



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

**ΤΙΤΛΟΣ «ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ELECTRE ΓΙΑ
ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ
ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ»**

Τελειόφοιτος: Αγγελίδης Θωμάς του Νικολάου

Επιβλέπων: Λεώπουλος Βρασίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συν-επιβλέπων: Κηρυτόπουλος Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Υποστήριξη: Ντζερεμές Παναγιώτης, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

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

Θωμάς Αγγελίδης

Ευχαριστίες

Επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας, κ. Β. Λεώπουλο για την δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ και να μελετήσω τον κλάδο της διαχείρισης κινδύνων. Ευχαριστώ επίσης τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κ. Κηρυττόπουλο που με ώθησε να ερευνήσω τον χώρο των μέτρων ασφαλείας οδικής σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Π. Ντζερεμέ για την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας αλλά και για την παροχή βιβλιογραφικής βοήθειας.

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων.....	6
Κατάλογος πινάκων	7
Έποψη-Περίληψη.....	8
Synopsis.....	9
1 Εισαγωγή.....	10
2 Βασικό υπόβαθρο αξιολόγησης μέτρων ασφαλείας	14
2.1 Συμπεριφορά φωτιάς.....	14
2.2 Συμπεριφορά ανθρώπων	19
2.3 Γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης κινδύνου	24
3 Αξιολόγηση εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας.....	26
3.1 Επιλογή εξεταζόμενων μέτρων ασφαλείας	26
3.2 Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας.....	27
3.2.1 Αξιολόγηση της εξόδου κινδύνου	29
3.2.2 Αξιολόγηση του μηχανικού αερισμού	32
3.2.3 Αξιολόγηση του συστήματος ειδοποίησης	37
3.2.4 Αξιολόγηση της σήμανσης	42
3.2.5 Αξιολόγηση των φαναριών	44
3.2.6 Αξιολόγηση των μπαρών.....	46
4 Μέθοδος Έρευνας.....	49
4.1 Πολυκριτήρια λήψη αποφάσεων.....	49
4.2 Γενικό πλαίσιο πολυκριτήριας ανάλυσης	50
4.3 Μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης	51
4.4 Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας MAUT.....	52
4.5 Πολυκριτήρια θεωρία κατάταξης MAVT.....	53
4.6 Θεωρία σχέσεων υπεροχής.....	53
4.6.1 Οικογένεια μεθόδων ELECTRE	54
4.6.1.1 Η μέθοδος ELECTRE I.....	56
4.6.1.2 Η μέθοδος ELECTRE II	57

4.6.1.3	Η μέθοδος ELECTRE III	58
4.6.1.4	Η μέθοδος ELECTRE TRI	61
4.6.2	Λογισμικά για τις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE	63
4.6.3	Οικογένεια μεθόδων PROMETHEE	64
4.6.4	Μέθοδοι PROMETHEE I & II	65
5	Ανάλυση σεναρίου και μελέτη περίπτωσης	69
5.1	Στοιχεία μελετηθείσας οδικής σήραγγας.....	69
5.2	Καθορισμός των βαρών	71
5.3	Πίνακας συμφωνίας.....	75
5.4	Πίνακας ασυμφωνίας.....	76
5.5	Κατασκευή πυρήνα	77
5.6	Λογισμικό για εκτύλιξη σεναρίου και ανάλυση ευαισθησίας	83
5.7	Ανάλυση ευαισθησίας.....	83
5.7.1	Ανάλυση ευαισθησίας του κόστους κατασκευής	83
5.7.2	Ανάλυση ευαισθησίας σε περίπτωση ενημέρωσης των χρηστών	86
6	Συμπεράσματα	90
	Βιβλιογραφία	94
	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	94
	Βιβλιογραφία στην ελληνική γλώσσα.....	96
	Παράρτημα Α: Στιγμιότυπο οθόνης (screenshot) λογισμικού Excel κατά την τελική επικράτηση του συστήματος του μηχανικού αερισμού στην μελέτη περίπτωσης με την βοήθεια της ELECTRE I	98
	Παράρτημα Β: Διάγραμμα ροής (flowchart) της λειτουργίας της πολυκριτήριας μεθόδου ELECTRE I	100

