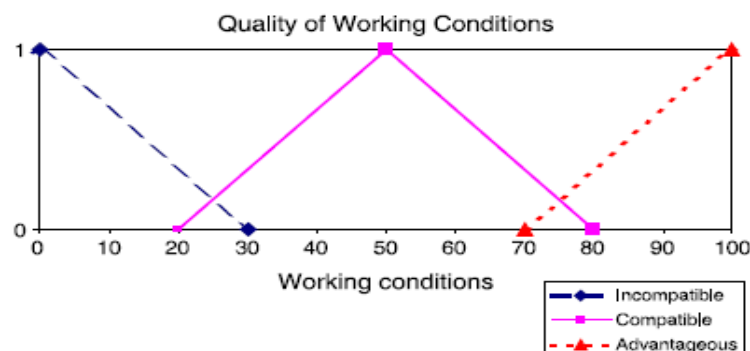
Η ποσοτικοποίηση της απόδοσης του διαχειριστή μέσω του μοντέλου CREAM γίνεται σε δυο στάδια, τα οποία αποτελούν ουσιαστικά την κύρια και την συμπληρωματική μέθοδο. Στην κύρια μέθοδο γίνεται μια αρχική διαλογή των ανθρωπίνων αλληλεπιδράσεων, κατά την οποία χαρακτηρίζονται οι κοινές συνθήκες απόδοσης, ενώ καταγράφονται οι επιδράσεις τους στην ανθρώπινη απόδοση (θετική, αρνητική ή ουδέτερη επίδραση). Σύμφωνα λοιπόν με τα αθροίσματα των θετικών και αρνητικών επιδράσεων των κοινών συνθηκών απόδοσης, καθορίζεται ο πιθανός *τρόπος ελέγχου* της κατάστασης από τον διαχειριστή. Η συμπληρωματική μέθοδος χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα της βασικής μεθόδου για την διερεύνηση ενεργειών ή καθηκόντων, για τα οποία απαιτείται πιο ακριβής και λεπτομερής ανάλυση.

### 5.1.3 Χρήση της ασαφούς λογικής στο μοντέλο CREAM

Όπως έγινε αναφορά στην **Ενότητα 5.1.1**, τα συστήματα ασαφούς λογικής μοιάζουν ικανά να μοντελοποιήσουν επαρκώς την ανθρώπινη συμπεριφορά, και τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι παίρνουν κρίσιμες αποφάσεις. Αυτό, σε συνδυασμό με την αδυναμία των κλασικών αναλύσεων ανθρώπινης αξιοπιστίας να παράσχουν συγκεκριμένες τιμές σχετικά με την απόδοση των διαχειριστών των εγκαταστάσεων, οδήγησε στην χρήση της θεωρίας ασαφούς λογικής στις υπάρχουσες αναλύσεις ανθρώπινης αξιοπιστίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος που πρότεινε η Konstandinidou (et al, 2006) για την διαχείριση της αβεβαιότητας σχετικά με τη συμπεριφορά του διαχειριστή, στην οποία αναπτύσσεται ένα ασαφές σύστημα που βασίζεται στις κοινές συνθήκες απόδοσης του μοντέλου CREAM. Για την μέθοδο αυτή επιλέχθηκε το μοντέλο ασαφούς λογικής του Mamdani, ενώ η μέθοδος χωρίζεται σε τρία βήματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

1. *Επιλογή των μεταβλητών εισόδου:* Στο πρώτο βήμα γίνεται επιλογή των μεταβλητών εισόδου που στη συνέχεια θα μετασχηματιστούν στο ασαφές σύστημα. Καθώς οι ενέργειες των διαχειριστών επηρεάζονται από μια σειρά από σημαντικούς παράγοντες, στη μέθοδο αυτή θεωρήθηκε ότι οι κοινές συνθήκες απόδοσης, έτσι όπως ορίζονται στο μοντέλο CREAM, επιτυγχάνουν να περιγράψουν κατάλληλα τους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των διαχειριστών. Ως εκ τούτου, οι εννιά κοινές συνθήκες απόδοσης αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου του ασαφούς συστήματος. Ωστόσο, σύμφωνα με την Konstandinidou, είναι στη διακριτική ευχέρεια του μελετητή να προσθέσει και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ανθρώπινη συμπεριφορά, εφόσον είναι σε θέση να το κάνει. Ακόμη, ο κάθε μελετητής έχει το ελεύθερο να χρησιμοποιήσει ως μεταβλητές εισόδου, τις κοινές συνθήκες απόδοσης της επιλογής του.
2. *Ανάπτυξη των ασαφών συνόλων:* Σε αυτό το βήμα καθορίζονται όλα ασαφή σύνολα των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Συγκεκριμένα κάθε παράμετρος αναλύεται σε τρία ή παραπάνω ασαφή σύνολα. Η συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων λαμβάνονται τριγωνικές. Για παράδειγμα για τη κοινή συνθήκη απόδοσης *συνθήκες εργασίας*, καθορίζονται τρία ασαφή σύνολα, τα οποία ονομάζονται «Μη συμβατές», «Συμβατές» και «Επωφελείς». Οι μη συμβατές και οι επωφελείς συνθήκες εργασίας έχουν αντίστοιχα αρνητική και θετική επίδραση στην ανθρώπινη απόδοση, ενώ η συμβατές συνθήκες εργασίας δεν έχει κάποια σημαντική επίδραση. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των παραπάνω ασαφών συνόλων απεικονίζονται στο **Σχήμα 5.2:**

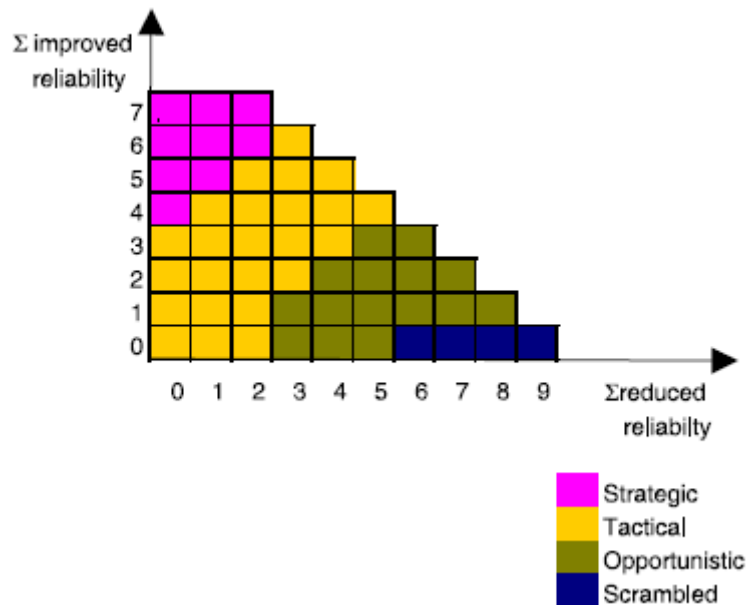


**Σχήμα 5.2:** Συναρτήσεις συμμετοχής

πηγή: Konstandinidou (et al., 2006)

Από την άλλη σχετικά με τα ασαφή σύνολα της μεταβλητής εξόδου, που είναι η συμπεριφορά του διαχειριστή, αυτά ουσιαστικά αποτελούν τους τέσσερις *τρόπους ελέγχου* του διαχειριστή, έτσι όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

- Τέλος στο τρίτο βήμα, καθορίζονται οι ασαφείς κανόνες του συστήματος. Οι κανόνες κατασκευάζονται από απλούς γλωσσικούς όρους και μπορούν να γίνουν κατανοητοί σε ένα κοινό επίπεδο λογικής. Η δομή των κανόνων βασίζεται στη χρήση του λογικού συμβόλου AND, ενώ λαμβάνονται υπόψη όλες οι μεταβλητές. Το αποτέλεσμα των κανόνων, καθορίζεται με βάση το άθροισμα των θετικών και αρνητικών επιδράσεων που έχει κάθε μεταβλητή στην απόδοση του διαχειριστή, το οποίο και ορίζει τον *τρόπο ελέγχου* του διαχειριστή. Έτσι προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (**Σχήμα 5.3**):



**Σχήμα 5.3: Διάγραμμα προσδιορισμού του τρόπου ελέγχου του διαχειριστή**

πηγή: Konstandinidou (et al., 2006)

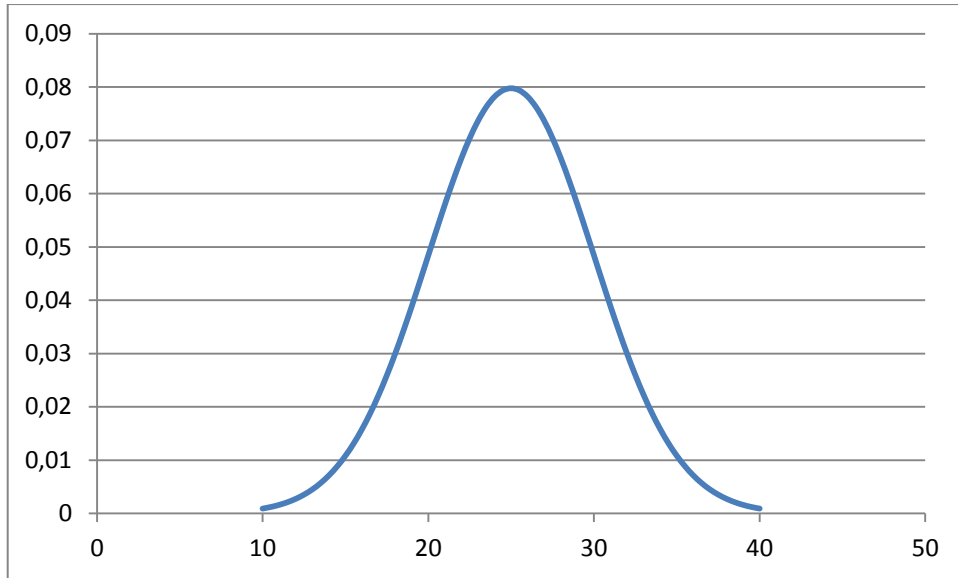
Έτσι για παράδειγμα αν όλες οι κοινές συνθήκες απόδοσης, έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση του διαχειριστή, ο κανόνας θα βγάλει ως αποτέλεσμα εξόδου το ασαφές σύνολο «αναμειγμένος τρόπος ελέγχου». Προφανώς, με βάση την ανάλυση της μεταβλητής εξόδου σε ασαφή σύνολα, που έγινε στο βήμα 2, προκύπτει η τιμή της μεταβλητής εξόδου.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας, αυτό που πρακτικά επιτυγχάνεται είναι ο ποσοτικός καθορισμός ενός εύρους, μέσα στο οποίο μπορεί να εντοπιστεί η απόδοση του διαχειριστή, η οποία μπορεί να εκφράζεται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας μέσω διαφόρων παραμέτρων, όπως η πιθανότητα αστοχίας του διαχειριστή ή οι χρόνοι αντίδρασης του διαχειριστή, όταν δεν μας είναι γνωστό πως οι διάφοροι οργανωσιακοί παράγοντες επηρεάζουν την συγκεκριμένη απόδοση. Στη συνέχεια οι διάφορες τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων εισάγονται στα μοντέλα αποτιμήσεων επικινδυνότητας, για τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο διαδίδεται η παραμετρική αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη συμπεριφορά του διαχειριστή, στο τελικό αποτέλεσμα.

## 5.2 Προσομοίωση Monte Carlo

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται ο πιο διαδεδομένος τρόπος διαχείρισης της αβεβαιότητας που εισάγεται κυρίως λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας του συστήματος καθώς επίσης λόγω της έλλειψης γνώσης σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων. Όπως έγινε αναφορά και στο **Κεφάλαιο 4**, οι αβεβαιότητες στις περισσότερες των περιπτώσεων αναπαριστώνται μέσω των πιθανοτήτων, τόσο των αντικειμενικών, όσο και των υποκειμενικών. Κατά αυτό τον τρόπο, οι πιθανότητες των διαφόρων τιμών που μπορεί να πάρει μια παράμετρος, ανεξάρτητα αν υπολογίσθηκαν μέσω πειράματος ή της γνώμης ειδικών, ορίζουν στο σύνολο τους τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τιμής της υπό μελέτη παραμέτρου. Εν ολίγοις, ο πιο διαδεδομένος τρόπος ανάλυσης της παραμετρικής αβεβαιότητας (επιστημικής ή στοχαστικής) είναι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.

