

Ανάλυση ευαισθησίας  
παραμέτρων κατά τη μελέτη  
διαχείρισης επικινδυνότητας  
διέλευσης επικίνδυνων φορτίων

Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας  
Επιβλέπων: Κηρυττόπουλος Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023



--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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 εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Σπυρίδων – Ηλίας Αλέπης

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

**Περιεχόμενα**

Σύνοψη – Περίληψη .....	5
Abstract.....	6
Συντομεύσεις - αρκτικόλεξα (abbreviations).....	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Πλαίσιο Έρευνας .....	8
1.2 Κύρια Προβλήματα .....	8
1.3 Σκοπός Ερευνάς.....	9
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα.....	9
1.5 Ερευνητικοί στόχοι.....	10
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	11
2.1 Ανάγκη για διαχείριση Επικινδυνότητας .....	11
2.1.1 Πιθανές Αίτιες ατυχημάτων και είδη ατυχημάτων .....	11
2.1.2 Πυρκαγιές και ιδιαιτερότητές τους σε οδικές σήραγγες.....	13
2.1.3 Φιλοσοφία σχεδιασμού .....	15
2.1.4 Τρόποι μοντελοποίησης και ανάλυσης της επικινδυνότητας.....	18
2.2 Υπάρχον νομοθετικό πλαίσιο στην ΕΕ και στην Ελλάδα και δυσκολίες εφαρμογής προτύπων .....	18
2.3 Τεχνικές μείωσης και διαχείρισης της επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες ..	21
2.3.1 Μέτρα αύξησης επιπέδου ασφαλείας στις οδικές σήραγγες .....	21
2.3.2 Μελέτη με χρήση εναλλακτικών διαδρομών .....	27
2.3.3 Τεχνοοικονομική ανάλυση της διαχείρισης της επικινδυνότητας.....	30
2.4 Μελέτη και Έρευνα πάνω στο μοντέλο DG-QRAM .....	32
2.4.1 Προσπάθειες ερευνάς και ανάπτυξης μοντέλων .....	32
2.4.2 Ανάπτυξη του μοντέλου DG-QRAM.....	35
3. Μεθοδολογία/Μέθοδος έρευνας.....	36
4. Παρουσίαση μοντέλου DG-QRAM.....	39
4.1 Περιγραφή μοντέλου DG-QRAM .....	39
4.2 Νέα χαρακτηριστικά Λογισμικού έκδοση 4.04.....	42
5. Χρήση νέου λογισμικού QRAM - Μελέτη περίπτωσης.....	44
5.1 Δεδομένα στο μοντέλο .....	44
5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας .....	47
5.2.1 Διαδικασία Επιλογής Παραμέτρων Ανάλυσης Ευαισθησίας .....	47
5.2.2 Σύγκριση FN Curves.....	52
6. Συμπεράσματα.....	92
7. Κατάλογος αναφορών - Βιβλιογραφία .....	95
9. Κατάλογος Πινάκων .....	99
10. Κατάλογος Σχημάτων .....	100

## Σύνοψη – Περίληψη

Η μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσω οδικών σηράγγων είναι κάτι αναγκαίο για την παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα. Εμπεριέχει όμως μεγάλη αβεβαιότητα και συνεπώς κινδύνους που έχουν οδηγήσει στην δημιουργία ειδικού κλάδου διαχείρισης διακινδύνευσης. Στο πλαίσιο αυτής, η παρούσα εργασία μέσω βιβλιογραφικής μελέτης και διενεργείας προσομοιώσεων στο λογισμικό DG-QRAM σε πρότυπη ελληνική σήραγγα έχει σκοπό να συνεισφέρει στην αύξηση του συνολικού επιπέδου ασφάλειας. Από τις δοκιμές εντοπιστήκαν παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την επικινδυνότητα και καταγράφηκαν προτάσεις αύξησης του επιπέδου ασφάλειας με μέτρα που τις επηρεάζουν. Η βιβλιογραφική έρευνα μελέτα αρχικά τις κυρίες αιτίες ατυχημάτων στις σήραγγες εξηγώντας την αβεβαιότητα τους. Στην συνέχεια αναλύεται η φιλοσοφία σχεδιασμού με όριο ALARP. Καταγράφεται και το νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο διαχείρισης διακινδύνευσης με έμφαση στην ελληνική πραγματικότητα και τις δυσκολίες της. Ταυτόχρονα καταγράφονται πολλές διαφορετικές μέθοδοι και μέτρα μείωσης της Αναμενομένης τιμής της ατομικής επικινδυνότητας από την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες από διάφορους ερευνητές. Για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα όλων αυτών των μέτρων παρουσιάζεται και ο παράγοντας κόστος – όφελος καθώς απαιτείται και τεχνοοικονομική ανάλυση για τα μέτρα αυτά.

Στην συνέχεια η εργασία εστιάζει στο μοντέλο DG-QRAM. Παρατίθενται τα στάδια ανάπτυξης του καθώς και παρελθοντικές ερευνητικές προσπάθειες. Αναλύονται μάλιστα τα νέα χαρακτηριστικά του στην έκδοση 4.04. Με βάση μια πρότυπη σήραγγα του ελληνικού οδικού δικτύου εκτελέστηκαν προσομοιώσεις. Για την σήραγγα αυτή συγκεντρωθήκαν και εκτιμήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας. Επιλέχθηκαν 6 παράμετροι και εύρος για την κάθε μια, για τις οποίες έγιναν δοκιμές (με μια αλλαγή σε κάθε δοκιμή) για να διαπιστωθεί η επιρροή τους στην Αναμενόμενη τιμή ατομικής επικινδυνότητας. Βρέθηκαν λοιπόν οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επιρροή στο επίπεδο ασφάλειας. Έπειτα, καθώς στόχος της εργασίας είναι οι αποτελεσματικές προτάσεις για αύξηση της ασφάλειας, βρέθηκε από ποια μέτρα επηρεάζεται η κάθε παράμετρος. Καταγράφονται συνεπώς μέτρα και προτάσεις μελλοντικής ερευνάς που μέσω της επιρροής στις παραμέτρους αυτές αυξάνουν σημαντικά το επίπεδο ασφάλειας.

Οι προσομοιώσεις, οι προτάσεις και τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία είναι σημαντικά για την ασφάλεια οδικών σηράγγων στην Ελλάδα και για τους χρήστες του μοντέλου DG-QRAM γενικότερα. Μέσω αυτής της ανάλυσης παρατίθεται με εύκολο τρόπο η μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας που εφαρμόζεται και σε άλλες σήραγγες του ελληνικού οδικού δικτύου. Έτσι και οι χρήστες του DG-QRAM αλλά και όσοι επιθυμούν να διερευνήσουν το επίπεδο ασφάλειας μιας σήραγγας μπορούν να συμβουλευτούν την εργασία αυτή για ορθότερη και γρηγορότερη δική τους ανάλυση. Τέλος, οι καταγεγραμμένες προτάσεις ισχύουν και για άλλες παρόμοιες σήραγγες άρα μπορεί να παραληφθεί αυτή η ανάλυση και να εφαρμοστούν απευθείας τα μέτρα για αύξηση του επιπέδου ασφάλειας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε αυτές.

## Abstract

Dangerous goods transportation via road tunnels is crucial for the global supply chain. However, there is a lot of uncertainty in this type of transportation which leads to a variety of risks. Therefore, dedicated risk management research was imperative. In this context, this thesis, through bibliographic study and simulations of a case-study tunnel in the Greek road network at DG-QRAM software, aims to increase the total safety level. After these simulations, many parameters that significantly affect the risk level were identified. Then, solutions that affect these parameters and thus the safety level, were proposed. Firstly, the bibliographic study explores the major causes of tunnel accidents while explaining the reasons of their uncertainty. Moreover, the design philosophy of ALARP is presented in detail. On top of that, the risk management regulation and legislation are explained with focus on Greece and its unique difficulties. Simultaneously, many different methods and solutions that reduce the Expected Value of individual risk were presented. In order to assess the effectiveness of these methods the cost – benefit factor is introduced because techno-economic analysis is required as well.

Then the focus shifts to the DG-QRAM. Past research and the model's stages of development were presented. After that, new characteristics of software version 4.04 were analysed. Using the case-study Greek tunnel the simulations were carried out. In order to complete the sensitivity analysis, the necessary tunnel data was either found or estimated. 6 Parameters and value ranges were selected in order to run simulations (with one changing at the time) and calculate the fluctuation in the total Expected Value of individual risk. As a result, parameters with the biggest change in EV were identified. This thesis aims to present effective solutions for increased safety, so measures that affect these parameters were identified and turned into recommendations. So, both solutions and recommended future research were proposed.

Simulations, recommendations and conclusions from this thesis are important for road tunnel safety in Greece and for potential users of DG-QRAM. Through this research, a sensitivity analysis methodology is presented in a simple way so it can be utilised easily in other Greek tunnels as well. So potential users can effectively use this thesis to achieve more effective and less time-consuming risk analysis. In the end, all these recommendations are valid for different Greek tunnels so they can be applied without the need for thorough risk analysis.

## Συντομεύσεις - αρκτικόλεξα (abbreviations).

PIARC: Διεθνή Οργανισμού Οδοποιίας

EV: Αναμενομένη Τιμή

ALARP: Όσο χαμηλό όσο είναι λογικά πρακτικό

ΟΜΟΕ: Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων

HGV: Όχημα μεταφοράς βαρέων φορτίων

DG: Επικινδυνά φορτία

QRAM: Μοντέλο Ποσοτικής διαχείρισης διακινδύνευσης

BLEVE: Έκρηξη οφειλόμενη σε απότομη διαστολή ατμών

HRR: Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας

LQI: Δείκτης Ποιότητας Ζωής

VPF: Τιμή ανά θάνατο

LCO: Βελτιστοποίηση κόστους ζωής

MFRA: Ανεκτικότητα πολλαπλών θανάτων

RSA: Επιθεώρηση Οδικής ασφάλειας

RSI: Έλεγχος Οδικής ασφάλειας

Q: Quiet time period

N: Normal time period

P: Peak time period

Οχ: Οχήματα

Veh: Οχήματα

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Πλαίσιο Έρευνας

Σε μια παγκόσμια οικονομία όπου η ανταλλαγή και η μεταφορά αγαθών από χώρα σε χώρα είναι καθημερινό φαινόμενο είναι εμφανής η αξία των οδικών μεταφορών. Οι οδικές μεταφορές μάλιστα αποτελούν τον κύριο όγκο των συνολικών μεταφορών καθώς υπερτερούν για τεχνοοικονομικούς λόγους έναντι των θαλάσσιων και αναέριων. Η μορφολογία του εδάφους ορισμένων χωρών έχει οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης σηράγγων στα οδικά δίκτυα. Οι οδικές μεταφορές μέσω σηράγγων κρύβουν πολλούς διαφορετικούς κίνδυνους για τους οποίους πλέον υπάρχει ξεχωριστός κλάδος που μελετά. Ιδιαίτερα όταν εστιάζουμε στις μεταφορές επικίνδυνων φορτίων ο κλάδος της διαχείρισης διακινδύνευσης διέλευσης τέτοιων φορτίων από οδικές σήραγγες καθίσταται καταλυτικός. Η μελέτη για τους πιθανούς κίνδυνους δεν ήταν όμως πάντοτε τόσο εκτενής και συστηματική. Αφενός η γιγάντωση του κλάδου των οδικών μεταφορών και αφετέρου τα αρκετά σοβαρά παρελθοντικά ατυχήματα οδήγησαν στην άνθιση και της διαχείρισης διακινδύνευσης. Σήμερα πληθώρα ερευνητών συνεργάζονται με τους διαχειριστές σηράγγων με στόχο την αύξηση του επιπέδου ασφαλείας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. Η έρευνα πλέον είναι συστηματική και με συγκεκριμένους στόχους. Σε αυτό το πλαίσιο και η παρούσα εργασία θα προσπαθήσει με την χρήση της βιβλιογραφίας και με προσομοιώσεις σε πρότυπη σήραγγα να συμβάλει στον κλάδο της διαχείρισης διακινδύνευσής. Στο τέλος από την ανάλυση υπάρχουν και προτάσεις μελλοντικής ερευνας για την αύξηση του συνολικού επιπέδου ασφάλειας των σηράγγων

### 1.2 Κύρια Προβλήματα

Τα κυρία προβλήματα που συνάντα αυτή η έρευνα:

- Δυσκολία άμεσης σύγκρισης διαφορετικών προτύπων ως προς τον καθορισμό του αποδεκτού επιπέδου επικινδυνότητας αλλά και των παραμέτρων που θα το υπολογίσουν.
- Αντικρουόμενα πρότυπα ασφαλείας και απαιτήσεις κάθε χώρας.
- Ύπαρξη μη συγκρίσιμων διαφορετικών μεθόδων ως προς το τρόπο προσδιορισμού του επιπέδου επικινδυνότητας,
- Δυσκολία για ακριβή προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης με τα μοντέλα λόγω μεγάλης αβεβαιότητας,



- Έλλειψη παρελθοντικών δεδομένων οδικών ατυχημάτων στην Ελλάδα λόγω μη καταγραφής τους, καθώς και βάσης δεδομένων για μελλοντικά.

### 1.3 Σκοπός Ερευνάς

---

Ο σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας:

- Συνεισφορά στην αύξηση της ασφάλειας των σήραγγων κατά την διέλευση επικίνδυνων φορτίων.
- Εύρεση παραμέτρων λειτουργίας της σήραγγας που επηρεάζουν σημαντικά την επικινδυνότητα, με σκοπό την αύξηση ασφάλειας.
- Προτάσεις αποτελεσματικής διαχείρισης της επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες.

### 1.4 Ερευνητικά ερωτήματα

---

Τα κυρία ερευνητικά ερωτήματα που καθόρισαν την έρευνα:

- Ποιες είναι οι προκλήσεις στη διενέργεια ανάλυσης επικινδυνότητας οδικών σήραγγων που περιλαμβάνουν τη διέλευση επικίνδυνων φορτίων;
- Πως θα προσομοιάσουμε αποτελεσματικά τις πραγματικές συνθήκες μιας σήραγγας με τα μοντέλα DG-QRAM δεδομένου της αβεβαιότητας και των απλοποιήσεων του μοντέλου;
- Πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων από χρήση διαφορετικών παραμέτρων;
- Ποιες είναι οι παράμετροι λειτουργίας που η μεταβολή τους συνεισφέρει σημαντικά και με μικρό κόστος στην μείωση της επικινδυνότητας;

## 1.5 Ερευνητικοί στόχοι

---

Οι κύριοι ερευνητικοί στόχοι της εργασίας:

- Προσδιορισμός και αποτελεσματική εκτίμηση απαιτούμενων δεδομένων για την ανάλυση επικινδυνότητας συγκεκριμένων σηράγγων.
- Διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών παραμέτρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων επικινδυνότητας.
- Καταγραφή προτάσεων αποδοτικής αύξησης του επιπέδου ασφάλειας σε οδικές σήραγγες.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Ανάγκη για διαχείριση Επικινδυνότητας

Η διαχείριση της επικινδυνότητας είναι μια σειρά μεθοδολογιών, μέτρων πρόληψης και αποφυγής συμβάντων που χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα. Η πιθανοτική και απρόβλεπτη φύση κάποιων καταστροφών οδήγησε την επιστημονική και όχι μόνο κοινότητα να διερευνήσει λύσεις προστασίας από τέτοιους κίνδυνους. Ειδικά σε περιπτώσεις που οι κίνδυνοι αυτοί αφορούν ανθρώπινες ζωές η ανάγκη πολλαπλασιάζεται. Σε έργα που χρησιμοποιούνται από πλήθος ανθρώπων και έχουν δημόσια αξία όπως οι οδικές σήραγγες είναι επιβεβλημένη η ανάπτυξη της διαχείρισης της επικινδυνότητας. Μια ιδιαιτερότητα της διαχείρισης διακινδύνευσης είναι ότι τα έξοδα για την πραγματοποίηση της τα επωμίζεται ο διαχειριστής της σήραγγας (ΟΜΟΕ,2001). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές για εξοικονόμηση πόρων να γίνεται με προχειρότητα ή και να παραλείπεται.

Ποιοι είναι όμως οι συγκεκριμένοι λόγοι και οι ιδιαιτερότητες στην περίπτωση της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες?

#### 2.1.1 Πιθανές Αίτιες ατυχημάτων και είδη ατυχημάτων

Για να διερευνηθεί η αξία της διαχείρισης επικινδυνότητας είναι σημαντικό να αναφερθεί η τυχαιότητα και το εύρος πιθανών ατυχημάτων. Εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις ασφάλειας είτε σε Prescriptive approach είτε Risk-based Approach γιατί υπάρχουν τόσοι ακόμα κίνδυνοι και ποιες είναι οι κυρίες αίτιες ατυχημάτων? Αρχικά γίνεται αντιληπτό πως υπάρχουν παράμετροι και παράγοντες με μεγάλη αβεβαιότητα κατά την λειτουργία μιας σήραγγας. Η πολυπλοκότητα αυτών των παραγόντων φαίνεται και από την δυσκολία στην δημιουργία μοντέλων που θα αναφερθεί αργότερα. Από παρελθοντικά δεδομένα (Beard and Core,2007) καθίσταται σαφές ότι η κυριά αίτια σοβαρών ατυχημάτων είναι οι μεγάλες φωτιές. Εκτός από τις πυρκαγιές σημαντικοί κίνδυνοι θεωρούνται και από την νομοθεσία (ΟΜΟΕ,2001) οι εκρήξεις (BLEVE) και η απελευθέρωση τοξικών αέριων. Εκτενής ανάλυση για τις συνθήκες που καθιστούν μια φωτιά στην σήραγγα καταστροφική υπάρχει παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό. Παράλληλα βλάβες στα συστήματα ελέγχου της σήραγγας επιφέρουν δυσλειτουργία στις ενέργειες αντιμετώπισης που έχουν προβλεφθεί με αποτέλεσμα δυσμενέστερες επιπτώσεις. Ακόμα καθοριστικός είναι και ο ανθρώπινος παράγοντας. Η οδική συμπεριφορά, η έλλειψη ενημέρωσης για τις απαραίτητες ενέργειες εκκένωσης καθώς και η χαλαρότητα κατά την επίβλεψη και συντήρηση των σηράγγων είναι κάποιες από τις βασικότερές αίτιες σφοδρών ατυχημάτων. Επιπρόσθετα οι οδηγοί όταν πρέπει να αντιμετωπίσουν μια έκτακτη συνθήκη πολλές φορές δρουν με πανικό δημιουργώντας ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα. Για αυτό και κατά την διαχείριση της διακινδύνευσης το σύστημα ασφάλειας περιλαμβάνει (Ntzeremes and Kirytopoulos,2018) α) τις εγκαταστάσεις β) τις υποδομές γ) την κυκλοφορία δ) τους χρήστες και ε) τα οχήματα έτσι ώστε να προσεγγίζεται το θέμα ολιστικά.

Τα ατυχήματα χωρίζονται σε δυο τύπους M,C. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά την απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών κατά την διάρκεια του ατυχήματος. Αν υπάρχει απελευθέρωση τέτοιων ουσιών και ο αριθμός των θυμάτων είναι άμεση συνέπεια αυτών είναι Τύπου M. Διαφορετικά όταν το αίτιο των θανάτων ή των τραυματισμών είναι ιδιά με ένα τυπικό ατύχημα βαρειών οχημάτων. Ανάλογα με το μοντέλο που θα επιλεγεί δίνεται έμφαση στην αποφυγή ενός τύπου η και των δυο. Για παράδειγμα στην σύγκριση διάδρομων με προσομοιώσεις QRAM δεν λαμβάνονται υπόψιν τα ατυχήματα τύπου C (ΟΜΟΕ,2001). Ο λόγος είναι ότι είναι πιο πιθανά από τα τύπου M και θα επηρέαζαν σημαντικά την Αναμενομένη τιμή (EV) διαστρεβλώνοντας την τελική κρίση. Οι διάφορες είναι μικρότερες και πιο αισθητές όταν μελετώνται μόνο τα τύπου M.

Τα ατυχήματα σε σήραγγα καθώς αφορούν στο σύνολο την κοινωνία και μπορούν να επηρεάσουν (Hokstad and Steiro,2004).

- Ανθρώπους (Χρήστες, Διαχειριστές)
- Περιβάλλον
- Δομές
- Λειτουργικότητα
- Δεδομένα
- Φήμη
- Εφοδιαστική αλυσίδα

Με ευρύτερη ανάλυση σε αυτούς τους τομείς προκύπτουν 11 κατηγορίες απωλειών

1. Απώλεια ζωής σε σοβαρό ατύχημα (πάνω από 5 θάνατοι)
2. Απώλεια ζωής σε μικρών διαστάσεων ατύχημα
3. Σοβαρός τραυματισμός
4. Χρόνια επίπτωση στην υγεία
5. Μακροχρόνια μείωση της ποιότητας ζωής
6. Έντονη μόλυνση η ρύπανση του περιβάλλοντος
7. Συνεχής μόλυνση η ρύπανση του περιβάλλοντος
8. Υλικές ζημιές
9. Απώλεια λειτουργικότητας της δομής
10. Απώλεια δεδομένων

## 11. Δυσφήμιση

Η κατηγοριοποίηση αυτή έχει αξία διότι οι κίνδυνοι και απώλειες μιας κατηγορίας μπορούν να αντιμετωπιστούν με παρόμοιες μεθόδους και μέτρα. Έτσι διευκολύνεται η συνολική διαχείριση διακινδύνευσης.

### 2.1.2 Πυρκαγιές και ιδιαιτερότητές τους σε οδικές σήραγγες

Όπως αναφέρθηκε η πιο συχνή αιτία ατυχημάτων στις οδικές σήραγγες είναι οι πυρκαγιές. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σηράγγων καθιστούν τις φωτιές στο εσωτερικό τους εξαιρετικά επικίνδυνες. Αυτό σημαίνει ότι το HRR (Heat Release Rate) που θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική παράμετρος σφοδρότητας μιας φωτιάς, πολλαπλασιάζεται καθώς η ενέργεια της φωτιάς απελευθερώνεται ταχύτερα και σε μικρότερο χώρο. Μαζί με τις αρχές της μεταφοράς θερμότητας και την πρόβλεψη του HRR γίνεται εκτίμηση για την συμπεριφορά της φωτιάς που ξεσπά. Σε πιο εξειδικευμένες αναλύσεις χρησιμοποιείται και προσομοίωση CFD (Computational Fluid Dynamics) για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της. Μια φωτιά ξεσπά συνήθως από κάποιο οδικό ατύχημα. Κάτι τέτοιο δημιουργεί μεγάλη αβεβαιότητα και πολλαπλά σενάρια σχετικά με την θέση και την ένταση της. Μπορεί να γίνει στην είσοδο είτε στην χειρότερη περίπτωση βαθιά στο εσωτερικό. Η αντιμετώπιση των πυρκαγιών προϋποθέτει άψογη λειτουργία όλων των συστημάτων της σήραγγας. Το σύστημα εξαερισμού, η ραδιοεπικοινωνία και οι κάμερες ασφάλειας είναι μερικά από αυτά. Παράλληλα όμως υπάρχει και ο απρόβλεπτος ανθρώπινος παράγοντας. Η διαδικασία εκκένωσης από τους οδηγούς καθώς και η ετοιμότητα των υπεύθυνων της σήραγγας είναι παράγοντες μέγιστης σημασίας. Συγκεκριμένα όσον αφορά την εκκένωση είναι καθοριστικό να έχουν γνώση και εκπαίδευση οι οδηγοί για να γνωρίζουν ποια είναι τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθήσουν. Τις περισσότερες φορές τέτοια εκπαίδευση είναι ελλιπής. Ακόμα και με άριστη θεωρητική γνώση βέβαια ο πανικός και ο φόβος που θα βιώσουν οι εμπλεκόμενοι μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες. Φυσικά και τα χαρακτηριστικά της σήραγγας επηρεάζουν άμεσα το τρόπο αντιμετώπισης των φωτιών. Η γεωμετρία η κατεύθυνση οι λωρίδες κυκλοφορίας μέχρι και οι θέσεις εξόδων κίνδυνου και εξαερισμού είναι διαφορές που μπορεί να επιβάλουν διαχείριση εντελώς διαφορετική. Παράλληλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μιας σήραγγας επηρεάζουν καθοριστικά. Η επένδυση πυροπροστασίας και η επιλογή των πυρίμαχων υλικών είναι τα πιο επιδραστικά. Επιπλέον τα χαρακτηριστικά της ίδιας της πυρκαγιάς κρίνονται καθοριστικά. Η ένταση της σε MW μας βοηθάει να επιλέξουμε τον τρόπο αντιμετώπισης. Γενικά φωτιές με HRR άνω των 20MW μελετώνται στα περισσότερα μοντέλα. Εξαιρετικά δυσμενείς είναι αυτές άνω των 100MW ενώ οι μικρότερες των 20MW δεν μοντελοποιούνται. Φυσικά ο σχεδιασμός για τις πιθανές πυρκαγιές εμπεριέχει πάντα έναν παραμένοντα κίνδυνο η επίπτωση του οποίου διαφέρει ανάλογα με το αποδεκτό επίπεδο επικινδυνότητας.

Για την εις βάθος κατανόηση των φωτιών σε οδικές σήραγγες έχουν διεξαχθεί πολλά πειράματα (Beard and Core,2007). Στην αρχή τα πρώτα πειράματα είχαν ως στόχο κυρίως την

μελέτη της συμπεριφοράς του καπνού. Πλέον όμως αν και πολύ περιορισμένα έχουν πολύ ευρύτερους στόχους. Η διεξαγωγή τους είναι μια δύσκολη και αμφιλεγόμενη διαδικασία και για αυτό είχαν δημιουργηθεί διαφορετικούς είδους δράσεις οι οποίες όμως στην πλειοψηφία τους έχουν εξαλειφθεί.

Για παράδειγμα στην Νορβηγία (Συγκεκριμένα στο Όσλο) από έρευνες και παρελθοντικά δεδομένα έχουν προκύψει οι παρακάτω αιτίες θανάτων (Beard and Core,2007).

### Πίνακας 1 Θάνατοι σε διάφορους τύπους ατυχημάτων

Τύπος Ατυχήματος	Θάνατοι ανά δισεκατομμύριο ανθρώπους χιλιόμετρα (PLL)
Καθημερινά ατυχήματα στην κυκλοφορία	0.74
Πυρκαγιές σε ελαφρά οχήματα	0.08
Πυρκαγιές σε Βαρέα οχήματα	0.24
Πυρκαγιές σε σήραγγες	0.01
Ατυχήματα που εμπλέκονται επικίνδυνα φορτία	0.04

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των ατυχημάτων αφορούν συνήθη συμβάντα στην κυκλοφορία όμως με την υπόθεση ότι τα συμβάντα επικίνδυνων φορτίων εμπεριέχουν συνήθως φωτιές φαίνεται η μεγάλη αξία των μέτρων περιορισμού και αντιμετώπισης των πυρκαγιών.

Το χαρακτηριστικό της αβεβαιότητας στις πυρκαγιές στις οδικές σήραγγες είναι ένας από τους άξονες της ερευνάς στην προσπάθεια αύξησης του επιπέδου ασφαλείας. Όμως σύμφωνα με τους (Ntzeremes, Kirytoroulos and Leoroulos,2020) οι σύγχρονες μέθοδοι δεν δίνουν τη απαραίτητη έμφαση στην αβεβαιότητα που πηγάζει από τον ανθρώπινο παράγοντα. Προτείνονται τρόποι με τους οποίους θα ενταχθεί στα μοντέλα και αυτή η παράμετρος. Γίνεται μάλιστα διαχωρισμός αναμεσα στην αβεβαιότητα πιθανοτήτων γεγονότων και την αβεβαιότητα στην συμπεριφορά που μπορεί να προέρχεται από άγνοια. Δίνεται συνεπώς έμφαση στην δεύτερη που αφορά άμεσα τους χρήστες. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να συμπεριληφθεί είναι η πιθανοτική ανάλυση. Δηλαδή να θεωρηθεί ως διάφορες παράμετροι που μπορεί να λάβουν τιμές με ένα εύρος.

### 2.1.3 Φιλοσοφία σχεδιασμού

#### Ανάγκη αύξησης επιπέδου ασφάλειας

Η ασάφεια στο αποδεκτό επίπεδο ασφάλειας έχει οδηγήσει στην δημιουργία διαφορετικών φιλοσοφιών σχεδιασμού και μοντέλων ελέγχου της επικινδυνότητας. Οι ρυθμιστικές αρχές καθώς και κάποιες χώρες ξεχωριστά επιβάλλουν δικά τους πρότυπα. Στο πλαίσιο της Risk-based Approach που αναφέραμε έχει πλέον υιοθετηθεί η PRA: Probabilistic risk assessment. Είναι ευρέως αποδεκτή ως η απαραίτητη λογική σχεδιασμού και στην διαχείριση πυρκαγιών αλλά και γενικότερα στην διαχείριση των κινδύνων στις σήραγγες. Είναι μια συστηματική μεθοδολογία έγκαιρης πρόληψης. Ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της ανάγκης ύπαρξης της διαχείρισης της επικινδυνότητας. Δεν είναι σαφές (Sykora et al.,2018) από τις ρυθμιστικές αρχές αν είναι μια προτεινόμενη μέθοδος ή προαπαιτούμενο για την αποτελεσματική διαχείριση. Είναι όμως σιγουρά μια μεθοδολογία που προτρέπει τους διαχειριστές των σηράγγων να οργανώσουν μελέτες και να συστηματοποιήσουν την διαχείριση τη διακινούσης. Όσο μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα επιθυμούν τα ενδιαφερόμενα μέρη τόσο περισσότερο στρέφονται σε τεχνικές προσομοιώσεων και δοκιμών προκειμένου να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος. Όλες οι πιθανές λύσεις κρίνονται από τα αποτελέσματα τους και για αυτό η έρευνα εστιάζει στην δημιουργία μοντέλων αντιπροσωπευτικών των αληθινών συνθήκων. Ακολουθούνται στην συνέχεια ορισμένα βήματα όπως η αναγνώριση των κινδύνων και ο υπολογισμός της πιθανότητας τους να συμβούν. Έτσι εξετάζονται πολλά διαφορετικά σενάρια και όχι μόνο παρελθοντικά γεγονότα που θα περιόριζαν την ικανότητα ανταπόκρισης σε νέους πιθανούς κινδύνους.

Η πληθώρα αλλά και η σφοδρότητα των παρελθοντικών ατυχημάτων επιβάλλει την συνεχή έρευνα και βελτίωση αυτών των μεθόδων για αυτό και υπάρχει η έντονη διαφοροποίηση. Αλώστε ο συγκεκριμένος κλάδος των μεταφορών έχει γνωρίσει ραγδαία αύξηση από την εποχή των περισσότερων καταγεγραμμένων ατυχημάτων. Θα γίνει συνεπώς ανάλυση της φιλοσοφίας και των διάφορων προτύπων στα επόμενα κεφάλαια. Συνηθίζεται μετά από σοβαρά ατυχήματα να γίνονται παραπάνω ενέργειες και έρευνα στην ανάλυση της επικινδυνότητας καθώς η εμπειρία των διαχειριστών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην γνώση του παρελθόντος (Beard and Core,2007). Κάτι τέτοιο εξηγείται από την επιρροή τέτοιων συμβάντων στην κοινωνία και από τα ψυχολογικά χαρακτηριστικά των ανθρώπων όπως το Hindsight bias (Van Coile et al., 2018). Όταν συμβεί λοιπόν ένα δυστύχημα η χωρά είτε η ευρύτερη ρυθμιστική αρχή εστιάζει παραπάνω στην ασφάλεια γεγονός που ναι μεν είναι θετικό αλλά θα ήταν προτιμότερο να υπήρχε κινητοποίηση από πριν. Κάτι τέτοιο δεν συνεπάγεται την αποφυγή του συμβάντος καθώς πάντα υπάρχει αβεβαιότητα αλλά είναι ένας πιο ορθολογικός τρόπος διαχείρισης της επικινδυνότητας.

#### Ατομική και Κοινωνική διακινδύνευση

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να λάβουμε υπόψιν είναι ο διαχωρισμός μεταξύ ατομικής και κοινωνικής διακινδύνευσης. Με την χρήση της Αναμενομένης τιμής ενός κίνδυνου



υπολογίζουμε την ατομική διακινδύνευσή. Δηλαδή την επικινδυνότητα που έχει ένας κίνδυνος για ένα άτομο ξεχωριστά. Σε πολλές εφαρμογές μας ενδιαφέρει η επίπτωση σε ένα άτομο όμως στις οδικές σήραγγες η ανάλυση είναι πιο περιπλοκή. Εκτός από την ατομική υπάρχει η Κοινωνική διακινδύνευσή που αφορά ένα μεγαλύτερο σύνολο από άτομα. Είναι λοιπόν η συνολική επίπτωση ενός κίνδυνου όχι σε ένα άτομο αλλά σε ένα επιλεγμένο σύνολο. Τέτοια διακινδύνευση εμφανίζεται και στις καμπύλες F-N και τέτοιο είναι και το όριο ALARP. Ωστόσο οι ανθρώπινες προκαταλήψεις και το τρόπος που αντιλαμβάνεται η κοινωνία τα ατυχήματα δημιουργούν και αλλά δεδομένα. Για την κοινωνία τα ατυχήματα με μικρότερη συχνότητα αλλά περισσότερα ανθρωπινά θύματα είναι πιο οδυνηρά από τα συχνότερα με λιγότερες απώλειες. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που μπορεί να έχουν ίδια αναμενόμενη τιμή η επικινδυνότητα εκτιμάται διαφορετικά. Αυτό ονομάζεται αντιληπτή επικινδυνότητα και έχει ακριβώς αυτήν την ιδιαιτερότητα. Συναντάται και ως MFRA (Multiple Fatality Risk Aversion) (Beard and Cope,2007). Καταλαβαίνουμε λοιπόν και από αυτό το χαρακτηριστικό ότι η λήψη αποφάσεων δεν μπορεί να βασίζεται μόνο σε μαθηματικά μοντέλα γιατί εμπλέκεται έντονα ο ανθρώπινος παράγοντας. Όταν επηρεάζονται ανθρώπινες ζωές τα κριτήρια αλλάζουν και οι ευθύνες αυξάνονται για τις αρμόδιες αρχές και τους διαχειριστές. Το βέλτιστο θα ήταν οι αρμόδιες αρχές και οι διαχειριστές της σήραγγας να οργανώνουν αποτίμηση κινδύνων σε διαφορετικά πρότυπα με σκοπό τα ακριβέστερα αποτελέσματα και την ολιστική προσέγγιση (Hokstad and Steiro,2004). Φυσικά παράλληλα ακόμα και αν είναι ποσοτική ανάλυσή θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τους ηθικούς και ψυχολογικούς παράγοντες που αναφέρθηκαν και στην κοινωνική διακινδύνευση. Πολλές φορές όμως (Wang and Liang,2021) οι κατασκευαστικές εταιρίες και οι διαχειριστές των σήραγγων έχουν ως πρωτεύον μέλημα την μείωση του κόστους για την διαχείριση διακινδύνευσης και τα μέτρα αύξησης ασφάλειας. Για αυτό και χρησιμοποιούν αναλύσεις κόστους - οφέλους. Ωστόσο οι κυβερνήσεις των χωρών πιέζουν σε συστήματα με μεγαλύτερη ασφάλεια για να μην διαχειριστούν μια ενδεχομένη καταστροφή. Έτσι δημιουργείται μια σύγκρουση όπου οι ρυθμιστικές αρχές καλούνται να ισορροπήσουν.

### **Επίδραση Ανθρώπινου παράγοντα**

Μια ακόμα ιδιαιτερότητα της διαχείρισης επικινδυνότητας σε σήραγγες είναι η μεγάλη και άμεση εξάρτηση από τους οδηγούς. Ο ανθρώπινος παράγοντας είναι απρόβλεπτος γεγονός που δυσκολεύει την δημιουργία μοντέλων. Σε μια επικίνδυνη κατάσταση οι υπεύθυνοι της σήραγγας οφείλουν να σταματήσουν την κυκλοφορία και να ξεκινήσουν τα βήματα εκκένωσης. Λόγω και της περιορισμένης εκπαίδευσης των οδηγών αλλά και του πανικού σε δύσκολες καταστάσεις η διαδικασία δεν κυλά ομαλά. Απρόβλεπτες συμπεριφορές και μη συμμόρφωση στους κανόνες μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες. Πολλοί έχουν μελετήσει (Kirytoroulios et al.,2014) ανθρώπινη συμπεριφορά σε ατυχήματα και καταλήγουν ότι πολλές φορές αυτή η καθοριστική επίδραση του ανθρώπινου παράγοντά αγνοείται με αποτέλεσμα ανακριβή αποτελέσματα και εικονική αίσθηση ασφαλείας. Μάλιστα από πείραμα που διεξήχθη (Nilsson, Johansson and Frantzich,2008) αναλύθηκε διεξοδικά η αποτελεσματικότητα διάφορων σημάνσεων ενημέρωσης των οδηγών. Βρέθηκε ότι κάποια σήματα όπως τα ηχογραφημένα μηνύματα οι περισσότεροι χρήστες τα αγνοούν σε κατάσταση πανικού ενώ



αλλά όπως οι φωτεινές ενδείξεις είναι εύκολο να γίνουν γρήγορα κατανοητά. Παράλληλα παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφοροποιήσεις και στην συμπεριφορά κάθε συμμετέχοντα σχετικά με την εγκατάλειψη του οχήματος. Μια τέτοια πράξη είναι επίτονη για τον χρήστη και ο καθένας σε κατάσταση αμφιβολίας λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο. Σημαντικός είναι και ο χρόνος που ο καθένας έφτασε με ασφάλεια στην έξοδο κινδύνου. Συνολικά μάλιστα τονίζεται και η μεγάλη επιρροή του γύρω περιβάλλοντος. Πολλοί μετά το πείραμα δήλωσαν ότι επηρεάστηκαν σημαντικά από τις κινήσεις και τις επιλογές των γύρω τους.

### **Είδη μέτρων ασφαλείας**

Ένας σημαντικός διαχωρισμό που γίνεται στα μέτρα ασφαλείας που προτείνονται είναι αν πρόκειται για μέτρα μείωσης της πιθανότητας ή της επίπτωσης ενός κίνδυνου (Prevention measures or Mitigation Measures). Τα μέτρα πρόληψης μειώνουν την πιθανότητα ενώ τα μέτρα μείωσης ελαττώνουν τις επιπτώσεις. Το μέγεθος που κυρίως μελετάμε είναι η ΕΝ όμως όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα είναι σημαντικό να διαχωρίζουμε και τα επιμέρους συστατικά της καθώς δεν γίνονται αντιληπτά στην κοινωνία με τον ίδιο τρόπο. Από τους (Benekos and Diamantidis, 2016) αναφέρονται ενδεικτικά:

#### Μέτρα για μείωση πιθανότητας

- Συντήρηση οδοστρώματος
- Συντήρηση υλικών
- Μελέτες φωτισμού
- Επιβολή ορίων ταχύτητας
- Συνοδείες/Φάλαγγες

#### Μέτρα για μείωση επίπτωσης

- Συστήματα αυτομάτου Ελέγχου
- Συστήματα επικοινωνίας με χρήστες
- Εξοπλισμός πυρασφάλειας

Ιδιαίτερη έμφαση στα μέτρα πρόληψης δίνεται και από τους (Malmtoorp et al.,2019). Υποστηρίζεται ότι αυτά τα μέτρα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στις οδικές σήραγγες συγκριτικά με το συνολικότερο οδικό δίκτυο για την αποφυγή κυρίως των συμβάντων με πολλές ανθρώπινες απώλειες. Συγκρίνονται τα μέτρα στις οδικές σήραγγες με την συνολική κυκλοφορία διότι υποστηρίζεται ότι το επίπεδο ασφαλείας στις οδικές μετακινήσεις δεν πρέπει

να είναι διαφορετικό στις σήραγγες. Αυτός λοιπόν θα πρέπει να είναι και ο στόχος των μέτρων που θα εφαρμόσουν δηλαδή να φτάσει το απαιτούμενο επίπεδο ασφάλειας στις οδικές σήραγγες στις τιμές την ανοικτής οδικής μετακίνησης. Φυσικά αυτό θα αυξήσει και την ασφάλεια ειδικά και στις μεταφορές επικινδύνων φορτίων.