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Τρόποι επίτευξης ασφάλειας σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο	12
Σχήμα :2 Ροή αέρα σε περίπτωση φωτιάς σε οδική σήραγγα	15
Σχήμα 3: Θερμοκρασία ως συνάρτηση του χρόνου για διάφορες μορφές πυρκαγιών	17
Σχήμα 4: Καμπύλη Έκλυσης Θερμότητας.....	19
Σχήμα 5: Ολιστική προσέγγιση αποτίμησης επικινδυνότητας (WORLD ROAD ASSOCIATION)	20
Σχήμα 6: Εξέλιξη δράσεων ως προς τον χρόνο σε περίπτωση φωτιάς	21
Σχήμα 7: Διαδικασία διαχείρισης κινδύνου	25
Σχήμα 8: Έξοδος κινδύνου	29
Σχήμα 9: Πυρκαγιά με/χωρίς μηχανικό αερισμό	33
Σχήμα 10: Διαμήκης αερισμός	34
Σχήμα 11: Πλήρως εγκάρσιος αερισμός	35
Σχήμα 12: Ημι-εγκάρσιος αερισμός	35
Σχήμα 13: Λειτουργία ενδεικτικού συστήματος πυρανίχνευσης	39
Σχήμα 14: Σύστημα ειδοποίησης κινδύνου σε οδική σήραγγα	39
Σχήμα 15: Σύστημα σήμανσης σε περιπτώσεις ατυχήματος φωτιάς	43
Σχήμα 16: Φωτεινοί σηματοδότες στο εξωτερικό της σήραγγας	45
Σχήμα 17: Απαγορευτικό εισόδου σε σήραγγα στην Αυστραλία	47
Σχήμα 18:Μεθοδολογικό πλαίσιο κατά Roy	50
Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση προτύπων αναφοράς ως προς τις κατηγορίες	62

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας βαθμολόγησης εναλλακτικών ως προς κάθε κριτήριο	28
Πίνακας 2: Αξιολόγηση εξόδου κινδύνου	32
Πίνακας 3: Αξιολόγηση μηχανικού αερισμού	37
Πίνακας 4: Αξιολόγηση συστήματος ειδοποίησης	42
Πίνακας 5: Αξιολόγηση συστήματος σήμανσης.....	44
Πίνακας 6: Αξιολόγηση συστήματος φαναριών	46
Πίνακας 7: Αξιολόγηση συστήματος μπαρών.....	48
Πίνακας 21: Συνοπτικός πίνακας λογισμικών οικογένειας ELECTRE	63
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών της σήραγγας	70
Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας βαρών-κριτηρίων.....	74
Πίνακας 10: Πίνακας βαρών και αξιολόγησης εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια.....	75
Πίνακας 11: Πίνακας συμφωνίας.....	76
Πίνακας 12: Πίνακας ασυμφωνίας	77
Πίνακας 13: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,92$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,2178$	
Πίνακας 14: Πίνακας επικράτησης για το πρώτο τρέξιμο του βασικού σεναρίου	78
Πίνακας 15: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,85$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,2979$	
Πίνακας 16: Πίνακας επικράτησης για το δεύτερο τρέξιμο του βασικού σεναρίου	79
Πίνακας 17: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,77$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,2980$	
Πίνακας 18: Πίνακας επικράτησης για το τρίτο τρέξιμο του βασικού σεναρίου	80
Πίνακας 19: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,69$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,6481$	
Πίνακας 20: Πίνακας επικράτησης για το τέταρτο τρέξιμο	82
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας βαρών-κριτηρίων για την πρώτη ανάλυση ευαισθησίας.....	84
Πίνακας 23: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,62$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,2985$	
Πίνακας 24: Πίνακας επικράτησης για το τέταρτο τρέξιμο της πρώτης ανάλυσης ευαισθησίας	85
Πίνακας 25: Πίνακας βαρών και αξιολόγησης εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια στην δεύτερη ανάλυση ευαισθησίας	87
Πίνακας 26: Πίνακας επικράτησης για το τρίτο τρέξιμο για $c=0,69$ και $d=0,43$	88

Έποψη-Περίληψη

Δεδομένης της πολυπλοκότητας που έχει ένα ατύχημα πυρκαγιάς μέσα σε μία οδική σήραγγα και των συνεπειών αυτού που μπορεί να εξελιχθούν καταστροφικές, επιδίωξη της εργασίας ήταν να αξιολογηθούν τα μέτρα ασφαλείας της εξόδου κινδύνου, του μηχανικού αερισμού, της ειδοποίησης από το κέντρο ελέγχου και των συστημάτων σήμανσης, φανών και μπαρών. Αυτές οι εναλλακτικές έχουν φανεί ως οι πιο σημαντικές έπειτα από ανάλυση επικινδυνότητας σήραγγας συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και έλεγχο της απόδοσης του κάθε μέτρου.