Από την άλλη, η προσομοίωση Monte Carlo (Monte Carlo Simulation) είναι η πιο διαδεδομένη, από τις υπάρχουσες μεθόδους δειγματοληψίας (sampling methods). Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Abrahamsson (2002), η προσομοίωση Monte Carlo αποτελεί την παλαιότερη και πιο γνωστή μέθοδο δειγματοληψίας, η οποία χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως στις αναλύσεις αβεβαιότητας. Η διαδικασία Monte Carlo στηρίζεται στην ανάλυση των κατανομών των παραμέτρων των αποτιμήσεων επικινδυνότητας. Για την ευκολότερη κατανόηση της διαδικασίας, γίνεται χρήση του παρακάτω παραδείγματος (Vose, 1996). Έστω, ότι ορίζεται η κανονική κατανομή  $f(x)$  μιας αβέβαιης παραμέτρου  $X$ , με μέση τιμή  $\mu = 25$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = 5$ , όπως δίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 5.4**:



**Σχήμα 5.4: Κανονική κατανομή παραμέτρου  $X$**

Για την συγκριμένη κατανομή μπορεί να οριστεί η αθροιστική συνάρτηση κατανομής  $F(x) = \int f(x)dx$ , η οποία πρακτικά υπολογίζει τη πιθανότητα η τιμή της παραμέτρου  $X$  να είναι μικρότερη ή ίση με  $x$ :

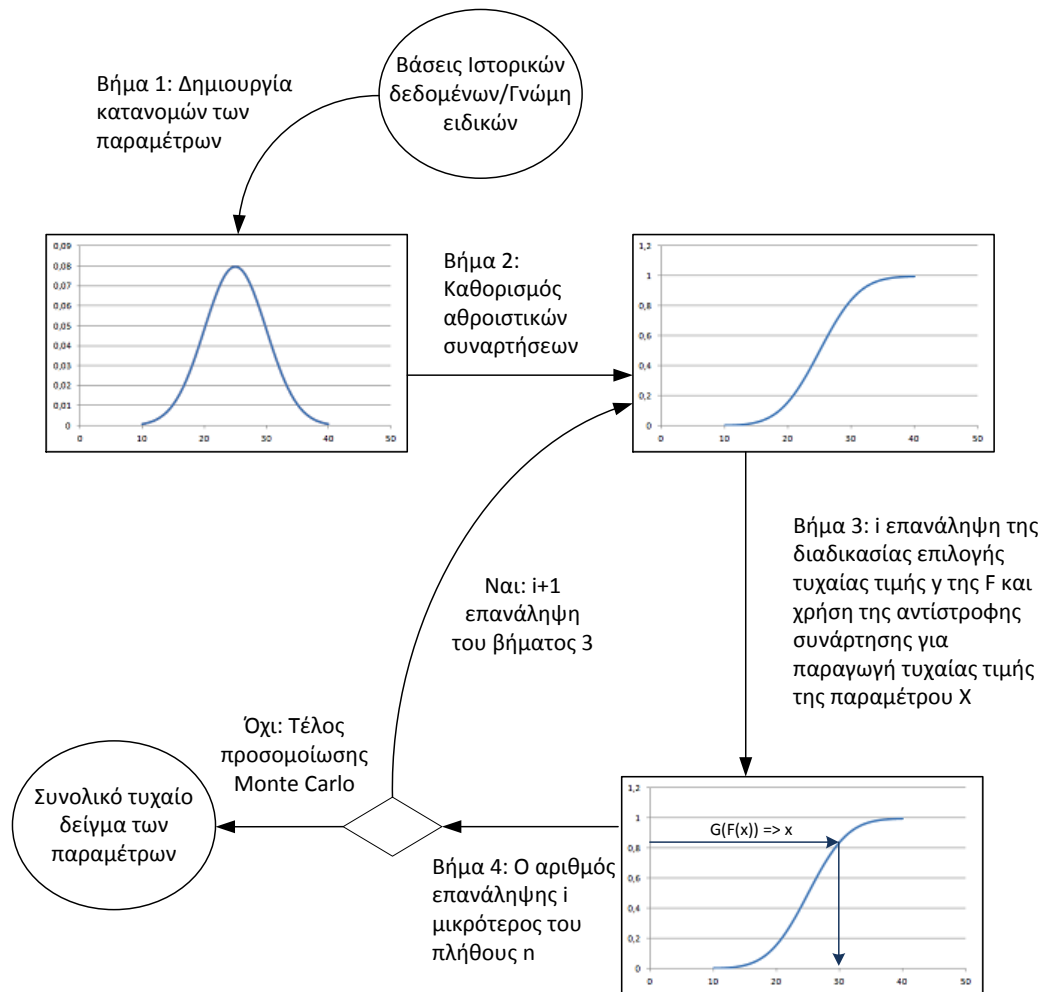
$$F(x) = P(X \leq x)$$

η οποία κυμαίνεται από το 0 έως το 1. Αφού λοιπόν οριστεί η αθροιστική συνάρτηση κατανομής  $F(x)$ , το επόμενο βήμα της προσομοίωσης Monte Carlo, αποτελεί ουσιαστικά αντιστροφή της παραπάνω διαδικασίας. Συγκεκριμένα, από την καθορισμένη αθροιστική συνάρτηση, γίνεται επιλογή μιας τυχαίας τιμής  $y$  της  $F(x)$ , μεταξύ του 0 και του 1, η οποία παράγει μια τυχαία τιμή της παραμέτρου  $X$ , καθώς εισάγεται στην διαδικασία η αντίστροφη συνάρτηση  $G(F(x))$ , η οποία αναπαρίσταται, παρακάτω:

$$G(F(x)) = x$$

Το παραπάνω βήμα επαναλαμβάνεται  $n$  φορές, όπου το πλήθος επαναλήψεων  $n$  καθορίζεται από τον μελετητή, και κατ' αυτόν τον τρόπο παράγεται το τυχαίο δείγμα της παραμέτρου  $X$ . Συνοπτικά, η προσομοίωση Monte Carlo παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:





Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης Monte Carlo

Η ποιότητα του δείγματος που προκύπτει από το Monte Carlo, συνδέεται άμεσα με το πλήθος των επαναλήψεων. Καθώς η δειγματοληψία είναι τυχαία, είναι λογικό, από πολλά σημεία των κατανομών των παραμέτρων να λαμβάνεται πολύ μεγάλο δείγμα, ενώ από άλλα να λαμβάνεται πολύ μικρό δείγμα. Έτσι για να διασφαλιστεί ότι τα δείγματα που προκύπτουν αναπαριστούν σε ικανοποιητικό βαθμό τις κατανομές των παραμέτρων, πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα πολύ μεγάλο πλήθος επαναλήψεων. Εξάλλου, σύμφωνα με τον Abrahamsson (2002), έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για την παραγωγή δειγμάτων που αποτελούνται από ομοιόμορφα κατανεμημένες τυχαίες τιμές. Ακόμη, η μέθοδος Latin hypercube η οποία αποτελεί εναλλακτική της μεθόδου Monte Carlo, έχει προταθεί για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος.

Αφού λοιπόν αναλυθεί η αβεβαιότητα των παραμέτρων μέσω του Monte Carlo, το ζητούμενο είναι να εντοπιστεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει αυτή αβεβαιότητα

ένα μοντέλο. Πρακτικά, σε κάθε επανάληψη του Monte Carlo παράγεται μια συγκεκριμένη ομάδα τιμών των παραμέτρων, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αποτελέσματος του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας το σύνολο του δείγματος των παραμέτρων που προέκυψε από το Monte Carlo, προσδιορίζεται εν τέλει μια κατανομή των τιμών που προκύπτουν από το μοντέλο, η οποία περιγράφει πως διαδίδεται οι παραμετρική αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, και σε αυτή τη περίπτωση το πλήθος των επαναλήψεων καθορίζει τον βαθμό στον οποίο αναπαρίστανται η διάδοση της παραμετρικών αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου.

## 6 Μελέτη περίπτωσης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μελέτη της επιρροής της αβεβαιότητας συγκεκριμένων παραμέτρων στο μοντέλο αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων DG-QRAM, η οποία διενεργήθηκε σε μια ενδεικτική σήραγγα της Ελληνικής επικράτειας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται μερικές γενικές πληροφορίες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης σήραγγας, καθώς επίσης περιγράφεται το περιβάλλον εργασίας του μοντέλου DG-QRAM και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τις αναλύσεις αβεβαιότητας. Τέλος, γίνεται συνοπτική παρουσίαση της διαχείρισης της παραμετρικής αβεβαιότητας, με βάση τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο **Κεφάλαιο 5**.

### 6.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ενδεικτικής οδικής σήραγγας

Η ενδεικτική σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη περίπτωσης είναι μια δίδυμη σήραγγα, δηλαδή αποτελείται από δυο σήραγγες, μια για κάθε κατεύθυνση κυκλοφορίας. Τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας δίνονται συνοπτικά στον παρακάτω **Πίνακα 6.1**:

**Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ενδεικτικής σήραγγας**

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Κατεύθυνση	Μονή
Λωρίδες ανά κατεύθυνση	Δυο (2)
Μήκος δεξιού κλάδου (m)	2500
Μήκος αριστερού κλάδου (m)	2500
Ενεργό πλάτος (m)	10
Ενεργό ύψος (m)	6
Μέση απόσταση μεταξύ των εξόδων κινδύνου (m)	300

### 6.2 Επιλογή των παραμέτρων προς ανάλυση του DG-QRAM

Το μοντέλο αποτίμησης επικινδυνότητας DG-QRAM στηρίζεται στη χρήση του MS Excel, καθώς όλο το μοντέλο έχει δομηθεί σε ένα αρχείο το οποίο αποτελείται από διάφορα υπολογιστικά φύλλα. Στα συγκεκριμένα υπολογιστικά φύλλα ο εκάστοτε μελετητής έχει πρόσβαση σε μια σειρά από παραμέτρους, οι οποίες σχετίζονται με την εγκάρσια και διαμήκη γεωμετρία της υπό μελέτη σήραγγας, το σύστημα

εξαερισμού σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας καθώς επίσης σε λειτουργία έκτακτης κατάστασης, τον τρόπο κατασκευής της σήραγγας, τα κυκλοφοριακά δεδομένα κλπ. (INERIS, 2005).

Όλες αυτές οι παράμετροι του μοντέλου δέχονται μια συγκεκριμένη αριθμητική τιμή, παρότι σε πολλές από αυτές τις παραμέτρους υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τη τιμή που μπορούν να λάβουν. Από την άλλη, για διάφορες παραμέτρους του μοντέλου, όπως για παράδειγμα οι παράμετροι που αφορούν τη γεωμετρία της σήραγγας, κατά τον υπολογισμό της τιμής τους, όπως είναι λογικό, δεν εντοπίζονται αβεβαιότητες οπότε δεν συντρέχει λόγος περαιτέρω μελέτης τους.

Πριν γίνει αναφορά στις παραμέτρους που επιλέχθηκαν για την ανάλυση αβεβαιότητας, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναφορά σε μερικά σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη μελέτη της ενδεικτικής σήραγγας. Συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας της σήραγγας ελήφθησαν υπόψη και τα δεκατρία σενάρια του DG-QRAM, ενώ επιλέχθηκε οι συνέπειες να εκφραστούν μόνο με βάση τις ανθρώπινες απώλειες. Ακόμη η σήραγγα χωρίστηκε σε 5 επιμέρους τμήματα και η ανάλυση έγινε σε μια χρονική περίοδο, ενώ η ταχύτητα εξαερισμού της σήραγγας σε λειτουργία έκτακτης κατάστασης ορίστηκε στα 330 m/s.

Όπως επισημάνθηκε και στο **Κεφάλαιο 4**, αβεβαιότητα συναντάται στις παραμέτρους που σχετίζονται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα, καθώς επίσης στις παραμέτρους που σχετίζονται με την συμπεριφορά του διαχειριστή της οδικής σήραγγας. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν στο υπολογιστικό φύλλο ROUTE του DG-QRAM για την ανάλυση των αβεβαιότητας των τιμών τους, είναι:

1. Ο μέσος αριθμός ατόμων στα επιβατικά οχήματα
2. Η συνολική κίνηση, εκφρασμένη σε οχήματα ανά ώρα (*veh/h*)
3. Το ποσοστό των φορτηγών που διέρχονται από τη σήραγγα
4. Το ποσοστό των λεωφορείων που διέρχονται από τη σήραγγα
5. Η ταχύτητα των επιβατικών οχημάτων (*km/h*)
6. Η ταχύτητα των φορτηγών και λεωφορείων (*km/h*)
7. Ο χρόνος στον οποίο κλείνει τη σήραγγα σε περίπτωση έκτακτης κατάστασης ο διαχειριστής (*s*)

Από την άλλη, στο υπολογιστικό φύλλο TUNNEL που σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της οδικής σήραγγας, επιλέχθηκε για την ανάλυση παραμετρικής αβεβαιότητας, ο χρόνος ενεργοποίησης του εξαερισμού έκτακτης κατάστασης από τον διαχειριστή, ο οποίος εκφράζεται σε λεπτά, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.1**.

23						
24	ventilation - normal					
25	...segments					
26	segment number	-		1	2	3
27	volume flow rate extracted from	YsN	m <sup>3</sup> /s	0	0	0
28	...nodes (segment start and end					
29	node number	-		1	2	3
30	volume flow rate along tunnel at nodes	YnN	m <sup>3</sup> /s	0	0	0
31						
32						
33	ventilation - emergency					
34	number of emergency ventilation regimes	nE	-	1		
35	time taken to activate emergency ventilation	tE	mins	1		Warning: This value c...
36	segment number	-		1	2	3
37	emergency ventilation regime if accident within this segment	iE	-	1	1	1
38						
39	...volume flow rate extracted from					
40	segment number	-		1	2	3
41	emergency ventilation regime	1	-	0	0	0
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52	...volume flow rate along tunnel					
53	node number	-		1	2	3
54	emergency ventilation regime	1	-	0	0	0

Σχήμα 6.1: Επιλογή παραμέτρων από το υπολογιστικό φύλλο TUNNEL

Πρέπει να τονιστεί ότι μια σειρά από παραμέτρους του DG-QRAM, στις οποίες σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 4**, εισάγεται αβεβαιότητα, όπως οι συχνότητες εμφάνισης ατυχημάτων, ο μέσος αριθμός επιβατών στα φορτηγά και τα λεωφορεία καθώς επίσης οι αναλογίες των διαφόρων φορτηγών που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα (φορτηγά που μεταφέρουν τοξικά αέρια, εύφλεκτα υγρά, κλπ), οι χρόνοι εκκένωσης της σήραγγας από τους χρήστες κλπ, μένουν εκτός του πλαισίου ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, αυτό δεν συνεπάγεται ότι στις συγκεκριμένες παραμέτρους δεν εισάγεται αβεβαιότητα, απεναντίας για μια πιο λεπτομερή ανάλυση της διάδοσης της παραμετρικής αβεβαιότητας στο μοντέλο DG-QRAM, οι συγκεκριμένες παράμετροι θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη.