#### 2.1.4 Τρόποι μοντελοποίησης και ανάλυσης της επικινδυνότητας

Για οποιοδήποτε κλάδο η διαχείριση της επικινδυνότητας γίνεται είτε με ποσοτικά είτε με ποιοτικά μοντέλα. Για τους λόγους που αναφέραμε είναι προφανές ότι στην περίπτωση των επικίνδυνων φορτίων χρειάζεται ένας συνδυασμός. Για αυτό έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκα ποσοτικά μοντέλα τα οποία όμως πάντα συνδυάζονται με ποιοτικές μελέτες και εκτιμήσεις. Οι Ποιοτικές μέθοδοι βασίζονται στην γενικότερη πρακτική της διαχείρισης της επικινδυνότητας. Περιλαμβάνει δηλαδή βήματα όπως η Αναγνώριση των κινδύνων, η Ανάλυση, η Αποτίμηση και η Αντιμετώπιση. Βασίζεται λοιπόν στην γνώση και την εμπειρία των αρμοδίων για την διαχείριση. Φυσικά όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται παρελθοντική γνώση και πρότυπα από παρόμοιες περιπτώσεις αλλά παραμένει σε θεωρητικό πλαίσιο. Αντίθετα οι ποσοτικές μέθοδοι κάνουν ακριβώς αυτό που σημαίνει η ονομασία δηλαδή τους ποσοτικοποιούν τους κινδύνους και τις επιπτώσεις τους με στόχο την χρήση μετρούμενων δεικτών και στόχων. Ένας τρόπος είναι η Αναμενομένη τιμή των κινδύνων. Ακόμα όμως πρέπει να μετρηθεί η επίπτωση και σε άλλους τομείς. Εδώ γίνεται και η διαχείριση του MFRA (Multiple Fatality Risk Aversion) που αναφέρθηκε νωρίτερα. Η επίπτωση στο περιβάλλον και τον γύρω πληθυσμό είναι σημαντικά στην διαχείρισή μιας σήραγγας. Ένα ατύχημα δεν εξετάζεται μόνο σε επίπεδο ανθρωπίνων ζωών αλλά και σε επιπτώσεις σε ένα ευρύτερο σύστημα. Η περιβαλλοντική καταστροφή ή ο αποκλεισμός μιας πληθυσμιακής ομάδας για ένα χρονικό διάστημα είναι κάποιες από αυτές τις επιπτώσεις. Παράλληλα σε μια καταστροφή υπάρχει και κόστος δομών και υλικών. Στην περίπτωση μιας πυρκαγιάς μπορεί να καταστραφούν συστήματα και σημεία μιας σήραγγας που θα απαιτούν μεγάλο κεφάλαιο για να επανακατασκευαστούν. Είναι προφανές ότι η τεράστια αβεβαιότητα και το πλήθος των παραμέτρων που επηρεάζουν ένα σύστημα σήραγγας αναγκάζει την περιθωριοποίηση ντετερμινιστικών μοντέλων και επιτάσσει την χρήση πιθανοτήτων, στοχαστικών και στατιστικών μεθόδων. Τα χαρακτηριστικά των στοχαστικών και στατιστικών μοντέλων θα αναλυθούν στην συνέχεια στο κεφάλαιο «Τεχνικές Διαχείρισης της Επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες και υπάρχουσες πρακτικές».

## 2.2 Υπάρχον νομοθετικό πλαίσιο στην ΕΕ και στην Ελλάδα και δυσκολίες εφαρμογής προτύπων

### Όρια αποδέκτης επικινδυνότητας σε ΕΕ και Ελλάδα

Λαμβάνοντας υπόψιν όσα αναφέρθηκαν για την κοινωνική διακίνδυνηση θα γίνει εμβάθυνση στην φιλοσοφία σχεδιασμού και στα όρια αποδέκτης επικινδυνότητας. Πως ορίζεται όμως το επίπεδο αποδέκτης επικινδυνότητας? Όπως αναλύθηκε και θα μελετηθεί περαιτέρω και στην συνέχεια κάτι τέτοιο είναι ασαφές και υπάρχουν πολλαπλές μέθοδοι

υπολογισμού και ορισμού. Η πιο αποδεκτή είναι η φιλοσοφία ALARP (As low as reasonably practical). Η τιμή ALARP είναι η αποδεκτή τιμή της επίπτωσης ενός κίνδυνου ή συνόλου κινδύνων επί την πιθανότητα να συμβεί. Η αναμενομένη τιμή (Expected Value) ορίζεται από αυτό το γινόμενο. Γενικά σύμφωνα με την φιλοσοφία ALARP όταν η Αναμενομένη Τιμή είναι πάνω από το όριο θεωρείται μη-αποδεκτό και μεταξύ αυτής και μιας μικρότερης τιμής θεωρείται ότι αποδεχόμαστε τον κίνδυνο. Ο υπολογισμός της διαφέρει σε ατομικό επίπεδο διακινδύνευσης και σε κοινωνικό. Για την κοινωνική διακινδύνευση το όριο στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι  $10^{-3}$  κάτι που σημαίνει 1 θάνατος κάθε 100 χρόνια. Έτσι γίνεται αντιληπτή μια αρχική εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες. Μια τέτοια τιμή συνυπολογίζει τον πληθυσμό που εκτίθεται σε κίνδυνο, το φυσικό περιβάλλον και τις υπάρχουσες δομές.

Όσον αφορά την ατομική επικινδυνότητα διαφορετικές χώρες παρουσιάζουν στην επιτρεπόμενη τιμή τις εξής διαφορές (Beard,Core,2007).

### Πίνακας 2 EV για διαφορετικές χώρες και συνθήκες

Χώρα		Τιμή EV
Ηνωμένο Βασίλειο	Για εργάτες	$10^{-3}$
	Για το κοινό	$10^{-4}$
	Γενικά	$10^{-6}$
Ολλανδία	Για ήδη υπάρχουσες κατασκευές	$10^{-5}$
	Για νέες κατασκευές	$10^{-6}$
Αυστραλία	Κοινωνικά ευαίσθητες δομές	$5*10^{-7}$
	Κατοικήσιμες περιοχές	$10^{-6}$
	Εμπορικές ζώνες	$10^{-5}$
	Βιομηχανικές περιοχές	$5*10^{-6}$

Παρατηρούμε λοιπόν πως προσαρμόζονται τα παραπάνω όρια και στις οδικές σήραγγες.

## Ρυθμιστικές Αρχές και κανόνες

Ένα ακόμα νομοθετικό πλαίσιο που ισχύει στην ΕΕ και εφαρμόζεται και στην Ελλάδα είναι η συμφωνία ADR (European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road). Αυτή η συμφωνία έχει θεσπιστεί από το 1957 και από τότε με τις ανανεωμένες μορφές της ισχύει συνεχώς. Η πιο πρόσφατη έκδοση της είναι του 2021 ενώ αναμένεται και αυτή του 2023. Μια από τις σημαντικές πληροφορίες αυτής της συμφωνίας είναι η κατηγοριοποίηση των επικίνδυνων φορτίων. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται γενικές οδηγίες και προδιαγραφές για την διαχείριση ορισμένων ουσιών. Συγκεκριμένα (ADR,2021) στον πίνακα που υπάρχει στην οδηγία αναφέρεται η κλάση της ουσίας, κάποιες προδιαγραφές συσκευασίας και για να είναι ευκολά και γρηγορά κατανοητό από όλους τι είδους ουσία μεταφέρεται υπάρχει και ειδική σήμανση. Έτσι μπορεί να προσαρμοστεί η συμπεριφορά αυτών που διαχειρίζονται την σήραγγα ή την κυκλοφορία ανάλογα με την κατηγορία φορτιού που μεταφέρεται. Ειδικότερα στην Ελλάδα η ανανέωση των οδηγιών της εγχωρίας αγοράς για να συμβαδίζει με την ADR γίνεται μέσω του ΕΛΙΝΥΑΕ (Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας Εργασίας). Έτσι εγκρίνονται και εφαρμόζονται στην νομοθεσία οι αντίστοιχες αλλαγές. Υπάρχουν και άλλες ρυθμιστικές αρχές στη Ελλάδα όπως οι Σύμβουλοι Ασφαλούς Μεταφοράς Επικίνδυνων Εμπορευμάτων (ΣΑΜΕΕ) που είναι μέρος του Πανελληνίου Συλλόγου Συμβούλων Ασφαλούς Μεταφοράς Επικίνδυνων Εμπορευμάτων (ΠΣΣΑΜΕΕ). Αρμοδιότητα του ΣΑΜΕΕ είναι να εξετάζει την εφαρμογή των κανόνων ασφαλούς μεταφοράς των επικίνδυνων εμπορευμάτων καθώς και να συμβουλεύει την επιχείρηση κατά τις εργασίες αποθήκευσης και μεταφοράς. Ακόμα υπάρχει και το Ινστιτούτο Μεταφορών (ΙΜΕΤ) που αποτελεί υποστηρικτική αρχή του Υπέργειου ανάπτυξης και επενδύσεων. Βασικός στόχος του Ι.ΜΕΤ. είναι η διεξαγωγή και υποστήριξη της εφαρμοσμένης έρευνας στον Τομέα των Μεταφορών στην Ελλάδα Γενικότερα γίνεται κατανοητό από το πλήθος των ρυθμιστικών αρχών ποσό περιπλοκή και ταυτόχρονα καθοριστική είναι η ασφαλής μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων.

## Δυσκολίες εφαρμογής στην Ελλάδα

Παρατηρείται (Spinardi,Bisby and Torero,2016) ότι συχνά οι μεγαλύτερες αλλαγές προς την αύξηση της ασφάλειας γίνονται μετά από μεγάλα ατυχήματα. Κάτι τέτοιο έχει θεμελιώδη προβλήματα αλλά συμβαίνει. Ειδικά στην Ελλάδα είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο και σε άλλους τομείς. Ωστόσο δεν υπάρχει κάποιο πρόσφατο σοβαρό ατύχημα που θα μπορούσε να κινητοποιήσει τις αρμόδιες αρχές. Η αίτια του θα αναλυόταν διεξοδικά και έτσι θα λαμβάνονταν πιθανότατα παραπάνω μετρά. Αυτό μεμονωμένα δεν φαντάζει μεγάλο πρόβλημα όμως σύμφωνα με τους (Ntzeremes and Kirytopoulos,2018) στην Ελλάδα δεν υπάρχει βάση δεδομένων με ατυχήματα. Κάτι τέτοιο αποτελεί εμπόδιο στην βελτίωση της ασφάλειας. Όσα έχουν συμβεί στο παρελθόν αλλά και τα μελλοντικά ατυχήματα αν δεν αναλυθούν δεν θα μπορέσουν να αποτελέσουν πηγή γνώσης και να αποτρέψουν παρόμοια συμβάντα. Κατά την άποψη μου τα πρότυπα ασφάλειας θα έπρεπε να επιβάλουν την δημιουργία και λειτουργία τέτοιων βάσεων δεδομένων καθώς τα οφέλη είναι σημαντικά και το κόστος μικρό. Η έλλειψη τους βέβαια δεν είναι φαινόμενο που παρατηρείται μόνο στην

Ελλάδα, σύμφωνα με (PIARC,2021) υπάρχει μια γενικότερη απουσία καταγραφής παρελθοντικών ατυχημάτων. Για παράδειγμα ούτε στην Σουηδία υπάρχει τέτοια καταγραφή (Malmtorp et al.,2019). Συγκριτικά όμως σε χώρες όπως την Γαλλία και την Ελβετία τα πρόσφατα συμβάντα αποτελούν παρελθοντική γνώση σε σχέση με την Ελλάδα που υπολείπεται σε αυτόν τον τομέα. Ένα ακόμα πρόβλημα της ελληνικής πραγματικότητας είναι το επίπεδο ενημέρωσης και εκπαίδευσης του μέσου χρήστη οδικών σηράγγων. Έπειτα από έρευνα (Kirytoroulos et al., 2021) διαπιστώθηκαν πράγματι σημαντικές ελλείψεις και στην πληροφόρηση αλλά και στην τήρηση των κανόνων. Παρατηρήθηκε από τους (Kirytoroulos et al., 2021) μια ασυμφωνία συμπεριφοράς και γνώσης. Πολλοί χρήστες ενώ γνώριζαν την θεωρητική απάντηση δεν θα έπρατταν έτσι σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό καταδεικνύει και το πρόβλημα δυσπιστίας και εμπιστοσύνης που αντιμετωπίζεται μόνο με περαιτέρω εκπαίδευση. Μάλιστα επισημαίνεται η άγνοια των χρηστών σχετικά με την σήμανση των εξόδων κινδύνου γεγονός που μπορεί να είναι καταστροφικό σε πραγματικές συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Το πρόβλημα της απουσίας εκπαίδευσής γίνεται δυσμενέστερο ότι η Ελλάδα είναι από τις ευρωπαϊκές χώρες με τις περισσότερες οδικές σήραγγες για μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (Kirytoroulos et al., 2021).

## **2.3 Τεχνικές μείωσης και διαχείρισης της επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες**

### **2.3.1 Μέτρα αύξησης επιπέδου ασφαλείας στις οδικές σήραγγες**

Η ασφάλεια στις σήραγγες συμβαδίζει με τις γενικότερες πρακτικές που χρησιμοποιούνται στην ασφάλεια δομικών κατασκευών. Υπάρχουν όμως δυο προσεγγίσεις σε αυτήν. Σύμφωνα με το Prescriptive approach αναπτύσσονται κανόνες και ρυθμιστικό πλαίσιο από τις αρμόδιες αρχές με τις οποίες επιβάλλεται να συμβαδίζει η κατασκευή της σήραγγας. Αυτοί οι κανόνες ανανεώνονται να αλλάζουν με την εξέλιξη των διαθέσιμων τεχνολογικών μέσων και την γνώση που λαμβάνουμε καθώς βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε παρελθοντικές εμπειρίες. Παραδείγματα τέτοιων κανόνων είναι η γενική ευρωπαϊκή οδηγία «European Directive 2004/54/EC» αλλά και οι συστάσεις της Παγκόσμιας Ένωσης οδοποιίας PIARC. Σε περίπτωση λοιπόν που η σήραγγα πληροί όλες αυτές τις προϋποθέσεις θεωρείται ασφαλής. Η υιοθέτηση μιας τέτοιας προσέγγισης κρύβει όμως ορισμένους κινδύνους. Αρχικά όσο κι αν γίνεται προσπάθεια να είναι σαφώς ορισμένοι, η μοναδικότητα κάθε σήραγγας (Hopkin, Van Coile and Lange,2017,) καθιστά δύσκολο να οριστεί επάρκεια σε τόσο διαφορετικές συνθήκες και συνεπώς μπορεί να είναι ασαφείς η ανεπαρκείς . Η προσαρμογή των τεχνικών οδηγιών είναι πολλές φορές ακατόρθωτη. Ακόμα υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθεί μια πλασματική εικόνα ασφάλειας. Όπως αναφέρεται (Beard and Core,2007) ποτέ δυο σήραγγες δεν είναι ακριβώς ίδιες. Ακόμα λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας αλλάζουν όλες σχεδόν οι επιμέρους παράμετροι. Από τα οχήματα και τα υλικά κατασκευής μέχρι τις τεχνικές κατασκευής παρακολούθησης και συντήρησης. Αν μια σήραγγα συμβαδίζει πλήρως με το ρυθμιστικό πλαίσιο δεν σημαίνει ότι δεν εμπεριέχει κινδύνους. Ανάλογα λοιπόν με την περίπτωση, σήραγγες που έχουν ακολουθήσει τους ιδίους κανόνες έχουν τεράστια διαφορά στην

επικινδυνότητα. Μπορεί αν δεν πραγματοποιηθεί ανάλυση με σενάρια και προσομοιώσεις το επίπεδο ασφάλειας στην καμπύλη F-N να βρίσκεται πάνω από το όριο ALARP. Έτσι απαντάται και το ερώτημα της σύγκρισης της συστηματικής ανάλυσης με την ανάλυση βάσει σεναρίων. Προτιμώνται συνήθως τα σενάρια και οι προσομοιώσεις διότι είναι προσαρμοσμένες στην εκάστοτε συγκεκριμένη σήραγγα και τις εξωγενείς συνθήκες της. Τα αποτελέσματα δεν μπορούν να προβλέψουν τι θα συμβεί στην πραγματικότητα όμως δίνουν μια εκτίμησή του επιπέδου ασφάλειας.

Για να εμβάθυνση και εκτενέστερη ανάλυση υπάρχει και η Risk-based προσέγγιση. Αυτή η προσέγγιση εκτός φυσικά από την συμβαδίζει με το κανονιστικό πλαίσιο ορίζει παραπάνω ενέργειες και μεθοδολογίες όπως η αναγνώριση κινδύνων ανάλυση των κινδύνων και η αποτίμηση της επικινδυνότητας. Χρησιμοποιείται δηλαδή η μεθοδολογία της διαχείρισης της επικινδυνότητας όπως έχει οριστεί και σε άλλα επιστημονικά πεδία. Για περαιτέρω εμβάθυνση αξιοποιούνται εκτός από ποιοτικά και ποσοτικά μοντέλα QRAM στα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά στην συνέχεια. Συνεπώς δεν είναι σαφώς προδιαγεγραμμένα τα βήματα με την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και για αυτό υπάρχουν διαφορετικά πρότυπα που επιλεγεί ο εκάστοτε οργανισμός λαμβάνοντας μάλιστα υπόψιν και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Γενικά όμως προτείνεται από πολλούς (Chatzistelios , Dermitzakis and Kirytopoulos,2022) η συνολική συστηματοποίηση των διαδικασιών διαχείρισης της επικινδυνότητας. Ειδικότερα προτείνεται η εφαρμογή και προσαρμογή των γενικότερων προτύπων της ποιότητας και της διαχείρισης συστημάτων. Οι σωστές πρακτικές περιλαμβάνουν βήματα προγραμματισμού, εφαρμογής μέτρων και ελέγχου. Γίνεται σαφές ότι η αποτελεσματικότητα της συστηματοποίησης αφορά το σύνολο των εμπλεκόμενων μερών και πρέπει να ξεκινάει από την διοίκηση του εκάστοτε έργου.

### **Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου/Εξοπλισμός της σήραγγας**

Ένα σημαντικό κομμάτι της παρακολούθησης της λειτουργίας αλλά και της συντήρησης μιας σήραγγας είναι τα συστήματά ελέγχου που έχουν εγκατασταθεί σε αυτήν. Η διαδικασία της παρακολούθησης είναι καθοριστική για την αντιμετώπιση και την αποφυγή ατυχημάτων όπως θα φανεί και στην ανάλυση ευαισθησίας στο κεφάλαιο με τις προσομοιώσεις. Από το στάδιο του σχεδιασμού γίνονται υπολογισμοί για το πλήθος των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και των χειριστών του. Ποια είναι αυτά τα συστήματα? Αρχικά τα συστήματά ραδιοεπικοινωνίας είναι καίρια για την αντιμετώπιση ενός ατυχήματος. Για να γίνει όσο το δυνατόν γρηγορότερα αντιληπτό και να δοθούν οι κατάλληλες οδηγίες εκκένωσης πρέπει να γίνει άμεση επικοινωνία με τους χειριστές. Ιδιαίτερα σε συνθήκες πυρκαγιάς αυτή η επικοινωνία είναι εξαιρετικά δύσκολη. Παράλληλα οι ιδιαιτερότητες των πολύ μεγάλων σηράγγων (πάνω από 2500m) καθιστούν τέτοια συστήματα κοστοβόρα και περιπλοκά. Τα ίδια ισχύουν και για τους αισθητήρες που τοποθετούνται. Αισθητήρες για τον φωτισμό για την θερμοκρασία ,για την περιεκτικότητα του αέρα σε επιβλαβή σωματίδια, μετεωρολογικοί σταθμοί και οι κάμερες παρακολούθησης είναι μερικά επιπλέον συστήματα ελέγχου. Ακόμα αισθητήρες που παρακολουθούν την κυκλοφορία βρίσκονται στην είσοδο, την έξοδο αλλά και



σε ορισμένα σημεία στο εσωτερικό. Όσον αφορά την διαχείριση και τον χειρισμό τους μια σήραγγα έχει συνήθως επιμέρους όλα αυτά τα συστήματα που αποτελούν τις ΤΜΕ (Τοπικές Μονάδες Ελέγχου) οι οποίες διαχειρίζονται από την ΚΜΕ (Κεντρική Μονάδα Ελέγχου). Οι χειρίστες από την ΚΜΕ είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο και την παρακολούθηση των ΤΜΕ. Η επικοινωνία είναι άμεση και σε περίπτωση που χρειαστεί να παρέμβουν μπορούν να το κάνουν ταχύτατα.

Υπάρχουν και συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για έλεγχο της κυκλοφορίας. Με βάσει ορισμένες μετρήσεις σε επιλεγμένους κόμβους πριν μετά ή και στο εσωτερικό ρυθμίζεται η ροή της κυκλοφορίας των οχημάτων. Από τους αισθητήρες μπορεί γίνει καταγραφή των διερχομένων οχημάτων καθώς και μέτρηση των κυκλοφοριακών στοιχείων (πχ μέση ταχύτητα είδος οχήματος). Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποια κυκλοφοριακή συμφόρηση δίνεται η δυνατότητα να περιοριστεί η εισερχόμενη κυκλοφορία. Τέλος μπορεί να διαπιστωθεί ευκολά και γρηγορά κάποιο όχημα με βλάβη και να προσφερθούν οι απαραίτητες βοήθειες (Tatarinov and Kirsanov,2019).

Αισθητήρας που εντοπίζει το ατύχημα εντοπίζει επιπλέον:

- Ποιότητα αέρα
- Ωρα ατυχήματος
- Συντεταγμένες
- Εμπλεκόμενα οχήματα
- Εμπλεκόμενοι χρήστες
- Στοιχεία οχήματος

Μάλιστα για τον αποτελεσματικότερο εντοπισμό πιθανών ακινητοποιημένων οχημάτων ή παγιδευμένων χρηστών έχουν προταθεί διάφορες τεχνολογίες (Kontogiannis et al. 2022). Τέτοιες τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν με τους αισθητήρες που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και με τις τεχνικές διαχείρισης της κυκλοφορίας και της ταχύτητας που αναφέρονται παρακάτω.

Ως συστήματα ελέγχου έχουν αναπτυχθεί και διάφοροι αλγόριθμοι που καταγράφουν ορισμένα δεδομένα τα οποία διαχειρίζονται οι χειρίστες των συστημάτων ελέγχου. Ένας από αυτούς τους αλγόριθμους μελετήθηκε από τους (Sisias, Konstantinidou and Kontogiannis,2022) και διαπιστώθηκε αποτελεσματικός. Ο αλγόριθμος κατέγραφε σε πραγματικό χρόνο τις σημάνσεις ADR και συνεπώς κατέγραφε την αναλογία επικίνδυνων φορτίων στην κυκλοφορία κάθε χρονική στιγμή. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά χρήσιμο δεδομένου μάλιστα ότι δεν απαιτεί ακριβό εξοπλισμό καθώς λαμβάνει χαμηλής ανάλυσης φωτογραφίες. Συνολικά η ερευνά και η ανάπτυξη τέτοιων αλγορίθμων θεωρείται ωφέλιμη για την αύξηση του επιπέδου ασφάλειας.

### Προσομοιωτές οδικής συμπεριφοράς

Όπως αναφέρθηκε ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά το επίπεδο ασφαλείας είναι η ανθρώπινη συμπεριφορά και η ενημέρωση των χρηστών. Ένας από τους τρόπους που έχει προταθεί (Kirytoroulos et al.,2021) για την αποτελεσματικότερη ενημέρωση των χρηστών μιας σήραγγας για τον τρόπο διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης είναι ένας προσομοιωτής. Μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού οι χρήστες θα βρεθούν σε ένα εικονικό περιβάλλον όπου θα εξοικειωθούν με τις ιδιαιτερότητες των συνθήκων στις σήραγγες. Μάλιστα με την ανάπτυξη του θα μπορούν να προσομοιάσουν διάφορες επικίνδυνες καταστάσεις για ολιστική εκπαίδευση του χρήστη. Παράλληλα η επιτυχία τέτοιων εγχειρημάτων δείχνει και την δυνητική χρησιμότητα τεχνολογιών VR (Virtual Reality) και AR (Augmented Reality).

### Διαχείριση κυκλοφορίας

Μια από τις τεχνικές που έχουν προταθεί για την αύξηση του επιπέδου ασφάλειας είναι η διαχείριση της ροής της κυκλοφορίας σε συγκεκριμένους κόμβους. Σκοπός της είναι να μειώσει τα οδικά ατυχήματα και να εξομαλύνει την ροή της κυκλοφορίας γεγονός που θα κάνει τα οδικά δίκτυα πιο ασφαλή και τις μετακινήσεις ταχύτερες. Στην περίπτωση της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων θα επιτευχθούν παρόμοια αποτελέσματα αλλά επειδή δεν έχει αξία να μελετηθεί όλο το οδικό δίκτυο η έρευνα συγκεντρώνεται σε κόμβους κοντά ή στις εισόδους/εξόδους σηράγγων. Κατά το έλεγχο των κόμβων υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμιστεί η απόσταση των οχημάτων που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία και οι λωρίδες στις οποίες μπορούν να κινούνται κάθε δεδομένη στιγμή. Γενικά είναι μια μέθοδος που φαίνεται να έχει οφέλη (Xu and Lambert,2013) με τα κυριότερα να είναι στη μείωση των ατυχημάτων και συνεπώς στην ασφάλεια. Ωστόσο δεν είναι πάντα συμφέρον το κέρδος σε σχέση με το κόστος καθώς σε πολλές περιπτώσεις που εκτελείται ανάλυση κόστους - οφέλους δεν έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα και δεν χρησιμοποιείται. Η αύξηση της ασφάλειας λοιπόν με μεθόδους access management δεν είναι σημαντική σε σχέση με το κόστος τους και για αυτό δεν προτιμώνται.

### Χρήση LAY-BYS

Κατά την κατασκευή μιας σήραγγας στο εσωτερικό σε κάποια σημεία προεκτείνεται παραπάνω ο δρόμος και δημιουργούνται τα lay-bys. Η χρήση τους είναι να διευκολύνουν την κυκλοφορία σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης μέσα στην σήραγγα. Ένα ακινητοποιημένο όχημα μπορεί να μεταφερθεί εκεί για να μην εμποδίζει την διαφυγή. Ακόμα τα οχήματα μπορούν να μετατοπιστούν για να ανοίξει η κυκλοφορία για να κινηθεί ένα ασθενοφόρο ή ένα πυροσβεστικό όχημα. Αυτό μπορεί να μην επηρεάζει άμεσα τα οχήματα που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία αλλά καθιστά την αντιμετώπιση ενός ατυχήματος πιο αποτελεσματική. Παράλληλα εκεί σταθμεύουν προσωρινά και τα οχήματα συντήρησης όταν διενεργούν κάποια



εργασία. Οι θέσεις τους επιλέγονται τυχαία αλλά η απόσταση και ο αριθμός τους καθορίζονται από τους κατασκευαστές σχετικά με την ασφάλεια που επιθυμούν. Φυσικά όμως η ύπαρξη τους κρύβει κινδύνους κάποιου ατυχήματος με σοβαρές επιπτώσεις αλλά η σπάνια συχνότητα τέτοιων τα καθιστά αμελητέα. Ωστόσο ένα παράδειγμα είναι (PIARC,2021) ένα ατύχημα στην Ελβετία το 2012 όπου οδήγησε στον θάνατο 28 ανθρώπων. Γεγονός που καταδεικνύει την μεγάλη αβεβαιότητα ολόκληρου του συστήματος της σήραγγας. Συνεπώς και στην χρήση των lay-bys υπάρχουν θετικά και αρνητικά και κάθε επιμέρους κατασκευαστής επιλέγει αν και ποσό θα τα αξιοποιήσει.

### **Σύστημα Εξαερισμού**

Ένα καθοριστικό σύστημα για την εύρυθμη λειτουργία μιας σήραγγας αλλά και για την αντιμετώπιση ατυχημάτων είναι το σύστημα εξαερισμού. Σε όλες τις σήραγγες υπάρχει μια μόνιμη παροχή αέρα που εξαναγκάζεται από το σύστημα εξαερισμού έτσι ώστε να ανανεώνεται ο αέρας στο εσωτερικό. Πάντα παράλληλα υπάρχει και η λειτουργία έκτακτης ανάγκης που θα απομακρύνει τον καπνό ή την φωτιά σε περίπτωση μιας πυρκαγιάς. Γενικότερα το σύστημα του εξαερισμού εμποδίζει την συσσώρευση ρύπων που εκπέμπονται από τα οχήματα διατηρώντας την στα επιθυμητά επίπεδα στο εσωτερικό. Παράλληλα δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης μαζί με αισθητήρες. Έτσι αν διαπιστωθεί αυξημένη συγκέντρωση σε μια επιβλαβή ουσία μπορεί να ενεργοποιηθεί σε μεγαλύτερες παροχές. Ταυτόχρονα υπάρχουν και κάποια φίλτρα που χρησιμοποιούνται για να συμμορφώνεται η σήραγγα με τις σχετικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Επίσης υπάρχουν περιορισμοί υπάρχουν και στο επίπεδο θορύβου το αερισμού. Ωστόσο η πιο σημαντική χρήση του είναι όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η λειτουργία έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση φωτιάς. Ο χρόνος ενεργοποίησης του εξαερισμού έκτακτης ανάγκης θα αναλυθεί και παρακάτω καθώς είναι παράμετρος της ανάλυσης ευαισθησίας αλλά είναι σημαντικό να αναφερθεί από εδώ η ύπαρξη τεχνολογικών περιορισμών από τα τεχνικά μέσα κάθε σήραγγας. Συνήθως στις σήραγγες άνω των 500m χρησιμοποιείται διαμήκης αερισμός καθώς είναι η φτηνότερη και πιο αποτελεσματική λύση. Σε ελάχιστες ειδικές περιπτώσεις και κατόπιν έγκρισης από μελέτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα εγκάρσιου ή ημιεγκάρσιου αερισμού. Όταν η σήραγγα βρίσκεται σε λειτουργία παρατηρείται ένα ιδιαίτερο φαινόμενο το Piston Effect. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει λόγω του αέρα που παρασύρουν τα εισερχόμενα με ταχύτητα οχήματα. Καθώς η κυκλοφορία είναι συνεχής αναπτύσσεται μια ροή αέρα σαν να αναρροφάτε από την είσοδο προς το εσωτερικό. Φυσικά κατά την μελέτη του εξαερισμού αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό. Στα περισσότερα μοντέλα το Piston Effect λαμβάνεται πάντα υπόψιν στους υπολογισμούς αν και υπάρχει η δυνατότητα για εμπείρους χρήστες να επεξεργαστούν κάποιες παραμέτρους του.

### **Συντήρηση/Έλεγχοι σωστής λειτουργίας**

Η διαχείρισή διακινδύνευσης σε μια σήραγγα δεν ολοκληρώνεται με την κατασκευή της. Εξίσου σημαντικά είναι η λειτουργία και η συντήρηση των σηράγγων. Σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής ένωσης κατά την διάρκεια ζωής μια σήραγγας είναι

υποχρεωτικό να διενεργούνται έλεγχοι και επιθεωρήσεις. Οι πιο αποτελεσματικές είναι οι επιθεωρήσεις που συνεργάζονται οι ρυθμιστικές αρχές με τους διαχειριστές της σήραγγας (Adewole Adesiyun et al., 2017). Αυτές οι επιθεωρήσεις ξεκινούν από το στάδιο του σχεδιασμού και εκτελούνται καθ' όλη την λειτουργία της σήραγγας. Σκοπός είναι να υπογραμμίσουν πιθανούς κινδύνους έτσι ώστε να ληφθούν προληπτικά μετρά. Υπάρχουν οι RSA (Road Safety Audits) και οι RSI (Road Safety Inspections). Οι RSI έχουν ως σκοπό και την καταπολέμηση ορισμένων κινδύνων και διενεργούνται συνήθως συστηματοποιημένα από τις ρυθμιστικές αρχές. Ένα προτεινόμενο διάστημα αναμεσα στις πιθανές επιθεωρήσεις ορίζεται από την Ευρωπαϊκή οδηγία (2004/54/EC) το αργότερο κάθε 6 χρονιά. Οι διαδικασίες και τα έγγραφα που προκύπτουν είναι συστηματοποιημένα και όμοια για όλες τις σήραγγες. Υπάρχουν και οι γνώμες (Adewole Adesiyun et al., 2017) που αναφέρουν πως θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμο να διενεργούνται περισσότερες οργανωμένες συνεργασίες των διαχειριστών των σηράγγων και των ειδικών σε θέματα οδικών μεταφορών και κυκλοφορίας για ελέγχους σε διάφορους τομείς. Εκτός από την ίδια την σήραγγα σε κομμάτια δρόμων αναμεσα από σήραγγες καθώς σε ένα ευρύτερο σύνολο του δικτύου.

### **Συνοδείες/Φάλαγγες**

Ένα από τα μη συμβατικά μετρά μείωσης της επικινδυνότητας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε σήραγγες είναι η μετακίνηση σε φάλαγγα με συνοδεία. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως κάτι τέτοιο είναι εφαρμόσιμο μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις επικίνδυνων φορτίων. Ένα τέτοιο μέτρο μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο ατυχήματος αν και δημιουργεί κάποιους νέους μικρότερους κινδύνους. Υπάρχουν τρεις τρόποι οργάνωσης μιας φάλαγγας συνοδείας ανάλογα με το αν περιορίζεται η υπόλοιπη κυκλοφορία. Η πιο πρακτικά εφαρμόσιμη είναι που περιορίζει μερικώς την κυκλοφορία σε μια από τις λωρίδες. Σε διαφορετική περίπτωση δυσχεραίνεται σημαντικά η κυκλοφορία και δεν υπάρχουν συνολικά οφέλη. Υπάρχουν όμως αρκετές διαφωνίες για την εφαρμογή της. Πολλοί υποστηρίζουν πως είναι πρωτόγνωρη συνθήκη για τους οδηγούς και παρόλο που μειώνεται η πιθανότητα ατυχήματος αυξάνεται πολύ οι συνέπειες του. Ωστόσο τα οχήματα συνοδείας έχουν άμεση δυνατότητα επικοινωνίας με τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης ενώ καθιστούν βέβαιη την τήρηση των κανόνων οδικής συμπεριφοράς. Συνολικά μια τέτοια λύση είναι δύσκολο να ενσωματωθεί στα μοντέλα και για αυτό υπάρχει διαρκής ξεχωριστή ερευνά πάνω στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Στην παρούσα εργασία δεν θα εμβαθύνουμε παραπάνω.

### **Χωρισμός σήραγγας σε τμήματα**

Μια κατασκευαστική λύση που έχει μελετηθεί για την αύξηση της ασφάλειας κυρίως σε πυρκαγιές είναι ο επιμερισμός των σηράγγων σε μικρότερες, όπου καθίσταται αυτό δυνατό από την μορφολογία του εδάφους και την γεωμετρία μπορεί η σήραγγα με μέθοδο κατασκευής Cut and cover να χωρίζεται σε μικρότερες. Η λογική αυτής της σκέψης είναι ότι θα κάνει τις σήραγγες λιγότερο επικίνδυνες σε φωτιές και θα μειώσει τους εγκλωβισμούς χρηστών. Ο αέρας θα διαφεύγει πιο εύκολα και θα χρειάζεται λιγότερος εξοπλισμός αερισμού αλλά και παρακολούθησης. Ωστόσο πέρα από την αύξηση του κόστους κατασκευής γίνεται ευάλωτη σε

καιρικές αλλαγές. Από μελέτη των (Kirytoroulos et al.,2010) φαίνεται πως μια τέτοια λύση δεν έχει ουσιαστικά οφέλη.

### 2.3.2 Μελέτη με χρήση εναλλακτικών διαδρομών

Πριν επιλεγεί η μελέτη εναλλακτικών διάδρομων γίνεται η μελέτη εγγενούς επικινδυνότητας. Το στάδιο αυτό είναι το πρώτο που προτείνεται για την αποτίμηση της επικινδυνότητας. Κατά την μελέτη αυτή ορίζεται ένα όριο επικινδυνότητας που αφορά την αναμενομένη τιμή (EV) και αν η τιμή που θα υπολογιστεί για την συγκεκριμένη σήραγγα ή διαδρομή είναι μικρότερη δεν γίνεται περεταίρω μελέτη. Κρίνεται ότι δεν χρειάζεται να αυξηθεί το επίπεδο ασφάλειας για αυτήν την συγκεκριμένη επικινδυνότητα. Σε περίπτωση όμως που είναι μεγαλύτερη διερευνώνται δυο εναλλακτικές. Είτε κάποια άλλη διαδρομή, είτε μέτρα που θα μειώσουν την πιθανότητα ή τις συνέπειες κάποιων κίνδυνων. Μετά από εισήγηση του αναλυτή λοιπόν ο διαχειριστής της σήραγγας θα αποφασίσει ποια από τις δυο περιπτώσεις θα εξεταστούν αρχικά σύμφωνα και με τις εισηγήσεις του (ΟΜΟΕ,2001).

#### Εύρεση Εναλλακτικών Διάδρομων

Μια από τις μεθόδους μείωσης της επικινδυνότητας που έχει μελετηθεί είναι η εξέταση εναλλακτικών διάδρομων για την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. Πρακτικά στο πλαίσιο μελέτης της επικινδυνότητας μιας σήραγγας διερευνάται η αποφυγή της εκτρέποντας το επικίνδυνο φορτίο σε μια άλλη διαδρομή. Αυτές οι μελέτες είναι περίπλοκες για πολλούς λόγους. Αρχικά πρέπει να υπάρχει ακριβής γνώση του οδικού δικτύου και όλων των τροπών που θα φτάσει το φορτίο στον προορισμό του. Παράλληλα όμως πρέπει να γίνει εκτίμηση και των χαρακτηριστικών της διαδρομής. Αν βρίσκεται σε πόλη ή στην επαρχία διαφοροποιείται ο γύρω πληθυσμός που επηρεάζεται. Ακόμα πρέπει να διερευνηθεί το πλήθος και τα χαρακτηριστικά όλων των μεγάλων σηράγγων που θα περάσει το φορτίο σε οποιαδήποτε διαδρομή. Κάτι τέτοιο γίνεται κατανοητό πως απαιτεί εκτενή μελέτη. Φυσικά για μια τέτοια απόφαση σημαντικό ρόλο παίζει ο κυκλοφοριακός φόρτος κάθε διαδρομής καθώς και η χρονική περίοδος εξέτασης. Άλλα χαρακτηριστικά του προβλήματος είναι (Holeczek and Nikolai,2019) α) Οι περιορισμοί στην δυναμικότητα μεταφοράς κάθε διαδρομής β) Δεν μπορεί να είναι αποτελεσματικό αν ορίσουμε μόνο μια αρχή και ένα τέλος. Για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα πρέπει να ορίσουμε και άλλους κόμβους για να γίνουν παρακάμψεις αλλιώς δεν θα είναι βέλτιστο. Έτσι αυξάνεται η πολυπλοκότητα γ) Ο τρόπος διαμερισμού της επικινδυνότητας στο σύνολο της διαδρομής. Πολλές φορές αν δούμε μεμονωμένα μια σήραγγα μπορεί να λάβουμε ανακριβή πληροφορία για την συνολική διακινδύνευση της διαδρομής. Έτσι μοιράζουμε και μελετάμε την διακινδύνευση σε όλη την έκταση της εξεταζόμενης διαδρομής. Παράλληλα μάλιστα η επικινδυνότητα αφορά σε τέτοια περίπτωση πολλά διαφορετικά ενδιαφερόμενα μέρη όπου το καθένα έχει διαφορετικές προσδοκίες. Συνεπώς ο διαμερισμός είναι καθοριστικός δ) Πολλές στοχαστικές μεταβλητές και μεγάλη αβεβαιότητα. Εφόσον μια διαδρομή περιέχει πολλές σήραγγες και πολλά ακόμη χαρακτηριστικά που απαιτούν εκτιμήσεις, η αβεβαιότητα και η ποσότητα των μεταβλητών αυξάνεται σημαντικά ε) Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και προσεγγίσεις «Fuzzy Logic»

(Kirytoroulos et al.,2014) για την μελέτη τους ζ) Εξάρτηση από καιρικές συνθήκες. Καθώς αναφερόμαστε σε διαδρομές μεγάλης έκτασης μπορεί τα δεδομένα και η επικινδυνότητα να αλλάξουν σημαντικά με τις αλλαγές στις καιρικές συνθήκες η) Τέλος για τον ίδιο λόγο επηρεάζεται από την χρονική περίοδο. Είτε αλλάζει η ώρα αναχώρησης είτε ανάλογα με την κυκλοφορία η ώρα που περνάει από κάποιον κόμβο. Ως χρονική περίοδο λαμβάνουμε πολλές φορές υπόψιν και την εποχή του χρόνου.