Η αξιολόγηση τους έγινε έπειτα από μελέτη της συμπεριφοράς των χρηστών σε παρόμοια ατυχήματα, από παρατήρηση των ευρημάτων ερευνών και πειραμάτων με στόχο την αποσαφήνιση της συμπεριφοράς των ανθρώπων σε τέτοιες καταστάσεις αλλά και από αναζήτηση σχετικής βιβλιογραφίας. Επίσης, για την αξιολόγηση λήφθηκε υπόψιν η συμπεριφορά της φωτιάς σε τέτοιο περιβάλλον.

Ως μέθοδος έρευνας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ELECTRE I που ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων που στηρίζονται στην θεωρία της υπεροχής. Αποτέλεσμα της μεθόδου τόσο κατά την εκτύλιξη του βασικού σεναρίου όσο και κατά τις 2 αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν ήταν η κατάληξη του συστήματος του μηχανικού αερισμού ως η βέλτιστη από τις υπό μελέτη εναλλακτικές.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι την καλύτερη αξιολόγηση έλαβε η εναλλακτική που η λειτουργία της επικουρεί το έργο των ανθρώπων που εκκενώνουν την σήραγγα και δεν στηρίζεται στην συνεργασία των ανθρώπων με αυτή καθώς δεν τους προτρέπει ούτε τους ενημερώνει για κάποιο σχέδιο δράσης. Η υπεροχή του μηχανικού αερισμού έναντι των άλλων εναλλακτικών αλλά και η ευρύτερη μελέτη που πραγματοποιήθηκε καθιστά αναγκαία την εκπαίδευση των χρηστών στο περιβάλλον των οδικών σιράγγων καθώς η ενημέρωσή τους σε θέματα ασφάλειας στις σιράγγες θα καταστήσει πολύ πιο αποδοτικά ακόμα και τα υπάρχοντα μέτρα ασφαλείας ενώ η πιθανή σωστή δράση τους θα γίνει αντικείμενο μίμησης και από χρήστες που υπό άλλες συνθήκες δεν θα ακολουθούσαν τις ενδεδειγμένες κινήσεις.

Κλείνοντας, επισημαίνεται πως η υπεροχή του μηχανικού αερισμού έναντι των υπολοίπων μέτρων ασφαλείας δεν δηλώνει ότι μπορεί να έχει επιθυμητά αποτελέσματα αν εφαρμοστεί μόνο του, καθώς επιτυχής εκκένωση της σήραγγας από τους χρήστες μπορεί να γίνει μόνο με συνδυασμό όλων των προαναφερθέντων μέτρων ασφαλείας. Τέλος, όλη η διαδικασία της αξιολόγησης των μέτρων ασφαλείας είχε ως βασική αρχή την αύξηση του επιπέδου ασφαλείας προς όφελος των χρηστών της και για αυτό τον λόγο παράγοντες όπως οι οικονομικοί περιορισμοί και η προστασία των δομικών υλικών της σήραγγας υπολογίστηκαν μεν αλλά χωρίς να έχουν ισάξια βαρύτητα με την προστασία των ανθρώπινων ζωών.

Synopsis

Given the complexity and the severe consequences a fire accident inside a road tunnel involves, the aim of this thesis was to assess safety measures such as the emergency exit, the mechanical ventilation and way-finding installations like the loudspeaker system, signals, light installations and barriers. These alternatives have been proven to be the most important ones as a result of conducting a risk analysis in a road tunnel of the same characteristics with the one examined.

In order to make the assessment, the past behavioural intentions of road tunnels users during accidents have been examined, simulation surveys of accidents that include users have been studied and a plethora of scientific books have been explored. Understanding deeply the driving and the evacuation habits of road tunnel users is of great importance in assessing the safety measures. Moreover, analyzing the fire behaviour was crucial in assessing the alternatives.

The used method was the multi-criteria decision analysis MCDA method called ELECTRE I which is based on the outranking theory. The final outcome of the ELECTRE I method was that the mechanical ventilation is the most effective safety measure among the above-mentioned alternatives. The same result occurred during the sensitivity analysis of 2 different scenarios that were examined.