### 6.3 Ανάλυση της παραμετρικής αβεβαιότητας του DG-QRAM

Στις παραμέτρους που επιλέχθηκαν, μπορούν να παρατηρηθούν δυο μοτίβα σχετικά με την αβεβαιότητα που εισάγεται σε αυτές, καθώς από τη μια έγινε επιλογή παραμέτρων, των οποίων η αβεβαιότητα σχετίζεται με την εγγενή μεταβλητότητα των ίδιων των παραμέτρων και τη χρήση ανακριβών ιστορικών δεδομένων, ενώ από την άλλη επιλέχθηκαν δυο παράμετροι, στις οποίες εισάγεται αβεβαιότητα λόγω της

συμπεριφοράς και απόδοσης του διαχειριστή της σήραγγας. Οπότε, σύμφωνα με το **Κεφάλαιο 5**, οι μεν θα αναλυθούν μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo, ενώ οι δε θα αναλυθούν μέσω της ασαφούς λογικής και του μοντέλου CREAM. Ο παρακάτω **Πίνακας 6.2** παρουσιάζει τη μέθοδο ανάλυσης που θα εφαρμοστεί σε κάθε μια παράμετρο:

**Πίνακας 6.2: Μέθοδος ανάλυσης επιλεχθέντων παραμέτρων**

Παράμετροι	Μέθοδοι ανάλυσης αβεβαιότητας	
	Monte Carlo	Ασαφής λογική & Cream
Μέσος αριθμός ατόμων επ. οχημάτων	×	
Συνολική κίνηση	×	
Ποσοστό φορτηγών	×	
Ποσοστό λεωφορείων	×	
Ταχύτητα επιβατικών οχημάτων	×	
Ταχύτητα φορτηγών/λεωφορείων	×	
Χρόνος κλεισίματος της σήραγγας		×
Χρόνος ενεργοποίησης εξαερισμού ε.κ.		×

### 6.3.1 Ανάλυση παραμετρικής αβεβαιότητας μέσω ασαφούς λογικής και CREAM

Για την ανάλυση της αβεβαιότητας των παραμέτρων που σχετίζονται με τον διαχειριστή, χρησιμοποιήθηκε μια απλοποίηση της μεθόδου της Konstandinidou (et al, 2005), που προτάθηκε από τον Kazaras (et al, 2013) και στην οποία δημιουργήθηκε ένα ασαφές μοντέλο χρησιμοποιώντας τρεις κοινές συνθήκες απόδοσης από το μοντέλο CREAM. Συγκεκριμένα οι τρεις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο ασαφές μοντέλο είναι οι:

1. Επάρκεια διεπαφής επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής
2. Διαθεσιμότητα διαδικασιών
3. Επάρκεια εκπαίδευσης και εμπειρίας

Οι συγκεκριμένες μεταβλητές αποτελούν τους κύριους παράγοντες διαμόρφωσης της απόδοσης των διαχειριστών και της συνολικής ασφάλειας των οδικών σηράγγων (PIARC, 2008b), και γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν ως μεταβλητές εισόδου του ασαφούς μοντέλου. Τέλος, καθορίστηκε η μοναδική

μεταβλητή εξόδου, η οποία είναι ο «Χρόνος αντίδρασης διαχειριστή» και εκφράζει τον χρόνο μέσα στον οποίο ο διαχειριστής κλείνει την σήραγγα και ενεργοποιεί το σύστημα εξαερισμού έκτακτης κατάστασης. Ουσιαστικά, οι δυο παράμετροι του DG-QRAM καθορίζονται από την ίδια μεταβλητή εξόδου του ασαφούς μοντέλου, καθώς γίνεται η υπόθεση ότι τη στιγμή που ο διαχειριστής αντιδράσει, θα επιτελέσει συγχρόνως τις δυο αυτές ενέργειες.

Η κατασκευή των ασαφών συνόλων των προαναφερθέντων παραμέτρων εισόδου και εξόδου έγινε ως εξής:

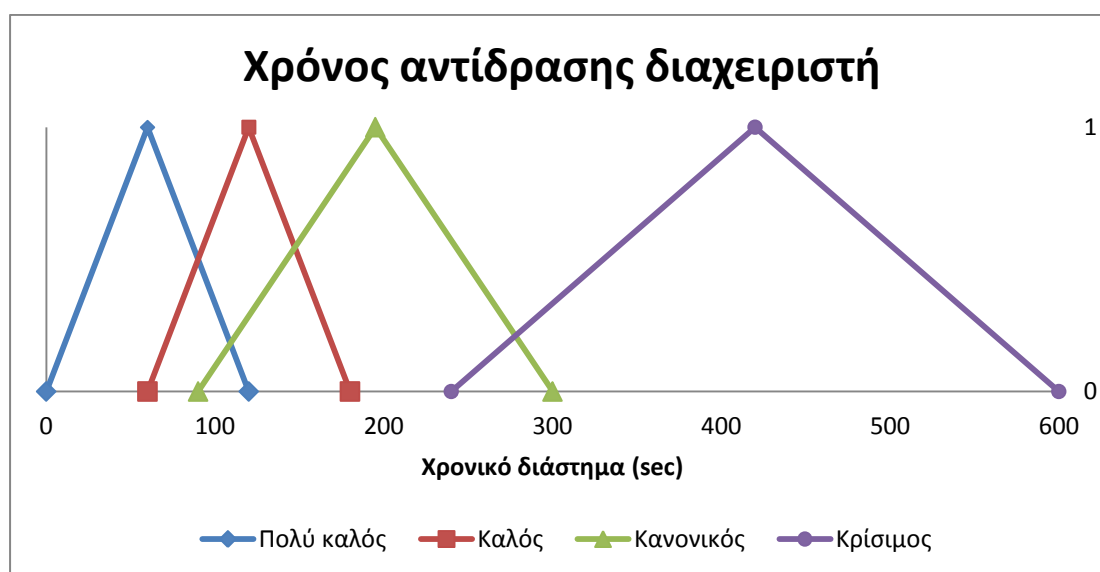
Επάρκεια διεπαφής επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής: Για τη συγκεκριμένη μεταβλητή ορίστηκαν τρία ασαφή σύνολα, τα «Ακατάλληλη», «Επαρκής» και «Υποστηρικτική». Όταν η διεπαφή επικοινωνίας χαρακτηρίζεται ως «Ακατάλληλη», το σύστημα δεν παράγει καθόλου οπτικές ενδείξεις, ενώ όταν χαρακτηρίζεται ως «Επαρκής» το σύστημα ενεργοποιεί συναγερμούς και παράγει οπτικές ενδείξεις σε περίπτωση καπνού ή φωτιάς στο εσωτερικό της σήραγγας. Τέλος, η διεπαφή χαρακτηρίζεται ως «Υποστηρικτική» αν το σύστημα είναι σε θέση να παράγει οπτικές και ηχητικές ενδείξεις, ενώ γίνεται επόπτευση της σήραγγας από κλειστό κύκλωμα βιντεοεπιτήρησης (Close Circuit Television/CCTV), το οποίο επιτρέπει τον οπτικό εντοπισμό της εστίας καπνού/φωτιάς.

Διαθεσιμότητα διαδικασιών: Για τη διαθεσιμότητα των διαδικασιών ορίζονται δυο ασαφή σύνολα, το σύνολο «Ακατάλληλες» και το σύνολο «Κατάλληλες». Οι διαδικασίες χαρακτηρίζονται ως «Ακατάλληλες» όταν τα σχέδια έκτακτης κατάστασης (emergency plans) δεν μπορούν να εντοπιστούν στην αίθουσα ελέγχου της οδικής σήραγγας ή όταν τα σχέδια έκτακτης κατάστασης δεν έχουν αναθεωρηθεί έπειτα από ένα ατύχημα στη σήραγγα ή/και μια άσκηση ασφαλείας (άσκηση έκτακτης κατάστασης).

Επάρκεια εκπαίδευσης και εμπειρίας: Όπως και η προηγούμενη μεταβλητή εισόδου, η συγκεκριμένη μεταβλητή αναλύεται σε δυο ασαφή σύνολα, τα «Επαρκής» και «Ανεπαρκής». Αντίστοιχα όταν η εκπαίδευση και η εμπειρία χαρακτηρίζεται από το πρώτο ασαφές σύνολο, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι διαχειριστές καλύπτουν συγκεκριμένες εργασιακές απαιτήσεις που είναι αναγκαίες για την οργάνωση των οδικών σηράγγων (π.χ. προϋπηρεσία, οργανωτικές ικανότητες), καθώς επίσης ότι εκπαιδευτικά σεμινάρια λαμβάνουν χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε περίπτωση που τουλάχιστον μια από τις δυο παραπάνω προϋποθέσεις δεν πληρούται, η επάρκεια εκπαίδευσης και εμπειρίας χαρακτηρίζεται ως «Ακατάλληλη».

Από τα παραπάνω προκύπτει μια ακόμη απλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου σε σχέση με τη μέθοδο της Konstandinidou, καθώς τα ασαφή σύνολα αντί των γνωστών συναρτήσεων συμμετοχής ορίζονται ποιοτικά. Ωστόσο αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς οι οργανωσιακοί παράγοντες που εισάγονται ως μεταβλητές εισόδου στο συγκεκριμένο ασαφές μοντέλο είναι πιο εύκολο να αναλυθούν ποιοτικά παρά ποσοτικά.

Όσον αφορά τη μεταβλητή εξόδου «Χρόνος αντίδρασης διαχειριστή», αναλύθηκε σε τέσσερα ασαφή σύνολα τα οποία καλύπτουν το χρονικό διάστημα από μηδέν έως δέκα λεπτά. Αν το άνω όριο των δέκα λεπτών ξεπεραστεί ο έλεγχος της οδικής σήραγγας είναι πολύ δύσκολος (PIARC, 2007). Τα τέσσερα ασαφή σύνολα καθώς επίσης οι συναρτήσεις συμμετοχής τους, οι οποίες είναι τριγωνικές, δίνονται στο παρακάτω **Σχήμα 6.2**. Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα, οι *τρόποι ελέγχου* της μεθοδολογίας του CREAM, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στη μέθοδο της Konstandinidou για την δόμηση των ασαφών συνόλων της μεταβλητής εξόδου, σε αυτήτη μέθοδο αντικαθίσταται από τα ασαφή σύνολα «Πολύ καλός», «Καλός», «Κανονικός», «Κρίσιμος».



**Σχήμα 6.2:** Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφών συνόλων της μεταβλητής εξόδου

Για την ανάπτυξη των ασαφών κανόνων έγινε ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας (PIARC, 2008), ενώ χρησιμοποιήθηκε η κρίση ειδικών. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι η ανάπτυξη ασαφών κανόνων, οποιοδήποτε και αν είναι το πεδίο έρευνας, βασίζεται στη γνώση και στην εμπειρία του μελετητή, σχετικά με το εν λόγω πεδίο. Τα αποτελέσματα των κανόνων είναι πάντα συγκεκριμένα και επαναλαμβανόμενα, δηλαδή οι ίδιες τιμές των μεταβλητών εισόδου οδηγούν πάντα



στην ίδια τιμή της μεταβλητής εξόδου. Όπως ακριβώς και στη μέθοδο της Konstandinidou, οι κανόνες δημιουργήθηκαν με βάση το λογικό σύμβολο AND, έτσι ο πρώτος κανόνας του ασαφούς συστήματος είναι ο «Αν η επάρκεια διεπαφής ανθρώπου-μηχανής είναι *ακατάλληλη* ΚΑΙ (AND) η διαθεσιμότητα διαδικασιών είναι *ακατάλληλη* ΚΑΙ (AND) η επάρκεια εκπαίδευσης και εμπειρίας είναι *ανεπαρκής*, τότε ο χρόνος αντίδρασης του διαχειριστή είναι *κρίσιμος*. Στον πίνακα της επόμενης σελίδας (**Πίνακας 6.3**) παρουσιάζονται οι ασαφείς κανόνες που ορίστηκαν για το συγκεκριμένο ασαφές σύστημα.

Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων του DG-QRAM που σχετίζονται με τον χρόνο κλεισίματος της σήραγγας και ενεργοποίησης του εξαιρεισμού έκτακτης ανάγκης, εφαρμόζεται μια ανάλυση ευαισθησίας. Συγκεκριμένα, για την αναπαράσταση της αβεβαιότητας που εισάγεται στις παραπάνω παραμέτρους, καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη οι προαναφερθέντες οργανωσιακοί παράγοντες, επιλέγονται οι δυο ακραίες καταστάσεις αυτών των παραγόντων. Επιλέγεται λοιπόν, στη μια κατάσταση η διεπαφή επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής να είναι *ακατάλληλη*, οι διαδικασίες *ακατάλληλες* και η εκπαίδευση και εμπειρία *ανεπαρκής*, και στην άλλη η διεπαφή επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής να είναι

**Πίνακας 6.3: Οι ασαφείς κανόνες του συστήματος**

Μεταβλητές εισόδου			Μεταβλητή εξόδου
Διεπαφή A-M	Διαδικασίες	Εκπαίδευση & Εμπειρία	Χρόνος αντίδρασης διαχειριστή
Ακατάλληλη	Ακατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Κρίσιμος</b>
Ακατάλληλη	Κατάλληλες	Επαρκής	<b>Κρίσιμος</b>
Ακατάλληλη	Ακατάλληλες	Επαρκής	<b>Κρίσιμος</b>
Ακατάλληλη	Κατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Κρίσιμος</b>
Επαρκής	Ακατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Κανονικός</b>
Επαρκής	Ακατάλληλες	Επαρκής	<b>Κανονικός</b>
Επαρκής	Κατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Καλός</b>
Επαρκής	Κατάλληλες	Επαρκής	<b>Πολύ Καλός</b>
Υποστηρικτική	Ακατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Κανονικός</b>
Υποστηρικτική	Ακατάλληλες	Επαρκής	<b>Καλός</b>
Υποστηρικτική	Κατάλληλες	Ανεπαρκής	<b>Καλός</b>
Υποστηρικτική	Κατάλληλες	Επαρκής	<b>Πολύ Καλός</b>

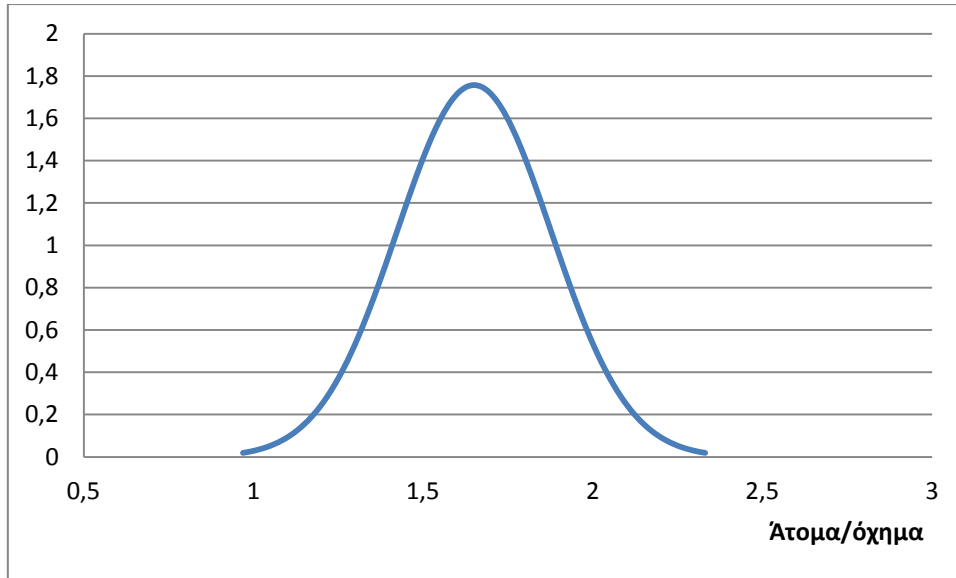
κατάλληλη, οι διαδικασίες κατάλληλές και η εκπαίδευση και εμπειρία επαρκής. Με βάση τους ασαφείς κανόνες στη μια περίπτωση προκύπτει για την μεταβλητή εξόδου το ασαφές σύνολο «Κρίσιμος» και στην άλλη το σύνολο «Πολύ καλός».

Κατά την αποασαφοποίηση των δεδομένων της μεταβλητής εξόδου, προκύπτουν οι δυο τιμές του χρόνου αντίδρασης του διαχειριστή, οι οποίες είναι αντίστοιχα τα 420 και τα 60 δευτερόλεπτα (sec). Οι τιμές της μεταβλητής εξόδου, προέκυψαν ουσιαστικά από τις συναρτήσεις συμμετοχής των δυο ασαφών συνόλων (βλέπε **Σχήμα 6.3**), καθώς και στα δυο σύνολα, οι συγκεκριμένες τιμές αποτελούν σίγουρα μέρος των ασαφών συνόλων. Οι συγκεκριμένοι χρόνοι αντίδρασης εκφράζουν τόσο τη παράμετρο του DG-QRAM «Χρόνος κλεισίματος της σήραγγας» όσο και τη παράμετρο «Χρόνος ενεργοποίησης του εξαερισμού έκτακτης κατάστασης». Ο τρόπος με τον οποίο οι δυο διαφορετικές τιμές των παραμέτρων εισήχθησαν στο DG-QRAM, για τον προσδιορισμό της διάδοσης της αβεβαιότητας τους στο συγκεκριμένο μοντέλο, περιγράφεται στην **Ενότητα 6.4**.

### 6.3.2 Ανάλυση παραμετρικής αβεβαιότητας μέσω προσομοίωσης Monte Carlo

Οι κατανομές των έξι παραμέτρων του DG-QRAM που αναλύθηκαν μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo, δημιουργήθηκαν μέσω της χρήσης ιστορικών δεδομένων, καθώς επίσης της κρίσης ειδικών. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της συνάρτησης συχνότητας πιθανότητας του μέσου αριθμού ατόμων των επιβατικών οχημάτων, ο οποίος εκφράζεται στη διάρκεια ενός χρόνου, χρησιμοποιήθηκαν τα ιστορικά δεδομένα που παρέχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency/EEA) (2008), τα οποία αναπαριστούν τον μέσο αριθμό ατόμων των επιβατικών οχημάτων ανά χρόνο, σε χρονική περίοδο 19 χρόνων, από το 1990 μέχρι το 2008. Η μελέτη έγινε σε 11 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ωστόσο μέσα σε αυτές τις χώρες δεν περιλαμβάνεται η Ελλάδα, συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα σχετικά με τον μέσο αριθμό επιβατών στην Ελλάδα, κρίθηκε σκόπιμο για τη δημιουργία της κατανομής να χρησιμοποιηθεί το σύνολο των αποτελεσμάτων και των 11 χωρών.

Για την προσαρμογή των δεδομένων (distribution fitting) στη καλύτερη δυνατή κατανομή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα @RISK (έκδοση 5.7) της Palisade, όπου με βάση τον έλεγχο καλής προσαρμογής  $\chi^2$  προέκυψε ότι τα δεδομένα προσαρμόζονται καλύτερα σε κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu = 1,65$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = 0,227$  (**Σχήμα 6.3**):



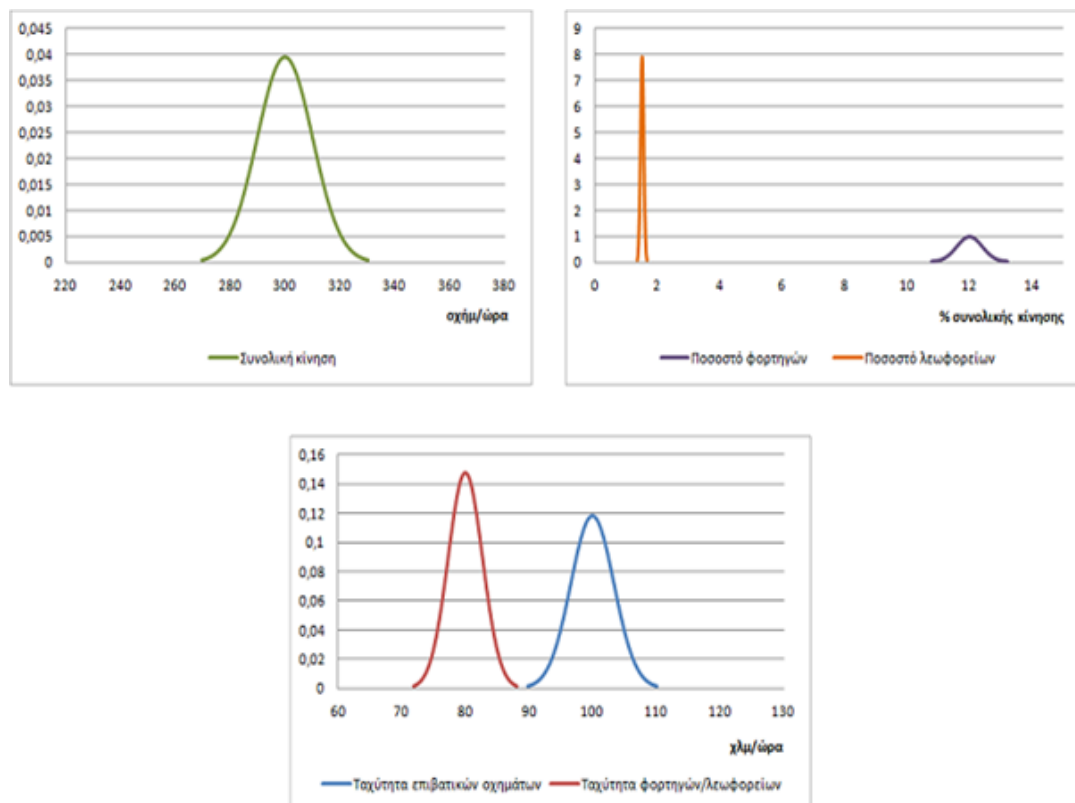
**Σχήμα 6.3: Κατανομή του μέσου αριθμού ατόμων των επιβατικών οχημάτων**

Για τη δημιουργία των κατανομών των υπολοίπων 5 παραμέτρων, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων έτσι όπως έχουν οριστεί για τις αραιοκατοικημένες περιοχές της Ελληνική επικράτειας, όπως είναι η περιοχή στην οποία βρίσκεται η ενδεικτική οδική σήραγγα της μελέτης περίπτωσης, δίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 6.4:**

**Πίνακας 6.4: Στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων**

Παράμετρος	Τιμή
Συνολική κίνηση (οχήματα/ ώρα)	<b>300</b>
Ποσοστό φορτηγών (% της συνολικής κίνησης)	<b>12</b>
Ποσοστό λεωφορείων (% της συνολικής κίνησης)	<b>1,5</b>
Ταχύτητα επιβατικών οχημάτων (χλμ/ ώρα)	<b>100</b>
Ταχύτητα φορτηγών/λεωφορείων (χλμ/ ώρα)	<b>80</b>

Με βάση τις παραπάνω τιμές και τη γνώμη ειδικών, έγινε η θεώρηση ότι η μεταβλητότητα των παραπάνω τιμών μπορεί να παρασταθεί ικανοποιητικά μέσω των κανονικών κατανομών. Ως μέσες τιμές των κατανομών ορίστηκαν οι τιμές του παραπάνω πίνακα, ενώ ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης βασίστηκε στην παραδοχή ότι το 99,7% των τιμών της κάθε κατανομής πρέπει να εντοπίζονται στο εύρος τιμών  $\pm 10\%$  της μέσης τιμής. Καθώς το 99,7% της κατανομής ορίζεται από το διάστημα  $(-3\sigma, 3\sigma)$ , εύκολα προκύπτει ότι  $\sigma \cong \mu / 30$ . Οι κατανομές των παραμέτρων δίνονται στο ακόλουθο **Σχήμα 6.4:**



Σχήμα 6.4: Κατανομές λοιπών των υπόλοιπων παραμέτρων

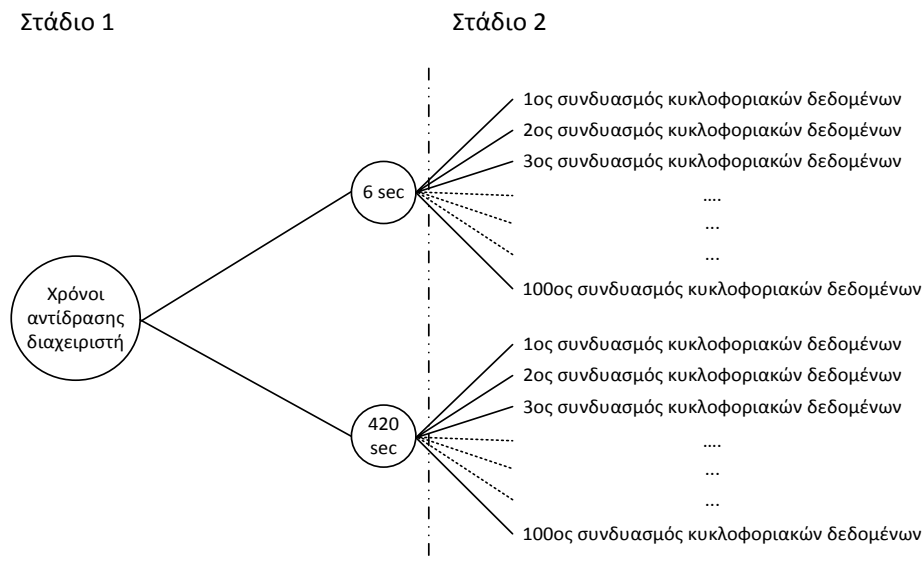
Με βάση τις κατανομές των 6 παραμέτρων έγινε προσομοίωση Monte Carlo με τη χρήση του @RISK, με  $n = 100$  επαναλήψεις και έτσι προέκυψαν οι 100 διαφορετικοί συνδυασμοί των τιμών των συγκεκριμένων παραμέτρων (βλέπε Παράρτημα Α).