Για να μπορέσει να εξεταστεί μια διαδρομή ως εναλλακτική κάποιας άλλης με μη αποδεκτό επίπεδο επικινδυνότητας πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις από την νομοθεσία (ΟΜΟΕ,2001) πρέπει να είναι δρόμος που επιτρέπει την μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων ριμουλκούμενων και ημί-ριμουλκούμενων. Παράλληλα είναι αναγκαίο να μην υπάρχει κάποια απαγόρευση μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων σε όλη την έκταση της. Τέτοιες απαγορεύσεις μπορεί να οφείλονται σε προσπάθεια προστασίας αρχαιολογικών ευρημάτων ή μιας προστατευόμενης περιοχής. Είναι σημαντικό να γίνει σαφές, ότι η σύγκριση των διάδρομων αφορά την εκτρεπόμενη κυκλοφορία και όχι τον συνολικό κυκλοφοριακό φόρτο. Βέβαια όταν λαμβάνεται απόφαση εκτροπής είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψιν οι επιπτώσεις στην κυκλοφορία και των δυο διάδρομων. Κατά την σύγκριση λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για να επιλεγεί τελικά η εναλλακτική διαδρομή θα πρέπει η διαφορά στην Αναμενομένη τιμή να είναι σημαντική. Για κάθε πρότυπο διαφέρει ο ορισμός της σημαντικότητας για την Ελλάδα με βάσει την (ΟΜΟΕ,2001)  $EV1/EV2 > 10$ . Σε περίπτωση που βρίσκεται στα όρια  $3 < EV1/EV2 < 10$  γίνεται περεταίρω ανάλυση ευαισθησίας σε παραμέτρους. Όταν το συγκεκριμένο κριτήριο δεν δίνει δυνατότητα απόφασης χρησιμοποιούνται αλλά κριτήρια όπως το είδος των ατυχημάτων που είναι συχνότερα η τρωτότητα της διαδρομής σε καταστροφές και το κόστος επισκευής τυχόν βλαβών.

### **Τρωτότητα διαδρομής**

Η τρωτότητα της διαδρομής που αναφέρθηκε προηγουμένως εισάγει κάποια επιπρόσθετα κριτήρια. Αρχικά (Alsultan, Junc and Lambert ,2020) για το γύρω περιβάλλον εξετάζονται φυσικές θέσεις (όπως υδάτινες διαδρομές) που μπορεί η ρύπανση τους από κάποιο ατύχημα να οδηγεί σε δυσμενείς συνέπειες για το φυσικό περιβάλλον και το δίκτυο ύδρευσης. Παράλληλα γέφυρες ή αρχαιολογικά σημαντικές περιοχές που επηρεάζονται άμεσα από ένα συμβάν προστατεύονται παραπάνω από τους υπεύθυνους αποφάσεων. Επίσης κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις που προκύπτουν από το κλείσιμο ενός οδικού δικτύου μπορεί να κριθούν μη διαχειρίσιμες και να επιλεγεί διαφορετική διαδρομή. Η προσβασιμότητα των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης στα επικινδυνά σημεία της διαδρομής είναι ένας ακόμα κλάδος της τρωτότητας. Τέλος εφόσον μελετώνται διαδρομές μεγάλου μήκους σε διαφορετικές περιοχές σημαντικό ρολό παίζουν και οι καιρικές συνθήκες.

### Εκτίμηση Πιθανότητας ατυχημάτων

Επειδή η πιθανότητα να συμβεί ένα είδος ατυχήματος είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί έχουν υιοθετηθεί διαφορά πρότυπα. Από παρελθοντικά γεγονότα και εκτιμήσεις δημιουργήθηκαν πρότυπα χωρών και ΕΕ με εύρος τιμής πιθανότητας για κάποια είδη ατυχημάτων. Η εκτίμηση αυτής της πιθανότητας είναι σημαντική διότι μαζί με την επίπτωση συνθέτουν την αναμενόμενη τιμή επικινδυνότητας ενός γεγονότος. Ανάλογα και με το είδος και την τοποθεσία του δρόμου υπολογίζονται και γενικότερη συχνότητα ατυχημάτων (Jiang et al., 2014) Για παράδειγμα στο μοντέλο DG-QRAM δίνεται η επιλογή των πιθανοτήτων ατυχήματος σύμφωνα με την Γαλλική μέθοδο ή την Νορβηγική ή την Καναδική μέθοδο (PIARC,2021). Η πιθανότητα κάθε σεναρίου επηρεάζεται άμεσα και από την αναλογία των επικίνδυνων φορτίων στην κυκλοφορία. Έπειτα από έρευνες οι τρεις προαναφερθείσες χώρες εκτιμούν τις εξής τιμές.

### Πίνακας 3 Αναλογία Επικίνδυνων φορτίων

	Γαλλία	Νορβηγία	Καναδάς
LPG in cylinder	0.008	0.002	0.005
All Flammable Liquids	0.363	0.352	0.301
Volatile Flammable Liquids	0.182	0.176	0.151
Chlorine	Negligible	Negligible	Negligible
LPG in bulk	0.024	0.023	0.015
Toxic gases	0.015	0.013	0.039
Toxic liquids in bulk	0.002	-	0.015
Toxic liquids in cylinders	0.002	-	0.015
Non Flammable non toxic liquefied gases	0.013	-	0.008
DG potentially leading to a large (100MW) fire (except liquids)	0.006	0.05	0.005

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές δεν φαίνονται σημαντικές όμως κατά την μοντελοποίηση τέτοιες μικρές διαφορές στην τιμή μιας πιθανότητας πολλαπλασιασμένες με την επίπτωση δίνουν

σημαντικά διαφορετικό αποτέλεσμα. Κάτι τέτοιο μας δείχνει και την μεγάλη αβεβαιότητα που υπάρχει ακόμα παρά την εκτενή ερευνά στην ανάπτυξη αυτών των μοντέλων. Έτσι η προσέγγισή με σενάρια προσαρμόζεται όσο καλύτερα γίνεται στις συνθήκες της εκάστοτε χώρας.

### Μέθοδοι επιχειρησιακής έρευνας

Ο σκοπός της εύρεσης εναλλακτικών διαδρομών είναι να εντοπιστεί η βέλτιστη διαδρομή ανάλογα με τα επιλεγμένα κριτήρια. Ο επιστημονικός κλάδος που μελετάει την μοντελοποίηση και την βελτιστοποίηση είναι αυτός της επιχειρησιακής ερευνας. Ενδεικτικά κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι (Holeczek,2019)

- Shortest Path without scheduling (SP-WOS)
- Shortest Path with a priori scheduling (SP-APS)
- Shortest path problems with adaptive route selection (SP-ADS)

Δηλαδή παραλλαγές με διαφορετική αποτελεσματικότητα των συνηθισμένων μεθόδων SP.

Είτε μεθόδους που ως κύριο σκοπό έχουν την εύρεση περισσότερων διαδρομών που ικανοποιούν τις προδιαγραφές και βελτιστοποιούν το πρόβλημα.

- Dissimilar path problems (DPP)
- Vehicle routing problems (VRP)
- Routing and location problems (RLP)
- Network design problems (NDP)
- Toll setting problems (ToSP)

Αντίστοιχα αλλά με διαφορετική φιλοσοφία υπάρχουν και οι Αλγόριθμοι DFS(Depth-First Search) (Wang,Liang,2020). Οι Αλγόριθμοι που προτείνονται προϋποθέτουν επένδυση και μελέτη με καταγραφή δεδομένων πριν χρησιμοποιηθούν. Το αποτέλεσμα τους όμως είναι εμφανές. Το ερώτημα είναι αν είναι αποδεκτό σύμφωνα με την θεωρία κόστους – οφέλους.

### 2.3.3 Τεχνοοικονομική ανάλυση της διαχείρισης της επικινδυνότητας

Στο πλαίσιο της κοινωνικής διακινδύνευσης και της ασφάλειας προστίθεται ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει την λήψη αποφάσεων: Το κόστος. Οι πόροι που μπορεί να διαθέσει κάθε χώρα είναι περιορισμένοι. Αν γινόταν σχεδιασμός με στόχο την μέγιστη δυνατή ασφάλεια θα δαπανόνταν υπέρογκα ποσά και πάλι λόγω της υψηλής αβεβαιότητας δεν θα υπήρχε



εγγύηση ασφάλειας. Κάποιοι υποστηρίζουν τέτοια φιλοσοφία. Ωστόσο η συνολική εικόνα μας δείχνει (Van Coile, Jomaas and Bisby, 2019) ότι αφού οι κοινωνικοί πόροι είναι πεπερασμένοι αν υπερεπενδύσουμε σε ασφάλεια στον τομέα της μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων μέσω σηράγγων οι πόροι θα στερηθούν από αλλού. Το κανονιστικό πλαίσιο οφείλει να λαμβάνει υπόψιν το σύνολο των κινδύνων σε μια κοινωνία και μέσω του ALARP να βρίσκει την ισορροπία. Ένας μεγάλος συνεπώς τομέας που εξετάζεται στις λύσεις αύξησης της ασφάλειας είναι η σχέση κόστος - όφελος.

### **Cost-benefit analysis**

Η ανάλυση κόστους – οφέλους είναι μια κοινωνικοοικονομική ανάλυση που στόχο έχει να εντοπιστεί το μετρό ασφάλειας που θα αποδώσει καλύτερα αναλογικά με το κόστος του. Όπως αναφέρθηκε οι πόροι ενός κράτους είναι περιορισμένοι και δεν είναι δυνατόν να σχεδιάζει με γνώμονα την μέγιστη δυνατή ασφάλεια. Είναι λοιπόν καθοριστικό να συγκρίνει τα προτεινόμενα μετρά μεταξύ τους ανάλογα με την αύξηση ασφάλειας που προσφέρουν συνυπολογίζοντας όμως το κόστος. Μάλιστα όχι μόνο το κόστος που δαπανηθεί στην αρχή αλλά σε όλη την διάρκεια ζωής της σήραγγας. Συνδυάζονται λοιπόν οικονομικές αναλύσεις με ηθικές απόψεις για να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα ανάλογα με τους στόχους των ενδιαφερομένων μερών.

### **Δείκτης LQI**

Σε αυστηρά τεχνικοοικονομικούς ορους όσο σκληρό κι αν φαίνεται κάθε ανθρώπινη ζωή έχει άλλη αξία. Παράλληλα με το Cost-benefit analysis κάθε χώρα έχει διαφορετικά πρότυπα ασφάλειας. Όσον αφορά το κόστος αυτό συμβαίνει διότι άλλες οικονομικές ικανότητες έχει κάθε χώρα. Αν υπήρχαν όρια ασφάλειας αυστηρά και κοστοβόρα ιδιὰ για όλους πολλά κράτη δεν θα είχαν την δυνατότητα να κατασκευάσουν και να συντηρήσουν σήραγγες. Παράλληλα το ίδιο ισχύει και για την πρόσβαση στα τεχνολογικά μέσα. Ένας τρόπος που εκτιμάται αυτή τη διαφορά και γίνονται οι κατάλληλες τροποποιήσεις είναι το LQI (Life Quality Index). Ανάλογα με το επίπεδο της διαβίωσης των κατοίκων αλλά και την οικονομική κατάσταση κάθε χώρας προκύπτει ένας συντελεστής που εξισορροπεί τις απαιτήσεις. Αυτό συνεπάγεται την μεγαλύτερη ανοχή σε επικινδυνότητα σε κάποιες χώρες συγκριτικά με άλλες. Έτσι λαμβάνεται υπολογισμένο ρίσκο στην εκάστοτε περίπτωση. Για να οριστεί ο LQI και να μπορέσουν οι μελετητές να έχουν ολοκληρωμένη εικόνα μιας επένδυσης στην αύξηση του επιπέδου ασφάλειας χρησιμοποιείται ο τύπος  $LQI = g^{\alpha} e$  (Van Coile and Pandey, 2017). Λαμβάνονται λοιπόν υπόψιν μεγέθη όπως το ΑΕΠ (Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν) κάθε χώρας καθώς και το προσδόκιμο ζωής των ανθρώπων σε αυτή. Μάλιστα κάποιες φορές (Van Coile et al., 2018) υπολογίζεται και ένας δείκτης που δείχνει την συσχέτιση του ελευθέρου χρόνου με τον χρόνο εργασίας των κατοίκων. Με αυτόν τον δείκτη και αυτά τα μεγέθη ενσωματώνεται και η κοινωνικοοικονομικός παράγοντας τέτοιων κατασκευών.

Για να μπορέσει να αποτιμηθεί πιο αποτελεσματικά μια επένδυση στην ασφάλεια αλλά και για να υπολογιστούν μελλοντικά κόστη συντήρησης και πιθανής καταστροφής

χρησιμοποιείται η μέθοδος LCO (Lifetime Cost Optimization). Σκοπός της χρήσης είναι η επιλογή της επένδυσης ασφάλειας με το ελάχιστο κόστος σε ολόκληρη την διάρκεια ζωής της. Με αυτούς τους υπολογισμούς μπορεί να διαφοροποιηθεί η απόφαση για κάποιο μέτρο που αρχικά φαινόταν συμφέρον. Καθώς μελετάμε συστήματα με μεγάλη αβεβαιότητα και στοχαστικές μεταβλητές είναι βέλτιστο να λαμβάνεται υπόψιν και η απόδοση μιας επένδυσης σε περίπτωση καταστροφής.

### Δείκτης VPF

Ένας ακόμα τεχνοοικονομικός δείκτης που χρησιμοποιείται στην ερευνά με στόχο την βελτιστοποίηση της σχέσης κόστους οφέλους στην ασφάλεια είναι ο VPF (Value to Prevent Fatality) (Beard and Core, 2007). Λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες, τις νομισματικές πολιτικές και το επίπεδο διαβίωσης διάφορων χωρών, ο δείκτης αυτός εκφράζει μια εκτίμηση του κόστους για να αποφευχθεί ένας θάνατος για μια συγκεκριμένη χώρα. Φυσικά αυτός ο δείκτης εφαρμόζεται σε συγκεκριμένα μέτρα αύξησης ασφαλείας και όχι γενικά καθώς θα ήταν ιδιαίτερα ασαφής. Για να υπάρχει όμως και μια ευρύτερη εκτίμηση πολλές φορές εφαρμόζεται σε έναν κλάδο όπως πχ τις οδικές μεταφορές. Ο VPF δεν αξιοποιείται άμεσα αλλά μας δείχνει την ανάγκη προσαρμογής στα δεδομένα της κάθε χώρας.

### Πίνακας 4 VPF διαφόρων χωρών

Χώρα	VPF (σε εκατ. δολάρια)
Γερμάνια	4.2
Σουηδία	3.85
Αυστραλία	3.07
Ηνωμένο Βασίλειο	2.74
Ιαπωνία	5.9
Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής	4.06

Παρατηρείται λοιπόν μια σημαντική διαφορά στο κόστος ανάλογα με την χώρα που μελετάμε.

## 2.4 Μελέτη και Έρευνα πάνω στο μοντέλο DG-QRAM

### 2.4.1 Προσπάθειες ερευνάς και ανάπτυξης μοντέλων

Πολλά διαφορετικά εγχειρήματα είχαν αναπτυχθεί για την αύξηση της ασφαλείας στις οδικές σήραγγες. Κάποια από ανεξάρτητες αρχές, κάποια από ιδιώτες επιχειρηματίες και κάποια με συνεργασία διάφορων χωρών. Γενικότερα από το 2000 και μετά οι προσπάθειες για



ένταξη της διαχείρισης διακινδύνευσης στις οδικές σήραγγες ανάπτυξη μοντέλων για την αύξηση της ασφάλειας έγιναν συστηματικότερες.

Κάποια ενδεικτικά (Beard and Core,2007).

1. FIT (Fire In Tunnels) με κύριο σκοπό την δημιουργία βάσεων δεδομένων για μελλοντική αντιμετώπιση.
2. UPTUN (Upgrading of Tunnels) με κύριο σκοπό την αναβάθμιση των υπάρχοντων σηράγγων με έμφαση στις τεχνολογίες διαφόρων συστημάτων ελέγχου
3. DARTS (Durable and Reliable Tunnel Structures) με κύριο σκοπό την βελτιστοποίηση του κόστους κατασκευής μελλοντικών σηράγγων
4. SAFE-T (Safety in Tunnels). με κύριο σκοπό τον εναρμονισμό των μεθόδων διαχείρισης της επικινδυνότητας
5. SAFE TUNNEL με κύριο σκοπό την γενικότερη αύξηση της ασφάλειας
6. SIRTAKI (Safety Improvement in Road and Rail Tunnels using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models) με κύριο σκοπό την ολιστική συμμετοχή της ανώτερης διοίκησης στην διαχείριση διακινδύνευσης
7. Virtual Fires με κύριο σκοπό την κατανόηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς
8. Tunnel Safety Awareness Campaign
9. SOLIT (Safety of Life in Tunnels) με κύριο σκοπό την βελτίωση των μεθόδων εκκένωσης και διαχείρισης ενός ατυχήματος
10. L-Surf (Large-Scale Underground Research Facility)

Όσον αφορά την έρευνα του PIARC το 2007 (Beard and Core,2007) δημοσιευτήκαν δυο εκθέσεις. Η πρώτη που υιοθετήθηκε από πολλές χώρες περιείχε τεχνικές διαχείρισης της επικινδυνότητας κάποιες από τις οποίες αναφέρθηκαν και στο κεφάλαιο 2.3. Η δεύτερη αφορούσε την φιλοσοφία των αποφάσεων ασφάλειας από τις αρχές και τους κατασκευαστές των σηράγγων. Αργότερα άρχισαν να αυξάνονται και οι προσομοιώσεις και οι δοκιμές CFD με

στόχο την αποτελεσματικότερη πρόβλεψή. Όσο αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι CFD τόσο βελτιώνονταν και αυτά τα μοντέλα.

Ακόμα μερικά ερευνητικά προγράμματα που έχουν διεξαχθεί είναι η Έκθεση αναφοράς του PIARC (Διεθνή Οργανισμού Οδοποιίας) με τίτλο 'Human factors and road tunnel safety regarding users. Στη συγκεκριμένη έκθεση αναφέρονται οι σωστές συμπεριφορές που πρέπει να υιοθετούν οι απλοί χρήστες των οδικών σηράγγων και σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες ατυχημάτων ενώ αναλύονται και οι συνθήκες συμπεριφορές των χρηστών. Έμφαση δίνεται στην ανάλυση και ερμηνεία των ψυχολογικών παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του χρήστη σε περίπτωση ατυχήματος. Ακόμα το Ερευνητικό πρόγραμμα EUROTAP (European Tunnel Assessment Program) ένα μέρος του προγράμματος EUROTTEST που ξεκίνησε το 2000 περιελάμβανε την εξέταση της ασφάλειας ενός μεγάλου αριθμού σηράγγων στο Ευρωπαϊκό οδικό δίκτυο. Ειδικότερα το EUROTAP έδωσε έμφαση στην ενημέρωση των χρηστών σχετικά με τις συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσουν σε μια σήραγγα καθώς και την κατάλληλη αντίδραση σε αυτές. Η ενημέρωση των χρηστών περιλάμβανε ενημερωτικά φυλλάδια, και δημιουργία ιστοσελίδας με ηλεκτρονικό υλικό ενημέρωσης σχετικά με θέματα ασφάλειας οδικών σηράγγων. Μια προσπάθεια καταγραφής της υφιστάμενης κατάστασης στον ελληνικό χώρο ήταν το μνημόνιο σχετικά με τη διέλευση οχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων από οδικές σήραγγες προς τον Πανελλήνιο Σύλλογο Συμβούλων Ασφαλούς Μεταφοράς Επικίνδυνων Εμπορευμάτων (ΠΣΣΑΜΕΕ). Μάλιστα στην Ελλάδα έχουν σχεδιασθεί κάποια εκπαιδευτικά εργαλεία στον τομέα των μεταφορών. Συγκεκριμένα το Ινστιτούτο Μεταφορών (IMET) έχει αναπτύξει διάφορα λογισμικά για την εκπαίδευση των οδηγών επικίνδυνων φορτίων και των απλών χρηστών. Ένα επίσης μεγάλο ερευνητικό έργο στην Ελλάδα είναι η πρωτοβουλία «Αναβάθμιση της ασφάλειας των οδικών μεταφορών μέσω βελτίωσης της συμπεριφοράς χρηστών σηράγγων με νέες τεχνολογίες εκπαίδευσης». Σκοπός ήταν η δημιουργία εργαλείων που θα στοχεύουν στην ενημέρωση αλλά και στην εκπαίδευση των χρηστών των οδικών σηράγγων, αναφορικά με τις βέλτιστες πρακτικές οδικής συμπεριφοράς. Έπειτα από έρευνα αιτιών και του επιπέδου γνώσης των χρηστών σε θέματα συμπεριφοράς σε επικίνδυνες καταστάσεις στις οδικές σήραγγες. Αναπτυχθήκαν και εργαλεία εκπαίδευσης και ενημέρωσης χρηστών οδικών σηράγγων, οδηγών επικίνδυνων φορτίων οδικών σηράγγων και οδηγών των βαρέων οχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Τέλος στην Ελλάδα στο πλαίσιο της ερευνάς για την αύξηση της ασφάλειας στις οδικές σήραγγες ξεκίνησε το Ερευνητικό έργο ΟΔΟΣ-ΗΜΡΤ. Το έργο αυτό είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη διαχείριση εκτάκτων καταστάσεων στις οδικές σήραγγες. Κατά την διάρκεια αναπτύχθηκε λογισμικό εκπαίδευσης των απλών χρηστών και των οδηγών επικίνδυνων φορτίων καθώς και ένας προσομοιωτής οδήγησης μέσα σε μια επιλεγμένη σήραγγα. Παράλληλα μελετήθηκαν προσομοιώσεις(και μια Άσκηση ασφάλειας) για βελτίωση των διαδικασιών της εκκένωσης της σήραγγας σε έκτακτες καταστάσεις. Για περαιτέρω βελτίωση της ασφάλειας έγινε ερευνά και στον εξοπλισμό και στα συστήματα ελέγχου των σηράγγων. Αναπτυχθήκαν συστήματα ελέγχου και σημεία επέμβασης των χειριστών σε

καταστάσεις που τα δεδομένα που λάμβαναν ήταν ανησυχητικά. Ταυτόχρονα σε αυτό το πεδίο δοκιμάστηκαν και Αλγόριθμοι αναγνώρισης όπως αυτό που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο.... ADR σήμανσης στα φορτηγά σε πραγματικό χρόνο με στόχο την δυνατότητα άμεσης επέμβασης αλλά και την ακριβή πληροφορία κάθε χρονική στιγμή.

#### 2.4.2 Ανάπτυξη του μοντέλου DG-QRAM

Η πρωτοβουλία για να αναπτυχθεί ένα μοντέλο Ποσοτικής ανάλυσης της επικινδυνότητας σε οδικές σήραγγες ξεκίνησε από συνεργασία του PIARC και της OECD. Διεξήχθησαν έρευνες σε διάφορα πανεπιστήμια του κόσμου και οι πρώτες εκδόσεις του λογισμικού εφαρμόστηκαν στην Γαλλία και την Αγγλία (INERIS, WS Atkins). Οι πρώτες χώρες που χρηματοδότησαν το project ήταν οι Αυστρία, Βέλγιο, Φινλανδία, Γαλλία, Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία και Ελβετία. Το συγκεκριμένο μοντέλο εστίαζε στο να δώσει πληροφορία στον χρήστη σχετικά με την ποσοτικοποίηση των κινδύνων που αφορούν επικινδυνά φορτία. Πλέον το μοντέλο έχει αναπτυχθεί επισημά από τις Γαλλία, Αγγλία, Καναδά (INERIS, WS Atkins, IRR). Καθώς όπως έχει αναφερθεί κάθε σήραγγα είναι μοναδική και οι περιπτώσεις ατυχημάτων πολλαπλές το μοντέλο δημιουργήθηκε με πολλές ελευθέριες οι οποίες στην συνέχεια περιορίστηκαν για τους μη- εξειδικευμένους χρήστες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα στις πρώτες του εκδόσεις να είναι δύσρηστο καθώς απαιτούσε μεγάλη ποσότητα δεδομένων. Τώρα το λογισμικό βρίσκεται στην έκδοση 4.04, πληροφορίες για την συγκεκριμένη έκδοση θα δοθούν παρακάτω στο κεφάλαιο 5.1. Στην πορεία όσο αναπτυσσόταν το μοντέλο προστέθηκε και η δυνατότητα να μελετώνται οι εναλλακτικές διαδρομές και τα διαφορετικά είδη σηράγγων. Παράλληλα εμβάθυνε παραπάνω σε δεδομένα εξαερισμού και κατασκευής. Σύμφωνα με στοιχεία που παρέχει το ίδιο το μοντέλο πλέον χρησιμοποιείται ενεργά σε 26 χώρες κυρίως της ΕΕ. Για περαιτέρω ανάπτυξη εκτός από τις χώρες, το μοντέλο χρηματοδοτείται και από ιδιωτικούς φορείς. Ειδικότερα στην Ελλάδα η χρηματοδότηση της τωρινής έκδοσης γίνεται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική συμβουλευτική εταιρεία “Enalos”. Προφανώς το μοντέλο συνεχίζει να αναπτύσσεται και να βελτιώνεται όσο συνεχίζει και η έρευνα στον τομέα της διαχείρισης διακινδύνευσης κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες.

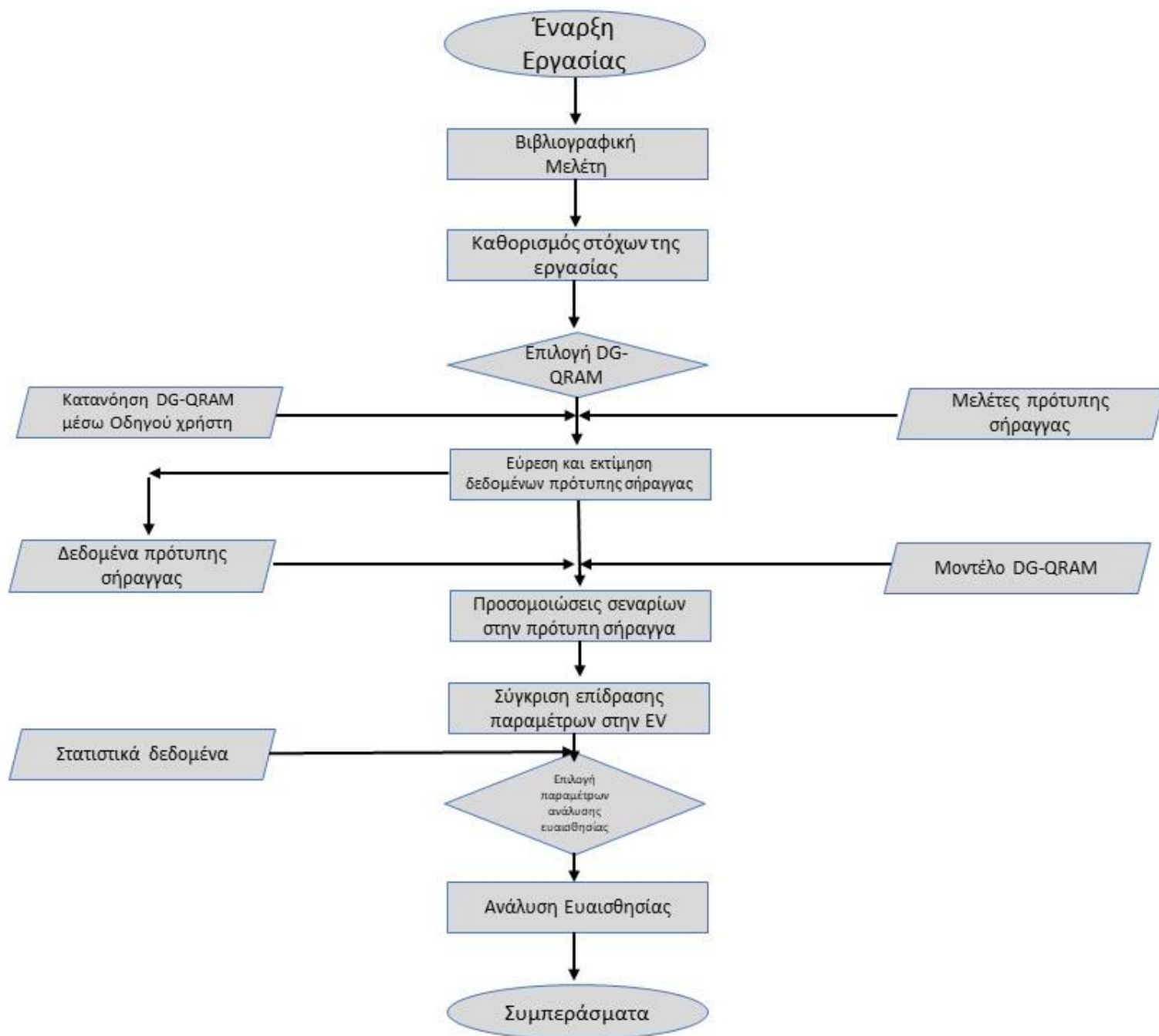
### 3. Μεθοδολογία/Μέθοδος έρευνας

Αρχικά διερευνήθηκε η γενικότερη ανάγκη διαχείρισης διακινδύνευσης και στην συνέχεια αιτιολογήθηκε η ταχεία ανάπτυξη της στον τομέα των οδικών σηράγγων. Μια τέτοια αιτιολόγηση ήταν απαραίτητη για να καθοριστούν τα δεδομένα και τα χαρακτηριστικά της ερευνάς στον συγκεκριμένο κλάδο. Στο πλαίσιο της αιτιολόγησης αναλυθήκαν και οι πιθανές αίτιες ατυχημάτων που συνδέθηκαν άμεσα με την περεταίρω ερευνά. Ένας από τους βασικούς άξονες της βιβλιογραφικής ερευνάς ήταν η μελέτη διαφόρων προτύπων διαχείρισης διακινδύνευσης της μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες. Η επιλογή αυτή έγινε αφενός για την ολοκληρωμένη προσέγγιση της διαχείρισης διακινδύνευσης και αφετέρου για την ανάλυση των δυσκολιών σύγκρισης και ανάπτυξης ενός καθολικού τυποποιημένου επιπέδου ασφάλειας. Κατά την βιβλιογραφική μελέτη επίσης επιλέγηκε να μελετηθούν πολλές διαφορετικές προτάσεις αύξησης του επιπέδου ασφάλειας. Με την μελέτη διάφορων κλάδων ερευνάς σε αυτόν τον τομέα η επιλογή των παραμέτρων της ανάλυσης ευαισθησίας θα ήταν αποτελεσματικότερη. Συνεπώς και οι προτάσεις στο τέλος θα είναι στοχευμένες. Για ακόμα πιο αποτελεσματική μελέτη πιθανών λύσεων δόθηκε έμφαση και σε έναν ακόμα σημαντικό παράγοντα την σχέση κόστους - οφέλους. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν και μια τεχνοοικονομική ανάλυση που παρουσίασε διαφόρους δείκτες με τους οποίους αξιολογούνται τα μέτρα και πως η συνεισφορά τους είναι αποδεκτή ή όχι ανάλογα με την οικονομία της χώρας που προτείνονται. Για να μπορέσει η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία να συνδεθεί άμεσα με την ελληνική πραγματικότητα μελετήθηκαν και οι ιδιαιτερότητες της διαχείρισης διακινδύνευσης καθώς και οι ρυθμιστικές αρχές στην Ελλάδα. Ένα ακόμα καίριο κομμάτι της βιβλιογραφικής ερευνάς ήταν η αναζήτηση της παρελθοντικής ερευνάς σχετικά με τα εγχειρήματα αύξησης της ασφάλειας και ανάπτυξης μοντέλων. Κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο για να αναλυθούν τελικά η ιδιαιτερότητες και τα πλεονεκτήματα του DG-QRAM και συνεπώς η αξία χρήσης του. Περιγράφονται τα στάδια από τα οποία πέρασε η διαχείριση διακινδύνευσης και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης προσομοιώσεων σεναρίων του DG-QRAM. Έτσι αιτιολογείται και η επιλογή του συγκεκριμένου λογισμικού. Έπειτα από την βιβλιογραφική μελέτη καθοριστικό ως στόχος της εργασίας και η εύρεση των παραμέτρων που επηρεάζουν σημαντικά το επίπεδο ασφαλείας. Μάλιστα τα μέτρα που δυνητικά της διαφοροποιούν να έχουν και την επιθυμητή σχέση κόστους – οφέλους. Επιλέχθηκαν λοιπόν παράμετροι που αφορούν τα συστήματα ελέγχου και τον ανθρώπινο παράγοντα καθώς εκεί φαίνεται να υπάρχει δυνατότητα επιπλέον μέτρων βελτίωσης καθώς και δυνητική μελλοντική ερευνά και με σημαντικά αποτελέσματα. Επιπλέον επιλέχθηκε ανάλυση ευαισθησίας και σε στοιχεία που σχετίζονται με παραμέτρους που οι τιμές είναι διαφορετικές ανάλογα με την μεθοδολογία που ακολουθείται σε διαφορά μοντέλα εκτίμησης τους. Για να μπορέσει το μοντέλο να προσομοιάζει αποτελεσματικά την πραγματικότητα είναι σημαντικό να υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την πρότυπη σήραγγα της μελέτης. Τα δεδομένα που υπήρχαν διαθέσιμα για την επιλεγμένη σήραγγα κρίθηκαν αποδεκτά και τα υπόλοιπα εκτιμήθηκαν με διάφορες μεθόδους.

Έτσι τα συμπεράσματα από την ανάλυση ευαισθησίας θα είναι ρεαλιστικά και χρήσιμα. Γενικότερα με τη μελέτη προσομοιώσεων περιγράφεται τι συμβαίνει σε διάφορες συνθήκες μέσω των σεναρίων. Ακολουθείται συνεπώς μια περιγραφική ερευνά όπου αναλύονται τα χαρακτηριστικά των φαινομένων που παρατηρούνται από τα διαφορά σεναρία. Αφότου όμως συγκεντρωθούν όλες οι προσομοιώσεις αναλύονται με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων.

Μέσω της βιβλιογραφικής ερευνάς και της μελέτης παρομοίων συνθήκων σε άλλες σήραγγες έγινε ο προσδιορισμός και αποτελεσματική εκτίμηση απαιτούμενων δεδομένων. Ακόμα μετά την μεθοδολογία επιλογής των παραμέτρων που πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας έγινε η διερεύνηση της επίδρασης τους στο επίπεδο ασφάλειας. Ενώ στο τέλος έγινε και η καταγραφή προτάσεων αποδοτικής αύξησης του επιπέδου ασφάλειας σε οδικές σήραγγες. Έτσι το σύνολο των στόχων επιτεύχθηκε.

Για την διαδικασία των προσομοιώσεων μέσω του μοντέλου DG-QRAM πρώτα επιλέχθηκαν οι παράμετροι που θα μελετηθούν. Αφού επιλέχθηκε και το εύρος των τιμών των παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας ξεκίνησαν οι προσομοιώσεις. Αρχικά επιλέχθηκαν μερικές τιμές μέσα στο εύρος και παράχθηκαν οι καμπύλες FN. Στις περιπτώσεις που υπήρχε σημαντική αλλαγή στην συνολική Αναμενομένη Τιμή επιλέγονταν επιπλέον κοντινές τιμές για αποδοτικότερη ανάλυση. Αφού παράχθηκαν όλες οι καμπύλες έγινε σύγκρισή τους ως προς την τιμή, την μεταβολή της αναμενομένης τιμής, τα δυσμενέστερα σεναρία και τις πιθανότητες ατυχημάτων με μεγάλο (>10) αριθμό θυμάτων. Μετέπειτα παρουσιάστηκαν τρόποι αλλαγής της τιμής των παραμέτρων που είχαν μεγάλη επιρροή με μέτρα στην πραγματικότητα. Έτσι προταθήκαν λύσεις αλλά και κλάδοι μελλοντικής έρευνας. Στις προτάσεις λήφθηκε υποψιών και το κόστος των μέτρων με γνώμονα την συμφέρουσα σχέση κόστους - οφέλους.



Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής Εργασίας

## 4. Παρουσίαση μοντέλου DG-QRAM

### 4.1 Περιγραφή μοντέλου DG-QRAM

Το μοντέλο DG-QRAM είναι ένα ποσοτικό μοντέλο προσομοιώσεων ατυχημάτων σε σήραγγες. Έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον excel δηλαδή με την προγραμματιστική γλώσσα Visual Basic (VBA). Υπάρχουν επιλεγμένα εγκεκριμένα σενάρια ατυχημάτων που θεωρείται όταν περικλείουν σχεδόν όλους τους πιθανούς κίνδυνους κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες. Ο χρήστης λοιπόν περνά τα δεδομένα της σήραγγας που επιθυμεί να μελετήσει (θα αναλυθούν στην συνέχεια) καθώς και τα σενάρια που θέλει να ελέγξει. Το λογισμικό τρέχει προσομοιώσεις και δίνει αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι καμπύλες F-N που μας δείχνουν την κοινωνική διακινδύνευση την οποία συγκρίνουμε με το όριο ALARP. Από τις καμπύλες F-N του λογισμικού προφανώς εμφανίζεται η Αναμενομένη τιμή των διάφορων κίνδυνων από τα σενάρια ενώ εκτός από την κοινωνική διακινδύνευση εμφανίζεται και η ατομική. Παράλληλα εμφανίζονται επιπτώσεις στο περιβάλλον που όπως αναφέραμε είναι μια παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί από τους κατασκευαστές και διαχειριστές της σήραγγας. Δίνεται ακόμα η δυνατότητα μελέτης εναλλακτικών διάδρομων. Φυσικά το μοντέλο είναι στοχαστικό και πολλά δεδομένα εκτιμώνται οπότε δεν είναι πάντα κοντά στην πραγματικότητα. Εξαρτάται λοιπόν σημαντικά από τον χρήστη και την εμπειρία του. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα χρήση του λογισμικού είναι η μελέτη των εξόδων έκτακτης ανάγκης. Υπάρχει τρόπος μέσω του μοντέλου να γίνει βελτιστοποίηση θέσης εξόδων βάσει σεναρίων (PIARC,2013). Στο σύνολο του το μοντέλο μέσω των προσομοιώσεων με τα παρακάτω σενάρια βοηθά στην εκτίμηση του επιπέδου ασφάλειας κατά την μεταφορά επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες.

#### QRA Σενάρια

1. Πυρκαγιά σε φορτηγό χωρίς επικίνδυνα εμπορεύματα έντασης 20MW
2. Πυρκαγιά σε φορτηγό χωρίς επικίνδυνα εμπορεύματα έντασης 100MW
3. BLEVE 50 κιλών LPG σε φιάλες
4. Λίμνη πυρκαγιάς βενζίνης
5. Έκρηξη νέφους ατμών βενζίνης σε βυτίο
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 ακρολεϊνης
12. Διαφυγή ακρολεϊνης σε κυλίνδρους
13. BLEVE μη αναφλέξιμου αερίου (CO2)

### **Σενάρια στην Ελλάδα**

Από το 2011 η χρήση των σεναρίων QRAM έχει θεσπιστεί ως υποχρεωτική για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων (Benekos and Diamantidis, 2016). Στην Ελλάδα κάποια σενάρια του λογισμικού δεν χρησιμοποιούνταν διότι απαγορευόταν η μεταφορά κάποιων ουσιών. Για παράδειγμα το Σενάριο 6 που αφορά την μεταφορά Χλωρίου/Χλωρίνης δεν χρησιμοποιείται. Ωστόσο πλέον έχει νομιμοποιηθεί η μεταφορά Χλωρίου/Χλωρίνης στα ελληνικά οδικά δίκτυα όμως δεν είναι συνηθισμένη. Έτσι δεν αναλύεται στα μοντέλα της εργασίας αυτής. Ακόμα κάποια προαιρετικά σενάρια ραδιενεργών ουσιών παραλείπονται. Χρησιμοποιούνται δηλαδή στις αναλύσεις τα 12 από 13 κύρια σενάρια του λογισμικού.