The conclusion that arises is that the best assessment was been made to the alternative whose function helps the evacuation process without relying on the road tunnel users and on their capacity to interpret a message or a signal. The dominance of the tunnel ventilation comparing to the other safety measures as well as the general study conducted indicates that is very important to invest time and money, as a society, in the education of the road tunnel users so that they know and act according to the recommended behaviours during accidents. By making the road tunnel users more aware of the recommended practices, the safety measures will become much more effective and even the not informed users will have greater chances to evacuate quickly by imitating the behavior of the other users.

Lastly, it is highlighted that mechanical ventilation's dominance over the rest of the safety measures does not indicate by any means that the mechanical ventilation should be implemented properly on its own, because a successful evacuation in case of a fire accident can happen only by combining effectively all the above-mentioned safety measures. Overall, this whole assessment process was aimed at increasing the overall safety of road tunnels while the human factor was the number one priority. For that reason, factors such as economic restrictions or the protection of the building materials of the tunnel were taken into account but were undoubtedly out weighted by the principle to create a safer place for the road tunnel users.

1 Εισαγωγή

Η ραγδαία τεχνολογική βελτίωση όλων των τομέων σε συνδυασμό με την προσπάθεια των ανθρώπων να αξιοποιήσουν κατά τον βέλτιστο τρόπο τις δυνατότητες των τεχνικών τους γνώσεων προς όφελος της καθημερινότητας τους οδήγησε στην ανάπτυξη της οδοποιίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ανάπτυξης αυτής είναι η δημιουργία των οδικών σηράγγων, των οποίων το κυριότερο όφελος είναι ότι συνδέουν τοποθεσίες παρακάμπτοντας φυσικούς περιορισμούς αλλά και τεχνητούς όπως είναι τα κέντρα των πόλεων. Αυτή η ιδιότητα εκτός από την εξυπηρέτηση των μεταφορών συμβάλλει και στην εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος. Βέβαια, με την εδραίωση αυτής της μορφής της οδοποιίας, δημιουργήθηκαν παράλληλα και οι αντίστοιχοι κίνδυνοι που σχετίζονται με την λειτουργία των οδικών σηράγγων.

Στην προσπάθεια κατάταξης των ατυχημάτων που συμβαίνουν εντός των οδικών σηράγγων, παρατηρείται ότι το 43% των ατυχημάτων προκαλούνται από την σύγκρουση 2 οχημάτων που πηγαίνουν προς την ίδια κατεύθυνση, το 35% των ατυχημάτων προκαλείται από μεμονωμένα οχήματα, ενώ το 15% προκαλείται από μετωπικές συγκρούσεις οχημάτων. (Hoye 2004).

Ο κυριότερος κίνδυνος που ελλοχεύει από την λειτουργία των οδικών σηράγγων είναι η εξάπλωση φωτιάς εντός αυτής. Παρόλο που ο δείκτης ατυχημάτων είναι χαμηλότερος σε οδικές σήραγγες σε σχέση με τον αντίστοιχο δείκτη για το υπόλοιπο οδικό δίκτυο, οι πιθανές συνέπειες που σχετίζονται με εξάπλωση φωτιάς σε οδικές σήραγγες είναι δυσμενέστερες (PIARC 2008). Αυτή η διαπίστωση αποδεικνύεται και από τα τρία καταστροφικά ατυχήματα στην Κεντρική Ευρώπη που στοίχισαν την ζωή 62 ανθρώπων (στα τούνελ του Mont Blanc και του Tauern το 1999, αλλά και στο τούνελ του St. Gotthart το 2001).

Η κυριότερη αιτία εξάπλωσης φωτιάς σε οδική σήραγγα είναι μηχανικές ή ηλεκτρικές βλάβες των οχημάτων που βρίσκονται μέσα στη σήραγγα. Δημοσίευση που μελετούσε τα ατυχήματα φωτιάς στις νορβηγικές σήραγγες κατά την τριετία 2008-2011 κατέστησε σαφές ότι η πλειοψηφία των φωτιών ευθύνεται από τα αμάξια, και ότι η φωτιά εξαπλώνεται κατά κύριο λόγο εξαιτίας εσφαλμένων χειρισμών του οδηγού αλλά και των άλλων ανθρώπων, και λιγότερο εξαιτίας των σχηματισμών της σήραγγας. (Naevestad et al. 2014)