#### 6.4 Χρήση των αποτελεσμάτων στο DG-QRAM

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της αβεβαιότητας των παραμέτρων, έτσι όπως προέκυψαν στη προηγούμενη ενότητα, αποτελούνται από δυο διαφορετικές τιμές για τις 2 παραμέτρους που σχετίζονται με τον χρόνο αντίδρασης του διαχειριστή της οδικής σήραγγας και 100 συνδυασμούς τιμών των 6 παραμέτρων που σχετίζονται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα. Ως εκ τούτου ο προσδιορισμός της επιρροής της αβεβαιότητας των παραμέτρων στο DG-QRAM, γίνεται σε δυο στάδια. Συγκεκριμένα στο πρώτο στάδιο προσδιορίζεται η επιρροή μόνο της αβεβαιότητας των παραμέτρων που σχετίζονται με τον διαχειριστή θεωρώντας ότι οι υπόλοιπες παράμετροι είναι σταθερές και ίσες με τη μέση τιμή τους, ενώ στο δεύτερο λαμβάνεται υπόψη και η στοχαστικότητα των λοιπών παραμέτρων. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι κάθε συνδυασμός των παραμέτρων των κυκλοφοριακών δεδομένων εισάγεται στο DG-QRAM και για τις δυο τιμές των

παραμέτρων που σχετίζονται με τον διαχειριστή. Οπότε για την ανάλυση της διάδοσης της παραμετρικής αβεβαιότητας στο DG-QRAM έλαβαν χώρα 202 επαναλήψεις του DG-QRAM, καθώς οι 100 συνδυασμοί των χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μια από τις τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με τον διαχειριστή. Για να γίνει πλήρως κατανοητός ο τρόπος εισαγωγής των τιμών όλων των παραμέτρων στο DG-QRAM, ακολουθεί το επεξηγηματικό **Σχήμα 6.5**:

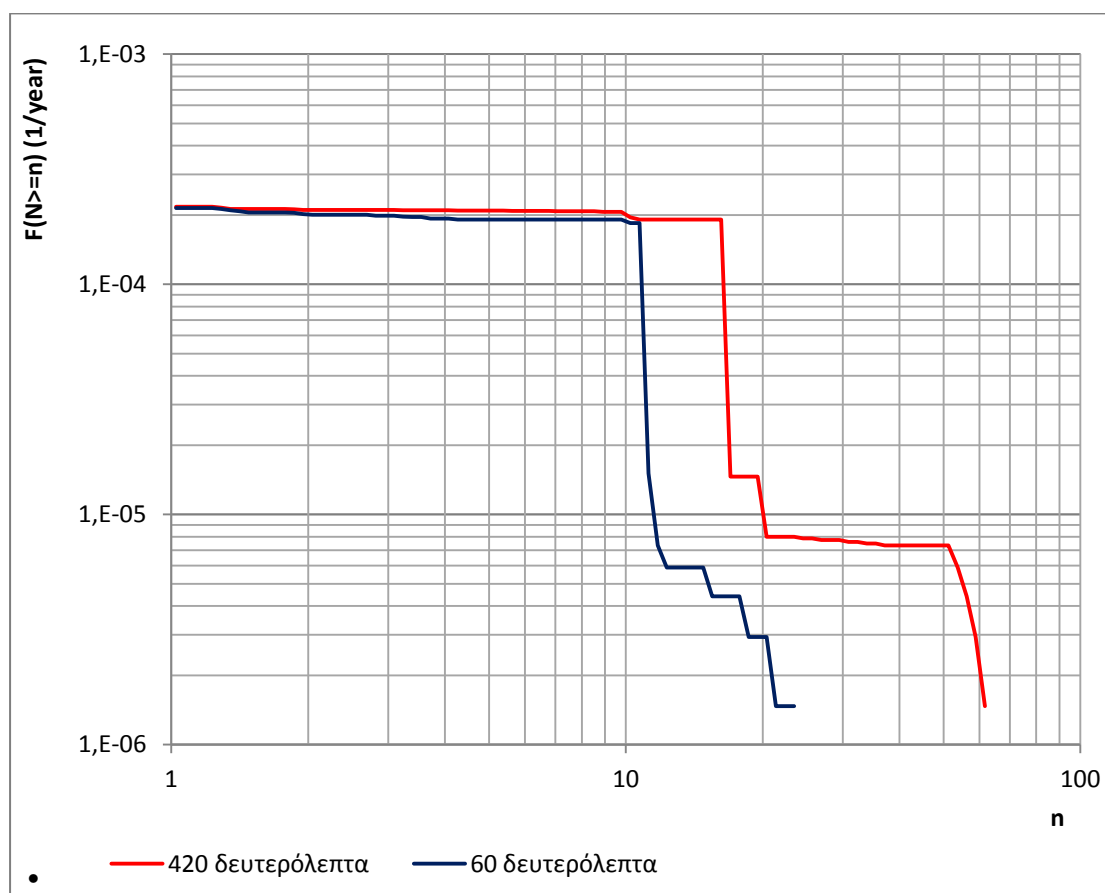
Εισαγωγή των αποτελεσμάτων των αναλύσεων αβεβαιότητας στο DG-QRAM



Σχήμα 6.5: Στάδια εισαγωγής των δεδομένων των αναλύσεων αβεβαιότητας

## 7 Αποτελέσματα

Όπως έγινε αναφορά και στο **Κεφάλαιο 3**, η προκύπτουσα κοινωνική επικινδυνότητα του DG-QRAM, εκφράζεται τόσο μέσω των διαγραμμάτων Συχνότητας-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών, όσο και με τη χρήση της αναμενόμενης τιμής. Έτσι στο παρόν κεφάλαιο τα αποτελέσματα του μοντέλου εκφράζονται και με τους δυο τρόπους. Έτσι για το πρώτο στάδιο, όπου αναλύθηκε μόνο η αβεβαιότητα των χρόνων κλεισίματος της σήραγγας και ενεργοποίησης του εξαερισμού έκτακτης κατάστασης από τον διαχειριστή, οι προκύπτουσες καμπύλες Συχνότητας-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών του μοντέλου δίνονται στο ακόλουθο **Σχήμα 7.1**:

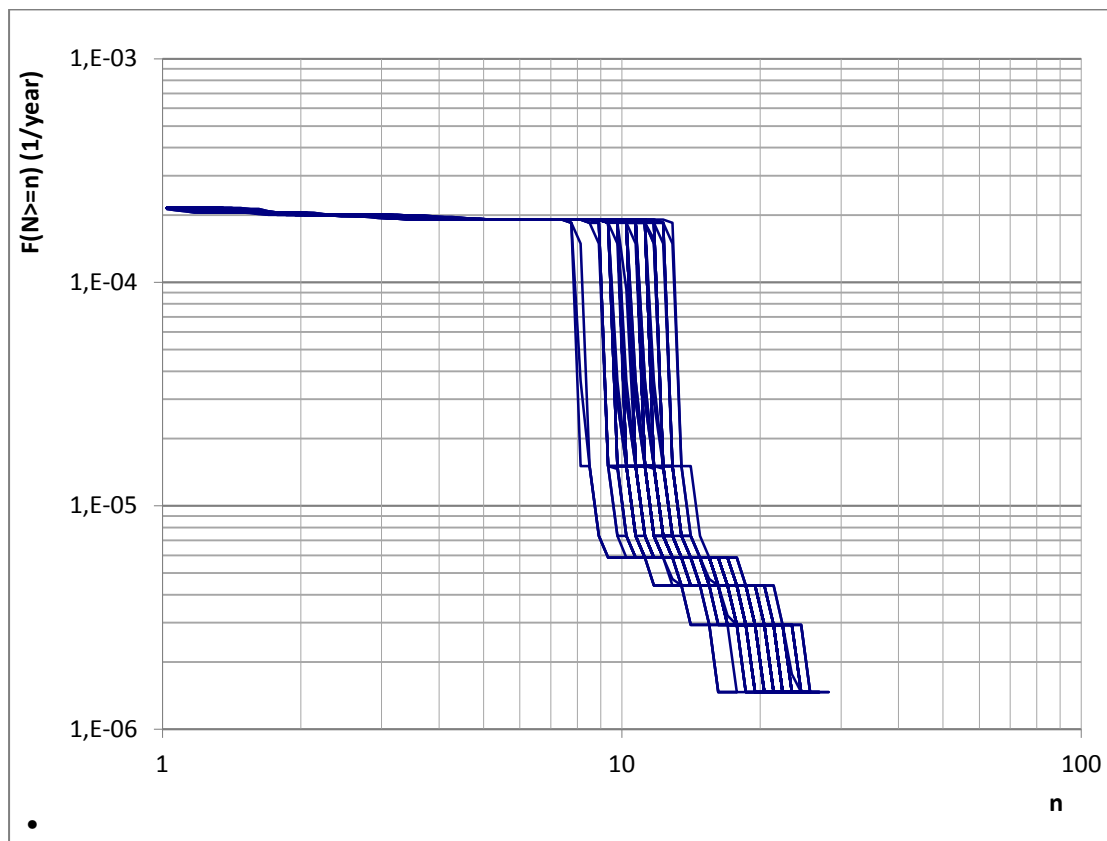


Σχήμα 7.1: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας διαχειριστή

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι καμπύλες που προκύπτουν για τις δυο τιμές των παραμέτρων του διαχειριστή έχουν αρκετή απόκλιση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, ενώ μέχρι τις περίπου 11 ανθρώπινες απώλειες οι καμπύλες διαφοροποιούνται ελάχιστα, πάνω από τις 11 ανθρώπινες απώλειες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, με χαρακτηριστική διαφορά το εύρος των ανθρωπίνων απωλειών στη περίπτωση

των 420 δευτερολέπτων, αφού ορίζεται πιθανότητα ατυχημάτων πάνω των 60 ανθρωπίνων απωλειών. Από την άλλη, στη περίπτωση των 60 δευτερολέπτων δεν συναντώνται ατυχήματα τέτοιας έκτασης, καθώς περιορίζεται η καμπύλη μέχρι τον καθορισμό συχνότητας εμφάνισης ατυχημάτων 20 ή παραπάνω ανθρωπίνων απωλειών. Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις ενισχύονται και από τη μεγάλη απόκλιση των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας που προκύπτουν από το μοντέλο, καθώς στη περίπτωση των 60 δευτερολέπτων προκύπτει  $EV = 2,15E - 03$ , ενώ για τα 420 δευτερόλεπτα η αναμενόμενη τιμή είναι  $EV = 3,61E - 03$ .

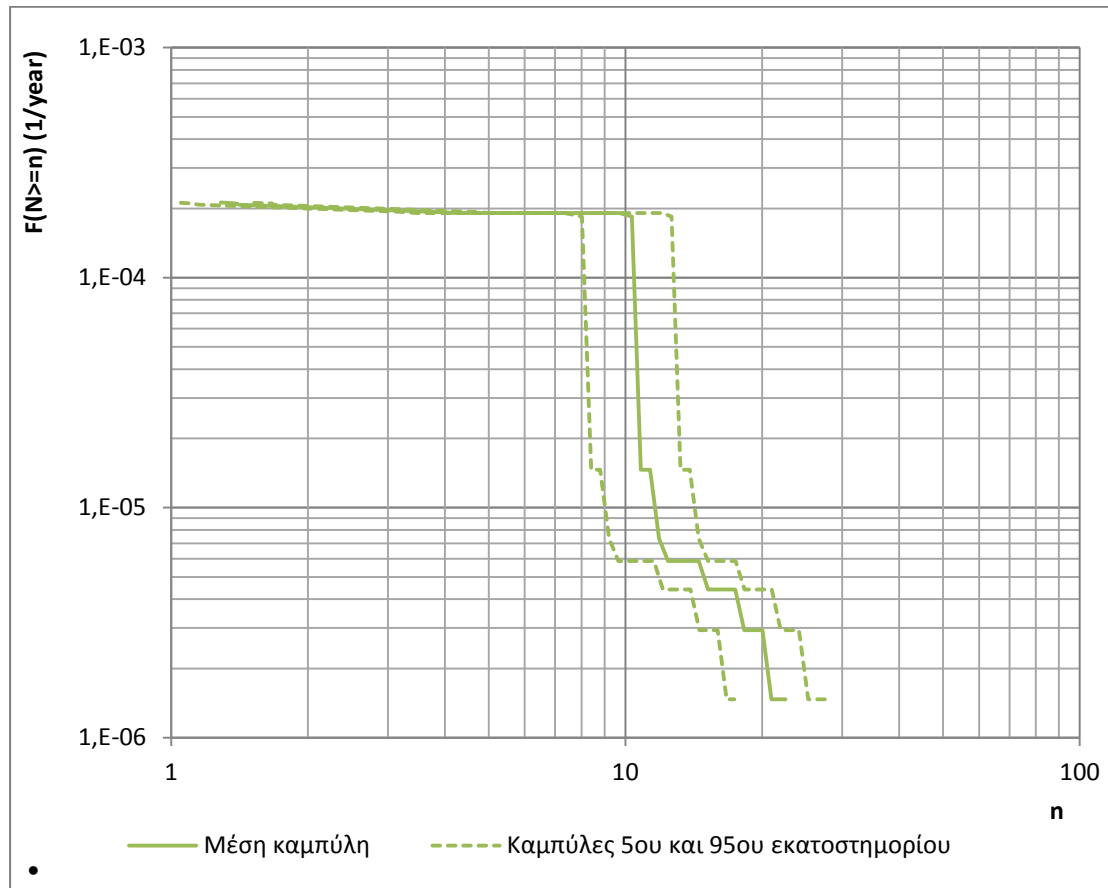
Λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των 6 παραμέτρων που σχετίζονται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα, οι προκύπτουσες καμπύλες Συχνότητας-Ανθρωπίνων απωλειών, για χρόνο αντίδρασης του διαχειριστή τα 60 δευτερόλεπτα, δίνονται στο παρακάτω **Σχήμα 7.2**:



**Σχήμα 7.2: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας κυκλοφοριακών δεδομένων (60s)**

Η διάδοση της παραμετρικής αβεβαιότητας που σχετίζεται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα είναι εμφανής στο παραπάνω διάγραμμα Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών, καθώς δημιουργείται ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών καμπυλών, ανάλογα με τον συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων σε που εισάγεται σε κάθε επανάληψη. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται και μια