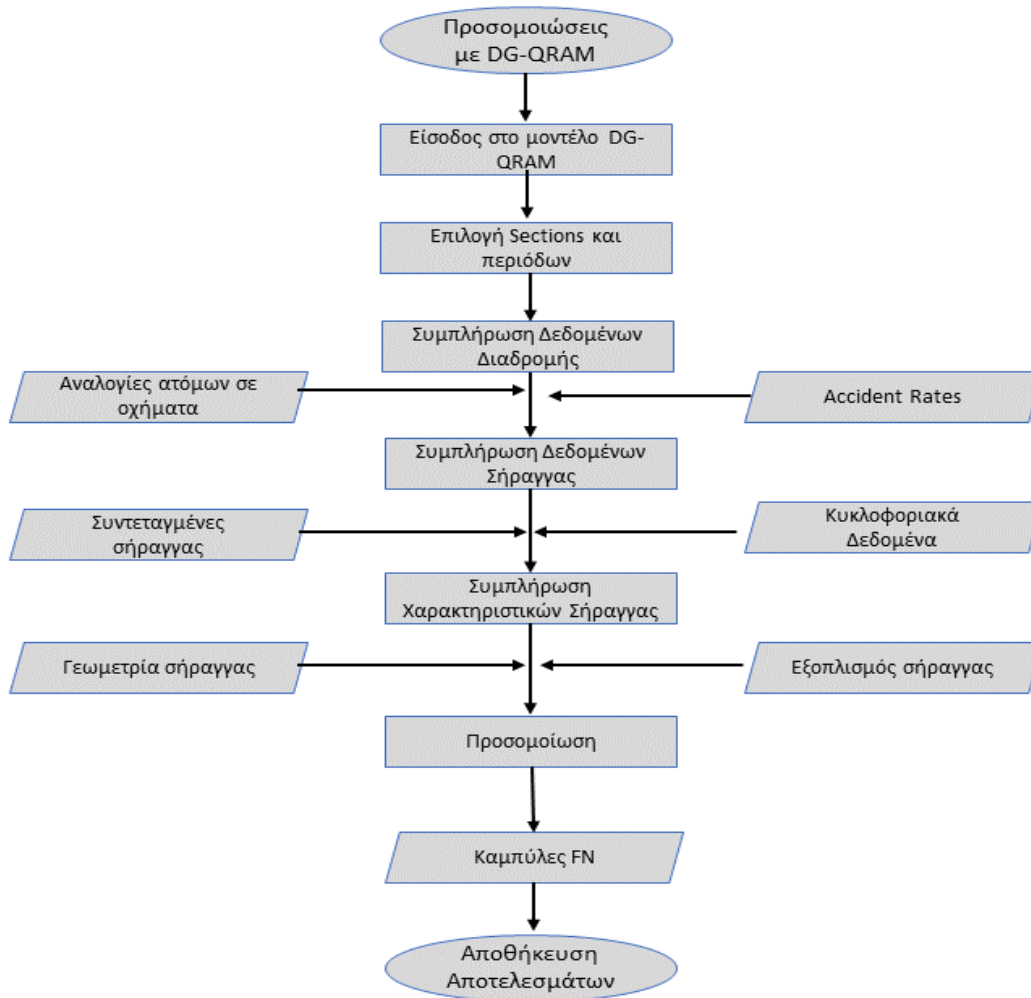
### **Μη τροποποιήσιμες επιλογές**

Μέσα στο μοντέλο υπάρχουν επιλογές οι οποίες δεν είναι παραμετροποιήσιμες. Ο χρήστης διαλέγει αναμεσα σε προεπιλεγμένες τιμές κάποιου προτύπου χωρών. Τέτοιες παράμετροι είναι οι «Surface Routes» (επιλέγεται αναμεσα σε defaults Καναδά, Γαλλίας, Νορβηγίας, Ολλανδίας και ΗΠΑ), «Tunnel Routes» (επιλέγεται αναμεσα σε defaults σταθμισμένου μέσου ορού ευρωπαϊκών χωρών, Γαλλίας, Νορβηγίας και Ολλανδίας), «Tunnel Sections, tunnel length adjustment factor» (επιλέγεται αναμεσα σε defaults Γαλλίας και Νορβηγίας) και «DG-HGV transport correction factor» (επιλέγεται αναμεσα σε Γαλλικό παράγοντα η καθόλου). Ο λόγος είναι ότι μετά από έρευνες έχουν επιλεγεί συγκεκριμένες τιμές από τις εκάστοτε χώρες και θα ήταν δύσκολο ένας απλός χρήστης να επιτύχει καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης πολλές φορές για μια σήραγγα δεν υπάρχουν από μελέτες τα αντίστοιχα δεδομένα οπότε χρησιμοποιούνται τα παραπάνω. Φυσικά λόγω της υψηλής αβεβαιότητας δεν μπορούμε να αποφανθούμε αν κάποιας χώρας υπερτερεί της άλλης και για αυτό υπάρχει η επιλογή. Ένα παράδειγμα είναι η μέση συχνότητα ατυχημάτων που εκτιμάται διαφορετικά από τα πρότυπα της Γαλλίας και της Νορβηγίας και οι διαφορετικές αναλογίες επικίνδυνων φορτίων που αναφέρθηκαν και στον Πίνακα 3 Αναλογία Επικίνδυνων φορτίων.



### **Μειονεκτήματα Μοντέλου**

Προφανώς σε ένα μοντέλο με τόσες πολλές παραμέτρους και τόσο μεγάλη αβεβαιότητα θα υπάρχουν και επιμέρους κομμάτια στα οποία θα υστερεί. Τα μειονεκτήματα είτε έχει επιλεχθεί να μην συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο είτε δεν έχει βρεθεί ακόμα ο κατάλληλος τρόπος ένταξής τους. Συγκεκριμένα δεν υπάρχει τρόπος να διαχωριστούν οι έξοδοι κίνδυνου από τις διασυνδετήριες στοές αναστροφής οχημάτων εκτάκτων υπηρεσιών (Kirgitoroulos et al.,2010). Αυτό αναγκάζει τον χρήστη να τα λάβει όλα υπόψιν ως εξόδους κίνδυνου και περιορίζει την ευελιξία του σε διαφοροποίηση χρόνου δράσης και αποτελεσματικότητας μιας έκτακτης υπηρεσίας. Ένα ακόμα μέτρο που δεν μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο με λεπτομέρεια είναι τα lay-bys. Έτσι δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η χρήση τους και να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητά τους. Παράλληλα δεν υπάρχει διαχωρισμός για « λειτουργία έκτακτης ανάγκης » και σε κανονική λειτουργία σε θέματα τροφοδότησης πυροσβεστικού δικτύου και εμβέλειας ραδιοεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα (Caliendo and Genovese,2021) δεν υπάρχουν καθόλου μέσα στο μοντέλο τα δίκτυα ύδρευσης και ο τρόπος προμήθειας του πυροσβεστικού δικτύου. Επιπρόσθετα δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν οι ενδείξεις και η σήμανση στο εσωτερικό της σήραγγας. Βέβαια κάποια από αυτά μπορούν να έμμεσα να ληφθούν υπόψιν μέσω των χρόνων αντίδρασης που υπάρχουν στο μοντέλο. Τέλος δεν μελετά διακινδύνευση όταν δεν υπάρχουν επικίνδυνα φορτία. Υπήρχε η δυνατότητα στα σενάρια 1,2 αλλά κρίθηκε αναποτελεσματική και αφαιρέθηκε. Πλέον το λογισμικό εξειδικεύεται στην μελέτη με επικίνδυνα φορτία.



Σχήμα 2 Διάγραμμα Ροής προσομοιώσεων Q-RAM

## 4.2 Νέα χαρακτηριστικά Λογισμικού έκδοση 4.04

Στόχος της νέας έκδοσης ήταν να είναι αυξηθεί η συμβατότητα του λογισμικού με όλα τα περιβάλλοντα και να μειωθούν σημαντικά τα bugs. Για αυτό οι κυρίες διαφορές δεν είναι στα χαρακτηριστικά του αλλά στην

- Συμβατότητα με Windows 10
- Συμβατότητα με excel 2016 (32 & 64 bits)
- Ύπαρξη λιγότερων δυσλειτουργιών (bugs)

Για να μειωθούν σημαντικά τα bugs πολλές διαφορετικές τεχνικές εταιρείες δοκίμασαν σε πολλές καταστάσεις το λογισμικό.

Όσον αφορά κάποιες λεπτομέρειες αν το θελήσει ο χρήστης

- Γίνεται πλέον αυτόματη πρόσθεση των αποτελεσμάτων της ίδιας κατηγορίας ADR
- Μικρές βελτιώσεις κάποιων παραμέτρων για ακόμα πιο ακριβή τήρηση των οδηγιών
- Αφαιρέθηκε η επιλογή χρήσης των σεναρίων 1,2 για μη επικινδυνά φορτία καθώς κρίθηκε μη ικανοποιητική
- Εμβάθυνση στις διαφορές αστικής και μη αστικής περιοχής
- Εμβάθυνση στις παραμέτρους εξαερισμού
- Ενίσχυση διαφοροποίησης μεταξύ αστικών και υπεραστικών σηράγγων

Στο λογισμικό πλέον υπάρχει σαφής διαχωρισμός για την τοποθεσία της σήραγγας, αν αυτή βρίσκεται σε αστική περιοχή ή στην εξοχή. Όπως αναφέρεται και στον οδηγό χρήστη δεν είναι πάντα σαφή τα όρια πόλης και επαρχίας συνεπώς ο διαχωρισμός είναι δύσκολος. Επιπλέον έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας βρέθηκε ότι για τα ίδια κυκλοφορικά δεδομένα και την ίδια πυκνότητα κατοίκων η παράμετρος αυτή έχει περιορισμένη επιρροή. Παρόλα αυτά η επιλογή υπάρχει και φαίνεται να έχει μια μικρή επιρροή στην Αναμενόμενη Τιμή σε κάποια σεναρία όπως το σενάριο 6. Ο διαχωρισμός στο μοντέλο υλοποιείται βάσει χαρακτηριστικών του πληθυσμού της περιοχής.

## 5. Χρήση νέου λογισμικού QRAM - Μελέτη περίπτωσης

### 5.1 Δεδομένα στο μοντέλο

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά σήραγγας

Μια σήραγγα χαρακτηρίζεται από πολλές παραμέτρους που την καθιστούν μοναδική. Αρχικά η τοποθεσία της. Ο διαχωρισμός ανάμεσα σε αστικές και σε σήραγγες στην ύπαιθρο υπάρχει στο μοντέλο. Υπάρχουν κι αλλά γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Οι συντεταγμένες της σήραγγας δείχνουν τον προσανατολισμό της και στο μοντέλο τοποθετούνται σε συνδυασμό με το μήκος κάθε τμήματος. Στα γεωγραφικά δεδομένα υπάρχει και η σύσταση του περιβάλλοντος καθώς και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που βρίσκεται πάνω από την σήραγγα. Επιπλέον τα κατασκευαστικά δεδομένα είναι απαραίτητο να παρουσιάσουν. Η μέθοδος κατασκευής καθώς και οι διαστάσεις του εσωτερικού αποτελούν κατασκευαστικά στοιχεία. Σε όλα αυτά περιλαμβάνονται οι οδικές λωρίδες τα πεζοδρομία και οι κλίσεις τους. Παράλληλα είναι σημαντικά και τα χαρακτηριστικά μονωτικά και αλλά υλικά των τοιχωμάτων της σήραγγας. Επίσης καθοριστικά είναι και τα δεδομένα εξοπλισμού της σήραγγας. Αυτά περιλαμβάνουν τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, τον εξοπλισμό, την αποστράγγιση και πληροφορίες για τις εξόδους κινδύνου και τα lay-bys.

#### Κυκλοφοριακά δεδομένα

Εκτός φυσικά από τα τεχνικά δεδομένα της σήραγγας είναι καίριο να καθοριστούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τα κυκλοφορικά χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου. Σε αυτά περιλαμβάνονται το πλήθος των οχημάτων που διέρχονται από την σήραγγα σε συνήθως τρεις περιόδους την ήσυχη την μέση και την απασχολημένη. Εκεί προστίθενται και πληροφορίες για τα ποσοστά της κυκλοφορίας σε οχήματα που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία. Ταυτόχρονα σε αυτά τα δεδομένα ενσωματώνονται και τα χαρακτηριστικά οδικής συμπεριφοράς όπως τα προσπεράσματα και τα όρια ταχύτητας.

#### Πίνακας 5 Είδη δεδομένων σήραγγας

Δεδομένα		
Κατασκευαστικά	Μέθοδος κατασκευής	Drill & Blast
	Πάχος υλικών επένδυσης τοιχωμάτων	1mm
	Πυροπροστασία	Ναι (1350 °C)
	Γεωμετρικά	
	Εσωτερικές διαστάσεις	

	Κλίση	2.5%
	Μήκος σήραγγας	2500m
	Ωφέλιμο πλάτος (m)	8.5m
	Εσωτερική ακτίνα (Internal radius)	5.25m
	Τύπος εδάφους	1=bedrock
	Συντεταγμένες	
	Ύψος εδάφους πάνω από την σήραγγα	500m
<b>Γεωγραφικά</b>		
	Άνθρωποι ανά όχημα	Για οχήματα: 2 Για HGV: 1.1
	Συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος	Quiet: 15 veh/h Normal: 25 veh/h Peak: 50 veh/h
	Ποσοστό HGV	0.1
<b>Κυκλοφοριακά</b>	Ποσοστό Bus	0.015
	Όρια ταχύτητας	Για οχήματα: 80 km/h Για HGV: 60 km/h
	Χρόνος για διακοπή της κυκλοφορίας	60s
	Θέση Lay-bys	800m και 1600m
	Είδος εξαερισμού	Διαμήκης
<b>Γενικά</b>	Χαρακτηριστικά κανονικής και έκτακτης λειτουργίας εξαερισμού	Παροχή κανονικής: 60 m <sup>3</sup> /s Παροχή έκτακτης: 120 m <sup>3</sup> /s
	Χρόνος ενεργοποίησης έκτακτης λειτουργίας εξαερισμού	60s
	Είδος σήραγγας	Twin bore Two Directions Two lanes Rural
	Χαρακτηριστικά συστήματος αποστράγγισης	Εμβαδό:0.01m

		Απόσταση μεταξύ σημείων αποστραγγισης:250m
	Θέση και πλήθος εξόδων κίνδυνου	Πλήθος: 7 Απόσταση μεταξύ: 325m
	Εξοπλισμός ασφάλειας και συστήματα ελέγχου	3=Όλα τα διαθέσιμα στο μοντέλο
	Accident rates	French Default

### Πως εκτιμήθηκαν

Η μέθοδος κατασκευής συνήθως στις σύγχρονες σήραγγες είναι η « Drill and Blast». Η σύστασή του εδάφους επιλέχθηκε σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της γεωγραφικής τοποθεσίας της πρότυπης σήραγγας. Παράλληλα υποτίθενται και τα χαρακτηριστικά του εδάφους από πάνω από την σήραγγα υπολογίζοντας όμως με σχετική ακρίβεια το ύψος του. Με παρόμοιο τρόπο επιλέχθηκαν και οι συντεταγμένες με στόχο να προσομοιάζουν την πραγματική υψομετρική διακύμανση της σήραγγας. Κατά την είσοδο στο μοντέλο ζητείται και το μήκος του τμήματος παρόλο που δίνονται συντεταγμένες και αν ο χρήστης εισάγει διαφορετικό τότε αυτόματα προκύπτουν στροφές και καμπύλες. Ένα ακόμα σημαντικό δεδομένο που ζητείται είναι ο χρόνος για διακοπή της κυκλοφορίας σε περίπτωση ατυχήματος. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω αυτός ο χρόνος έχει μεγάλη αβεβαιότητα όμως από έρευνες είναι ασφαλής εκτίμηση να ληφθεί γύρω στο ένα λεπτό. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είτε υπάρχουν καταγεγραμμένα είτε υποτίθενται με βάσει παρόμοιες με την πρότυπη σήραγγες. Το ίδιο ισχύει και για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της πρότυπης σήραγγας. Παρόμοια τα δεδομένα του εξαερισμού είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Με βάσει άλλες γνωστές σήραγγες γίνεται η υπόθεση για την λειτουργία έκτακτης ανάγκης και για τον χρόνο ενεργοποίησης της. Μπορούμε παρόλα αυτά να γνωρίζουμε αν η πρότυπη σήραγγα έχει διαμήκη ημί-εγκάρσιο ή και τα δυο. Όμοια είναι η διαδικασία υπόθεσης και των χαρακτηριστικών αποστράγγισης. Είναι επίσης καίριο να εκτιμηθούν οι έξοδοι κινδύνου και ο εξοπλισμός ασφαλείας. Στην περίπτωση της πρότυπης σήραγγας της μελέτης γνωρίζουμε και τα δυο. Για να εκτιμηθούν με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια τα κυκλοφορικά δεδομένα απαιτείται Κυκλοφοριακή μελέτη. Λαμβάνοντας υπόψιν ένα σύνολο μελετών στην χώρα ενδιαφέροντος και ειδικότερα στο οδικό δίκτυο που βρίσκεται η πρότυπη σήραγγα εκτιμάτε η κυκλοφορία στις τρεις περιόδους. Όσον αφορά τα ποσοστά οχημάτων με επικινδυνά φορτία και τους μέσους επιβάτες αυτά λήφθηκαν από τις μελέτες και τις τιμές που δίνονται από τα French defaults. Εκτός από τα δεδομένα που αναφέρθηκαν υπάρχει άλλο ένα χαρακτηριστικό μιας σήραγγας που είναι καθοριστικό για τον τρόπος μοντελοποίησής της. Η κατεύθυνση και το πλήθος των οδικών λωρίδων της. Η πρότυπη σήραγγα της μελέτης είναι μια διπλής κατεύθυνσης με τις κατευθύνσεις να μην εννοώντας παραμονή σε επιλεγμένα σημεία εξόδων έκτακτης ανάγκης. Για την μοντελοποίηση των “Twin-bore tunnels” με μια κατεύθυνση

κάθε κλάδο χωρίζεται σε 5 τμήματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά για να προσομοιωθούν οι δυο διαφορετικές κατευθύνσεις.

### Παραδοχές/Σημαντικές αποκλίσεις

Για την πρότυπη σήραγγα της μελέτης και για τον αυτοκινητόδρομο που βρίσκεται δεν υπήρχε πρόσφατη ολοκληρωμένη κυκλοφοριακή μελέτη και για αυτό οι εκτιμήσεις έγιναν βάσει γνωστών δεδομένων του ελληνικού οδικού δικτύου. Μερικές από τις βασικές παραμέτρους που θα μελετηθούν στην παρακάτω ανάλυση ευαισθησίας είναι οι χρόνοι αντίδρασης των χειριστών και των χρηστών. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η υπόθεση αυτών των χρόνων εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα. Έπειτα από την μελέτη της βιβλιογραφίας υπολογιστικό ένα εύρος ακραίων τιμών μέσα στο οποίο θα κινηθεί η μοντελοποίηση. Πιθανά σημεία σημαντικής απόκλισης από πραγματικές συνθήκες λόγω μεγάλης αβεβαιότητας είναι συνεπώς αυτοί οι χρόνοι και τα κυκλοφοριακά δεδομένα.

## 5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

### 5.2.1 Διαδικασία Επιλογής Παραμέτρων Ανάλυσης Ευαισθησίας

Από όλες τις παραμέτρους που εξεταστήκαν για ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκαν οι παρακάτω:

#### Χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα (κλείσιμο σήραγγας)

Αυτή είναι μια παράμετρος που όπως έχει ήδη αναφερθεί επηρεάζεται από την έγκαιρη και σωστή συμπεριφορά των χρηστών της σήραγγας. Επίσης η εκκένωση και η διακοπή της κυκλοφορίας είναι πιο γρήγορη όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προβλεπόμενες διαδικασίες από τους διαχειριστές. Είναι παρόλα αυτά μια παράμετρος με μεγάλη αβεβαιότητα. Από την βιβλιογραφική μελέτη επιλέχθηκε ένα εύρος από (45s-4min). Τα 45 δευτερόλεπτα είναι ένας πολύ δύσκολος επιτεύξιμος στόχος αλλά η σύγκριση των αναμενόμενων τιμών δείχνει αν μια τέτοια προσπάθεια είναι ωφέλιμη. Ενώ τα 4 λεπτά είναι μια πολύ αργή αντίδραση.

#### Χρόνος ενεργοποίησης εξαερισμού έκτακτης ανάγκης

Όπως έχει αναφερθεί ο εξαερισμός επηρεάζει σημαντικά τις επιπτώσεις από πιθανά ατυχήματα στην σήραγγα. Μελετώνται λοιπόν δυο παράμετροι του εξαερισμού: Ο χρόνος ενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης και η παροχή έκτακτης ανάγκης. Συγκεκριμένα ο χρόνος ενεργοποίησης επηρεάζεται από τους τεχνολογικούς περιορισμούς ενεργοποίησης των κινητήρων και από την αποδοτικότητα αυτών. Τα τεχνολογικά μέσα από σήραγγα σε σήραγγα διαφέρουν σημαντικά και μάλιστα σε παλαιές κατασκευές η ανανέωση είναι δύσκολη. Επιπλέον εξαρτάται και από τα συστήματα ελέγχου μιας σήραγγας και την αντίδραση των χειριστών. Έχει γίνει αναφορά σε συστήματα εντοπισμού ατυχημάτων αλλά και ενδοεπικοινωνίας. Είναι συνεπώς μια συνθέτη παράμετρος με μεγάλη αβεβαιότητα αλλά πως δείχνει και η μελέτη σημαντική επίδραση. Το εύρος που επιλέχθηκε είναι (45s- 180s). Λιγότερο



από 45 δευτερόλεπτα κρίθηκε ανέφικτος στόχος ενώ τα 3 λεπτά χρησιμοποιούνται ως το χειρότερο σενάριο.

### **Παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης**

Η παροχή του εξαερισμού είναι μια παράμετρος με μικρότερη αβεβαιότητά όμως με σημαντική επιρροή. Μπορεί να εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την τεχνολογία των κινητήρων αλλά εμπλέκουν ένα σημαντικό φαινόμενο των σπράγγων, το piston effect. Σε αυτό το φαινόμενο επιδρά και ο χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας που επίσης μελετάται. Λόγω αυτών δίνει αποτελέσματα που δεν προβλέπονται χωρίς προσομοιώσεις. Επιλέχθηκε λοιπόν να μελετηθεί και αυτή. Ως εύρος επιλέχθηκε παροχή ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$  -  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### **Όρια Ταχυτήτων οχημάτων και HGV**

Φυσικά καθοριστική παράμετρος είναι και η συμπεριφορά των οδηγών των απλών οχημάτων αλλά και των οχημάτων που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία. Ένας τρόπος να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά είναι η αλλαγή των ορίων ταχύτητας. Το μοντέλο θεωρεί ότι τηρούνται αυστηρά τα όρια αρά για να μελετηθούν οι ιδιαιτερότητες διάφορων οδηγών αλλάζουν τα όρια στο μοντέλο. Δεν εστιάζει η μελέτη μόνο στα πραγματικά όρια ταχύτητας της πρότυπης σπράγγας αλλά στην εκτίμηση της ταχύτητας των περισσότερων χρηστών. Έτσι επιλέγονται εύρος ταχύτητας οχημάτων ( $80 \text{ km/h}$  -  $110 \text{ km/h}$ ) και εύρος ταχύτητας HGV ( $60 \text{ km/h}$  -  $90 \text{ km/h}$ ). Η παράμετρος αυτή προφανώς έχει μεγάλη αβεβαιότητα και για αυτό κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί.

### **Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV**

Οι μεταφορές σε κάθε χωρά είναι διαφορετικές. Στο παρελθόν τα δεδομένα που συγκεντρώνονταν σε κάθε χωρά ήταν ακριβή και επαρκούσαν να περιγράψουν την κατάσταση στο οδικό τους δίκτυο. Πλέον όμως λόγω της παγκοσμιοποίησης και της διεύρυνσης του συγκεκριμένου κλάδου είναι δύσκολο να προβλεφθούν οι ανάγκες και τα χαρακτηριστικά των οδικών μεταφορών. Μια παράμετρος που μπορεί να μελετηθεί για να λάβει υπόψιν της αυτή την διακύμανση είναι η αναλογία των μεταφερομένων επικίνδυνων φορτίων. Στο μοντέλο υπάρχουν δεδομένα από μελέτες στο Καναδά, την Γαλλία και την Νορβηγία. Παρόλο που οι ευρωπαϊκές χώρες φαντάζουν ακριβέστερος τρόπος περιγραφής και εκτίμησης των επικίνδυνων φορτίων κρίνεται σκόπιμο να συμπεριληφθούν στην ανάλυση και οι έρευνες του Καναδά για τους προαναφερθέντες λογούς παγκοσμιοποίησης της οικονομίας. Η αναλογία επικίνδυνων φορτίων συνδυάζεται και έναν συνδυασμό άλλων δεδομένων που αφορούν τις συγκεκριμένες χώρες για ακριβέστερα αποτελέσματα. Τέτοια δεδομένα είναι: Η ποιότητα των οδικών δικτύων, στοιχεία για συχνότητα ατυχημάτων και άλλοι συμπληρωματικοί συντελεστές.

### **Κυκλοφοριακός φόρτος**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την συγκεκριμένη πρότυπη σπράγγα της μελέτης δεν υπήρχε αναλυτική ανάλυση κυκλοφοριακής μελέτης. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η υπόθεση

των κυκλοφοριακών δεδομένων έχει αναλυθεί. Επειδή όμως πρόκειται για εκτίμηση είναι αναγκαίο για να είναι πιο ακριβή τα αποτελέσματα να χρησιμοποιεί ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος ως παράμετρος ανάλυσης ευαισθησίας. Επιλέχθηκαν διαφορά εύρη και για τις 3 περιόδους (Quiet, Normal, Peak) εύρος Normal (25veh/h - 45 veh/h), εύρος Quiet (15 veh/h - 30 veh/h), εύρος Peak (50 veh/h - 90 veh/h). Με διάφορους συνδυασμούς έγιναν προσομοιώσεις και τελικά και η ανάλυση ευαισθησίας.

### **Άλλες παράμετροι που δεν μελετήθηκαν τελικά**

Κάποιες παράμετροι που θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση είναι οι Άνθρωποι στα οχήματα αλλά και η Αναλογία οχημάτων που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία και λεωφορείων στην κυκλοφορία. Επιλέχθηκε να μην μελετηθούν διότι στόχος της ανάλυσης και της εργασίας ήταν όχι μόνο να βρεθεί η επιρροή των παραμέτρων αλλά και να βρεθούν προτάσεις για την μεταβολή της τιμής τους στην πραγματικότητα. Ο μέσος αριθμός των ατόμων στα οχήματα δεν εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία παραμέτρων. Παράλληλα η αναλογία στην κυκλοφορία μελετήθηκε μέσω των προτεινομένων αναλογιών διάφορων χωρών οπότε θεωρήθηκε ότι δεν θα προσέθετε κάτι παραπάνω στην ανάλυση.

### **Προβλήματα/Δυσκολίες σύγκρισης**

Γενικά δεν ενδιαφέρει μόνο η απολυτή τιμή στις καμπύλες F-N. Προφανώς δίνεται μεγαλύτερη προσοχή σε τιμές πάνω η κοντά από το όριο ALARP αλλά και πάλι όπως αναφέρθηκε το όριο δεν είναι ίδιο σε όλα τα μοντέλα. Εκεί που δίνεται έμφαση είναι στην διαφοροποίηση της τιμής για τις αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων που μελετώνται. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω κάθε σήραγγα είναι μοναδική και είναι δύσκολο να ακολουθεί καθολικούς κανόνες. Επιπλέον λόγω της αβεβαιότητας είναι αποτελεσματικότερο να δίνεται προσοχή στην αύξηση ή μείωση της τιμής του επιπέδου ασφαλείας πάρα στην ακριβή τιμή του.

### **Κατηγοριοποίηση Παραμέτρων**

Οι παράμετροι που επηρεάζονται άμεσα από τον ανθρώπινο παράγοντα είναι και αυτοί με την μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Τέτοιοι είναι οι παράγοντες οδικής συμπεριφοράς όπως τα προσπεράσματα και η τήρηση των ορίων ταχύτητας αλλά και οι χρόνοι εκκένωσης. Αυτές οι παράμετροι τονίζονται διότι είναι ένας τομέας οπου με συντονισμένη έρευνα μπορεί να αυξήσει σημαντικά το επίπεδο ασφαλείας. Τέτοιες παράμετροι είναι ο εξοπλισμός της σήραγγας, ο χρόνος αυτόματης ενεργοποίησης της λειτουργίας έκτακτης ανάγκης του συστήματος εξαερισμού καθώς και ο εντοπισμός ατυχήματος ή εγκλωβισμένου χρήστη από τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

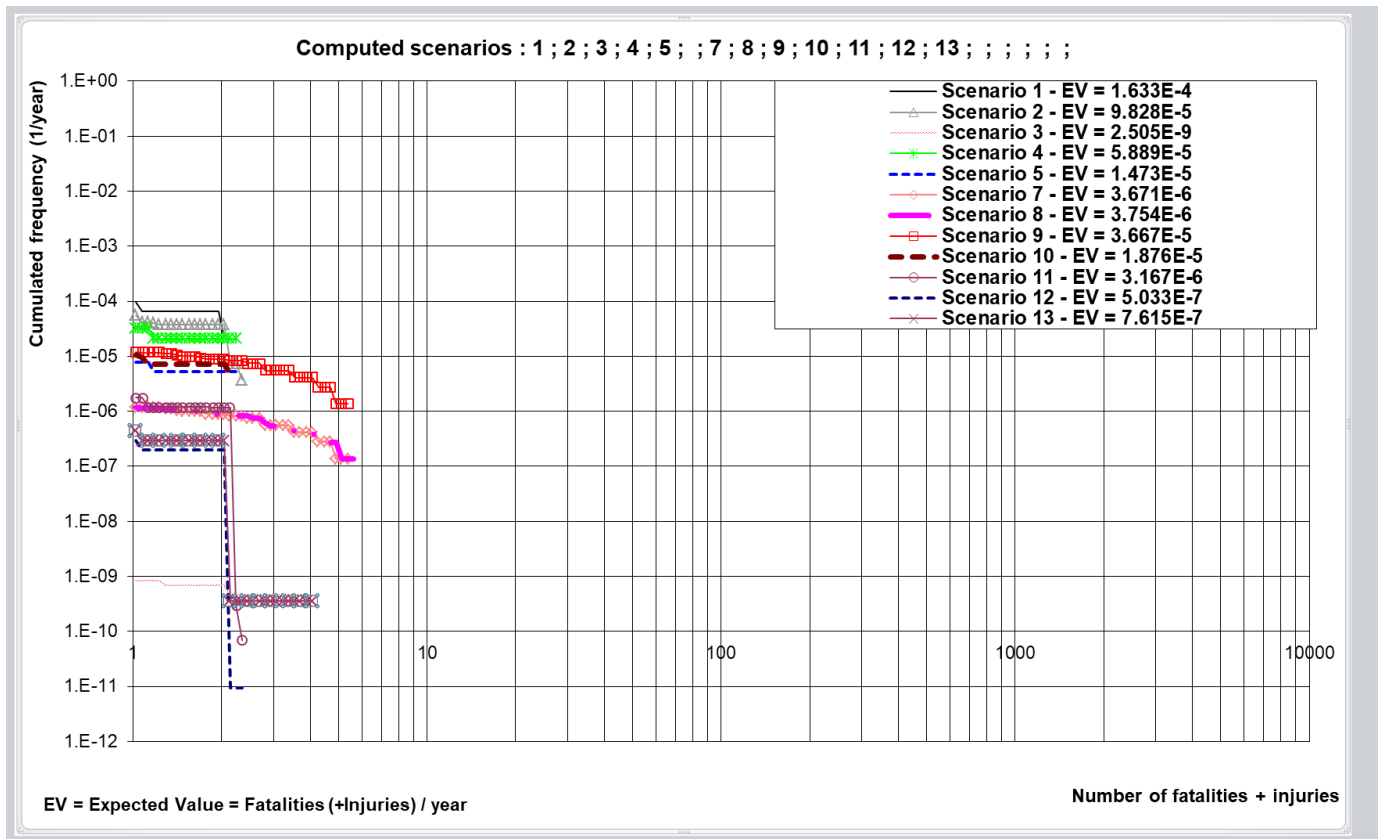
### **Μέτρα αύξησης της ασφαλείας κατά την λειτουργία και την συντήρηση των σηράγγων**

Εδώ αναφέρονται και συστήματα τα οποία με σωστή και συστηματική συντήρηση μπορούν να αποφύγουν φθορές που οδηγούν σε μείωση του επιπέδου ασφαλείας. Τέτοια είναι προφανώς τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, ο εξαερισμός, ο εξοπλισμός πυροπροστασίας

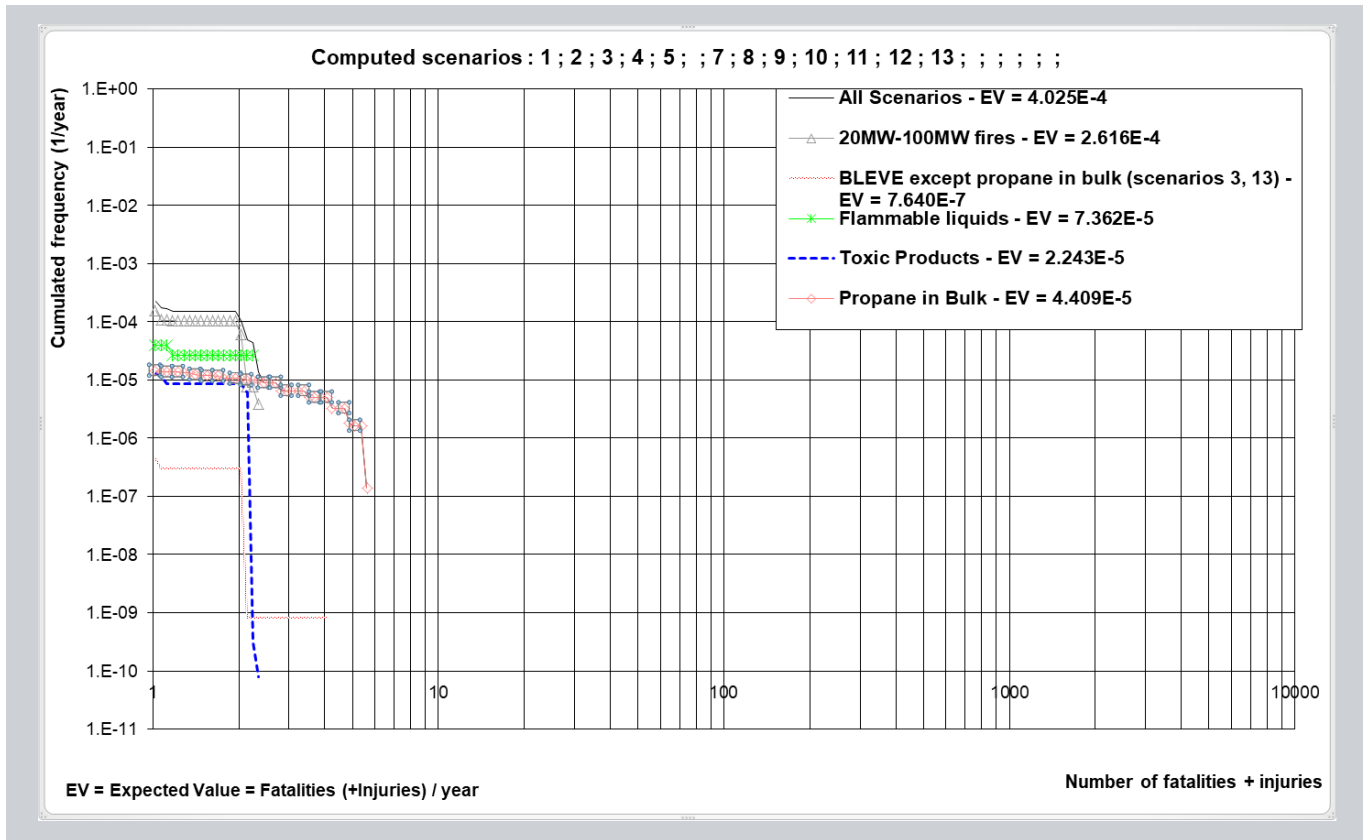
αλλά και η ίδια η κατασκευή της σήραγγας που προφανώς χρειάζεται ελέγχους και συντήρηση. Εδώ μάλιστα παρατηρούνται και αρκετοί τεχνολογικοί περιορισμοί. Είναι όμως συστήματα στα οποία σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να αξίζει η επένδυση στην βελτίωση τους ή η έρευνα για πιο αποδοτικές τεχνολογίες. Ενδεικτική αναφορά τέτοιων συστημάτων: σύστημα εντοπισμού ατυχήματος ή εγκλωβισμένου χρήστη, κάμερα αναγνώρισης σήμανσης ADR, σημάνσεις και ειδικοί φωτισμοί.

### Αρχικό σενάριο (Προσομοίωση Σημείο Αναφοράς)

Το αρχικό σενάριο που παρουσιάζεται έχει τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Είναι το σημείο αναφοράς για την μετέπειτα ανάλυση ευαισθησίας καθώς θα αλλάζει η εκάστοτε παράμετρος διατηρώντας τα υπόλοιπα δεδομένα ίδια.

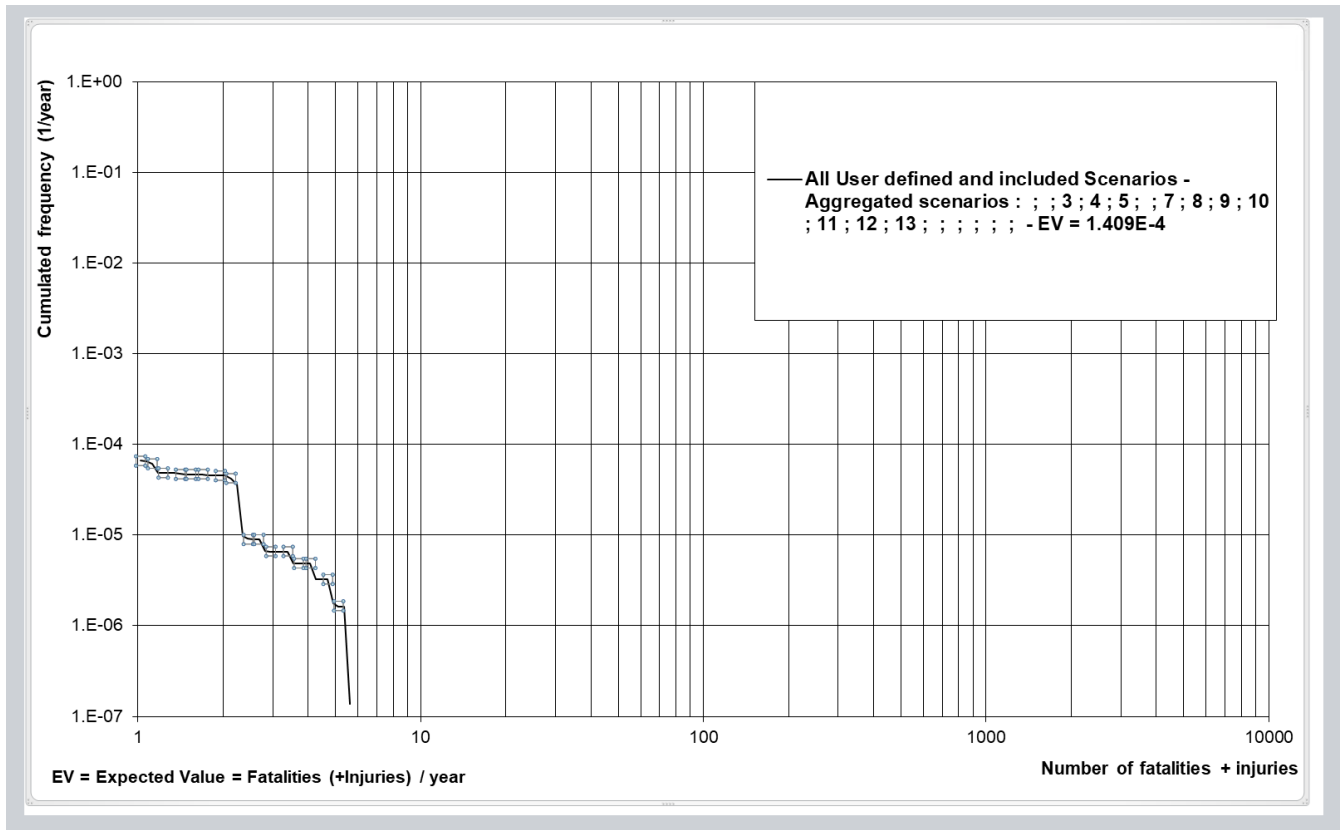


Σχήμα 3 Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης



Σχήμα 4 Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης με ομαδοποιημένα σενάρια

Εδώ τα σενάρια έχουν ομαδοποιηθεί από το μοντέλο με βάση την κατηγορία της επικίνδυνης ουσίας που μεταφέρεται. Αυτή η ομαδοποίηση μπορεί να είναι χρήσιμη για να φανεί η επικινδυνότητα ενός είδους επικινδύνου φορτιού αλλά στην ανάλυση που έγινε δεν φάνηκε αξιοποιήσιμη.