Για αυτό ακριβώς τον λόγο, η επιλογή κατάλληλων μέτρων ασφαλείας αποτελεί μια διεθνής δέσμευση (Λευκή Βίβλος μεταφορών, 2001). Η ευρωπαϊκή κοινότητα αναγνώρισε την σημασία ύπαρξης μίας ενοποιημένης παροχής ασφάλειας υψηλού επιπέδου και εξέδωσε τον Σεπτέμβριο του 2001 την Λευκή Βίβλο με σκοπό να είχε καθοριστεί μέχρι το 2010 μία κοινή πολιτική ασφαλείας. Οι ολέθριες καταστροφές που υπήρξαν από ατυχήματα φωτιάς σε οδικές σήραγγες στις αρχές του 21^{ου} αιώνα κινητοποίησαν και άλλους διεθνείς οργανισμούς όπως οι PIARC, ITA και τα Ηνωμένα Έθνη. Απώτερος στόχος του νομοθετήματος είναι να

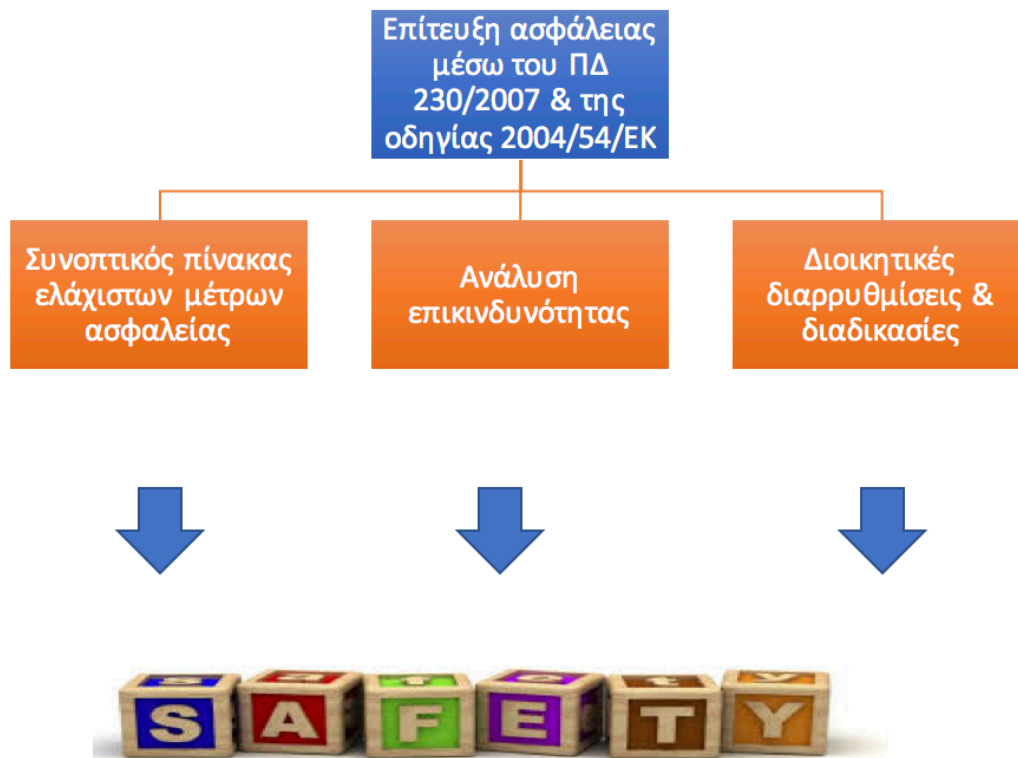
εξασφαλιστεί η ασφάλεια μέσα στις σήραγγες, η οποία απαιτεί την κατάλληλη λήψη μέτρων τα οποία εξαρτώνται από την μορφή και τον σχεδιασμό της σήραγγας αλλά και από τον εξοπλισμό ασφαλείας:

- Οδική σήμανση
- Διαχείριση κυκλοφορίας
- Εκπαίδευση υπηρεσιών εκτάκτου ανάγκης
- Ενημέρωση οδηγών
- Επικοινωνία μεταξύ αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών εκτάκτου ανάγκης