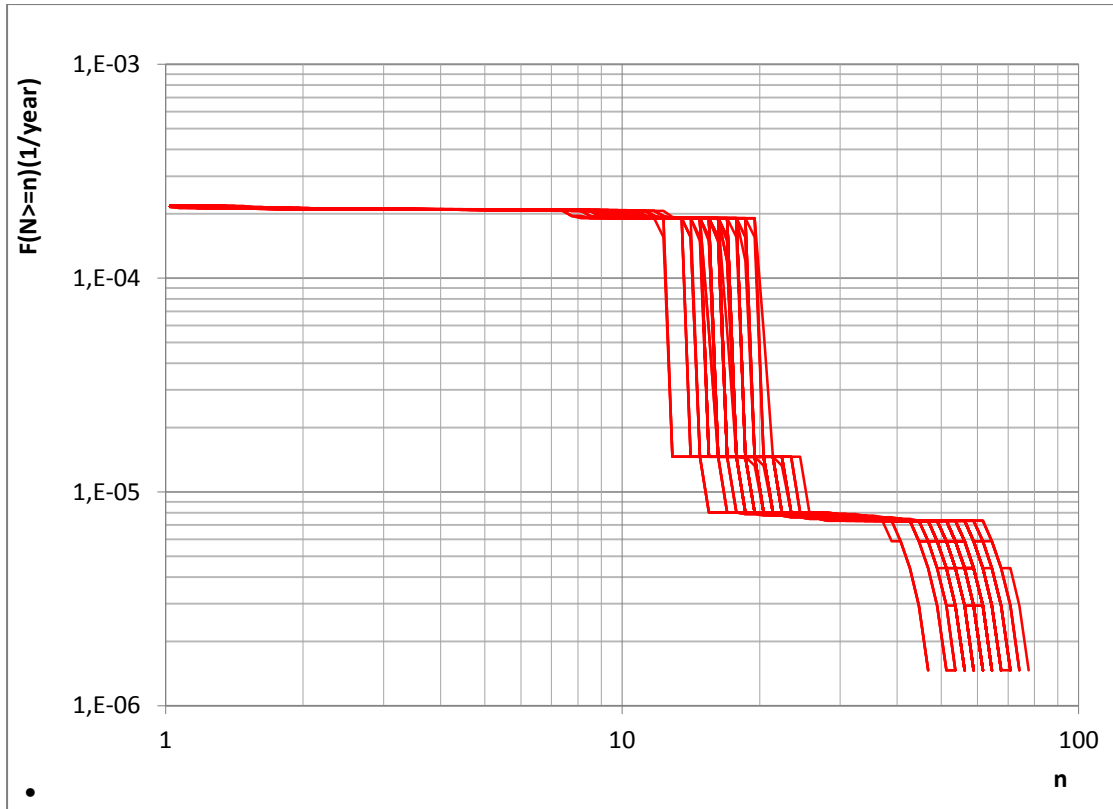
ομαδοποίηση των καμπυλών, η οποία λογικά οφείλεται στις ομαδοποιήσεις που γίνονται στις τιμές των παραμέτρων, δηλαδή συγκεκριμένο εύρος τιμών των παραμέτρων οδηγεί σε συγκεκριμένα αποτελέσματα. Για το παραπάνω εύρος καμπυλών Συχνότητων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών προσδιορίστηκε η μέση καμπύλη και οι καμπύλες του 5<sup>ου</sup> και 95<sup>ου</sup> εκατοστημορίου του εύρους, που δίνονται στο **Σχήμα 7.3**:



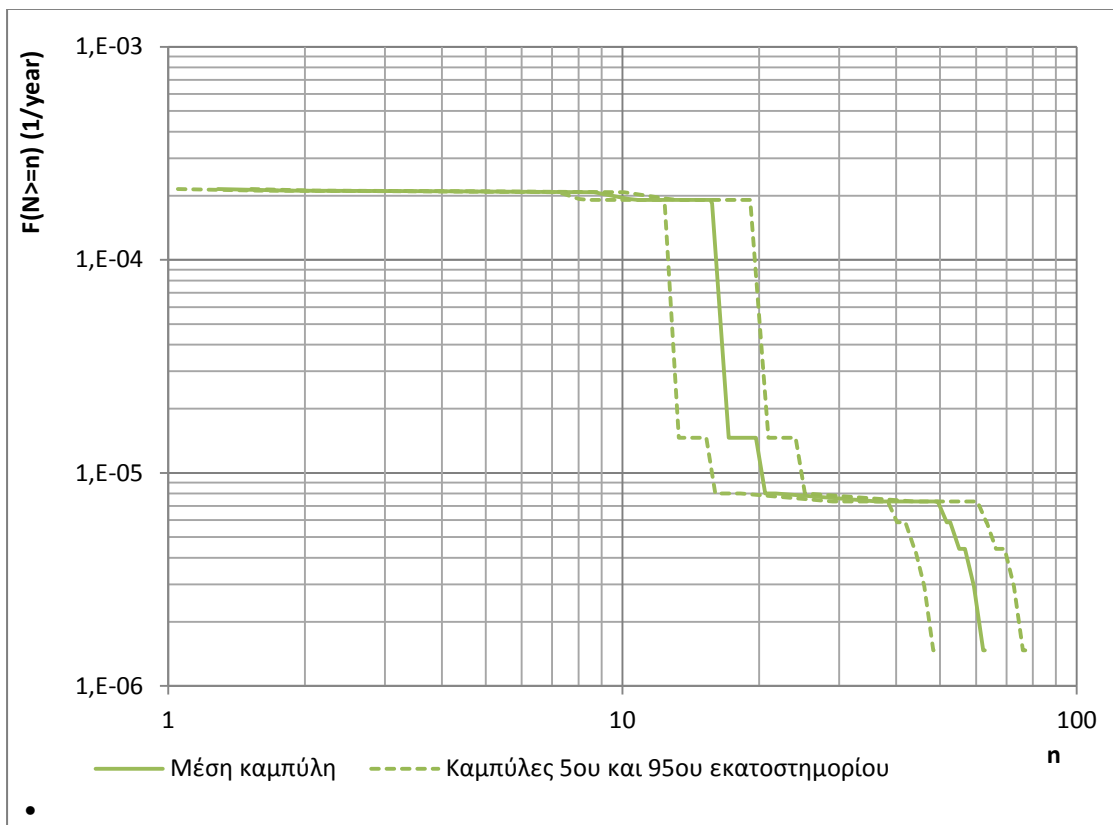
**Σχήμα 7.3:** Χαρακτηριστικές καμπύλες εύρους των καμπυλών Σ-Α.α (60s)

Αντίστοιχα οι προκύπτουσες καμπύλες Συχνότητων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών, στη περίπτωση που ο χρόνος αντίδρασης του διαχειριστή είναι 420 δευτερόλεπτα, δίνονται στο **Σχήμα 7.4**. Όπως ακριβώς και στη περίπτωση των καμπυλών για τα 60 δευτερόλεπτα, και σε αυτή τη περίπτωση δημιουργείται ένα εύρος καμπυλών, που παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά με το εύρος των καμπυλών για τα 60 δευτερόλεπτα, καθώς τόσο η έκταση του εύρους των καμπυλών όσο και η ομαδοποίησή τους, είναι σχεδόν ίδιες. Η μέση καμπύλη καθώς επίσης οι καμπύλες του πέμπτου και ενενηκοστού πέμπτου εκατοστημορίου παριστάνονται στο **Σχήμα 7.5**.



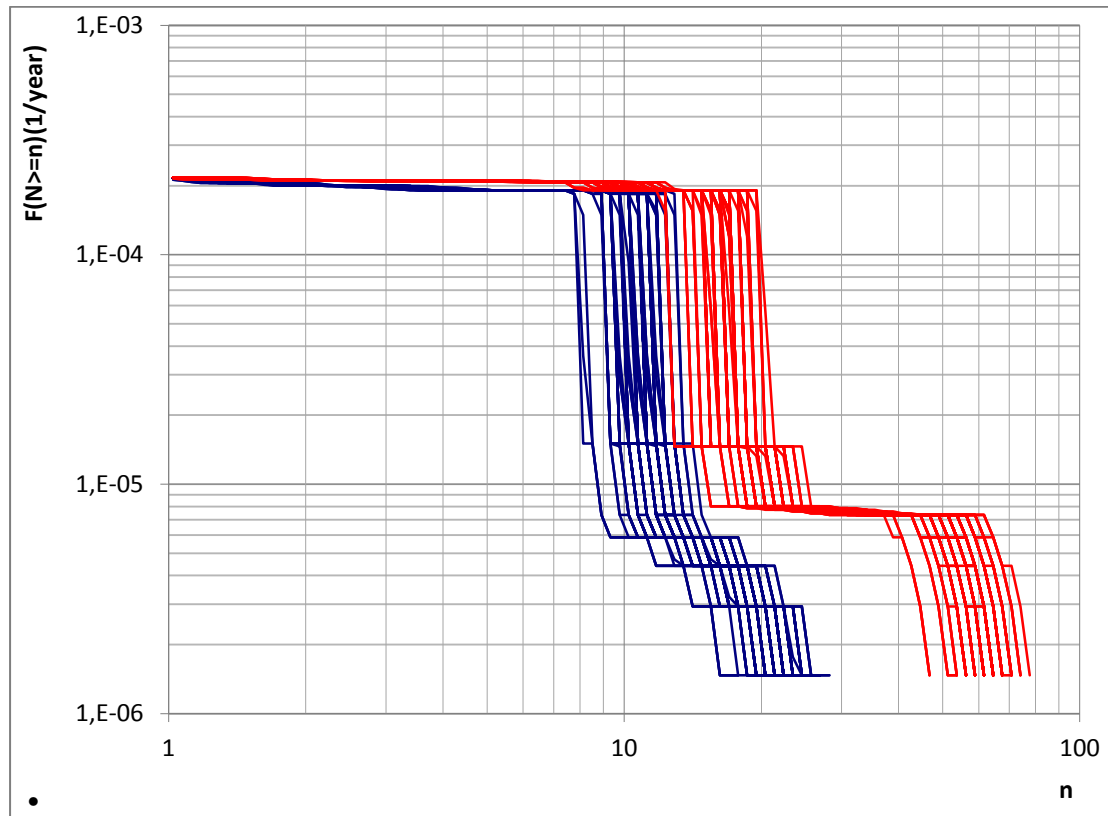


Σχήμα 7.4: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας κυκλοφοριακών δεδομένων (420s)



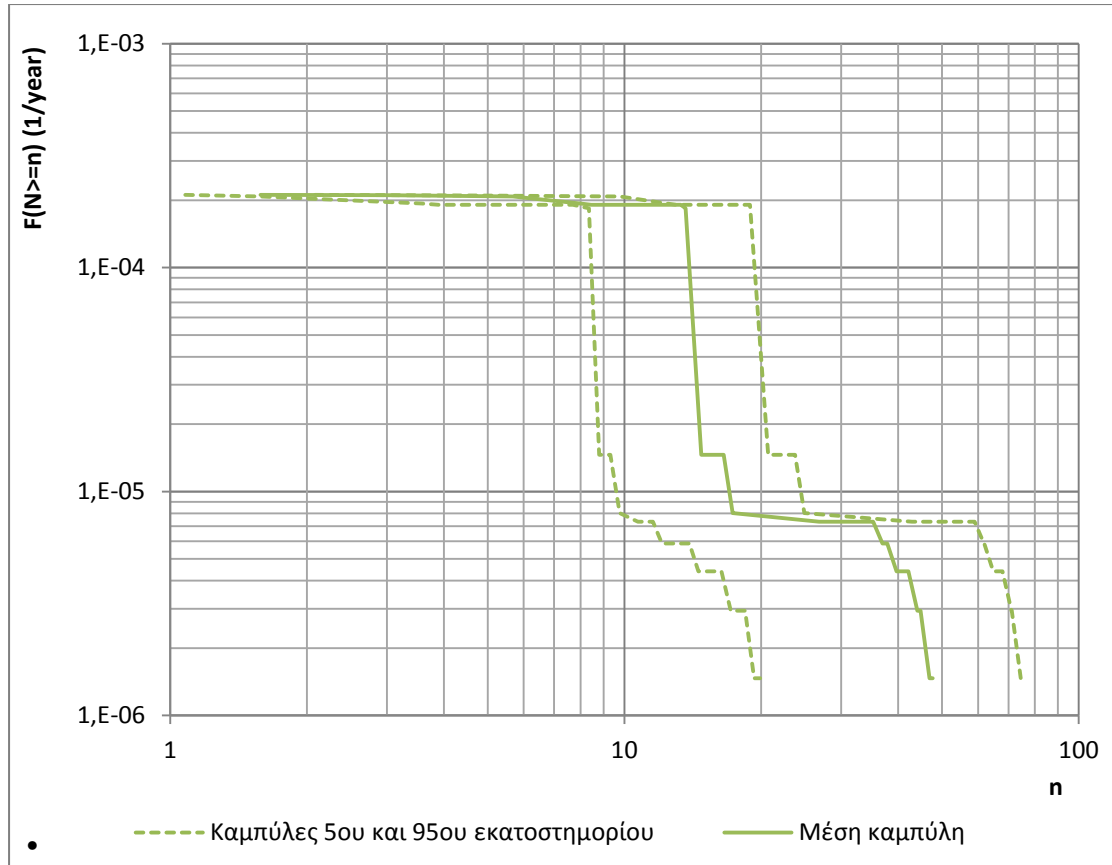
Σχήμα 7.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες εύρους των καμπυλών Σ-Α.α (420s)

Μελετώντας την επιρροή της αβεβαιότητας του συνόλου των παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου DG-QRAM, προέκυψε το επόμενο **Σχήμα 7.6**, ενώ με βάση το συγκεκριμένο σχήμα έγινε ανάλυση του συνολικού εύρους των καμπυλών που προέκυψαν από το DG-QRAM, όπου προσδιορίστηκε η μέση καμπύλη του εν λόγω εύρους, καθώς επίσης οι καμπύλες του πέμπτου (5%) και ενενηκοστού πέμπτου (95%) εκατοστημορίου του εύρους, οι οποίες και δίνονται στο **Σχήμα 7.7**.