**Σχήμα 5 Αθροιστική Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης**

Από τις παραπάνω καμπύλες FN είναι σαφές ότι η πρότυπη σήραγγα έχει επίπεδο ασφαλείας κάτω από το όριο  $10^{-3}$  ALARP. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο καθώς είναι μια τυπική σήραγγα του ελληνικού οδικού δικτύου. Το επίπεδο αυτό δίνει και μια επιβεβαίωση ότι οι υποθέσεις στα δεδομένα ήταν σχετικά ακριβείς. Ακόμα φαίνεται ότι και σε πραγματικές συνθήκες η ασφάλεια δεν είναι σημαντικά κάτω από το όριο. Αυτό δείχνει ότι όντως οι σήραγγες σχεδιάζονται με γνώμονα την αποφυγή ατυχημάτων αλλά όχι και υπερ- επενδύοντας σε μέτρα που θα αύξαναν σημαντικά το κόστος. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω η υπερ - επένδυση στην ασφάλεια σηράγγων δεν ωφελεί συνολικά την κοινωνία καθώς στερούνται πόροι από άλλα μέτρα μείωσης διαφορετικών κινδύνων.

### 5.2.2 Σύγκριση FN Curves

Για την σύγκριση θα χρησιμοποιηθούν 2 είδη FN καμπυλών. Αυτή με όλα σενάρια χωριστά και μια με την άθροιση των σεναρίων σε μια αναμενόμενη τιμή. Σε κάθε παράμετρο που επιλέχθηκε για ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε βάσει της βιβλιογραφίας και ένα εύρος τιμών που θα λάβει. Έγιναν δοκιμές για παραπάνω τιμές μέσα στο εύρος αλλά επιλέχθηκαν οι χαρακτηριστικότερες για να παρουσιαστούν σε καμπύλες FN. Αναπτύσσοντας λοιπόν το μοντέλο της πρότυπης σήραγγας στο DG-QRAM έγιναν προσομοιώσεις με αλλαγές σε μια

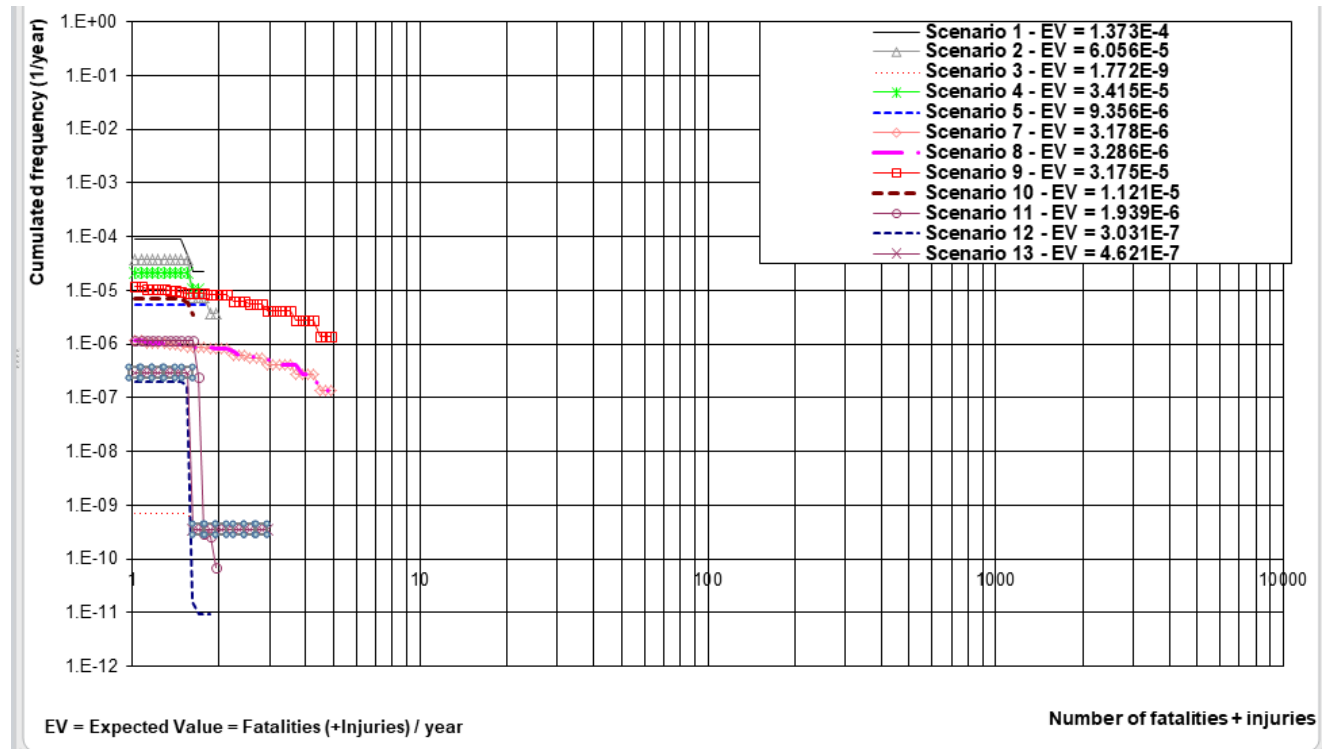
παράμετρο κάθε φορά και τιμές της μέσα στο επιλεγμένο εύρος. Έτσι παράχθηκαν πολλές καμπύλες FN και μελετήθηκαν οι αλλαγές στις αναμενόμενη τιμή. Όλες οι παράμετροι που αναλύθηκαν προηγουμένως είναι αυτές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση. Λαμβάνοντας τιμές στο επιλεγμένο εύρος αυτών των παραμέτρων καταγράφηκε η παρακάτω επιρροή στο επίπεδο ασφάλειας. Στην συνέχεια η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα δείξει ποια είναι κάποια από τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν έτσι ώστε να αλλάξει η τιμή μιας παραμέτρου με στόχο την αύξηση του επιπέδου ασφάλειας. Τα μέτρα αυτά διερευνώνται και βάσει του κόστους τους για να μελετηθεί η σχέση κόστους – οφέλους.

### Χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα (κλείσιμο σήραγγας)

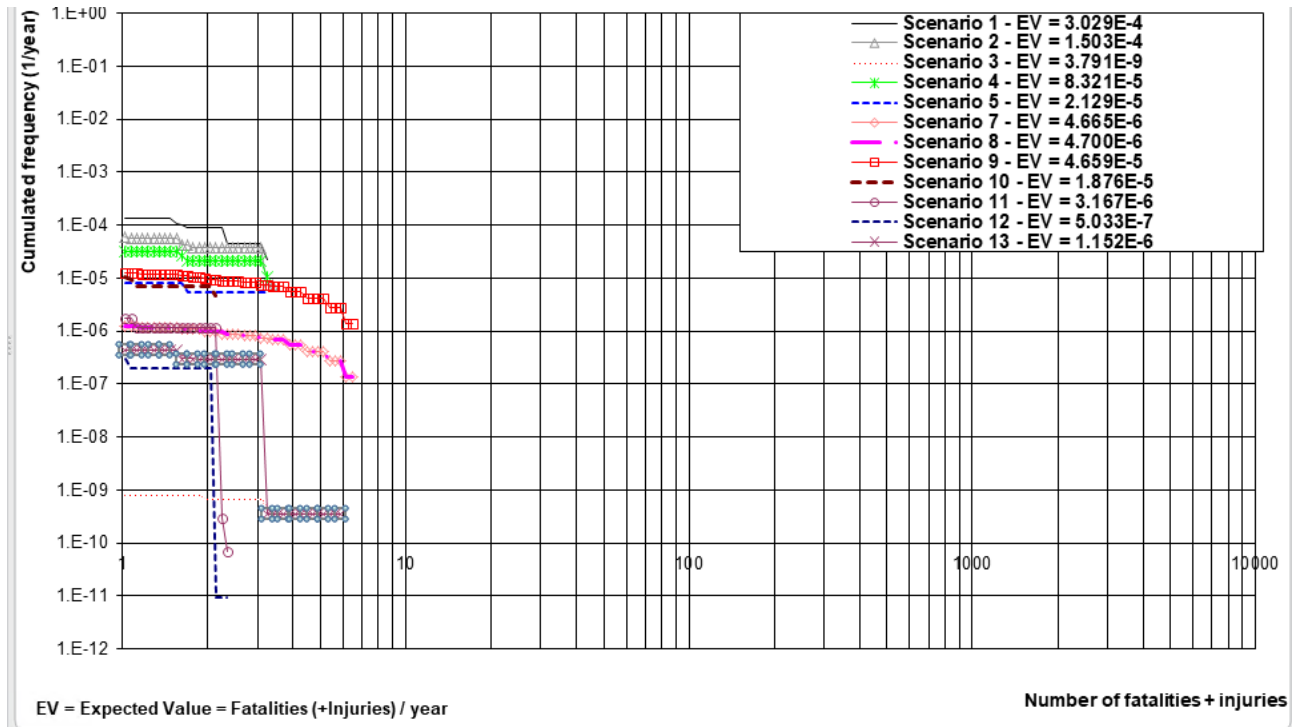
Εύρος Αναμενόμενης τιμής ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $9.564E-5$  -  $2.473E-4$ . Στην περίπτωση αυτή η πιο ασφαλής τιμή είναι για χρόνο διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα 45 s ενώ η χειρότερη περίπτωση για 4 λεπτά.

Τα Δυσμενέστερα σενάρια σε κάθε δοκιμή που παρατηρούνται είναι τα 1,2,4. Αυτά δεν αλλάζουν για τις διαφορετικές τιμές του χρόνου διακοπής. Κάτι τέτοιο δείχνει ότι δεν υπάρχουν κάποια σενάρια που να επηρεάζονται παραπάνω συγκριτικά με τα άλλα. Ο μέγιστος αριθμός απωλειών από το δυσμενέστερο διάγραμμα: περίπου 20

### Καμπύλες FN

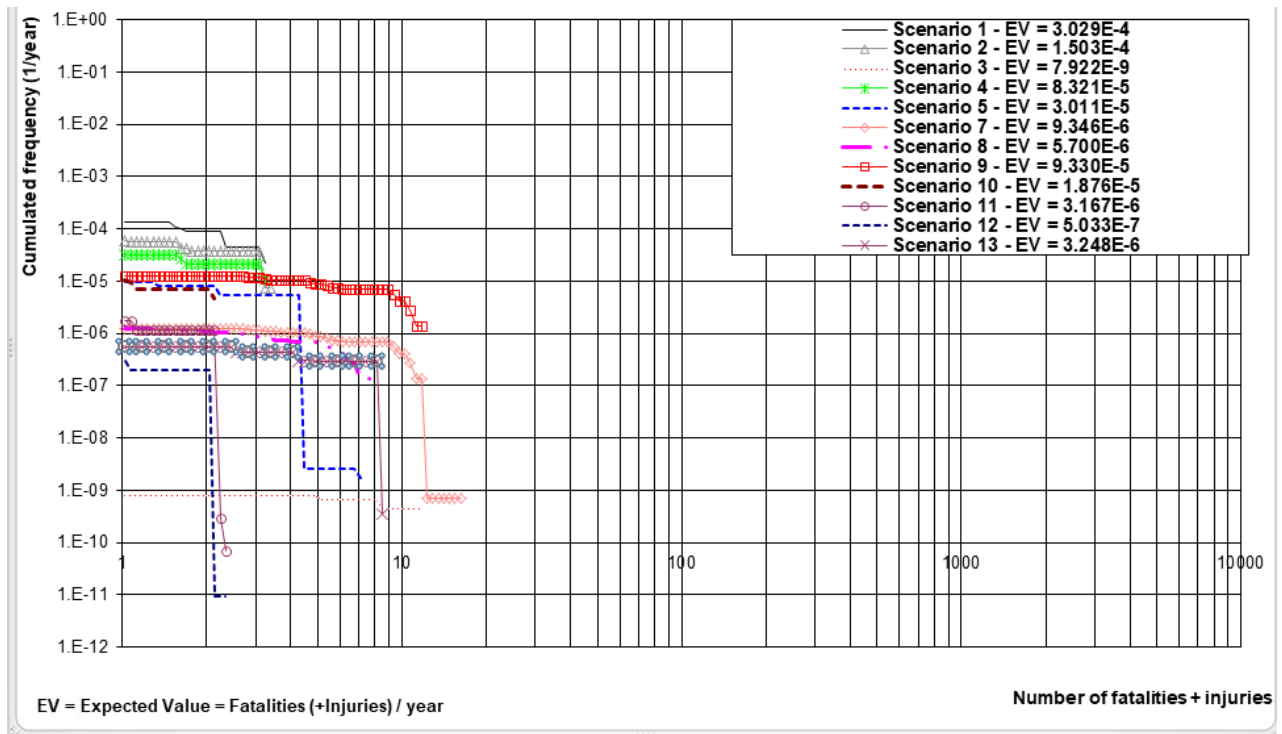


Σχήμα 6 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας (45s)



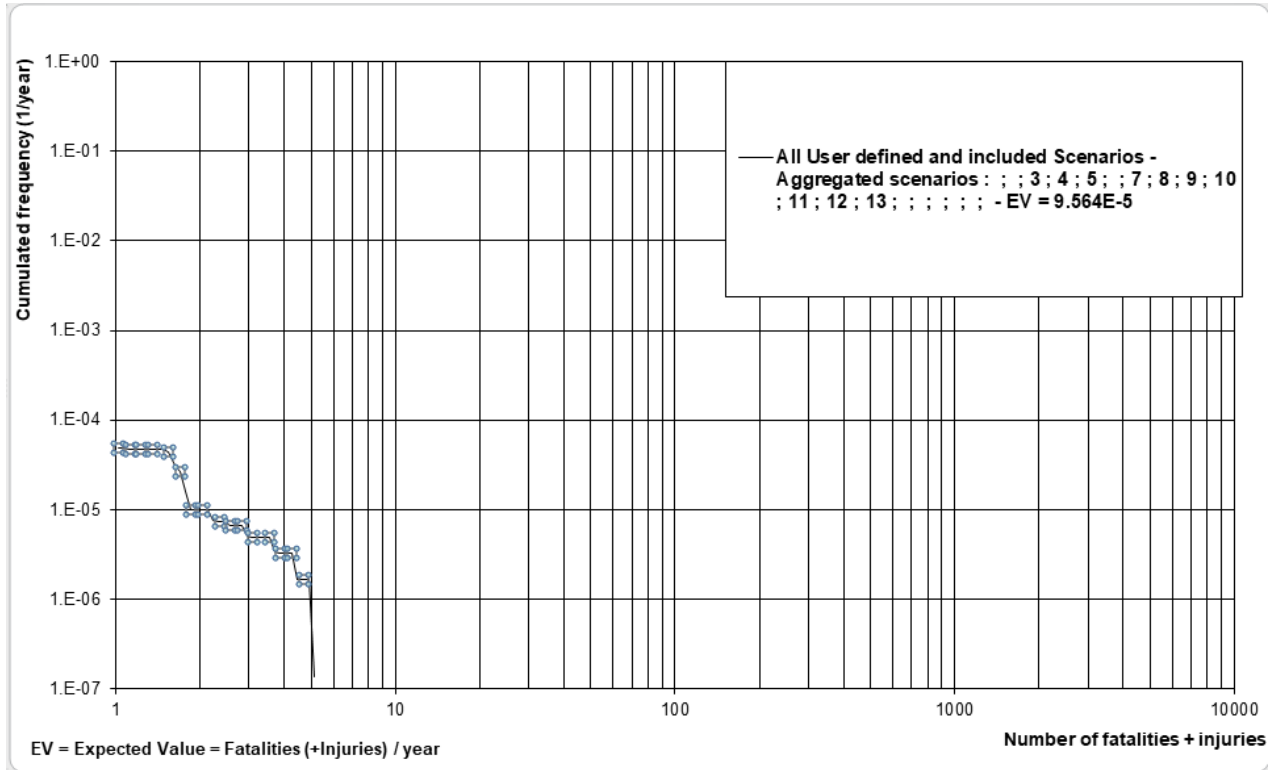
Σχήμα 7 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(1.5mins)



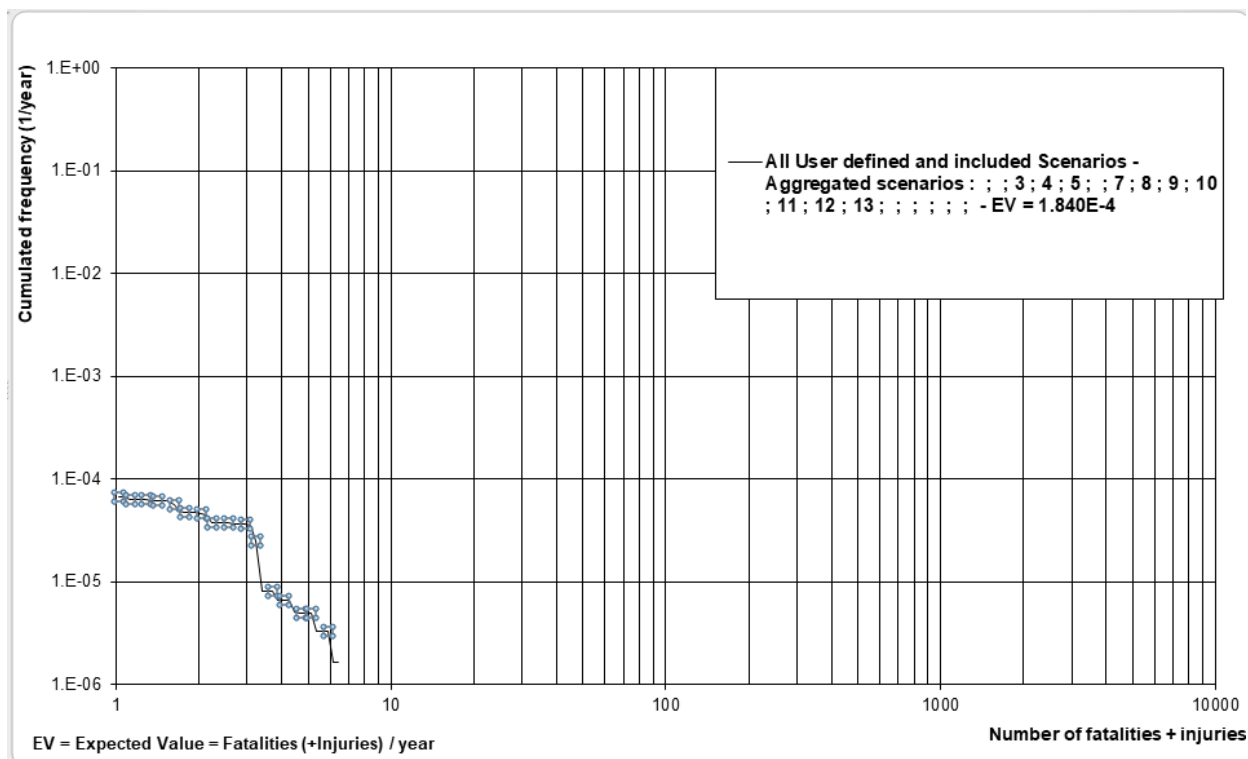


Σχήμα 8 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(4mins)

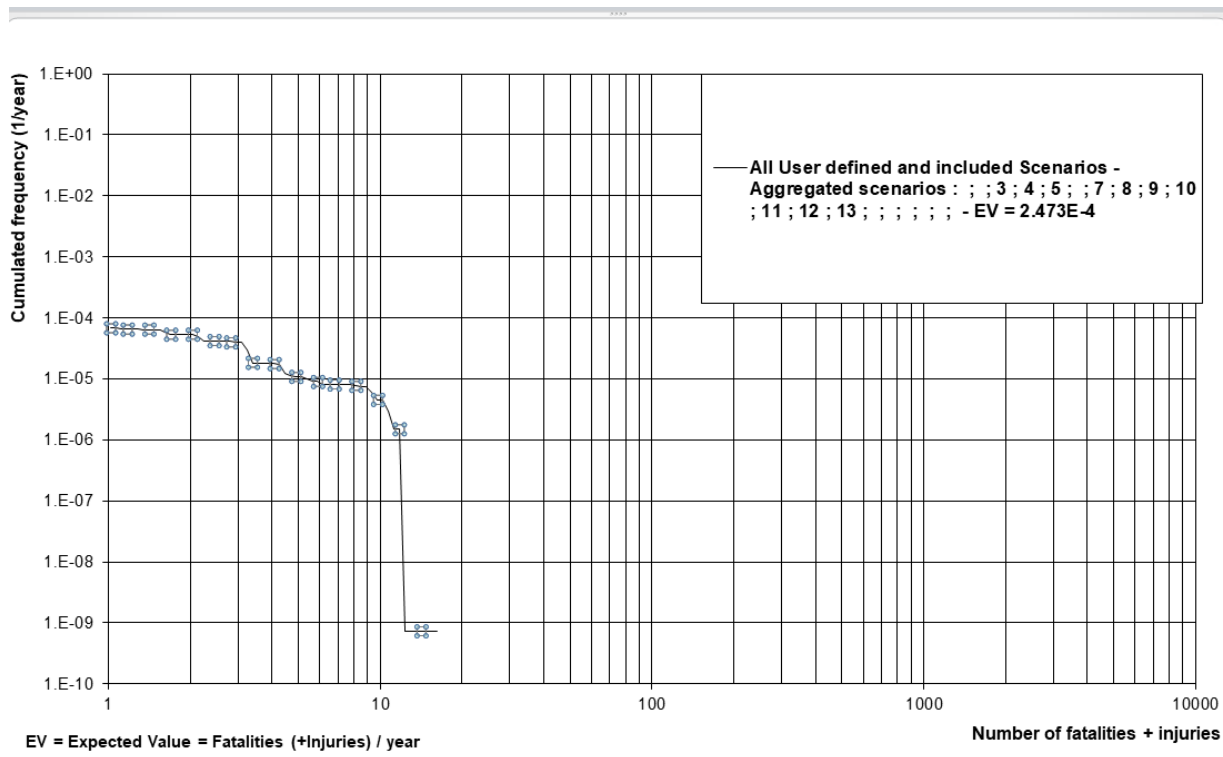
Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή



Σχήμα 9 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(45s)



Σχήμα 10 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(1.5mins)



**Σχήμα 11 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(4mins)**

**Παρατηρήσεις:**

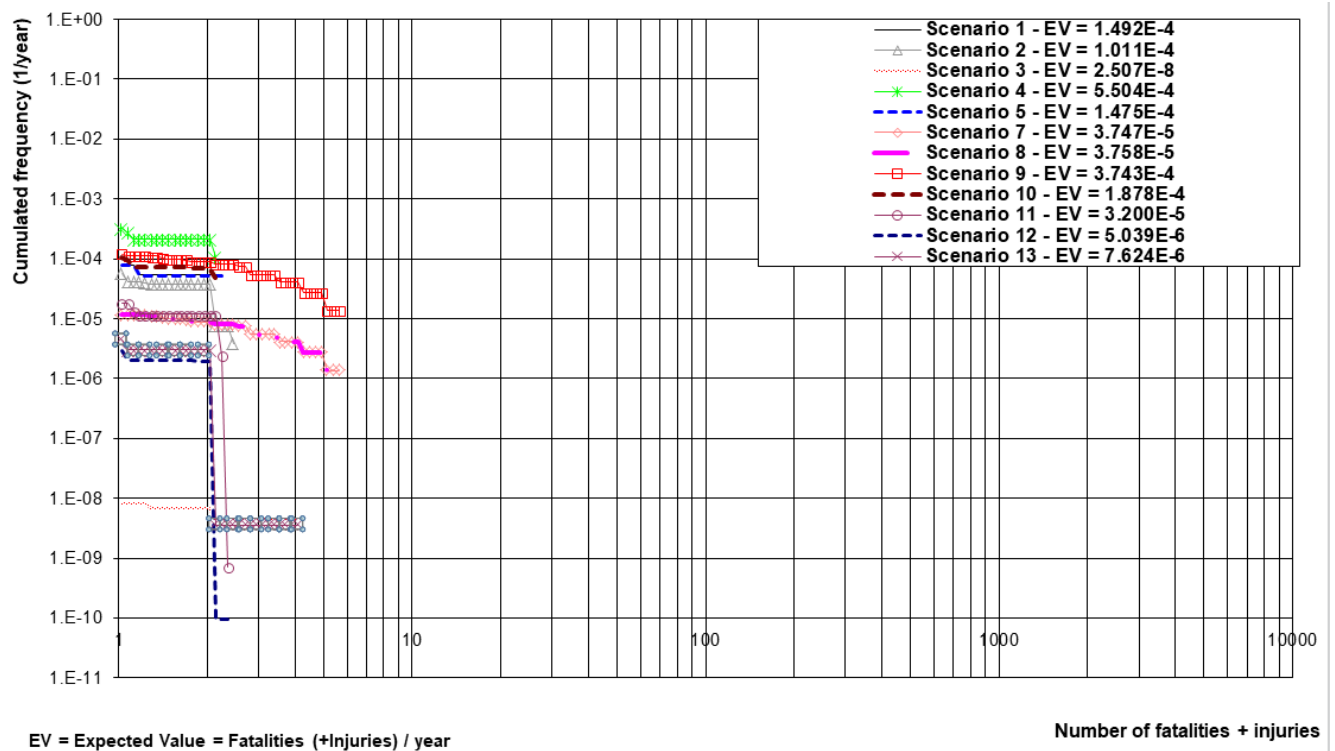
Παρατηρείται μεταξύ των δοκίμων με τους διαφορετικούς χρόνους κλεισίματος της σήραγγας μια διαφορά στην πιθανότητα ατυχημάτων με πολλά θύματα (>10). Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που υπάρχει αύξηση στην αναμενομένη τιμή. Φαίνεται μάλιστα ότι στην δοκιμή με τον χρόνο 4 λεπτά παρατηρείται ο μεγαλύτερος μέγιστος αριθμός θυμάτων (περίπου 20) σε σχέση με όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Συνεπώς εκτός από την Αναμενόμενη τιμή αυτή η παράμετρος επηρεάζει σημαντικά και τον αριθμό των θυμάτων. Από το 1.5 λεπτό και για αργότερο χρόνο αλλάζει η Αναμενόμενη τιμή ατομικής επικινδυνότητας μόνο σε ορισμένα σενάρια και κυρίως για ατυχήματα με πολλά θύματα. Η αύξηση αυτή φαίνεται να είναι σημαντική καθώς η υψηλότερη από την χαμηλότερή τιμή απέχουν μια τάξη μεγέθους. Φαίνεται λοιπόν ότι είναι ένας παράγοντας που θα μειώσει τον χρόνο κλεισίματος της σήραγγας θα αποτελέσει ευεργετική παράμετρο για την συνολική ασφάλεια της σήραγγας. Τρόποι με τους οποίους ελαχιστοποιείται ο χρόνος είναι με συστήματα ελέγχου, με έγκαιρες παρεμβάσεις, με σωστή ενημέρωση των χρηστών για περιπτώσεις εκκένωσης και με ανάπτυξη αποδοτικών μέσων για την ενημέρωση αυτή. Παραπάνω έχουν αναφερθεί πολλά από αυτά και είναι σαφές ότι η έρευνα και τα μέτρα αύξησης ασφάλειας πρέπει να εστιάσουν και εκεί. Το σημαντικότερο που θα επιτευχθεί με αυτά τα μέτρα είναι η σημαντική μείωσή των ατυχημάτων με μεγάλο αριθμό θυμάτων. Κάτι που όπως έχει αναφερθεί είναι εξαιρετικά σημαντικό για την κοινωνία.

### Χρόνος ενεργοποίησης εξαερισμού έκτακτης ανάγκης

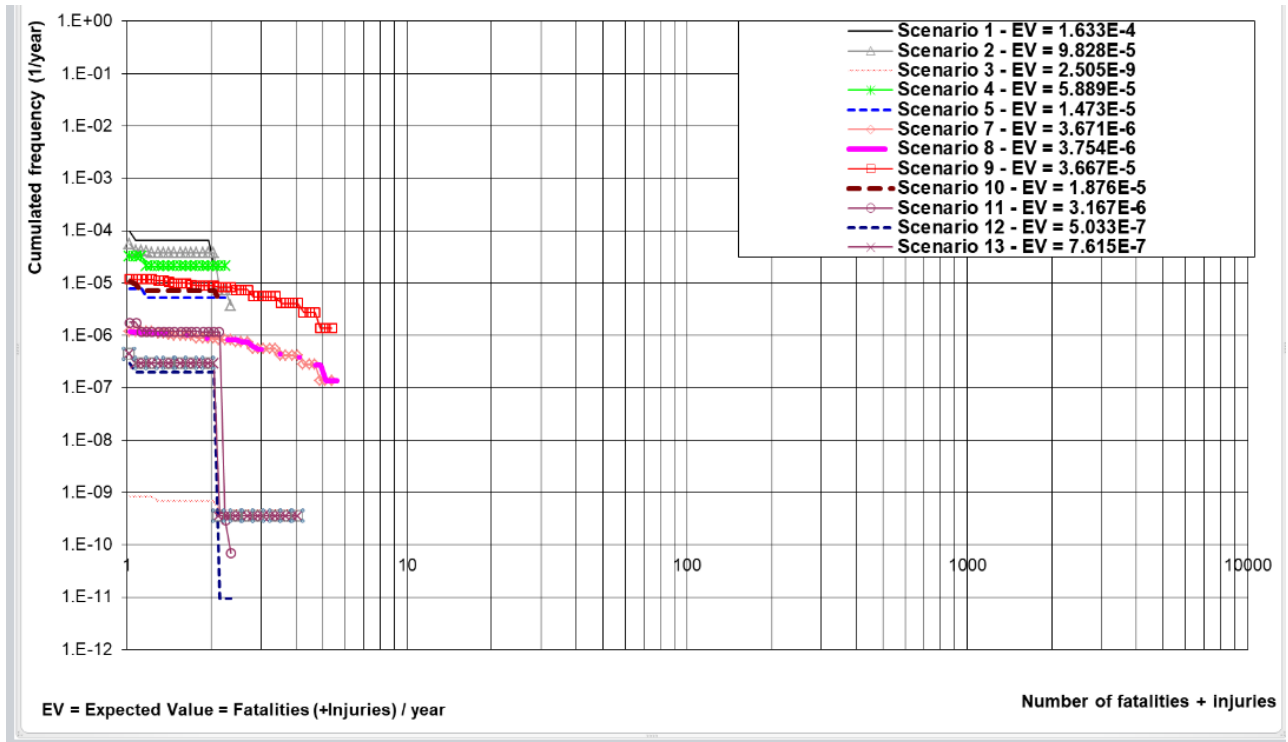
Εύρος Αναμενόμενης τιμής ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $1.363E-3$  -  $1.409E-4$ . Στην περίπτωση αυτή η πιο ασφαλής τιμή είναι για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού έκτακτης ανάγκης στην σήραγγα 45 s ενώ η χειρότερη περίπτωση για 3 λεπτά.

Τα Δυσμενέστερα σενάρια που παρατηρούνται είναι τα:1,2,4,9. Εδώ φαίνεται επίσης να μην αλλάζουν τα δυσμενέστερα σενάρια αλλά για αργούς χρόνους (πάνω από 2 λεπτά κρίνεται αργός) επισημαίνονται οι επιπτώσεις του σεναρίου 9 με πυρκαγιά από χύδην LPG. Είναι εμφανές και εδώ ότι ανάμεσα στις ακραίες τιμές του εύρους φαίνεται σημαντική διαφορά στο επίπεδο ασφάλειας. Ο μέγιστος αριθμός απωλειών από το δυσμενέστερο διάγραμμα: περίπου 5

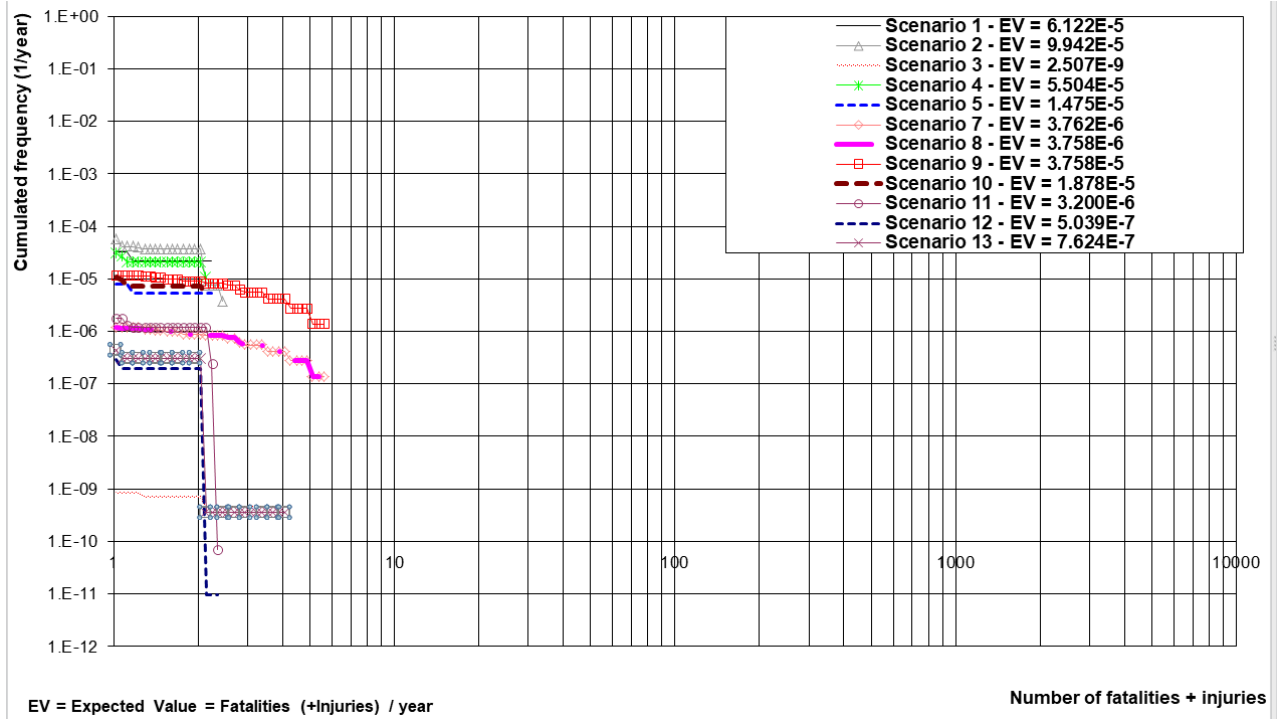
### Καμπύλες FN



Σχήμα 12 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(45s)



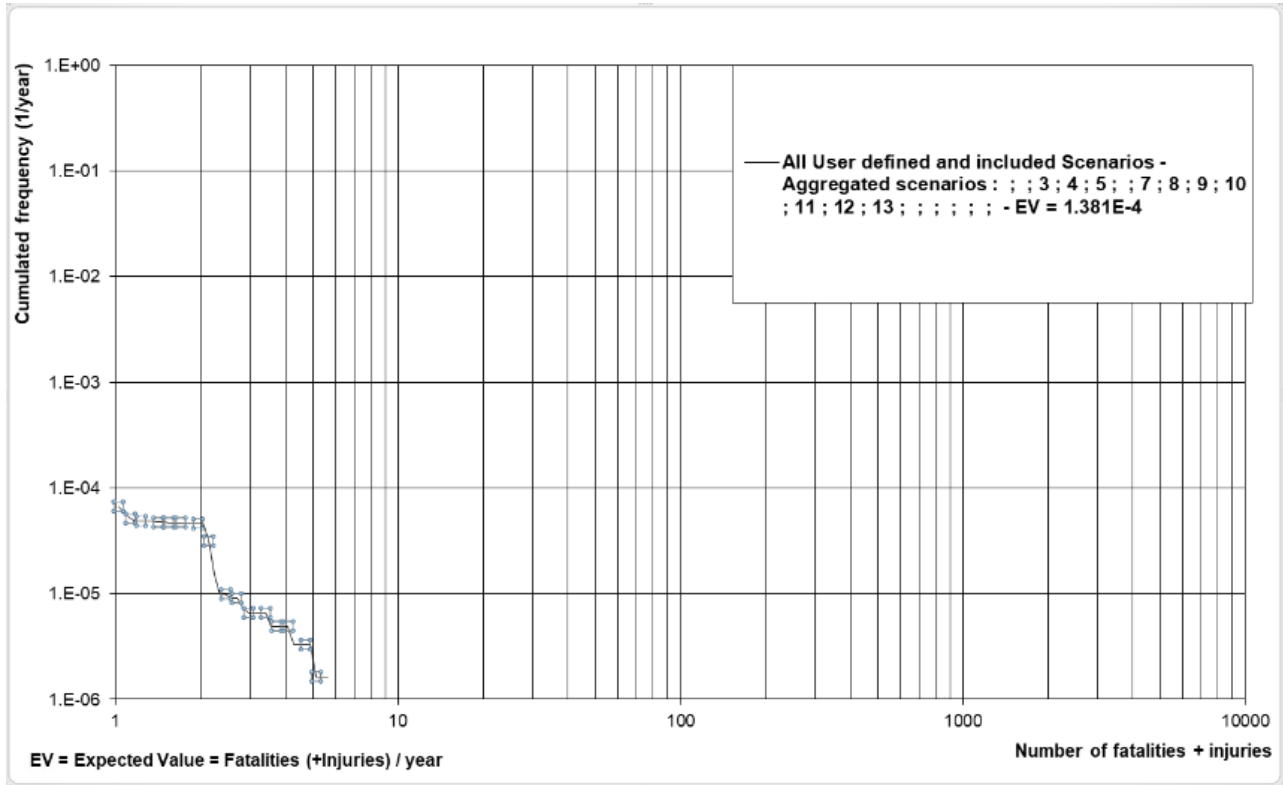
Σχήμα 13 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαιρισμού(1min)



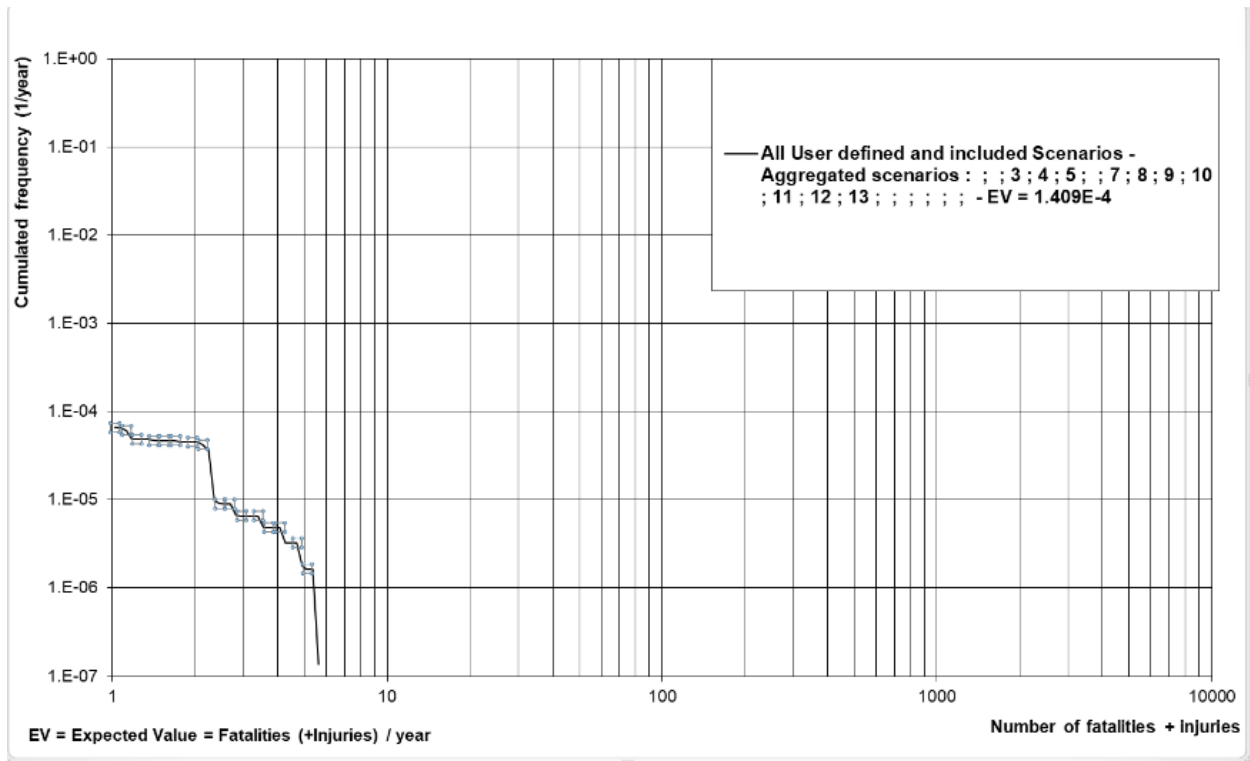
Σχήμα 14 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαιρισμού(3mins)



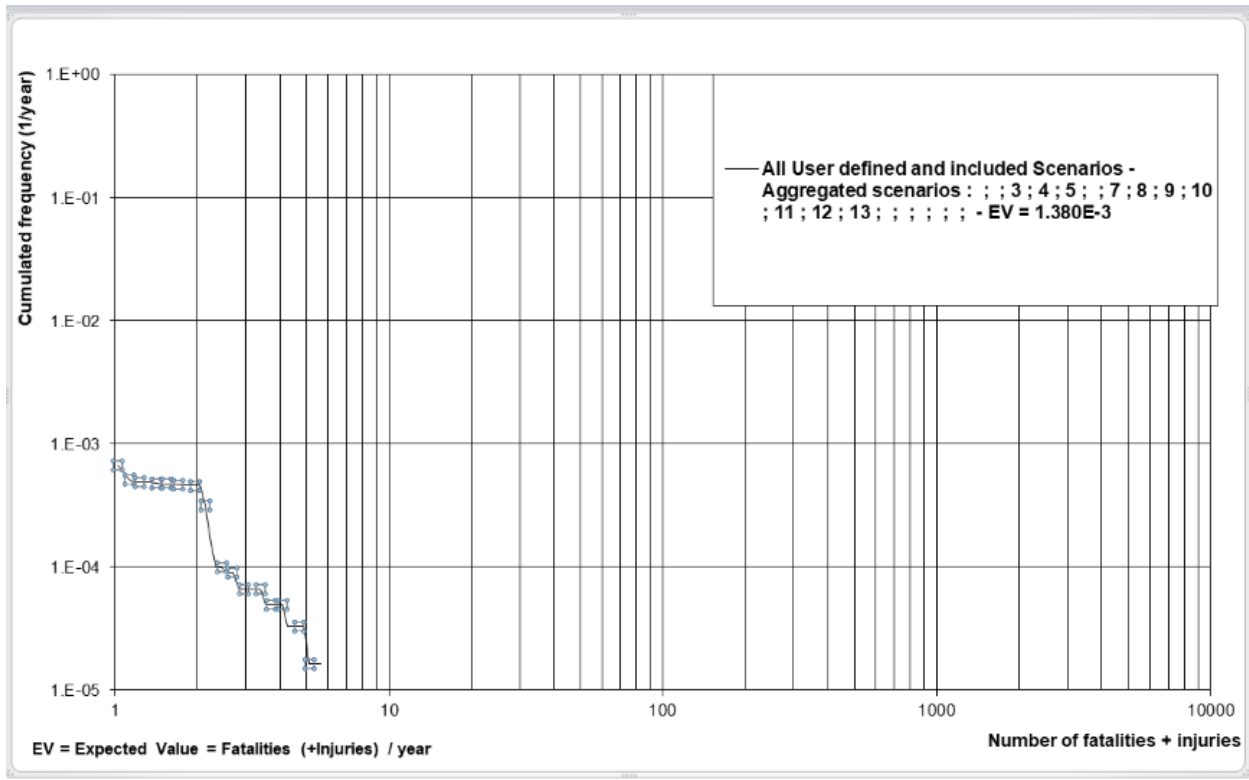
Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή



Σχήμα 15 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(45s)



Σχήμα 16 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαιρισμού(1min)



Σχήμα 17 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαρτισμού(3mins)

**Παρατηρήσεις:**

Για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν υπήρχε διαφορά στην αναμενομένη τιμή κατά την αύξηση του χρόνου ενεργοποίησης. Σημειώνεται όμως η σχετικά μικρή μείωση κοντά στο 1 λεπτό (από 45s – 1 mins η διάφορα στην συνολική EV είναι μόλις 1.363E-3 – 1.409E-3). Κάτι τέτοιο δείχνει ότι προφανώς για πιο γρήγορη ενεργοποίηση θα αυξηθεί το επίπεδο ασφάλειας αλλά ίσως να μην αξίζει να γίνουν επενδύσεις για μεγάλη μείωση. Στην περίπτωση μείωσης του χρόνου κάτω του ενός λεπτού με βεβαιότητα δεν αξίζει η επένδυση. Η αύξηση ασφάλειας είναι τόσο μικρή που με την αβεβαιότητα δεν είναι σίγουρο ότι υπάρχει όντως αύξηση ενώ το κόστος για αυτή είναι σημαντικό. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερου χρόνου πχ 3 λεπτά αξίζει η επένδυση σε συστήματα ελέγχου και σε βελτίωση των διαδικασιών καθώς η EV μειώνεται σημαντικά ( πχ 2mins – 3 mins EV: 1.380E-3 – 1.381E-4) ενώ το κόστος δεν είναι τόσο μεγάλο όσο για μείωση κάτω από 1 λεπτό. Σε κάθε περίπτωση η ανάλυση κόστους – οφέλους θα δίνει διαφορετική απάντηση για το συμφέρον της επένδυσης μείωσης του απαιτούμενου χρόνου ενεργοποίησης. Όπως αναφέρθηκε άλλωστε υπάρχουν και αρκετοί τεχνολογικοί περιορισμοί σχετικά με αυτόν τον παράγοντα όπως οι κινητήρες και τα συστήματα εντοπισμού ενός ατυχήματος. Μπορεί ακόμα να γίνει μελέτη για την μείωση του χρόνου κοντά στο 1 λεπτό για παλαιές σήραγγες με

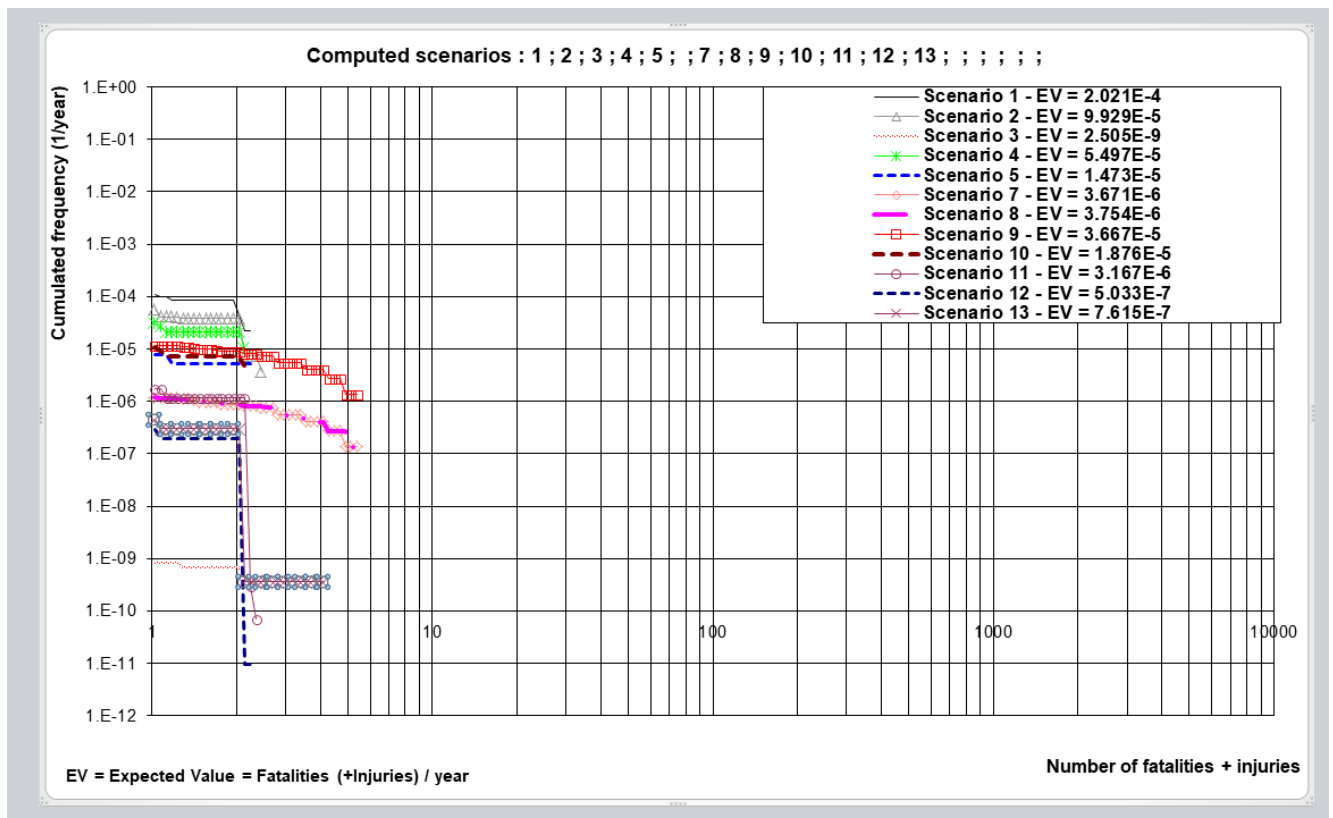
πεπερασμένο και κακώς συντηρημένο εξοπλισμό. Φαίνεται με αυτόν τον τρόπο και η αξία της συντήρησης των σηράγγων και είναι ένας τομέας που προτείνεται να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή. Είναι καθοριστικό να δίνεται η απαραίτητη προσοχή σε ενέργειες όπως οι έλεγχοι που αναφερθήκαν και στην βιβλιογραφία. Μόνο από την μελέτη αυτού του παράγοντα δεν μπορεί να δικαιολογηθεί η πρόταση για επενδύσεις στον τομέα των ελέγχων όμως είναι σιγουρά ένας τομέας ο οποίος μπορεί να εμβαθύνει.

### Παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης

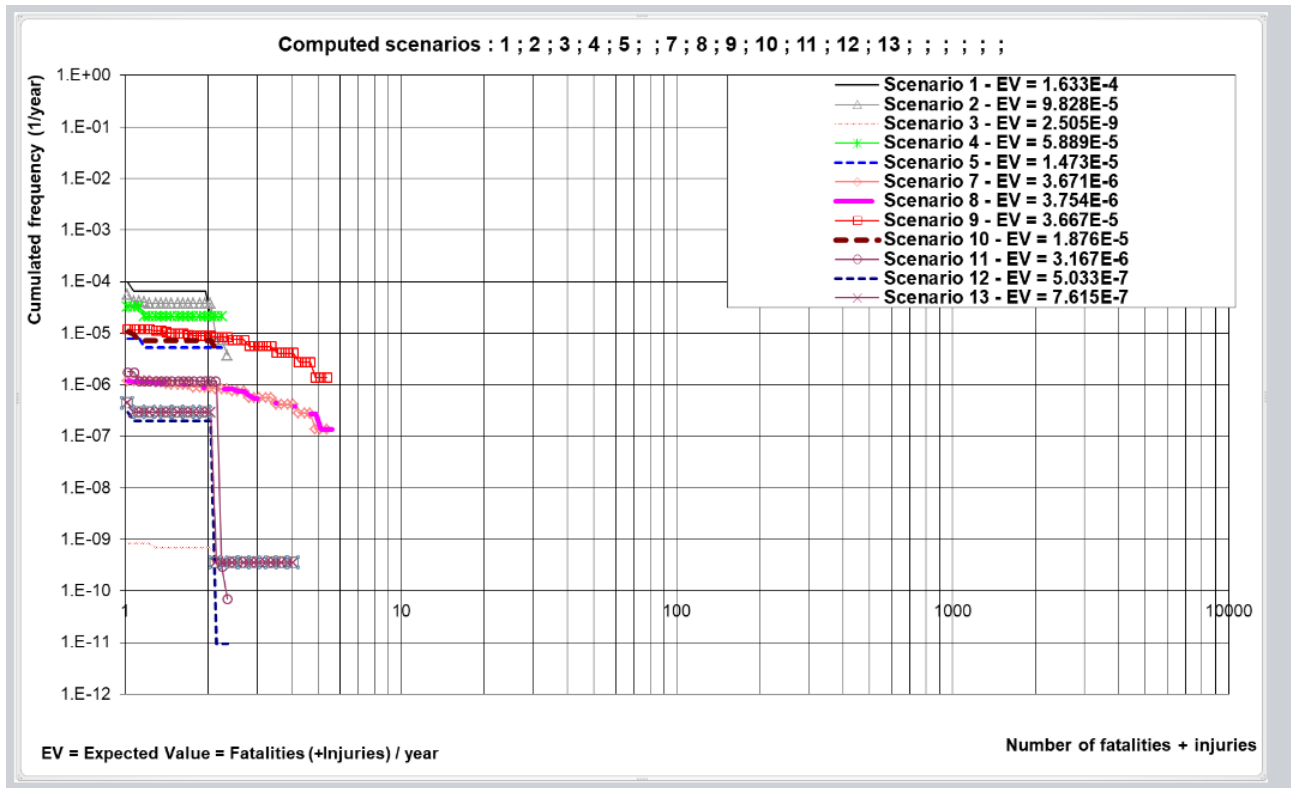
Εύρος Αναμενόμενης τιμής ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $1.370E-4$  -  $3.158E-4$ . Στην περίπτωση αυτή η πιο ασφαλής τιμή είναι για την παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης παρατηρείται στην υψηλότερη παροχή ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και η δυσμενέστερη περίπτωση στην μικρότερη παροχή ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Τα Δυσμενέστερα σενάρια σε κάθε δοκιμή που παρατηρούνται είναι τα: 1,2,4. Αυτά δεν διαφοροποιούνται στις δοκιμές με διαφορετική παροχή. Ο μέγιστος αριθμός απωλειών από το δυσμενέστερο διάγραμμα: περίπου 5.

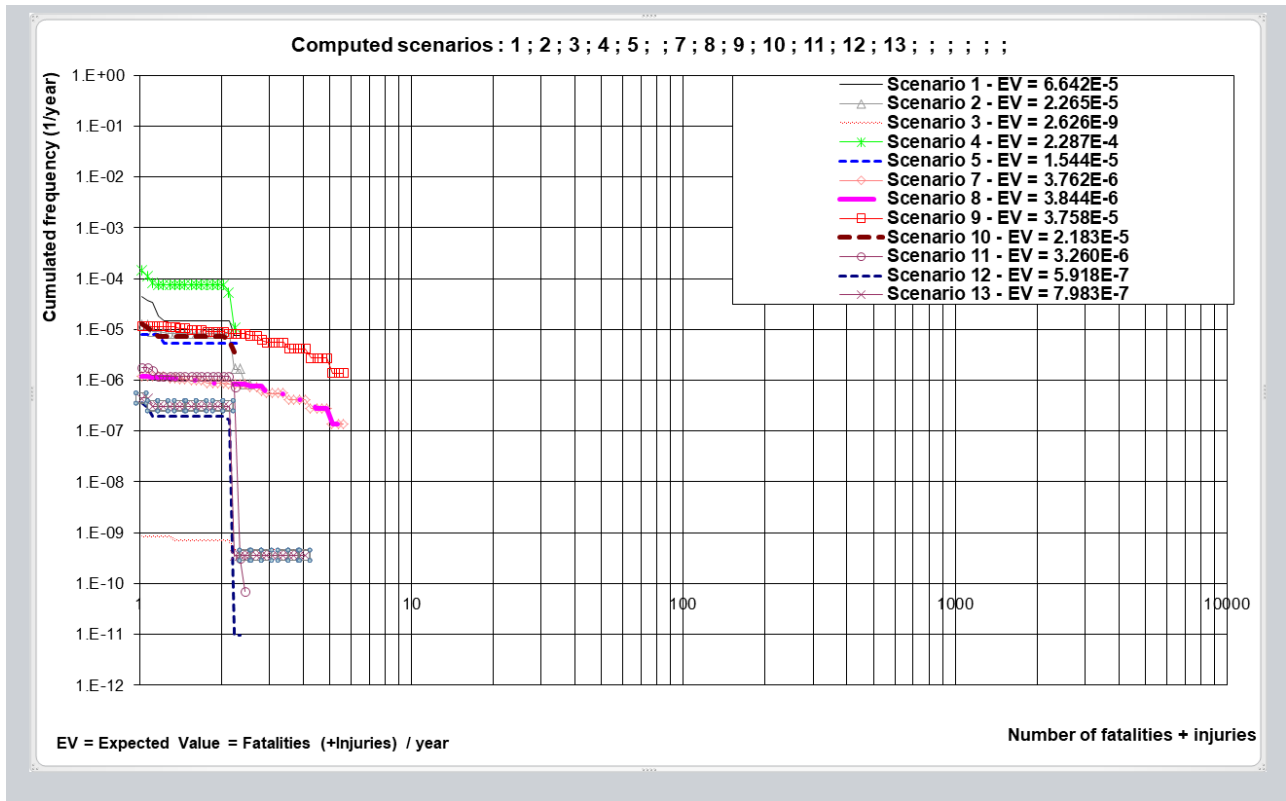
### Καμπύλες FN



Σχήμα 18 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ )

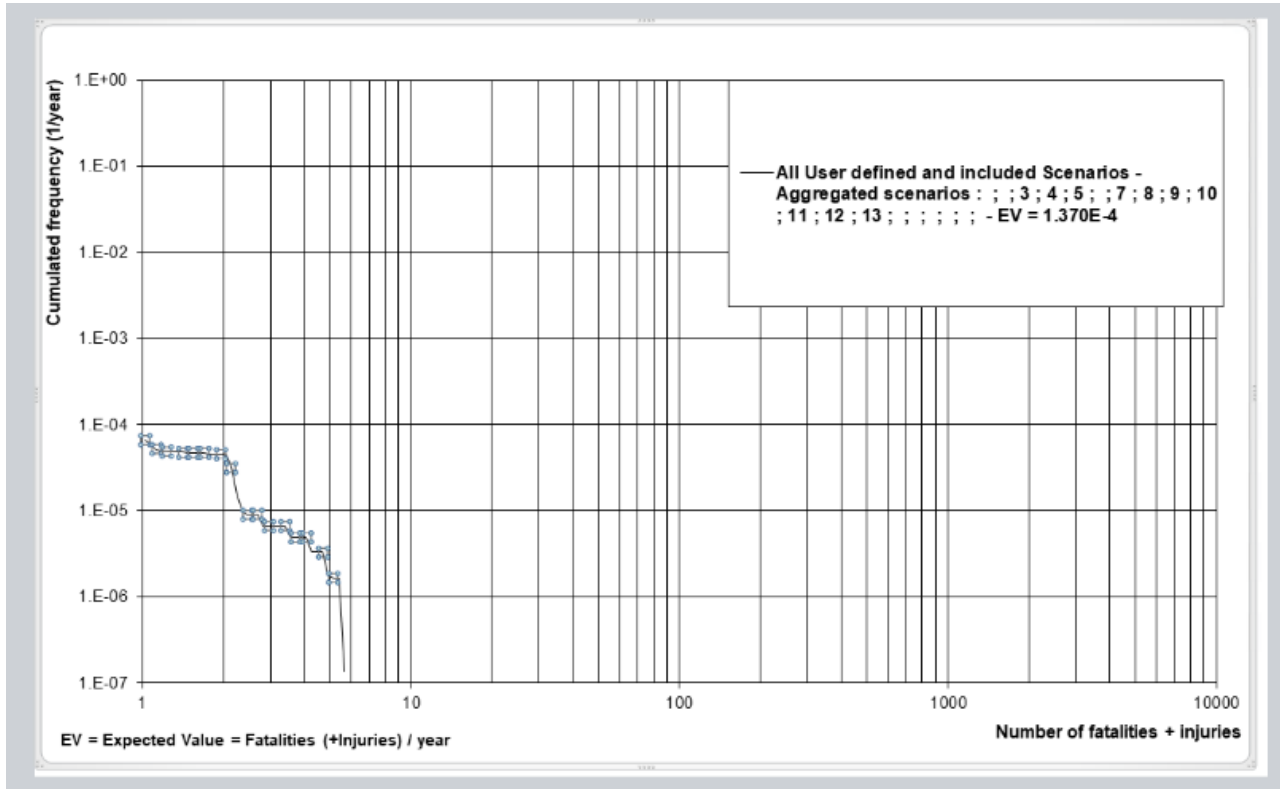


Σχήμα 19 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (150m<sup>3</sup>/s)



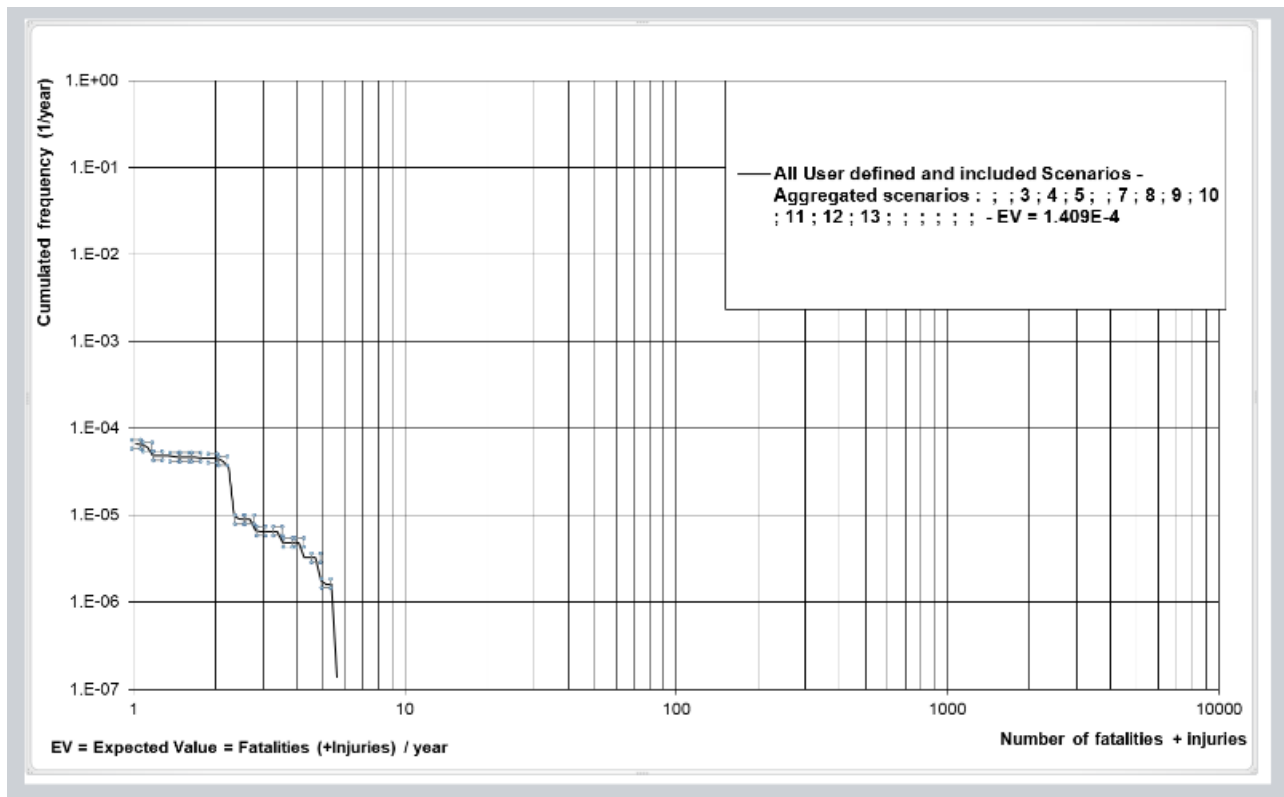
Σχήμα 20 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (300m<sup>3</sup>/s)

Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή

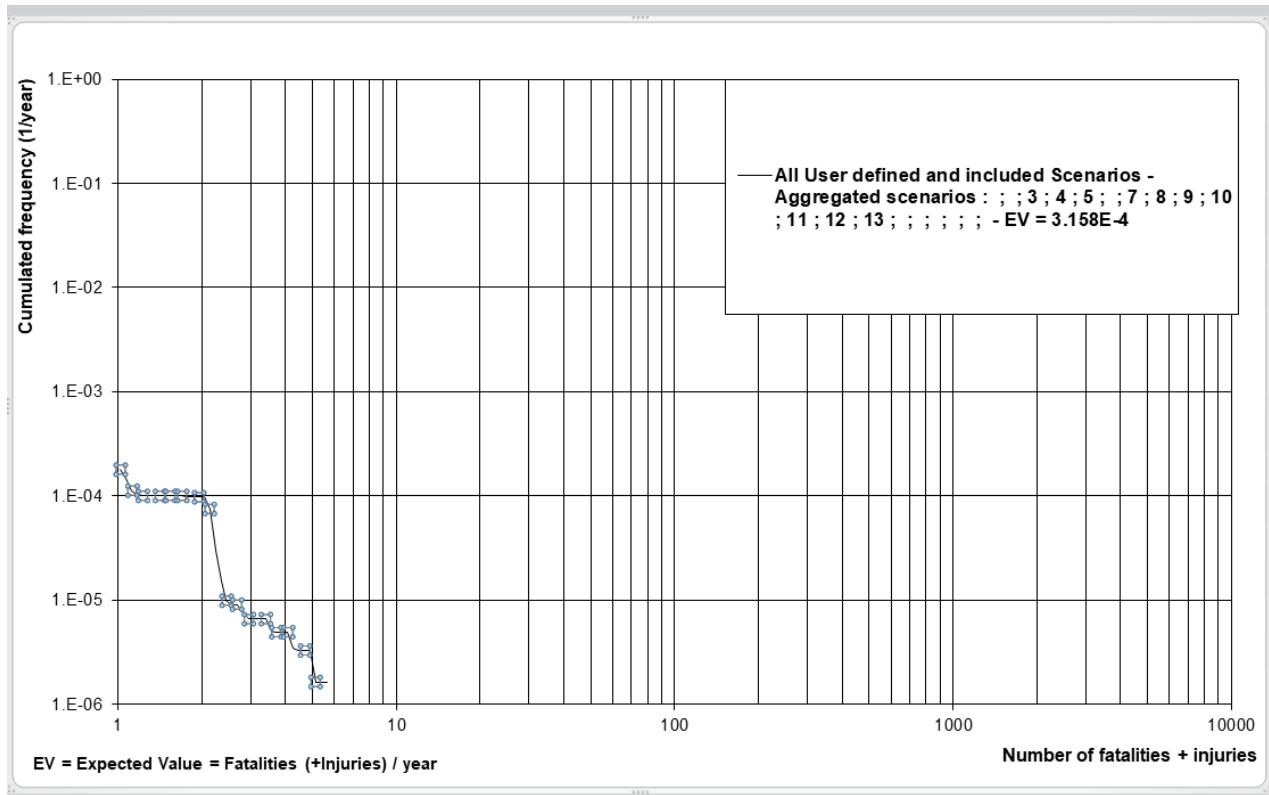


Σχήμα 21 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (120m<sup>3</sup>/s)





Σχήμα 22 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (150m<sup>3</sup>/s)



Σχήμα 23 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (300m<sup>3</sup>/s)

#### Παρατηρήσεις:

Σε αυτές της δοκιμές με διαφορετική παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης παρατηρείται μια ιδιαιτερότητα των μεταφορών επικίνδυνων φορτίων σε οδικές σήραγγες η επιρροή από piston effect σε κοντινές σε τιμή παροχές του εξαερισμού έκτακτης ανάγκης. Όπως έχει εξηγηθεί το piston effect λειτουργεί σαν επιπλέον ρεύμα αέρα με κατεύθυνση την έξοδο της σήραγγας. Ανάλογα λοιπόν με την παροχή έκτακτης ανάγκης δημιουργείται μια απρόβλεπτη ροή στο εσωτερικό (έχει μελετηθεί με μεθόδους CFD αλλά δεν εξετάζεται αυτή στην συγκεκριμένη εργασία). Ενώ λοιπόν στην θεωρία η αύξηση της παροχής του εξαερισμού μέσω της ισχυρότερων κινητήρων των ανεμιστήρων θα έπρεπε να καθαρίζει την ατμόσφαιρά και να διευκολύνει την εκκένωση, σε κάποιες δοκιμές η μικρή αύξηση επιφέρει αμελητέα αύξηση επιπέδου ασφάλειας. Συγκεκριμένα έγιναν δοκιμές και με τιμές κοντά στα 150 m<sup>3</sup>/s που έδωσαν ελάχιστα μεγαλύτερη ασφάλεια από τα 120 m<sup>3</sup>/s. Στα 120 m<sup>3</sup>/s η συνολική Αναμενομένη τιμή ήταν 1.370E-4 ενώ στα 150 m<sup>3</sup>/s ήταν 1.409 E-4. Κάτι τέτοιο δείχνει ότι είναι απαραίτητο να γίνεται μια ερευνά για την ιδανική παροχή σε κάθε σήραγγα δηλαδή αυτή που θα δώσει την μικρότερη Αναμενομένη Τιμή ατομικής διακινδύνευσή και συνεπώς το μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας. Κάθε σήραγγα είναι ξεχωριστή και δεν μπορεί χωρίς μελέτη

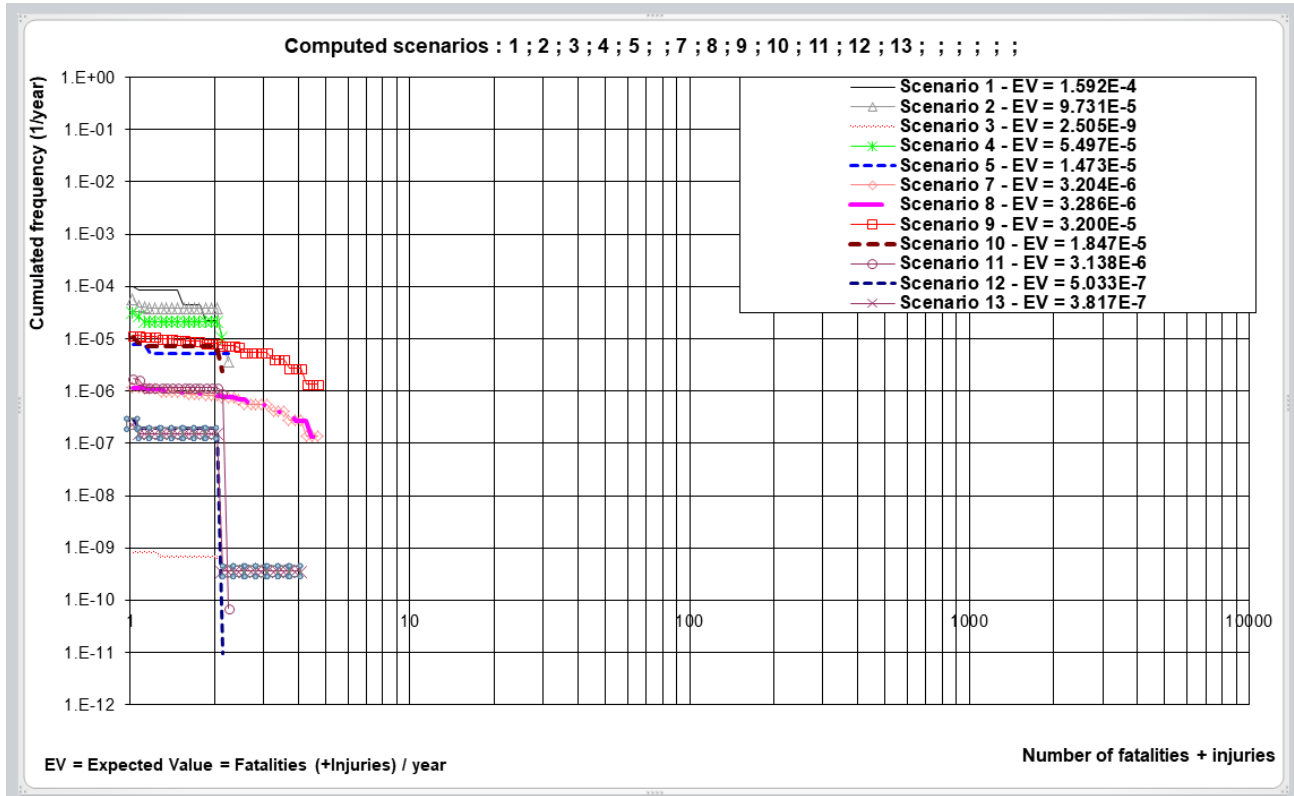
κανείς να ορίσει από πριν την παροχή που προσδίδει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας. Οι έρευνες που προτείνονται περιλαμβάνουν και την ανάλυση CFD που αναφέρθηκε καθώς υπάρχουν μοντέλα μέσω το οποίων είναι δυνατή και χωρίς μεγάλο κόστος. Φυσικά επιπλέον οι τεχνολογικοί περιορισμοί των κινητήρων και της ενέργειας εμποδίζουν την αύξηση της παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης πολλές φορές όμως για να αποφευχθεί ο κίνδυνος μια μικρή αύξηση να μην επιφέρει αποτελέσματα προτείνεται η μεγαλύτερη αύξηση. Σε παλαιές σήραγγες κάτι τέτοιο δεν είναι συμφέρον καθώς έχει υψηλό κόστος που δεν δικαιολογείται από ανάλυση κόστους – οφέλους αλλά κατά την κατασκευή νέων είναι επιθυμητό να υπάρχει μια παροχή έκτακτης ανάγκης αρκετά υψηλότερη (3-4 φορές μεγαλύτερη) από την κανονική λειτουργία (στην πρότυπη σήραγγα η κανονική λειτουργία έχει οριστεί  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### **Όρια Ταχυτήτων οχημάτων και HGV**

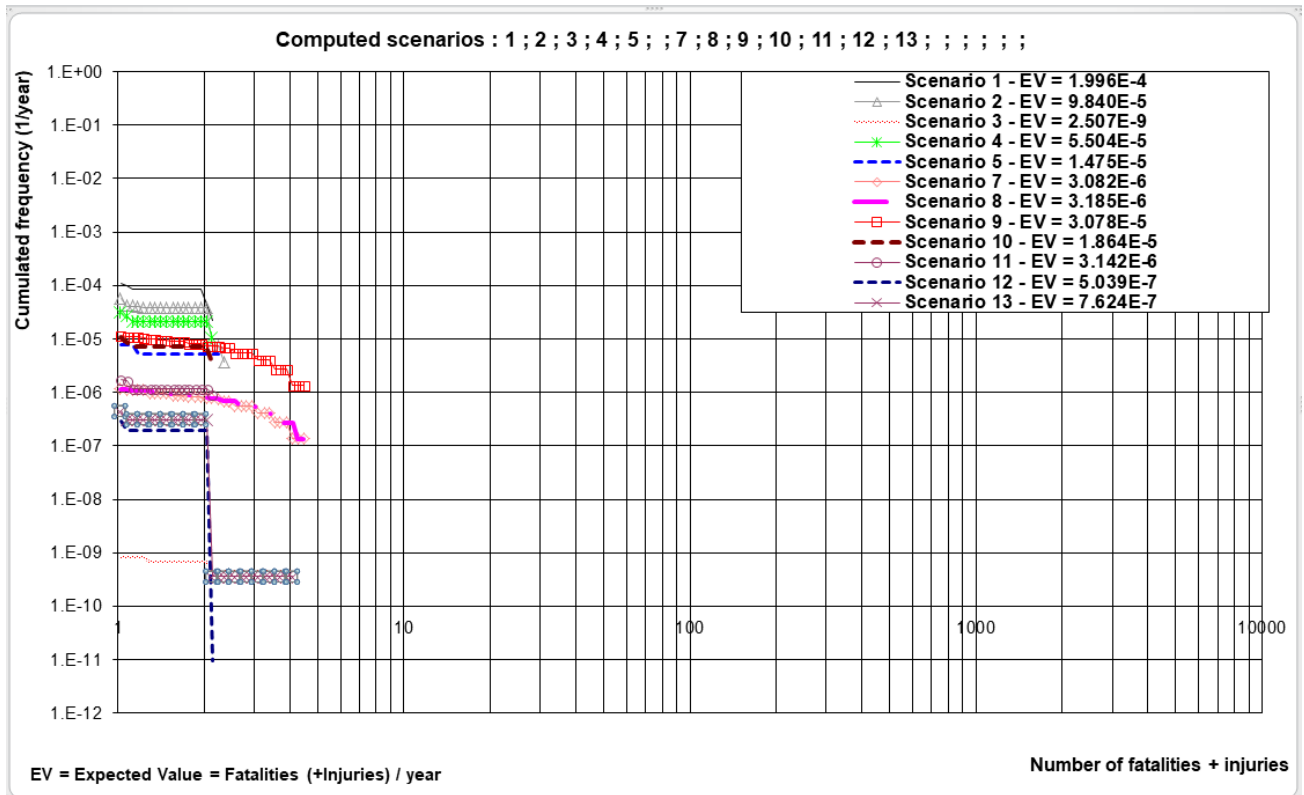
Εύρος Αναμενόμενης τιμής ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $1.409\text{E}-4$  -  $1.312\text{E}-3$ . Στην περίπτωση αυτή η πιο ασφαλής τιμή είναι για τα χαμηλότερα όρια ταχύτητας (οχήματα: 80 km/h HGV:60 km/h) ενώ η υψηλότερη Αναμενόμενη Τιμή και πιο επικίνδυνη για τα όρια (οχήματα: 110 km/h HGV:90 km/h).