**Σχήμα 7.6: Επιρροή της αβεβαιότητας του συνόλου των παραμέτρων**

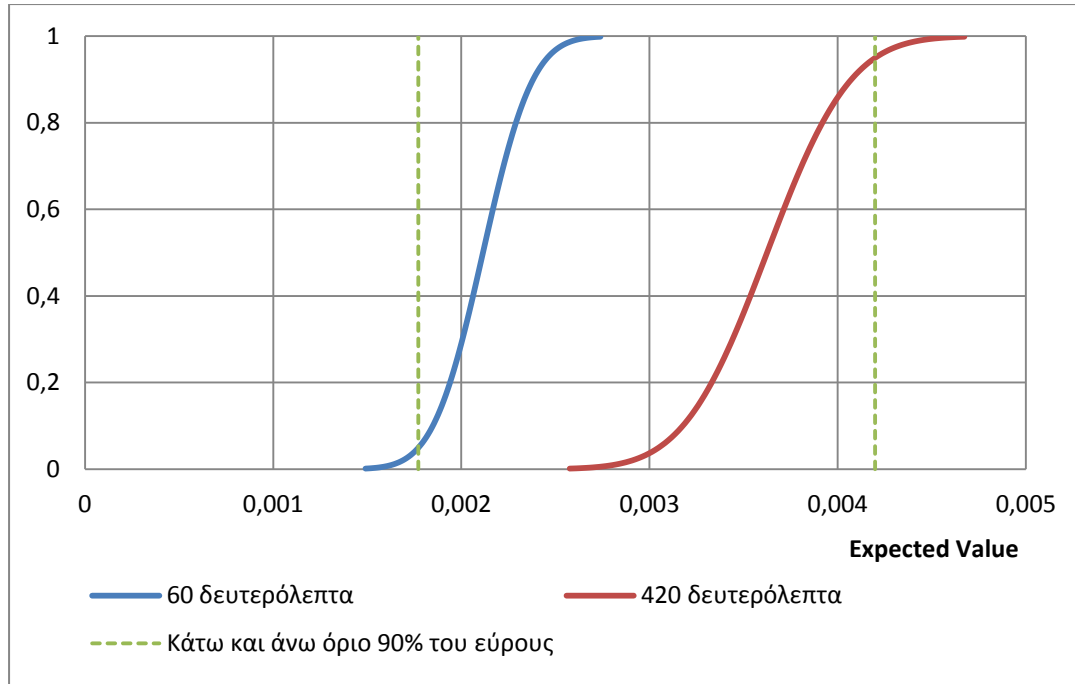
Εξετάζοντας τα δυο σχήματα, γίνεται αντιληπτό πως η αβεβαιότητα όλων των παραμέτρων, που επιλέχθηκαν στη μελέτη της ενδεικτικής σήραγγας, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα του DG-QRAM, καθώς ο χώρος μέσα στον οποίο εντοπίζονται οι καμπύλες Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών είναι αρκετά ευρύς. Πράγματι, συγκριτικά με όλα τα προηγούμενα σχήματα, τα οποία παρουσιάζουν το πως επηρεάζουν ξεχωριστά τα αποτελέσματα του μοντέλου, από τη μια η αβεβαιότητα των παραμέτρων που σχετίζονται με τον χρόνο αντίδρασης του διαχειριστή και από την άλλη η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα κυκλοφοριακά δεδομένα, το εύρος μεταξύ των προκυπτουσών καμπυλών των συγκεκριμένων σχημάτων είναι πολύ μεγαλύτερο. Είναι εμφανές ότι μετά τις 8 ανθρώπινες απώλειες, δεν μπορούν να προκύψουν σαφή συμπεράσματα για τη τιμή της επικινδυνότητας (όταν εκφράζεται μέσω των Καμπυλών Σ-Α.α.α.).



**Σχήμα 7.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες συνολικού εύρους των καμπυλών Σ.-Α.α**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας που προέκυψαν για κάθε επανάληψη. Συγκεκριμένα, με τη χρήση του @RISK προσδιορίστηκε ότι η κανονική κατανομή προσαρμόζεται καλύτερα στο σύνολο των δεδομένων των αναμενόμενων τιμών (Έλεγχος καλής προσαρμογής). Συνεπώς δημιουργήθηκαν δυο κατανομές των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας, για κάθε έναν από τους χρόνους αντίδρασης του διαχειριστή, με μέσες τιμές  $\mu_{60} = 2,11E - 03$ ,  $\mu_{420} = 3,62E - 03$ , και τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_{60} = 2,07E - 04$ ,  $\sigma_{420} = 3,49E - 04$  και αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 7.6** δίνονται οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας.

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των παραπάνω κατανομών είναι ότι η παραμετρική αβεβαιότητα των κυκλοφοριακών δεδομένων επηρεάζει περισσότερο τις αναμενόμενες τιμές επικινδυνότητας που προκύπτουν για χρόνο αντίδρασης του διαχειριστή τα 420 δευτερόλεπτα, σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές για χρόνο αντίδρασης 60 δευτερολέπτων. Όντως, από τη κατανομή των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας για τα 60 δευτερόλεπτα



**Σχήμα 7.8: Επιρροή παραμετρικής αβεβαιότητας στις αναμενόμενες τιμές επικινδυνότητας**

προκύπτει ότι το 90% των τιμών που προέκυψαν από το DG-QRAM βρίσκεται στο διάστημα  $[1,77E - 03, 2,46E - 03]$ , ενώ το αντίστοιχο εύρος για τη κατανομή των 420 δευτερόλεπτων είναι  $[3,05E - 03, 4,19E - 03]$ . Αυτό σχετίζεται κυρίως με την εμφάνιση μεγαλύτερων συνεπειών όταν ο χρόνος αντίδρασης του διαχειριστή είναι 420 δευτερόλεπτα, όπως διαπιστώνεται και στα αντίστοιχα σχήματα των καμπυλών Συχνοτήτων-Αριθμού ανθρωπίνων απωλειών.

Ωστόσο το κυριότερο συμπέρασμα που εξάγεται από το παραπάνω σχήμα είναι η αρκετά μεγάλη απόκλιση των αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας, όταν λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα τόσο των παραμέτρων των κυκλοφοριακών δεδομένων όσο και του διαχειριστή, καθώς, όπως φαίνεται, δημιουργείται ένα πολύ μεγάλο εύρος αναμενόμενων τιμών επικινδυνότητας. Πράγματι, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια των παραπάνω κατανομών, το 90% του συνόλου των τιμών εντοπίζεται στο διάστημα  $[1,77E - 03, 4,19E - 03]$ , δηλαδή το άνω όριο του διαστήματος έχει υπερδιπλάσια τιμή από το κάτω όριο.

## 8 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα του μοντέλου DG-QRAM, έτσι όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανέδειξαν ότι η αβεβαιότητα των παραμέτρων του συγκεκριμένου μοντέλου, μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα τελικά αποτελέσματα του. Αρχικά, αυτό που προέκυψε ως συμπέρασμα από τα αποτελέσματα, είναι ότι η αβεβαιότητα που δημιουργείται λόγω της έλλειψης ενός σαφώς δομημένου πλαισίου ανάλυσης των παραγόντων που επηρεάζουν και διαμορφώνουν τους χρόνους αντίδρασης του διαχειριστή, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας. Ωστόσο, εξίσου επηρεάζει τις τιμές επικινδυνότητας και η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα διάφορα κυκλοφοριακά δεδομένα, και κυρίως με την μεταβλητότητα των συγκεκριμένων παραμέτρων.

Κρίνοντας συνολικά τη διάδοση της παραμετρικής αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του DG-QRAM, το αρκετά ευρύ πεδίο, μέσα στο οποίο μπορούν να εντοπιστούν οι προκύπτουσες τιμές επικινδυνότητας, θέτει ερωτήματα, σε σχέση με τη καταλληλότητα του συγκεκριμένου μοντέλου, στον προσδιορισμό, και έπειτα στην αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών σηράγγων. Παρότι δεν μπορεί να γίνει σε καμία περίπτωση γενίκευση των αποτελεσμάτων του παραδείγματος της παρούσας εργασίας στο σύνολο των μοντέλων αποτιμήσεων επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, λόγω της κοινής δομής των μοντέλων αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, έτσι όπως παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 3**, δημιουργείται η αίσθηση ότι αντίστοιχη μελέτη κάποιου άλλου μοντέλου θα εξήγαγε παρόμοια αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η ανάλυση αβεβαιότητας που έλαβε χώρα στα πλαίσια της μελέτης περίπτωσης του **Κεφαλαίου 6**, ήταν αρκετά περιορισμένης έκτασης, καθώς έγινε εστίαση στη διαχείριση μόνο της παραμετρικής αβεβαιότητας, ενώ ο αριθμός των παραμέτρων που επιλέχθηκαν προς ανάλυση ήταν εξίσου περιορισμένος. Συνυπολογίζοντας λοιπόν, το σύνολο της αβεβαιότητας που εισάγεται στις αποτιμήσεις επικινδυνότητας οδικών σηράγγων, όπως παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 4**, γίνεται αντιληπτό ότι η ανάλυση αβεβαιότητας ήταν αρκετά έως πολύ συντηρητική. Παρόλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί, ότι και η ίδια η διαδικασία ανάλυσης αβεβαιότητας, έτσι όπως διενεργήθηκε, υπόκεινται στις διαφορές υποθέσεις, απλοποιήσεις και γενικεύσεις του μελετητή, και ως εκ τούτου, στα αποτελέσματα της ανάλυσης υπεισέρχεται επίσης η σχετική αβεβαιότητα.

Ωστόσο, πέρα από την ακρίβεια της ανάλυσης και των αποτελεσμάτων, το κυριότερο συμπέρασμα της ανάλυσης της επιρροής της αβεβαιότητας των παραμέτρων, που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας,

είναι ότι στις διαδικασίες αποτίμησης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων εισάγονται αβεβαιότητες, οι οποίες δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να αμελούνται. Αντίθετα, ο εκάστοτε αναλυτής πέρα από τον υπολογισμό των διαφόρων τιμών επικινδυνότητας θα πρέπει να είναι γνωρίζει τόσο τις αβεβαιότητες που εισάγονται στις συγκεκριμένες διαδικασίες όσο και το πώς επηρεάζουν αυτές οι αβεβαιότητες τις τιμές επικινδυνότητας, έτσι ώστε να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει τις εν λόγω τιμές επικινδυνότητας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abrahamsson, M. 2002, *Uncertainty in Quantitative Risk Analysis - Characterization and Methods of Treatment*, Lund University, Sweden, Διαθέσιμο από: [http://www.brand.lth.se/staff/abrahamsson\\_marcus/publications/#0](http://www.brand.lth.se/staff/abrahamsson_marcus/publications/#0) [Δεκέμβριος 2012].

Apostolakis, G. 2004, 'How useful is Quantitative Risk Assessment?', *Journal of Risk Analysis*, vol. 24, no. 3, pp. 515-520.

Arralt, T.T. & Nilsen, A.R. 2009, 'Automatic fire detection in road traffic tunnels', *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 75-83.

Aven, T. & Reniers, G. 2013, 'How to define and interpret a probability in a risk and safety setting', *Journal of Safety science*, vol. 51, pp. 223-231.

Aven, T. & Zio, E. 2011, 'Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 96, pp. 64-74.

Aven, T. 2009, 'Risk Analysis and Management. Basic concepts and principles', *Journal of Reliability and Risk Analysis: Theory and applications*, vol.2, no. 1 (12), pp. 57-73.

Beard A.N. 1997, 'Fire Models and Design', *Fire Safety Journal*, vol. 28, pp. 117-138.

Beard, A.N. & Carvel R. 2005, *The handbook of tunnel fire safety*, Thomas Telford Ltd, England.

Beard, A.N. & Cope, D. 2008, *Assessment of the Safety of Tunnels*, Science and Technology Options Assessment, European Parliament, Διαθέσιμο από: <http://www.europarl.europa.eu/stoa> [Ιανουάριος 2013].

Beard, A.N. 1992, 'Limitations of Computer Models', *Fire Safety Journal*, vol.18, pp. 375-391.

Bjelland, H. & Aven, T. 2013, 'Treatment of uncertainty in risk assessments in the Rogfast road tunnel project', *Journal of Safety Science*, vol. 55, pp. 34-54.

Brussard, L.A., Kruskamp, M.M. & Essink, M.P. 2001, 'The Dutch model for the quantitative risk analysis of road tunnels', *Proceedings of European Safety and Reliability International Conference 2001*, Italy.

Bubbico, R., Di Cave, S., Mazzarotta, B. & Silvetti, B. 2009, 'Preliminary study on the transport of hazardous materials through tunnels', *Journal of Accident Analysis and Prevention*, vol. 41, pp. 1199-1205.

Carvel, R. 2009, 'Ventilation and suppression systems in road tunnels: some issues regarding their appropriate use in fire emergency', *Proceedings of the 2nd International Tunnel Safety Forum for road and rail*, Lyon.

Defert, R., Rentzeperis, I., Koutsoukos, K., Pons, P. & Lacroix, D. 2010, 'Application of a system-based and a scenario-based risk analysis to the Driskos Tunnel: Reflections about accuracy of collected data and uncertainties of risk analysis methods', *Proceedings of 4th International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt*, pp. 113-124.

Démotier, S., Dencœux, T., Schön, W. 2003, 'Risk assessment in drinking water production using belief functions', *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 2711, pp. 319-331.

EU Directive 2004/54/EC. 2004, *Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*, European Commission, Directorate-General for Energy and Transports, Brussels.

European Environment Agency. 2008, *Occupancy rates in passenger transport (TERM 029)*, European Environment Agency of European Union, Copenhagen, Διαθέσιμο από: <http://www.eea.europa.eu/legal/copyright> [Απρίλιος 2013].

Frantzich, H. 1998, *Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering*, Lund University, Sweden, Διαθέσιμο από: [http://www.brand.lth.se/staff/frantzich\\_haakan/publications/#0](http://www.brand.lth.se/staff/frantzich_haakan/publications/#0) [Δεκέμβριος 2012].

Garret, C. & Apostolakis, G. 1999, 'Context in the risk assessment of digital system', *Journal of Risk Analysis*, vol. 19, pp. 24-32.

Guanquan, C. & Jinhui, W. 2012, 'Study on probability distribution of fire scenarios in risk assessment to emergency evacuation', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 99, pp. 24-32.