Τα Δυσμενέστερα σενάρια που παρατηρούνται είναι τα:1,2,4,9. Αυτά δεν αλλάζουν για τις διαφορετικές τιμές. Κάτι τέτοιο δείχνει ότι δεν υπάρχουν κάποια σενάρια που να επηρεάζονται παραπάνω συγκριτικά με τα άλλα. Ο μέγιστος αριθμός απωλειών από το δυσμενέστερο διάγραμμα: περίπου 5

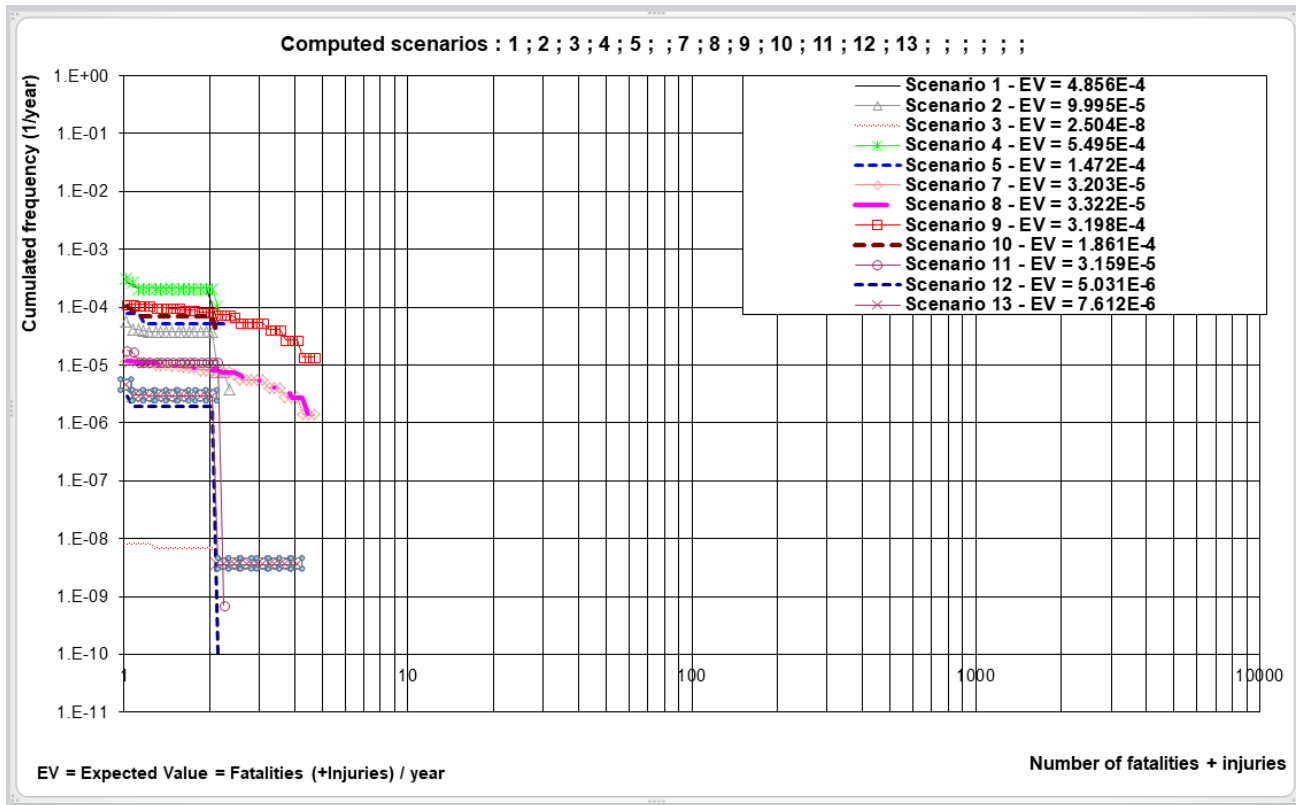
Καμπύλες FN



Σχήμα 24 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgn: 75km/h – οχ:105km/h)

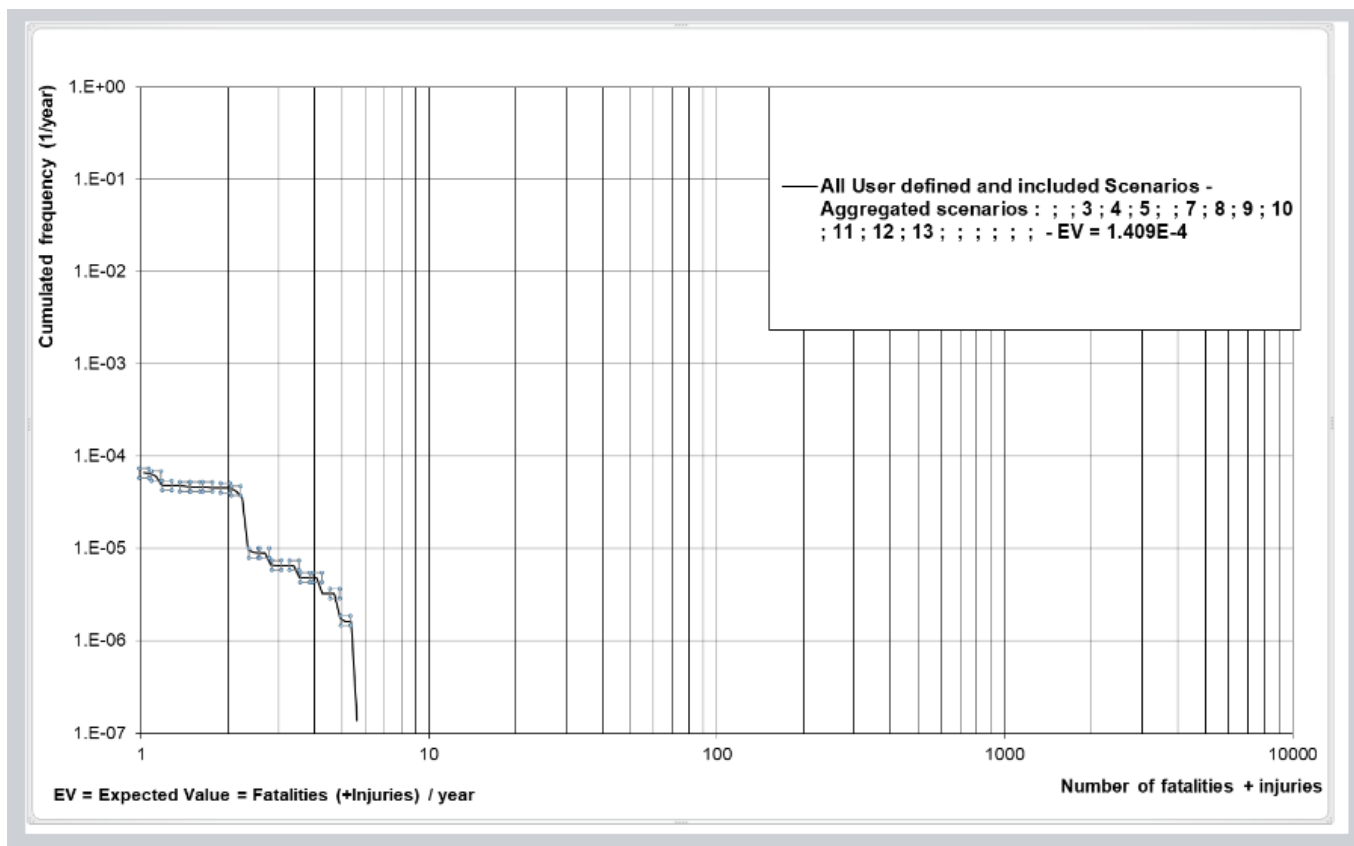


Σχήμα 25 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 90km/h – οχ:110km/h)

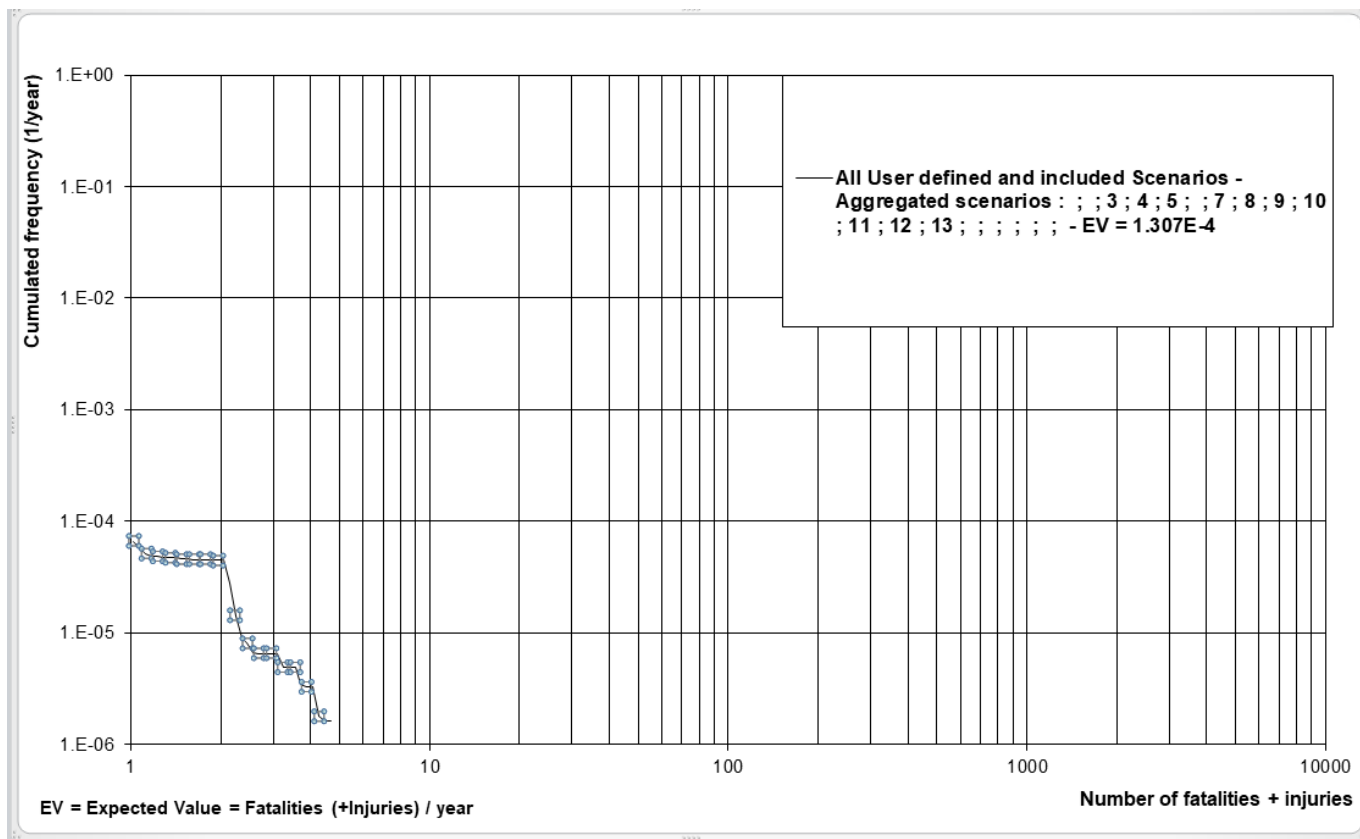


Σχήμα 26 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 80km/h – οχ:100km/h)

Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή

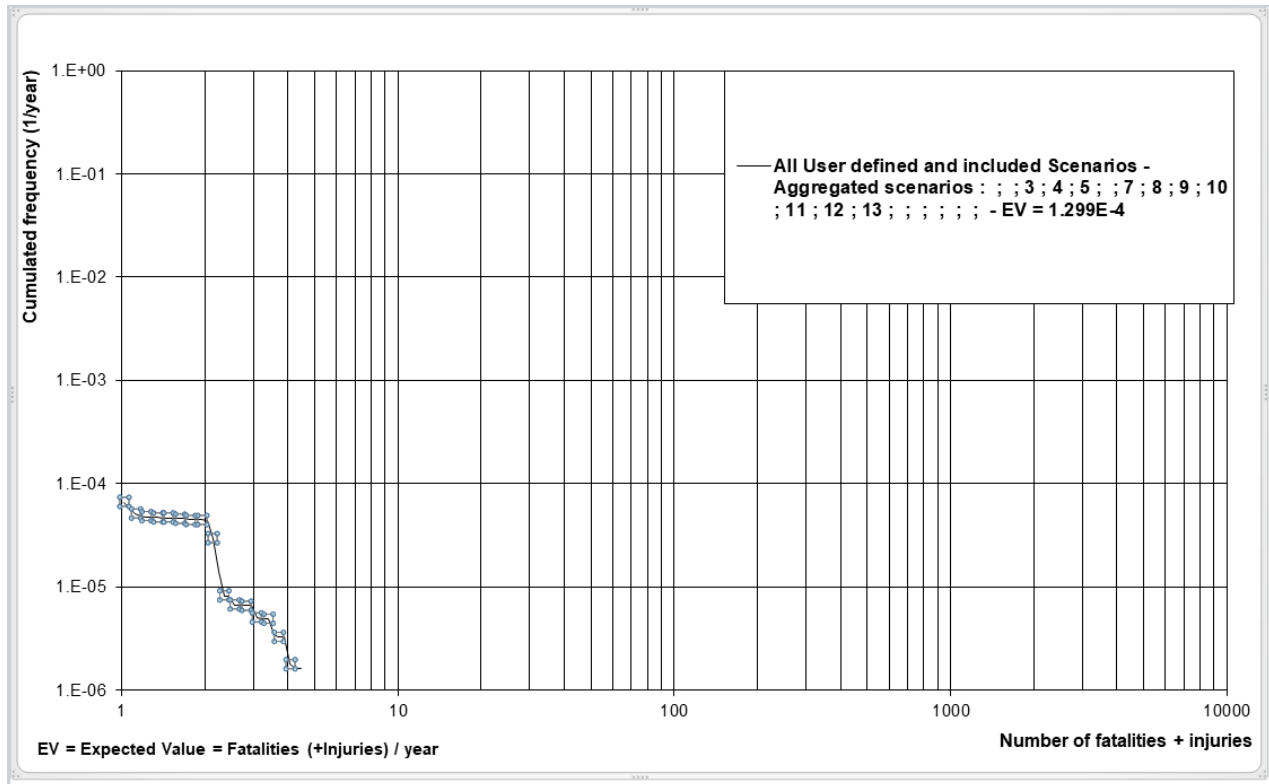


Σχήμα 27 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 75km/h – οχ:105km/h)



Σχήμα 28 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 90km/h – οχ:110km/h)





Σχήμα 29 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 80km/h – οχ:100km/h)

#### Παρατηρήσεις:

Η παράμετρος των ορίων ταχύτητα χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα. Όπως έχει αναφερθεί εμπλέκεται ο ανθρώπινος παράγοντας με τη συμπεριφορά των οδηγών οπότε δεν μπορεί να προβλεφθεί. Από τις προσομοιώσεις δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα για το βέλτιστο όριο ταχύτητας στις σήραγγες. Το βέλτιστο θα ήταν το όριο το οποίο με την προϋπόθεση ότι θα τηρείτο στην συγκεκριμένη σήραγγα στο συγκεκριμένο οδικό δίκτυο θα έδινε την ασφαλέστερη (μικρότερη) τιμή EV κατά την δοκιμή. Αυτό θα ήταν λοιπόν και το όριο που θα επέλεγε η εκάστοτε ρυθμιστική και νομοθετική αρχή για την σήραγγα. Στις δοκιμές με διαφορετικά όρια υπάρχουν μικρές αυξομειώσεις στο επίπεδο ασφάλειας. Για το εύρος που μελετήθηκε είναι για τα όρια ταχύτητας της Ελλάδας δεν υπάρχει ανησυχία για το επίπεδο ασφάλειας των σηράγγων καθώς η αύξηση των ορίων στις προσομοιώσεις δεν οδηγεί σε αύξηση της EV κοντά στο όριο ALARP. Φυσικά υπάρχει και η πιθανότητα να ξεπεραστούν από κάποιους σημαντικά τα όρια αλλά αυτό ελέγχεται και τιμωρείται από την νομοθεσία οπότε δεν εξετάστηκε. Θα μπορούσε να μελετηθεί στο πλαίσιο μιας ανάλυσης «μη σκοπούμενης χρήσης» της σήραγγας αλλά αυτό δεν θα είχε την απαιτούμενη ακρίβεια. Η μη σκοπούμενη συμπεριφορά κάποιων οδηγών έγκειται περισσότερο σε παράνομα προσπεράσματα ή και σε οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ παρά στην σημαντική παραβίαση των ορίων. Τα παραπάνω στοιχεία είναι εξαιρετικά δύσκολο να μοντελοποιηθούν και για αυτό δεν εξετάστηκε μια μη σκοπούμενη χρήση. Τα όρια

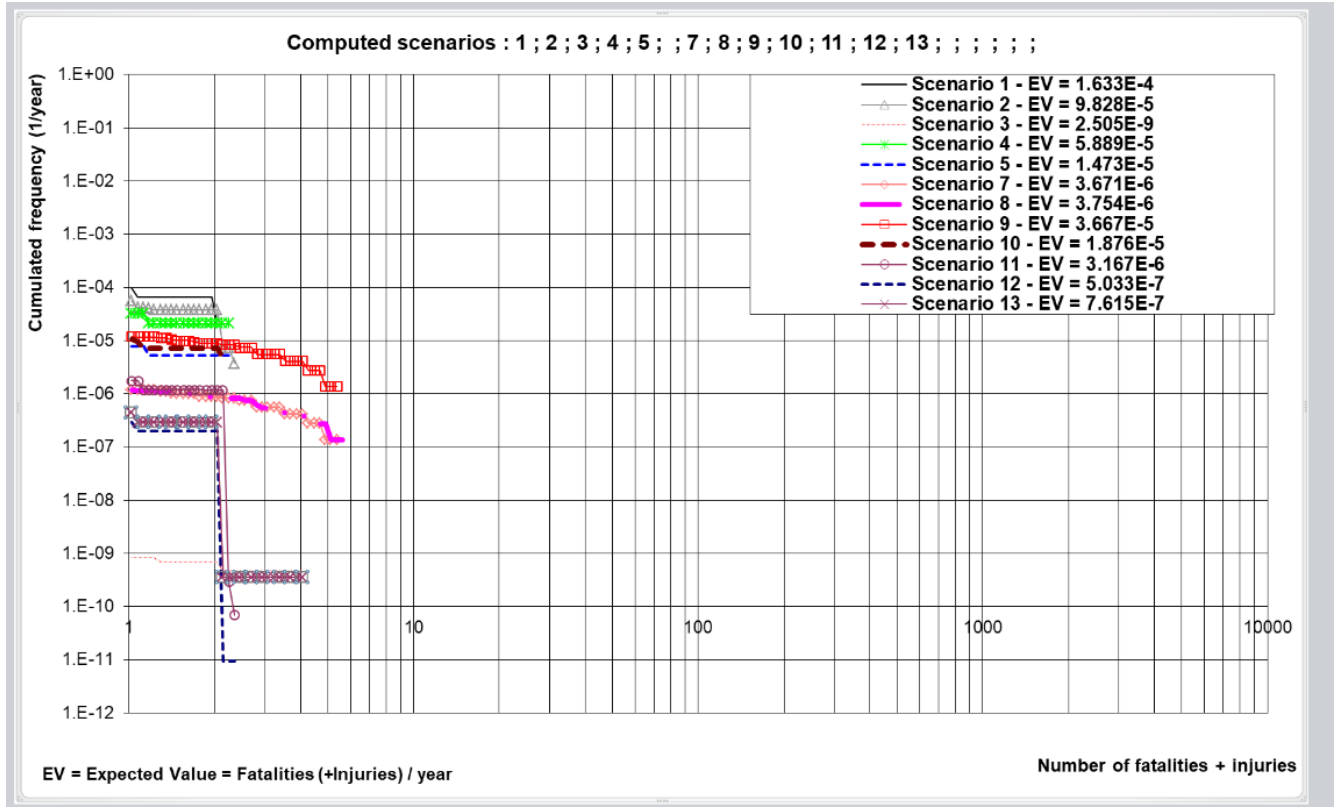
ταχύτητας γενικά επηρεάζουν την πιθανότητα να συμβεί ένα ατύχημα αλλά δεδομένου ότι δεν είναι για όλα τα πρότυπα και τις χώρες αυτά σταθερά δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα για την προτεινομένη ταχύτητα ούτε των απλών οχημάτων ούτε αυτών που μεταφέρουν τα επικινδυνά φορτία. Οι ιδιαιτερότητες κάθε σήραγγας δηλαδή δυσκολεύουν την εύρεση των ορίων που θα οδηγήσουν στην μικρότερη Αναμενόμενη τιμή και μεγαλύτερη ασφάλεια. Ωστόσο η διαφορά μιας τάξης μεγέθους στην αναμενόμενη τιμή δεν μπορεί να αγνοηθεί και συνεπώς είναι καίριο να ελέγχεται η ταχύτητα των οχημάτων για να συμβαδίζει με τα όρια κάθε οδικού δικτύου. Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν ειδικά συστήματα ελέγχου που ελέγχουν την κυκλοφορία και τα όρια ταχύτητας και η ευρεία χρήση τους αλλά και η εξέλιξη τους θα συντελέσει σημαντικά στην αύξηση του επιπέδου ασφαλείας.

### **Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV**

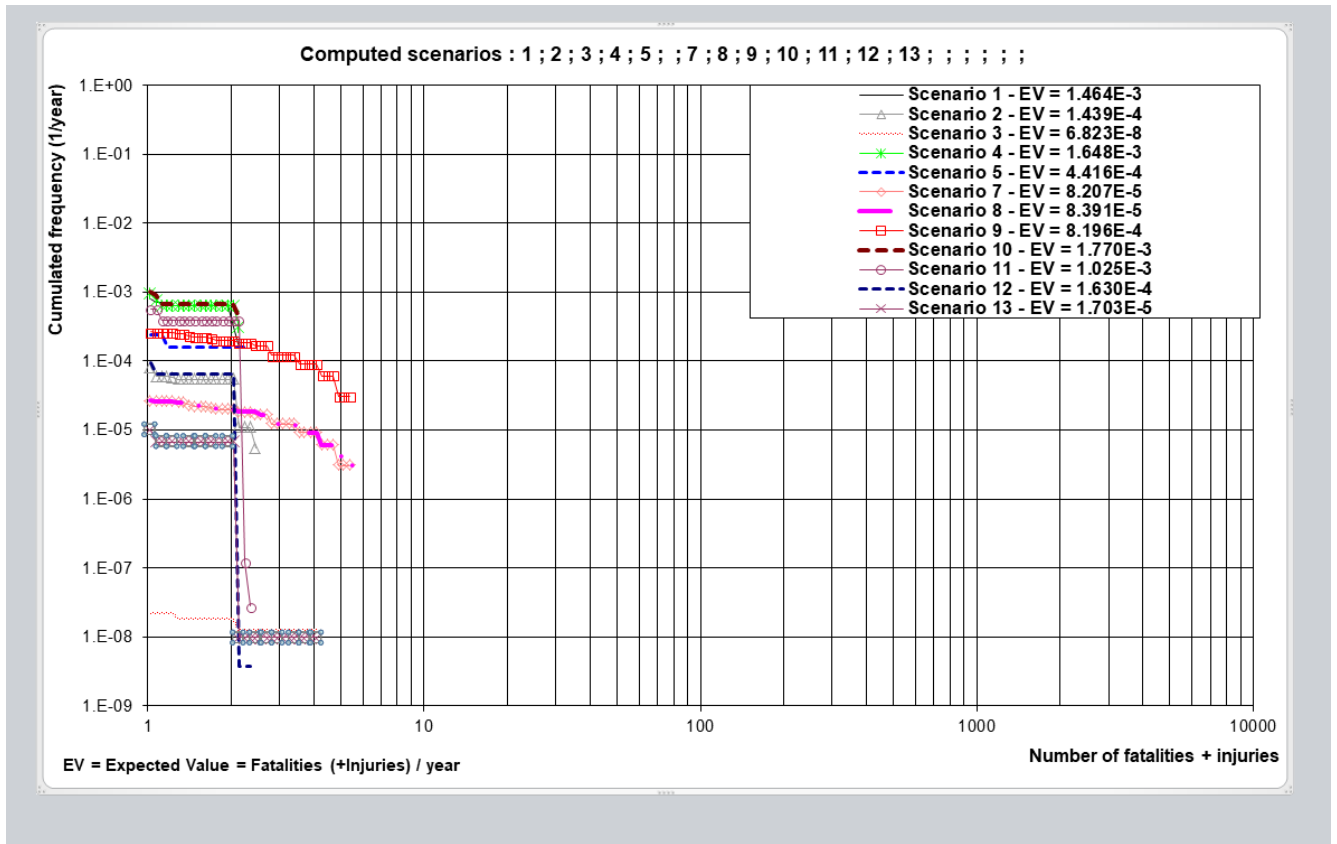
Εύρος Αναμενόμενης τιμής ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $6,050E-5$  -  $2.931E-3$ . Στην περίπτωση αυτή η πιο ασφαλής τιμή δηλαδή η χαμηλότερη EV παρατηρείται για τις αναλογίες σε επικινδυνά φορτία σύμφωνα με την Γαλλία (French Defaults). Αντιθέτως η δυσμενέστερη τιμή EV φαίνεται να είναι η προσομοίωση με αναλογίες DG σύμφωνα με τον Καναδά (Canadian defaults).

Τα Δυσμενέστερα σενάρια που παρατηρούνται είναι τα:1,2,4,10. Εδώ φαίνεται καθώς μελετώνται διαφορετικές αναλογίες επικίνδυνων φορτίων ότι αλλάζουν και τα δυσμενέστερα σενάρια πάρα το γεγονός ότι πρόκειται για την ίδια σήραγγα. Συνεπώς τα σενάρια επηρεάζονται από αυτήν την παράμετρο περισσότερο από όλες που μελετήθηκαν και φαίνεται να διαφοροποιούνται τα σενάρια με την μεγαλύτερη EV. Ο μέγιστος αριθμός απωλειών από το δυσμενέστερο διάγραμμα: περίπου 5

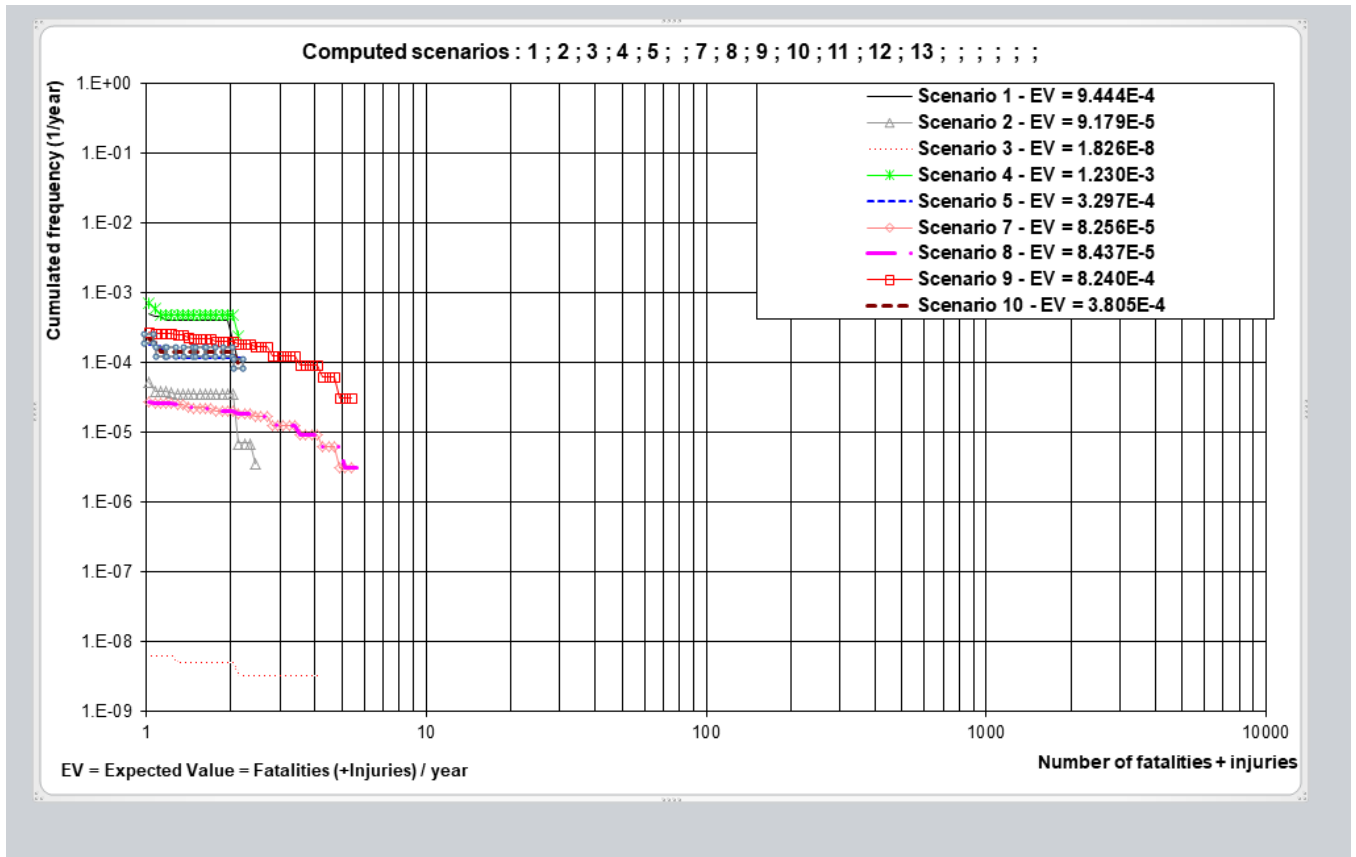
Καμπύλες FN



Σχήμα 30 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Γαλλίας)

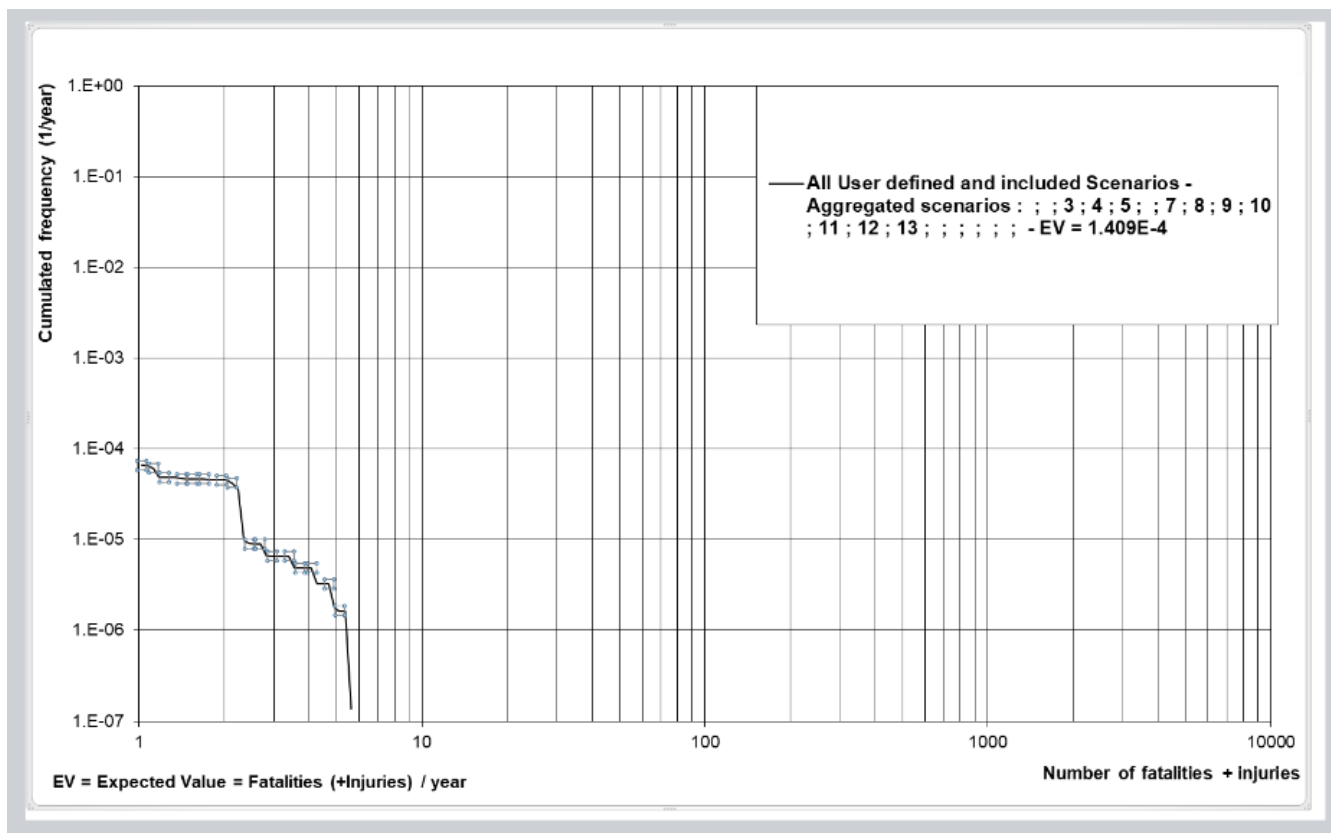


Σχήμα 31 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Καναδά)

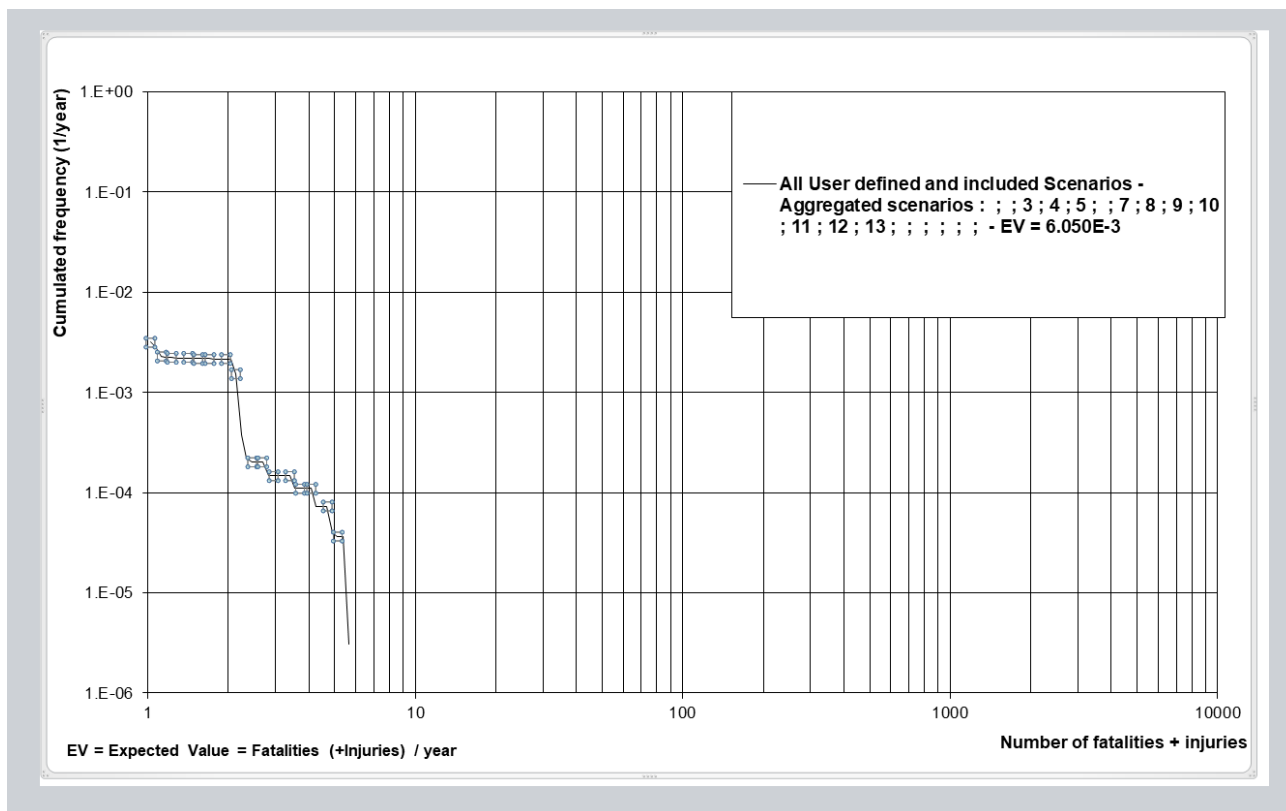


Σχήμα 32 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Νορβηγίας)

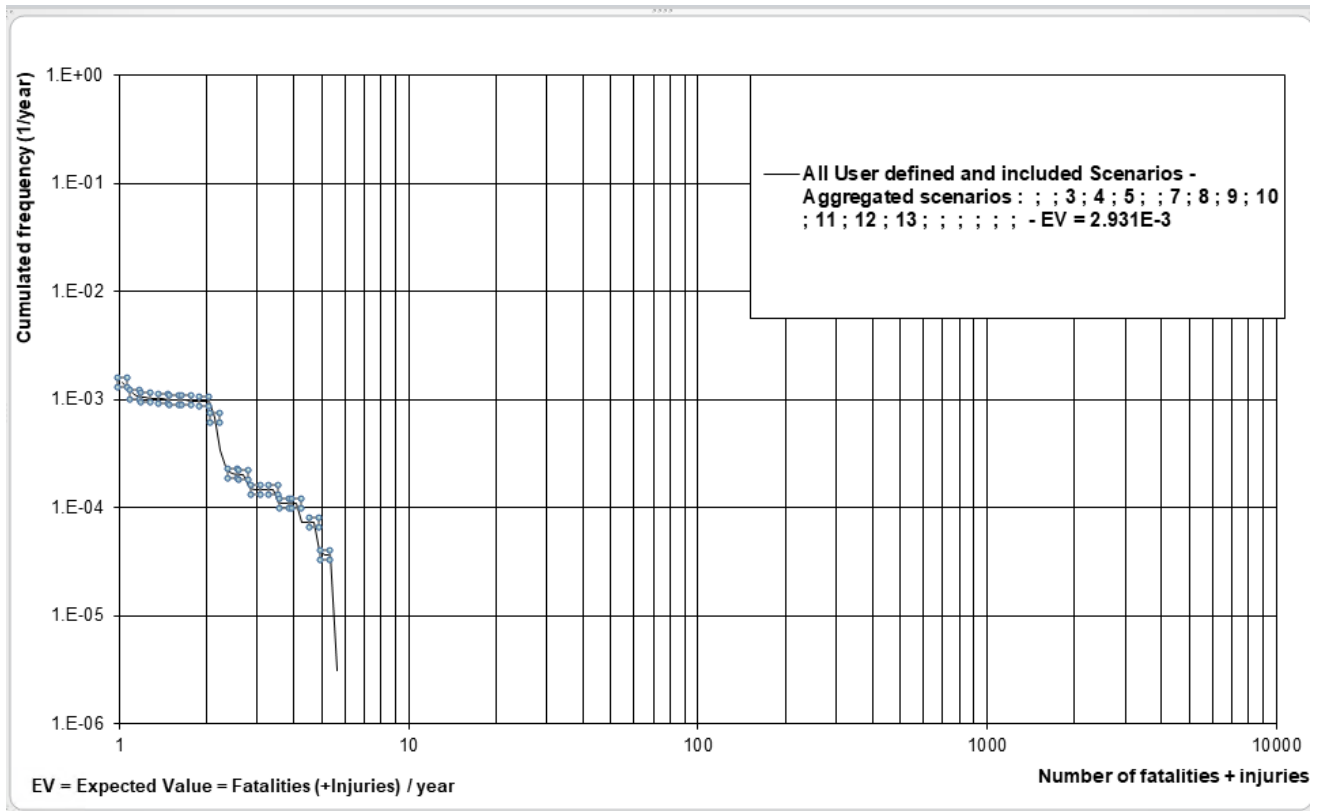
Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή



Σχήμα 33 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Γαλλίας)



Σχήμα 34 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Καναδά)



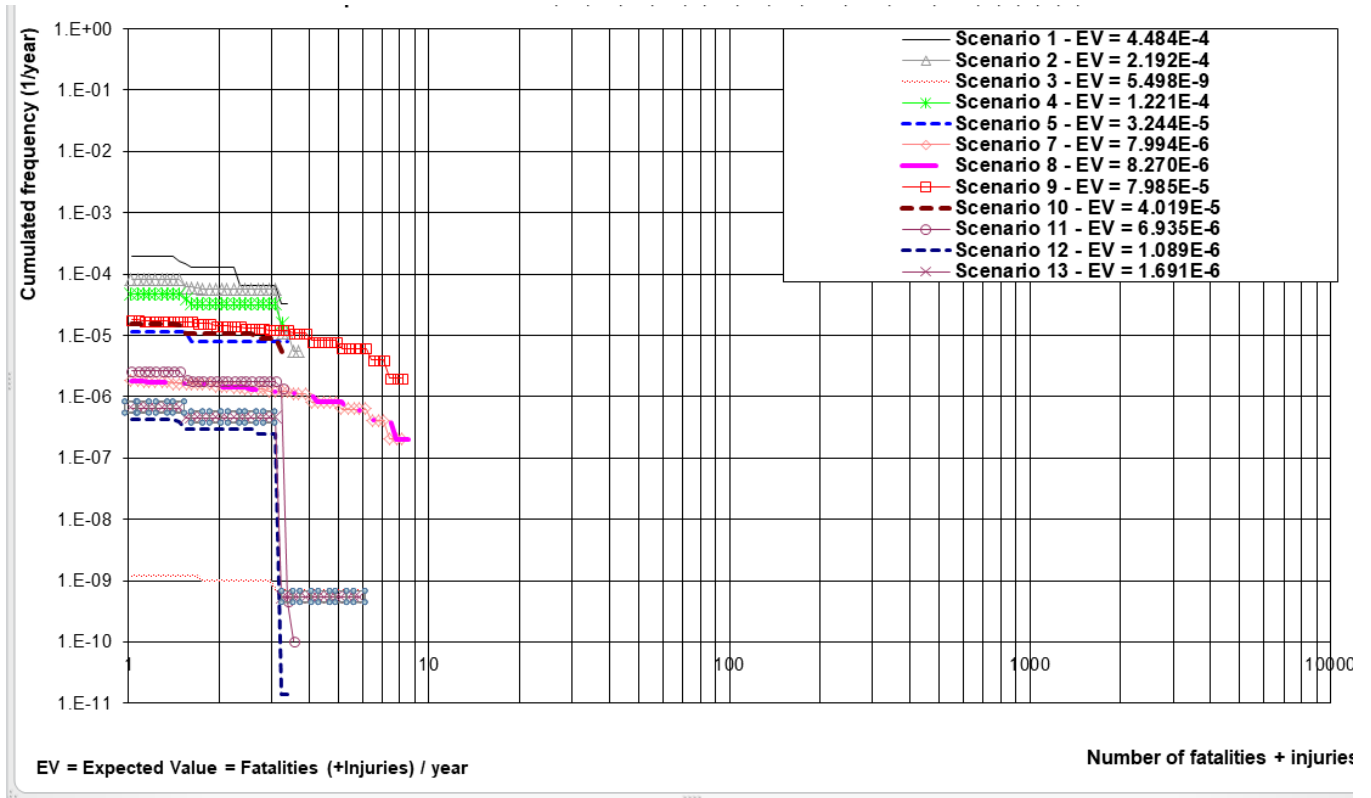
**Σχήμα 35 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Νορβηγίας)**

**Παρατηρήσεις:**

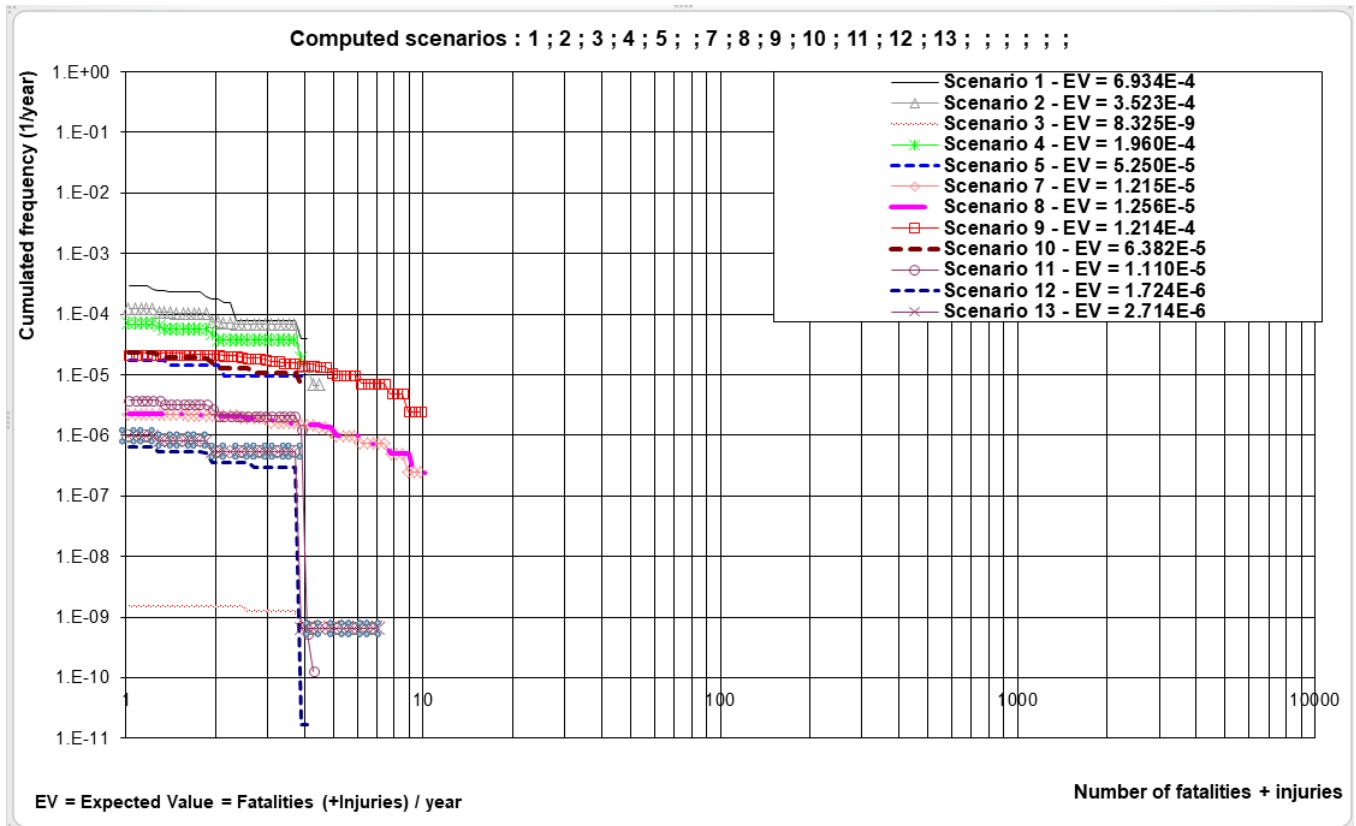
Αυτή η παράμετρος είναι αυτή που έδωσε τις μεγαλύτερες διαφορές στην συνολική αναμενομένη τιμή. Κάτι τέτοιο δείχνει την μεγάλη αβεβαιότητα στο επίπεδο ασφάλειας ειδικά σε οδικά δίκτυα που δεν υπάρχουν μελέτες για την αναλογία των επικίνδυνων φορτίων. Η αβεβαιότητά αυτή φαίνεται από το γεγονός ότι αλλάζοντας απλώς την εκτιμώμενη σύσταση της κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά στην Αναμενόμενη τιμή ατομικής επικινδυνότητας συνολικά :  $6,050E-5$  -  $2.931E-3$  δηλαδή δυο τάξεις μεγέθους. Είναι σαφές ότι έρευνα και κυκλοφοριακές μελέτες στον τομέα της αναλογίας των επικίνδυνων φορτίων θα δώσει σαφή κατεύθυνση στις υπεύθυνες αρχές. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι τόσο σημαντικές που φαίνεται ποσό παραπλανητική μπορεί να είναι μια έρευνα αν λείπουν τέτοια δεδομένα. Προτείνεται λοιπόν για να περιοριστούν τέτοιες μεγάλες αποκλίσεις στην EV (δηλαδή αβεβαιότητα στο επίπεδο ασφαλείας της σήραγγας) να επενδυθούν ποσά για μελέτες που θα προσδιορίζουν την αναλογία της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων σε κάθε επιμέρους οδικό δίκτυο της χώρας στην οποία βρίσκεται η σήραγγα που εκτελείται διαχείριση της επικινδυνότητας. Μάλιστα σε χώρες με πολυπληθείς επαρχίες θα προσέδιδε ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια αν πραγματοποιούνταν μελέτες σε περιφέρειες. Στην περίπτωση της Ελλάδας μια γενική κυκλοφοριακή μελέτη κρίνεται επαρκής για να προσδιοριστούν με





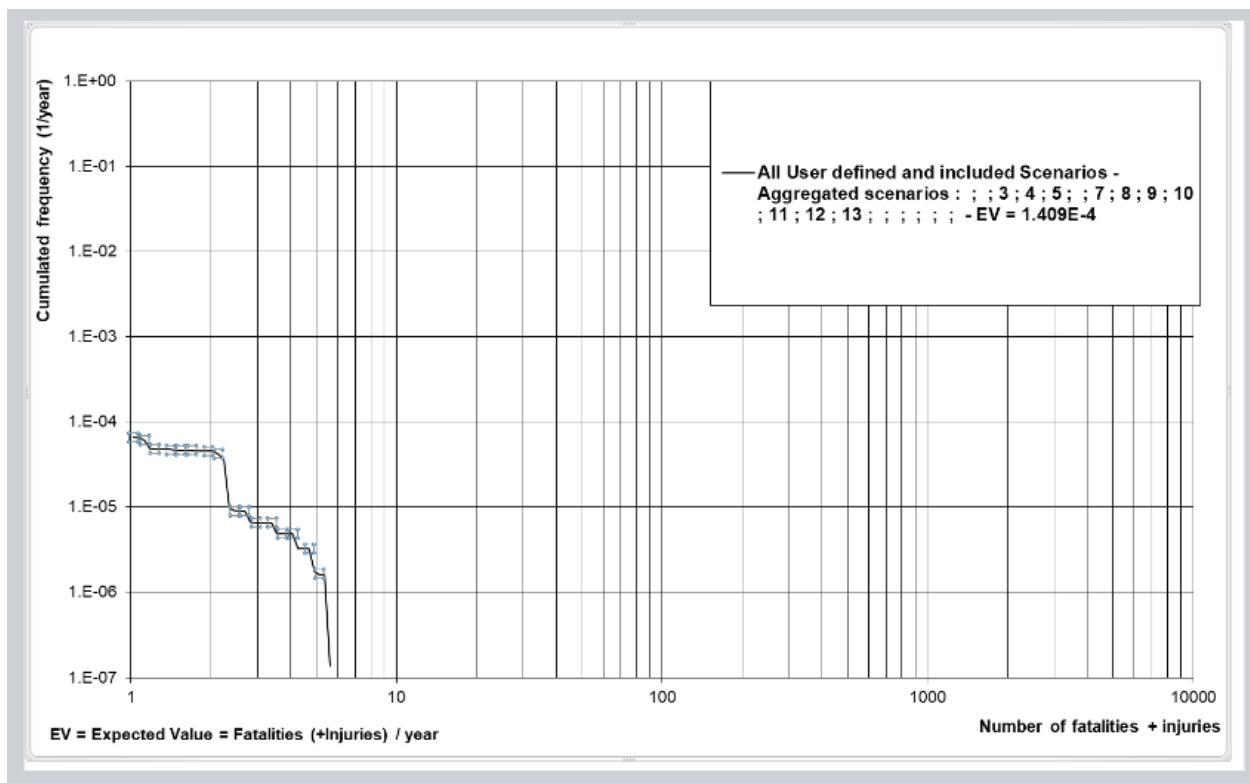


Σχήμα 37 Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:20 N:35 P:75)

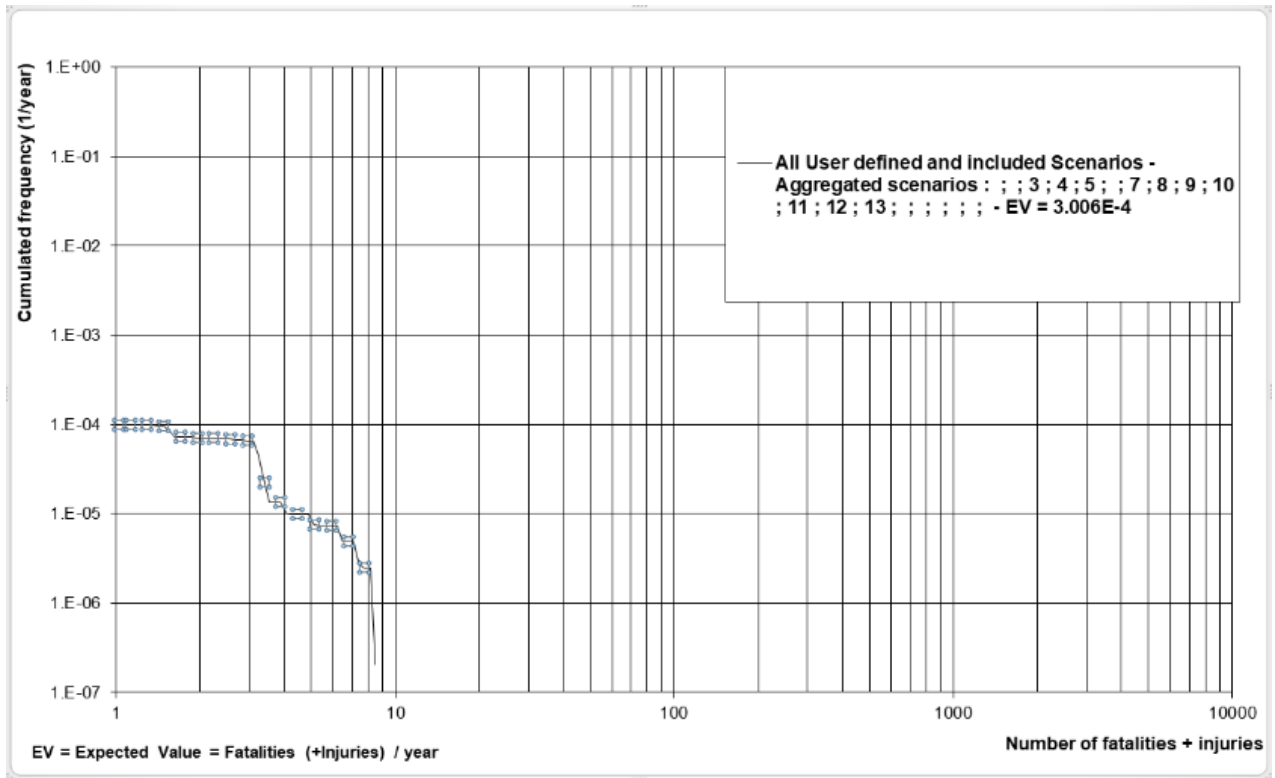


Σχήμα 38 Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:30 N:45 P:90)

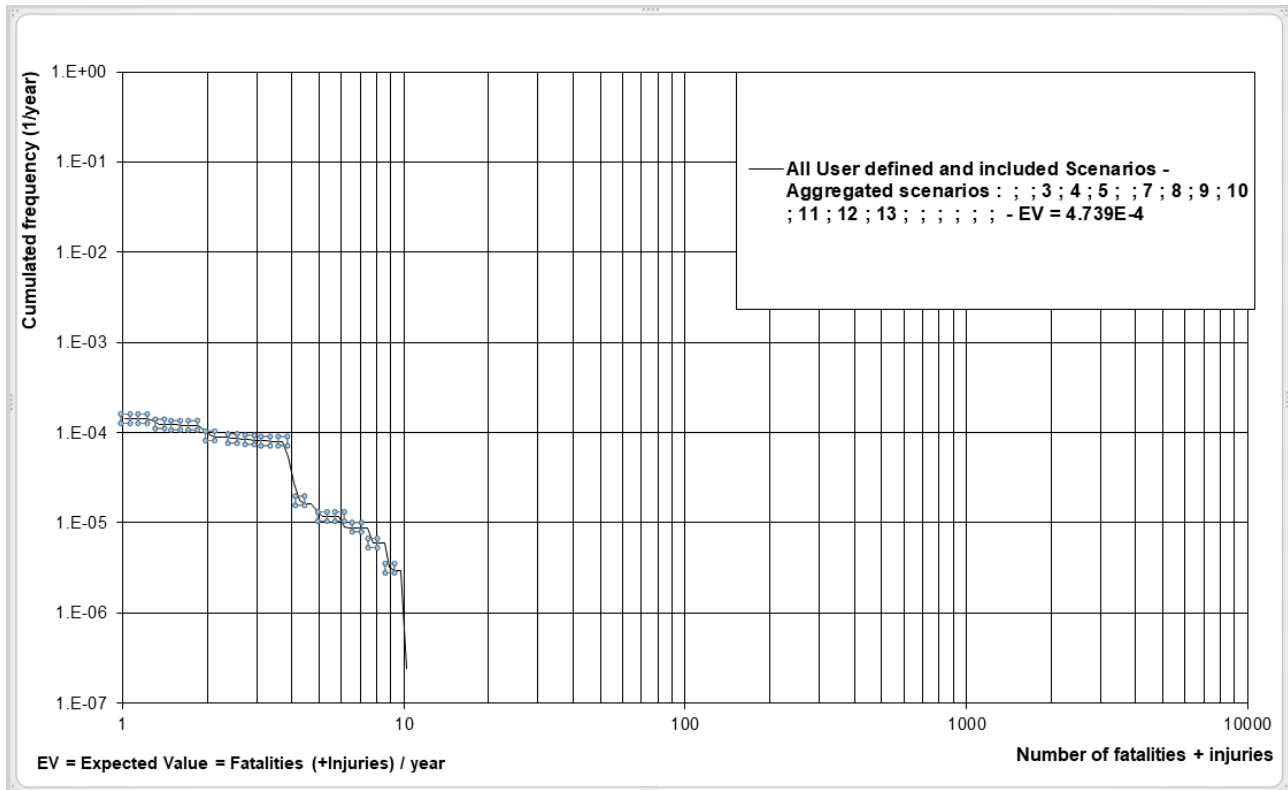
Καμπύλες με αθροιστική Αναμενομένη Τιμή



Σχήμα 39 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:15 N:25 P:50)



Σχήμα 40 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:20 N:35 P:75)



**Σχήμα 41 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:30 N:45 P:90)**

**Παρατηρήσεις:**

Από τις δοκιμές με διαφορετικό συνολικό κυκλοφοριακό φόρτο παρατηρήθηκε σχεδόν σταθερή αύξηση της συνολικής αναμενομένης τιμής για περισσότερο φόρτο ( $1.409E-4 \rightarrow 3.006E-4 \rightarrow 4.739E-4$ ). Κάτι τέτοιο φαντάζει λογικό καθώς μεγαλύτερο πλήθος οχημάτων και χρηστών αυξάνει και την πιθανότητα και τις συνέπειες ορισμένων ατυχημάτων. Για τα χαμηλά επίπεδα της κυκλοφορίας στην Ελλάδα δεν έχει σημαντική επιρροή που θα δικαιολογούσε την έρευνα για εναλλακτικές διαδρομές που θα μείωναν την συνολική κυκλοφορία. Αυτό φαίνεται από την μικρή αύξηση της EV για τις δοκιμές κυκλοφοριακού φόρτου (δεν αλλάζει η τάξη μεγέθους). Αν το οδικό δίκτυο ήταν πιο πυκνό σε διερχόμενα οχήματα μπορεί οι διάφορες να ήταν σημαντικότερες. Ωστόσο σε περίπτωση που χρειαζόταν να διαχωριστεί η κυκλοφορία (δηλαδή ένα ποσοστό της να μην περάσει από την μελετώμενη σήραγγα) θα ακολουθούσαν οι αρχές εύρεσης εναλλακτικής διαδρομής όπως μελετήθηκαν στο βιβλιογραφικό μέρος. Θα εξεταζόταν συνεπώς διαφορετικά το συνολικό επίπεδο ασφάλειας με τις ιδιαιτερότητες που έχουν παρουσιαστεί στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο. Από τις καμπύλες ακόμα φαίνεται όμως η αύξηση στα ατυχήματα με περισσότερα από 10 θύματα καθώς είναι πιθανό όταν περνούν από την σήραγγα περισσότερα οχήματα σε ένα χρονικό διάστημα να παραμένουν μέσα σε αυτήν περισσότεροι χρήστες, εκεί ωφελείται και η αύξηση στην αναμενομένη τιμή. Αυξάνεται άρα και η πιθανότητα να εγκλωβιστούν για παράδειγμα περισσότεροι χρήστες αλλά και η επίπτωση

ενός τέτοιου ατυχήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας στον κυκλοφορικό φόρτο μπορεί να αξιοποιηθεί λοιπόν και στην μελέτη του επιπέδου ασφαλείας μιας σήραγγας αλλά και στις αποφάσεις για την επιλογή εναλλακτικών διάδρομων αν φυσικά αυτό είναι δυνατό. Προτείνονται λοιπόν αναλυτικές κυκλοφοριακές μελέτες και σε επίπεδο χωράς αλλά και σε επιμέρους οδικά δίκτυα.

## 6. Συμπεράσματα

Ο πρώτος από τους στόχους της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός και η αποτελεσματική εκτίμηση απαιτούμενων δεδομένων για την ανάλυση επικινδυνότητας συγκεκριμένων σηράγγων. Για να επιτευχθεί αυτός συγκεντρωθήκαν και εκτιμήθηκαν τα δεδομένα για την μοντελοποίηση της πρότυπης σήραγγας. Μετά από μελέτη και του οδηγού χρήσης του μοντέλου DG-QRAM προσδιορίστηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Όσα δεν μπορούσαν να βρεθούν, εκτιμήθηκαν με διάφορες μεθόδους. Παράλληλα μελετήθηκε ενδελεχώς ο οδηγός του λογισμικού DG-QRAM για να μπορέσει να αποτυπωθεί η πραγματικότητα με όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια βάσει των πραγματικών χαρακτηριστικών της σήραγγας κάτι το οποίο έγινε με επιτυχία.

Ο δεύτερος στόχος ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών παραμέτρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων επικινδυνότητας. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εξηγήθηκε ποιες παράμετροι επiléχθηκαν και γιατί, αλλά και ποια είναι η επίδραση τους στο επίπεδο ασφάλειας. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο «Χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα» ο «Χρόνος ενεργοποίησης εξαερισμού έκτακτης ανάγκης» η «Παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης» τα «Όρια Ταχυτήτων οχημάτων και HGV» οι «Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV» και ο «Συνολικός Κυκλοφοριακός φόρτος». Κάποιες είχαν σημαντική επιρροή ενώ άλλες μικρή αλλά υπαρκτή. Την μεγαλύτερη διακύμανση στην Αναμενόμενη τιμή ατομικής επικινδυνότητας συνολικά την έδωσε η παράμετρος «Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV» ενώ τα περισσότερα ανθρώπινα θύματα παρατηρήθηκαν με την αύξηση της παράμετρου «Χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα». Αντίθετα οι παράμετροι με την μικρότερη επιρροή στο συνολικό επίπεδο ασφάλειας της σήραγγας ήταν οι «Παροχή εξαερισμού έκτακτης ανάγκης» και «Συνολικός Κυκλοφοριακός φόρτος». Έτσι έγινε εξαγωγή πολυτίμων συμπερασμάτων σχετικά με προτάσεις αποδοτικής αύξησης του επιπέδου ασφάλειας σε οδικές σήραγγες οι οποίες θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Ο τρίτος στόχος ήταν η καταγραφή προτάσεων αποδοτικής αύξησης του επιπέδου ασφάλειας σε οδικές σήραγγες. Από την βιβλιογραφική μελέτη έχει προσδιοριστεί με ποιους τρόπους και μέτρα μπορεί να αλλάξει η τιμή μιας παραμέτρου. Επιπρόσθετα για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα σε ορισμένες συνθήκες και παραμέτρους απαιτείται έρευνα. Ανάλογα με την επίδραση στην ανάλυση ευαισθησίας προτείνεται σε κάποιους κλάδους να διεξαχθεί περαιτέρω μελλοντική έρευνα. Συγκεκριμένα, προτείνεται ερευνά και εφαρμογή περισσότερων συστημάτων ελέγχου στις σήραγγες. Συστήματα όπως κάμερες που θα καταγράφουν την αναλογία των επικίνδυνων φορτίων μέσα στην σήραγγα σε πραγματικό χρόνο, αισθητήρες που θα ελέγχουν τα όρια ταχύτητας και την κυκλοφορία αλλά και βελτιωμένα συστήματα εντοπισμού ατυχημάτων μέσα στην σήραγγα θα αυξήσουν την συνολική ασφάλεια. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί καθώς αυτά τα συστήματα επηρεάζουν τις παραμέτρους που μελετήθηκαν είτε μειώνοντας τους χρόνους αντίδρασης είτε με ακριβέστερη γνώση της κυκλοφορίας δηλαδή μικρότερη



αβεβαιότητα. Ακόμα προτείνεται καθώς επηρεάζει τον ανθρώπινο παράγοντα που είναι έντονος σε αρκετές από τις παραμέτρους και συνεπώς επηρεάζει την ασφάλεια της σήραγγας να γίνουν συστηματικές προσπάθειες για σωστή ενημέρωση των χρηστών για τις ειδικές συνθήκες στην σήραγγα σε περίπτωση ατυχήματος. Ταυτόχρονα λοιπόν πρέπει να γίνει και έρευνα για την ανάπτυξη αποδοτικών μέσων ενημέρωσης όπως είναι οι προσομοιωτές οδήγησης σε ατύχημα σε σήραγγα που έχει αναφερθεί ή διαδραστικές καμπάνιες ενημέρωσης των νεαρότερων οδηγών και των μαθητών. Επιπλέον λόγω της έντονης παρουσίας εξοπλισμού στην σήραγγα προτείνεται να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή σε θέματα συντήρησης. Η συντήρηση και ιδιαίτερα σε παλαιότερες σήραγγες δεν είναι συστηματική και μεθοδική. Θα πρέπει να υπάρχουν ξεκάθαρα πρωτοκολλά συντήρησης και να διενεργούνται έλεγχοι RSA (Road Safety Audits) και οι RSI (Road Safety Inspections) όπως έχει αναφερθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Έχει αναλυθεί το πρόβλημα με την απουσία καταγραφής των ατυχημάτων στην Ελλάδα οπότε προτείνεται να ξεκινήσει συστηματική καταγραφή ατυχημάτων και μικρότερων δυσλειτουργιών σηράγγων σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια με στόχο να χρησιμοποιηθούν αυτά στο μέλλον για την αύξηση του συνολικού επιπέδου ασφάλειας. Τέλος και ίσως η σημαντικότερη πρόταση είναι η λεπτομερής κυκλοφοριακή μελέτη στο οδικό δίκτυο που βρίσκεται η σήραγγα που μελετάται. Η μεγαλύτερη επιρροή στην Αναμενόμενη τιμή ατομικής επικινδυνότητας συνολικά την έδωσε η παράμετρος «Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV». Επιβάλλεται συνεπώς για να περιοριστεί η αβεβαιότητα να έχει ήδη γίνει μελέτη της αναλογίας των DG για την σήραγγα. Επιπρόσθετα η κυκλοφοριακή μελέτη θα δώσει και πληροφορίες για τον συνολικό κυκλοφοριακό φόρτο άλλη μια σημαντική παράμετρο.

Για την διαδικασία εκτίμησης των δεδομένων αλλά και για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί. Αρχικά αρκετές παράμετροι έχουν μεγάλη αβεβαιότητα με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία όχι μόνο στην εκτίμηση του εύρους που θα μελετηθεί αλλά και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων για μικρές διαφορές. Δηλαδή όταν η απόκλιση στην Αναμενόμενη τιμή είναι μικρότερη από μια τάξη μεγέθους είναι δύσκολο να εξαχθεί σαφές συμπέρασμα. Από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν μεγαλύτερη αβεβαιότητα έχουν οι «Χρόνος διακοπής της κυκλοφορίας στην σήραγγα» , «Όρια Ταχυτήτων οχημάτων και HGV» οι «Εκτιμήσεις για την αναλογία των διαφορετικών DG στα HGV» και ο «Συνολικός Κυκλοφοριακός φόρτος». Η αβεβαιότητα οφείλεται είτε στην έντονη εξάρτηση από τον απρόβλεπτο ανθρώπινο παράγοντα είτε από ελλιπή δεδομένα. Συγκεκριμένα υπάρχει ασάφειά στις διαδικασίες εκκένωσης και κλεισίματος της σήραγγας ενώ ο χρόνος εκκένωσης εξαρτάται επηρεάζεται από τον ανθρώπινο παράγοντα και από άλλες παραμέτρους. Όπως έχει αναφερθεί κάθε σήραγγα είναι μοναδική και ξεχωριστή ως προς τα τεχνολογικά μέσα και συστήματα ελέγχου εξαερισμού. Απρόβλεπτος παράγοντας επίσης είναι η συμπεριφορά των οδηγών η οποία σε συνδυασμό με την απουσία κυκλοφοριακής μελέτης για την πρότυπη σήραγγα δυσκόλεψαν σημαντικά την ανάλυση. Ταυτόχρονα καθώς στην Ελλάδα δεν έχει γίνει μελέτη για τις αναλογίες μεταφερομένων επικίνδυνων φορτιών έπρεπε να γίνουν προσομοιώσεις με αναλογίες από διάφορες χώρες για

να διασφαλιστεί η ορθότητα των συμπερασμάτων. Έτσι συνδυάστηκαν και πρότυπα και εκτιμήσεις από διάφορες χώρες όπως η Γαλλία, η Νορβηγία , ο Καναδάς κ.α.

## 7. Κατάλογος αναφορών - Βιβλιογραφία

- Adesiyun, A., Avenoso, A., Dionelis, K., Cela, L., Nicodème, C., Goger, T., and Polidori, C., 2017. Joint Road Safety Operations in tunnels and open roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, p.012096.
- Alsultan, M., Jun, J., and Lambert, J.H., 2020. Program evaluation of highway access with innovative risk-cost-benefit analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, p.106649.
- Batarliene, N., 2020. Essential safety factors for the transport of dangerous goods by road: A case study of lithuania. *Sustainability*, 12(12), p.4954.
- Beard, AN & Cope, D 2007 'Assessment of the safety of tunnels' European Technology Assessment Group
- Benekos, I., and Diamantidis, D., 2017. On risk assessment and risk acceptance of dangerous goods transportation through road tunnels in Greece. *Safety Science*, 91, pp.1–10.
- Bettelini, M. (2020) “Systems approach to underground safety,” *Underground Space*, 5(3), pp. 258–266.
- Casey, N. (2020) “Fire incident data for australian road tunnels,” *Fire Safety Journal*, 111, p. 102909.
- Caliendo, C. and Genovese, G. (2020) “Quantitative risk assessment on the transport of dangerous goods vehicles through Unidirectional Road Tunnels: An evaluation of the risk of transporting hydrogen,” *Risk Analysis*, 41(9), pp. 1522–1539.
- Chaabat F., P. Salizzoni, M. Creyssels, A. Mos, J. Wingrave, H. Correia, M. Marro, 2020, “Smoke control in tunnel with a transverse ventilation system: An experimental study,” *Building and Environment*, 167, p. 106480.
- Danny Hopkin, Ruben Van Coile, David Lange, 2017, “Certain Uncertainty - Demonstrating safety in fire engineering design and the need for safety targets”, *Fire Safety Engineering Design of Structures*, pp. 1–13.
- Economic Commission for Europe Inland Transport Comitee, 2021, “ADR 2021 Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road”, vol 1
- Flodén, J. and Woxenius, J. (2021) “A stakeholder analysis of actors and networks for land transport of dangerous goods,” *Research in Transportation Business & Management*, 41, p. 100629.
- Wang, H. and Liang, Q. (2020) “Risk analysis and route optimization of dangerous goods transportation based on the empirical path set,” *Journal of Advanced Transportation*, 2020, pp. 1–13.

- Hokstad, P. and Steiro, T. (2006) "Overall strategy for risk evaluation and priority setting of risk regulations," *Reliability Engineering & System Safety*, 91(1), pp. 100–111.
- Holeczek, N. (2019) "Hazardous materials truck transportation problems: A classification and State of the Art Literature Review," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, pp. 305–328.
- Huanga Zhen, Helin Fua, Wei Chena, Jiabing Zhanga, Hongwei Huang, 2018, "Damage detection and quantitative analysis of Shield Tunnel Structure," *Automation in Construction*, 94, pp. 303–316.
- Iranitalab Amirfarrokh, Aemal Khattak, George Bahouth, 2020, "Statistical modeling of cargo tank truck crashes: Rollover and release of Hazardous Materials," *Journal of Safety Research*, 74, pp. 71–79.
- Jan Malmtorp, Johan Lundin, Peter Lundman, Per Vedin, 2019, "Safety in road tunnels – safety target proposal," *International Journal of Applied Science*, 2(3).
- Jiang Yang, Xingchen Zhang, Yaping Ronga, Zheng Zhanga, 2014, "A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation based on multi-commodity flow model," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 138, pp. 791–799.
- Xu, J. and Lambert, J.H. (2013) "Distributed travel time savings of a Multiscale Transportation Access Management Program," *Environment Systems and Decisions*, 33(3), pp. 362–375.
- Kilanitis, I. and Sextos, A. (2018) "Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(1), pp. 181–210.
- Kirytopoulos Konstantinos, George Chatzistelios, Panagiotis Ntzeremes, Myrto Konstantinidou, Athanasios Tsantsanoglou, Athanasios Saramourtsis, 2021, "How much do Greek drivers know about safety when driving through road tunnels?," *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference* [Preprint].
- Kirytopoulos Konstantinos, George Chatzistelios, Panagiotis Ntzeremes, Myrto Konstantinidou, 2021, "Employing serious games to increase safety in driving through road tunnels," *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)* [Preprint].
- Kirytopoulos Konstantinos, Konstandinidou Myrto, Nivolianitou Zoe, Kazaras Konstantinos 2014, "Embedding the human factor in Road Tunnel Risk Analysis," *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), pp. 329–337.
- Kirytopoulos Konstantinos Athanasios A. Rentizelas, Ilias P. Tatsiopoulos & George Papadopoulos, 2010, "Quantitative risk analysis for road tunnels complying with EU regulations," *Journal of Risk Research*, 13(8), pp. 1027–1041.

- Konstantinos Kirytopoulos, Konstantinos Kazaras, Panagiotis Papapavlou, Panagiotis Ntzeremes, Ilias Tatsiopoulou, 2016, “Exploring driving habits and safety critical behavioural intentions among Road Tunnel Users: A questionnaire survey in Greece,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, pp. 244–251.
- Klein Raymond, Igor Maevski, Jonathan Ko, Yuan Li, 2018, “Fuel Pool development in tunnel and drainage as a means to mitigate tunnel fire size,” *Fire Safety Journal*, 97, pp. 87–95.
- Lundin, J. and Antonsson, L. (2019) “Road tunnel restrictions – guidance and methods for categorizing road tunnels according to Dangerous Goods Regulations (ADR),” *Safety Science*, 116, pp. 170–182.
- Nilsson, D., Johansson, M. and Frantzich, H. (2009) “Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations,” *Fire Safety Journal*, 44(4), pp. 458–468.
- Ntzeremes, P., Kirytopoulos, K. and Leopoulou, V. (2020) “Discussing the need to manage uncertainty relating to users in Road Tunnel Fire Risk Assessment,” *Journal of Risk Analysis and Crisis Response* [Preprint].
- Ntzeremes, P. and Kirytopoulos, K. (2018) “Applying a stochastic-based approach for developing a quantitative risk assessment method on the fire safety of Underground Road Tunnels,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, pp. 619–631.
- Ntzeremes, P. and Kirytopoulos, K. (2019) “Evaluating the role of risk assessment for Road Tunnel Fire Safety: A Comparative Review within the EU,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(3), pp. 282–296.
- Ntzeremes, P. and Kirytopoulos, K. (2018) “A stochastic-based evacuation model for risk assessment in road tunnel fire accidents and the importance of educating users,” *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*, pp. 2185–2191.
- Paton, D. and Buergelt, P. (2019) “Risk, transformation and adaptation: Ideas for reframing approaches to disaster risk reduction,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14), p. 2594.
- Schmidt-Polończyk, N., Wąs, J. and Porzycki, J. (2021) “What is the knowledge of evacuation procedures in road tunnels? survey results of users in Poland,” *Buildings*, 11(4), p. 146.
- Seike, M., Kawabata, N. and Hasegawa, M. (2017) “Quantitative assessment method for road tunnel fire safety: Development of an evacuation simulation method using CFD-derived smoke behavior,” *Safety Science*, 94, pp. 116–127.
- Sisias, G., Konstantinidou, M. and Kontogiannis, S. (2022) “Deep learning process and application for the detection of dangerous goods passing through motorway tunnels,” *Algorithms*, 15(10), p. 370.
- Sotirios Kontogiannis, Anestis Kastellos, George Kokkonis, Theodosios Gkamas, Christos Pikridas, 2022, “Driving speed estimation and trapped drivers’ detection inside tunnels using distributed MIMO bluetooth devices,” *Electronics*, 11(2), p. 265

- Spinardi, G., Bisby, L. and Torero, J. (2016) “A review of sociological issues in fire safety regulation,” *Fire Technology*, 53(3), pp. 1011–1037.
- Sykora Miroslav, Milan Holicky, Karel Jung, Dimitris Diamantidis, 2018, “Human safety criteria for risk-based structural design,” *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8(2), pp. 287–298.
- Tunnel study Center, 2005, *Guide to Road Tunnel Safety Documentation*
- Tatarinov, V. and Kirsanov, A. (2019) “Enhancement of monitoring systems for the transport of dangerous goods by road,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 492, p. 012017.
- Van Coile, R., Jomaas, G. and Bisby, L. (2019) “Defining alarp for fire safety engineering design via the life quality index,” *Fire Safety Journal*, 107, pp. 1–14.
- Van Coile Ruben, 2019, “The need for hierarchies of acceptance criteria for Probabilistic Risk Assessments in Fire Engineering,” *Fire Technology*, 55(4), pp. 1111–1146.
- Van Coile Ruben, Mahesh D. Pandey, 2017, Investments in structural safety: the compatibility between the economic and societal optimum solutions, *Proceedings of the 12th International Conference on Structural Safety and Reliability*
- Wang Xintong, Shucai Li, Zhenhao Xua, Xiaozhao Li, Peng Lina, Chunjin Lin, 2019, “An interval risk assessment method and management of water inflow and inrush in course of Karst Tunnel excavation,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, p. 103033.
- World Road Association (PIARC), 2013, “Current practices for risk evaluation for road tunnels”
- World Road Association (PIARC), 2008, “Risk analysis for Road tunnels”
- World Road Association (PIARC), 2021, “Transport of Dangerous Goods through road tunnels: QRAM User’s Guide”
- ΔΑΣ, 2011, “Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας από διέλευση οχημάτων που μεταφέρουν επικινδυνά φορτία”
- Ελληνική επιτροπή σηράγγων και υπογείων έργων, 2022, “Το Δελτίο των Σηράγγων”
- Υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας, 2001, “Οδηγίες ΟΜΟΕ”

## 8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Θάνατοι σε διάφορους τύπους ατυχημάτων.....	14
Πίνακας 2 EV για διαφορετικές χώρες και συνθήκες.....	19
Πίνακας 3 Αναλογία Επικίνδυνων φορτίων .....	29
Πίνακας 4 VPF διαφόρων χωρών .....	32
Πίνακας 5 Είδη δεδομένων σήραγγας.....	44

## 9. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής Εργασίας .....	38
Σχήμα 2 Διάγραμμα Ροής προσομοιώσεων Q-RAM .....	42
Σχήμα 3 Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης .....	50
Σχήμα 4 Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης με ομαδοποιημένα σενάρια .....	51
Σχήμα 5 Αθροιστική Καμπύλη FN Αρχικής προσομοίωσης.....	52
Σχήμα 6 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας (45s) .....	53
Σχήμα 7 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(1.5mins) .....	54
Σχήμα 8 Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(4mins) .....	55
Σχήμα 9 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(45s).....	56
Σχήμα 10 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(1.5mins).....	57
Σχήμα 11 Αθροιστική Καμπύλη FN για κλείσιμο σήραγγας(4mins).....	58
Σχήμα 12 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(45s).....	59
Σχήμα 13 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(1 min) .....	60
Σχήμα 14 Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(3mins).....	61
Σχήμα 15 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(45s) .....	62
Σχήμα 16 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(1 min).....	63
Σχήμα 17 Αθροιστική Καμπύλη FN για χρόνο ενεργοποίησης εξαερισμού(3mins) .....	64
Σχήμα 18 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (120m <sup>3</sup> /s).....	65
Σχήμα 19 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (150m <sup>3</sup> /s).....	66
Σχήμα 20 Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (300m <sup>3</sup> /s).....	67
Σχήμα 21 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (120m <sup>3</sup> /s) .....	68
Σχήμα 22 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (150m <sup>3</sup> /s) .....	69
Σχήμα 23 Αθροιστική Καμπύλη FN για παροχή εξαερισμού (300m <sup>3</sup> /s) .....	70
Σχήμα 24 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 75km/h – οχ:105km/h).....	72
Σχήμα 25 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 90km/h – οχ:110km/h).....	73
Σχήμα 26 Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 80km/h – οχ:100km/h).....	74
Σχήμα 27 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 75km/h – οχ:105km/h) .....	75
Σχήμα 28 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 90km/h – οχ:110km/h) .....	76
Σχήμα 29 Αθροιστική Καμπύλη FN για όρια ταχύτητας (hgv: 80km/h – οχ:100km/h) .....	77
Σχήμα 30 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Γαλλίας) .....	79
Σχήμα 31 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Καναδά) .....	80
Σχήμα 32 Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Νορβηγίας) .....	81
Σχήμα 33 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Γαλλίας) .....	82
Σχήμα 34 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Καναδά).....	83
Σχήμα 35 Αθροιστική Καμπύλη FN για αναλογίες DG (Αναλογίες Νορβηγίας).....	84
Σχήμα 36 Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:15 N:25 P:50) .....	85
Σχήμα 37 Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:20 N:35 P:75) .....	86
Σχήμα 38 Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:30 N:45 P:90) .....	87
Σχήμα 39 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:15 N:25 P:50).....	88



Σχήμα 40 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:20 N:35 P:75).....	89
Σχήμα 41 Αθροιστική Καμπύλη FN για κυκλοφοριακό φόρτο (Q:30 N:45 P:90).....	90