Hickman, J.W. et al. 1983, *PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants: Chapters 1-8*, vol. 1, Prepared for the Office of Nuclear Regulatory Research, Washington DC, U.S.A.

Hofer, E. 1996, 'When to separate uncertainties and when not to separate', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 54, no. 2, pp. 113-118.

Høj, N.P. & Kröger, W. 2002, 'Risk analyses of transportation on road and railway from a European Perspective', *Journal of Safety Science*, vol. 40, no.1-4, pp. 337-357.

Hollnagel, E. 1998, *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*, Elsevier Science Ltd, Amsterdam.



INERIS. 2005, *Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model: User's Guide*, INERIS.

Institution of Chemical Engineers. 1985, *Risk Analysis in the Process Industries*, European Federation of Chemical Engineering, publication no. 45, England.

ISO Technical Committees. 2009, *Risk management - Principles and guidelines on implementation*, International Organization for Standardization, Διαθέσιμο από: <http://www.iso.org> [Νοέμβριος 2012].

Jones-Lee, M. & Aven, T. 2011, 'ALARP - What does it really mean?', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 96, no. 8, pp. 877-882.

Kaplan, S. & Garrick, B.J. 1981, 'On the Quantitative Definition of Risk', *Journal of Risk Analysis*, vol.1, no.1, pp. 11-27.

Kazaras, K., Kirytopoulos, K. & Rentizelas, A. 2012, 'Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment', *Journal of Safety Science*, vol. 50, 1806-1817.

Kazaras, K., Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Kirytopoulos, K. 2013, 'Enhancing Road Tunnel Risk Assessment with a Fuzzy System Based on the CREAM Methodology', *Chemical Engineering Transactions*, vol. 31.

Kirytopoulos, K.A., Rentizelas, A., Tatsiopoulos, I.P., & Papadopoulos, G. 2010, 'Quantitative risk analysis for road tunnels complying with EU regulations', *Journal of Risk Research*, vol. 13, no. 8, pp. 1027-1041.

Kirytopoulos, K. & Kazaras, K. 2011, 'The need for a new approach in road tunnels risk analysis', *Proceedings of European Safety and Reliability Conference 2011*, France.

Klir, J. & Yuan B. 1995, *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*, Prentice Hall Ltd, New Jersey.

Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Kiranoudis, C. & Markatos, N. 2006, 'A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 706-716.

Larsson, P., Dekker, W.A. & Tingvall, C. 2009, 'The need for a system's theory approach to road safety', *Journal of Safety Science*, vol. 48, pp. 1167-1174.

Le Bon, G. 1971, *Psychologie des Foules*, PUF, Paris.

Leveson, N.G. 2004, 'A new accident model for engineering safer systems', *Journal of Safety Science*, vol. 42, pp. 237-270.

Mamdani, E. 1974, 'Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plants', *Proceedings of IEEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588.

Melchers, R.E. 2001, 'On the ALARP approach to risk management', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 71, pp. 201-208.

Meng, Q. & Qu, X. 2010, 'Quantitative Risk Assessment Model for Fire in Road Tunnels', *Proceedings of the 4th International Workshop in Reliable Engineering Computing (REC 2010)*, ed. Beer M., Muhanna R.L. and Mullen R.L., Research Publishing Services, Singapore, pp. 751-764.

Meng, Q. & Qu, X. 2012, 'Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels', *Journal of Accident Analysis and Prevention*, vol. 48, pp. 254-263.

Meng, Q., Qu, X., Wang, X., Yuanita, V. & Wong, S.C. 2011, 'Quantitative Risk Assessment Modeling for NonHomogeneous Urban Road Tunnels', *Journal of Risk Analysis*, vol. 31, no. 3, pp. 382-403.

Meng, Q., Wang, X., Qu, X., Yong, K.T., Lee, S.P. & Wong, S.C. 2009, 'Quantitative risk assessment models of road tunnels-State of their art and their implication for Singapore's road tunnels', *Proceedings of the 2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail*, Lyon, pp. 192-203.

Muse, S.R. & Thalmann, D. 1997, 'A Model of Human Crowd Behavior: Group Inter-Relationship and Collision Detection Analysis', *Proceedings of Computer Animation and Simulations '97 Eurographics Workshop*, Budapest, pp. 39-51.

Norén, A. & Winér, J. 2003, *Modeling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations*, Lund University, Sweden, Διαθέσιμο από: <http://lup.lub.lu.se> [Μάιος 2013].

Nyvt, O., Privara, S. & Ferkl, L. 2011, 'Probabilistic risk assessment of highway tunnels', *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, vol. 26, pp. 71-82.

Parry, G.W. & Drouin, M.T. 2009, *Risk-informed regulatory decision-making at the U.S. NRC: dealing with model uncertainty*, Prepared for the Office of Nuclear Regulatory Research, Washington DC, U.S.A.

Parry, G.W. 1996, 'The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessments of complex systems', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 54, no. 2-3, pp. 119-126.

Paté-Cornell, M.E. 1996, 'Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 54, 95-111.

PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation Working Group no.2. 2010, *Risk Evaluation*, World Road Association, Διαθέσιμο από: <http://www.piarc.org> [Φεβρουάριος 2013].

PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation. 2007, *Intergraded approach to road tunnel safety*, World Road Association, Διαθέσιμο από: <http://www.piarc.org> [Δεκέμβριος 2012].

PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation. 2008a, *Risk analysis for road tunnels*, World Road Association, Διαθέσιμο από: <http://www.piarc.org> [Δεκέμβριος 2012].

PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation. 2008b, *Management of the operator - Emergency teams interface in road tunnels*, World Road Association, Διαθέσιμο από: <http://www.piarc.org> [Απρίλιος 2013].

Privara, S. 2009, *Risk Analysis of Tunnels*, CTU Prague, Czech Republic, Διαθέσιμο από: <https://support.dce.felk.cvut.cz/pub/privasam/me/dp> [Νοέμβριος 2012].

Rasmussen, J. 1997, 'Risk Management in a dynamic society: A modeling problem', *Journal of Safety Science*, vol. 27, pp. 183-213.

Reason, J. 1997, *Managing the risks of organizational accidents*, Ashgate Publishing Ltd, Aldershot Hants.

Ronchi, E., Colanna, P. & Berloco, N. 2013, 'Reviewing Italian Fire Safety Codes for the analysis of the road tunnel evacuation: Advantages and limitations of using evacuation models', *Journal of Safety Science*, vol. 52, pp. 28-36.

Saccomanno, F. & Haastrup, P. 2002, 'Influence of safety measures on the risks of transporting dangerous goods through road tunnels', *Journal of Risk Analysis*, vol. 22, pp. 1059-1069.

Stamatelatos, M. 2000, *Probabilistic Risk Assessment: What is it and why is it worth performing it*, Office of Mission and Safety Assurance, NASA, Διαθέσιμο από: <http://www.hq.nasa.gov> [Νοέμβριος 2012].

Vose, D. 1996, *Quantitative Risk Analysis: A guide to Monte Carlo Simulation modeling*, John Wiley and Sons Inc, U.S.A.

Zadeh, L. 195, 'Fuzzy Sets', *Journal of Inform Control*, vol. 8, pp. 338-353.

Zarboutis, N. & Marmaras, N. 2005, 'Investigating Crowd behavior during Emergency Evacuations using Agent-Based Modeling', *Proceedings of EAM 2005*, Athens.

Zio, E. 2009, 'Reliability engineering: Old problems and new challenges', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 125-141.

Διοικητική Αρχή Σηράγγων. 2011, *Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα μέσα από οδικές σήραγγες που εμπíπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ. 230/07 (Σεναριακή Προσέγγιση)*, Διοικητική Αρχή Σηράγγων, Αθήνα.

Καζάρας, Κ. 2013, *Αντιδρώντας στους κινδύνους κρίσιμων ως προς την ασφάλεια υποδομών μέσω συστημικής προσέγγισης: Η περίπτωση των οδικών σηράγγων*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

ΠΔ 230/2007. 2007, *Προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην Οδηγία 2005/54/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29ης Απριλίου 2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού δικτύου*, Ελληνική Δημοκρατία, Αθήνα.

Μαρμαράς, Ν. 2002, *Εισαγωγή στην Εργονομία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo, που έγινε στα πλαίσια της μελέτης περίπτωσης του **Κεφαλαίου 6**.

Iteration	LV Occupancy	LV Speed	HGV/Bus Speed	Total Traffic	HGV ratio	Bus/Coaches ratio
1	1,84	105	78	293	0,119	0,0146
2	1,63	100	79	285	0,118	0,0146
3	1,39	99	82	302	0,118	0,0143
4	1,48	100	82	306	0,122	0,0149
5	1,48	103	82	305	0,119	0,0150
6	1,52	94	84	323	0,119	0,0149
7	1,52	103	80	316	0,119	0,0146
8	1,56	100	79	298	0,124	0,0149
9	1,88	99	80	295	0,120	0,0154
10	1,79	96	85	290	0,113	0,0153
11	1,45	99	83	298	0,121	0,0151
12	1,61	101	79	283	0,124	0,0154
13	1,66	99	80	297	0,121	0,0151
14	1,11	100	82	285	0,113	0,0150
15	1,86	98	82	310	0,121	0,0150
16	1,69	104	80	307	0,116	0,0150
17	1,68	103	80	309	0,119	0,0157
18	1,40	98	82	286	0,115	0,0148
19	2,05	99	78	308	0,118	0,0149
20	1,59	101	80	299	0,117	0,0155
21	1,90	100	81	288	0,122	0,0149
22	1,14	103	80	290	0,119	0,0142
23	1,63	96	82	299	0,120	0,0162
24	1,57	97	78	304	0,122	0,0142
25	1,99	105	80	299	0,120	0,0152
26	1,64	96	79	308	0,123	0,0151
27	1,74	94	81	291	0,121	0,0148
28	1,58	96	77	309	0,123	0,0154
29	1,22	101	75	296	0,123	0,0159
30	1,76	100	85	300	0,116	0,0141
31	1,60	98	79	291	0,119	0,0149
32	1,72	101	81	304	0,121	0,0149
33	1,77	99	79	288	0,128	0,0157
34	1,52	101	81	292	0,123	0,0156
35	1,46	102	77	297	0,125	0,0157
36	1,71	105	79	294	0,115	0,0154
37	1,56	96	77	318	0,128	0,0148
38	1,70	106	82	295	0,116	0,0158
39	1,72	100	78	287	0,117	0,0151

40	1,50	98	77	287	0,124	0,0148
41	1,61	103	77	300	0,127	0,0147
42	1,94	98	78	306	0,119	0,0153
43	1,35	98	78	301	0,114	0,0160
44	1,78	101	83	313	0,117	0,0149
45	1,81	100	82	302	0,115	0,0143
46	1,89	99	81	301	0,120	0,0145
47	1,62	98	81	293	0,121	0,0159
48	1,55	97	81	312	0,118	0,0155
49	1,42	97	81	293	0,115	0,0146
50	1,59	104	79	294	0,123	0,0145
51	1,27	95	78	292	0,116	0,0154
52	1,91	99	81	305	0,112	0,0153
53	1,85	101	77	299	0,120	0,0156
54	1,49	93	79	312	0,119	0,0152
55	1,34	99	82	308	0,120	0,0147
56	1,55	94	80	310	0,124	0,0150
57	1,96	105	80	297	0,125	0,0147
58	1,80	96	81	303	0,119	0,0140
59	1,74	99	80	281	0,118	0,0153
60	1,73	101	82	275	0,125	0,0138
61	1,77	98	81	289	0,125	0,0139
62	1,64	95	84	304	0,122	0,0148
63	2,11	101	78	294	0,123	0,0148
64	1,47	100	76	314	0,123	0,0147
65	1,83	98	87	306	0,114	0,0151
66	1,37	102	83	291	0,111	0,0147
67	1,75	91	84	301	0,121	0,0151
68	2,23	102	79	303	0,125	0,0143
69	1,83	102	83	306	0,130	0,0153
70	1,67	95	86	307	0,122	0,0148
71	1,75	103	71	282	0,124	0,0150
72	1,31	102	78	302	0,121	0,0141
73	1,54	101	77	315	0,120	0,0144
74	1,80	100	76	311	0,120	0,0155
75	1,32	103	77	312	0,120	0,0147
76	1,46	95	80	305	0,127	0,0146
77	1,94	108	77	289	0,122	0,0155
78	1,43	98	78	296	0,122	0,0152
79	1,67	103	75	300	0,124	0,0158
80	1,82	101	79	325	0,125	0,0152
81	2,00	100	84	310	0,127	0,0153
82	1,65	104	76	311	0,121	0,0144
83	1,21	102	83	277	0,110	0,0146
84	1,50	106	80	315	0,114	0,0145
85	1,28	97	84	295	0,118	0,0144

<b>86</b>	1,77	99	80	298	0,122	0,0151
<b>87</b>	2,02	102	82	304	0,116	0,0144
<b>88</b>	1,41	97	74	298	0,117	0,0163
<b>89</b>	1,65	100	79	307	0,117	0,0152
<b>90</b>	1,62	108	83	295	0,120	0,0145
<b>91</b>	1,53	106	79	284	0,126	0,0156
<b>92</b>	1,91	97	81	299	0,121	0,0152
<b>93</b>	1,68	105	76	301	0,118	0,0153
<b>94</b>	1,43	102	80	296	0,116	0,0151
<b>95</b>	2,16	97	83	297	0,117	0,0154
<b>96</b>	1,57	97	75	320	0,118	0,0156
<b>97</b>	1,97	102	81	302	0,117	0,0147
<b>98</b>	1,87	104	80	292	0,117	0,0150
<b>99</b>	1,70	104	85	318	0,114	0,0152
<b>100</b>	1,38	102	78	303	0,126	0,0150