Σύμφωνα με την οδηγία 2004/54/EK προσδιορίστηκαν τα ελάχιστα επίπεδα ασφαλείας για τους χρήστες των σηράγγων (Μπακογιάννης 2014). Τα μέτρα αυτά ορίστηκε να εφαρμόζονται σε σήραγγες του Διευρωπαϊκού Οδικού Δικτύου ΔΟΔ με μήκος άνω των 500 m ανεξαρτήτως αν βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο μελέτης και κατασκευής ή αν βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Η οδηγία αυτή ενθαρρύνει τα Κράτη Μέλη να υιοθετούν τέτοια επίπεδα ασφαλείας και σε σήραγγες μικρότερου μήκους ακόμα και αν δεν ανήκουν στον ΔΟΔ. Η οδηγία αυτή, ως προς το περιεχόμενο της, εισάγει τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος διαχείρισης ασφαλείας σήραγγας, καθορίζει αρμοδιότητες ανάμεσα στους υπεύθυνους της σήραγγας αλλά και μία ολιστική προσέγγιση σχετικά με την λήψη αποφάσεων ως προς τα μέτρα ασφαλείας. Επιπρόσθετα, η οδηγία 2004/54/EK ορίζει μία ανάλυση επικινδυνότητας (risk analysis) για την αιτιολόγηση εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας με ισοδύναμο επίπεδο ασφαλείας και για την μελέτη των συνεπειών των ειδικών χαρακτηριστικών της σήραγγας, τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας ενώ επιβάλλει την υποβολή έκθεσης προς την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η οδηγία 2004/54/EK εφαρμόστηκε στην Ελλάδα με το Προεδρικό Διάταγμα υπ' αριθμόν 230 το 2007. Περιλαμβάνει 16 άρθρα που περιγράφουν το αντικείμενο και το πεδίο εφαρμογής του και κατανέμουν αρμοδιότητες προς την διοικητική αρχή, τον διαχειριστή της σήραγγας, τον αρμόδιο ασφαλείας και τον φορέα επιθεώρησης. Επίσης, καθορίζονται οι διαδικασίες που πρέπει να τηρούνται όπως οι περιοδικές επιθεωρήσεις (άρθρο 12), η ανάλυση επικινδυνότητας (άρθρο 13) και οι εκθέσεις (άρθρο 15).

Στο Παράρτημα I του ΠΔ 230/2007 εντοπίζονται τα διάφορα μέτρα ασφαλείας ανάλογα με τις παραμέτρους της σήραγγας αλλά και ένας συνοπτικός πίνακας στοιχειωδών απαιτήσεων που ορίζει απαιτήσεις ανάλογα με τον κυκλοφοριακό φόρτο της σήραγγας. Στο Παράρτημα II παρουσιάζονται οι απαιτούμενες διαδικασίες όπως η έγκριση της μελέτης, ο φάκελος ασφαλείας, η θέση μίας σήραγγας σε λειτουργία, οι τροποποιήσεις και οι περιοδικές ασκήσεις. Τέλος, στο Παράρτημα III υπάρχει ανάλυση των απαιτήσεων σχετικά με την σήμανση των σηράγγων.



Σχήμα 1: Τρόποι επίτευξης ασφάλειας σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο

Η επιλογή των μέτρων ασφαλείας για καταστάσεις φωτιάς εντός οδικής σήραγγας έχουν ορισμένους ξεκάθαρους επιδιωκόμενους στόχους, οι οποίοι ορίζονται πρωτίστως νομικά αλλά απορρέουν εύλογα και από το ηθικό πλαίσιο της σύγχρονης κοινωνίας. Οι στόχοι αυτοί λοιπόν από την επιλογή των μέτρων ασφαλείας σε σειρά φθίνουσας προτεραιότητας είναι οι εξής:

1. Η προστασία των εμπλεκόμενων ανθρώπινων ζωών
2. Η αποτροπή κλιμάκωσης της φωτιάς και ο περιορισμός της
3. Η μείωση των περιβαλλοντικών καταστροφών
4. Ο περιορισμός των ζημιών στα δομικά στοιχεία της σήραγγας
5. Η κατά το δυνατόν συντομότερη αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας της σήραγγας για κοινωνικούς και οικονομικής φύσεως λόγους

Η ιεράρχηση των στόχων δηλώνει ότι σαφώς προτεραιότητα είναι ο άνθρωπος. Όμως, συνετό θα ήταν να επιδιώκεται και η επίτευξη των υπόλοιπων στόχων. Η περίπτωση του ατυχήματος στο Mont Blanc είναι ενδεικτική καθώς η σήραγγα υπέστη τέτοιες ζημιές που χρειάστηκαν 4 χρόνια για να επαναλειτουργήσει ομαλά επισκευάζοντας τις βλάβες και εγκαθιστώντας ένα πιο σύγχρονο σύστημα πυρασφάλειας (Παπαδημητρίου 2014). Αυτή η πολυετής διαδικασία στοίχισε κοντά στα 4 δισεκατομμύρια στις κυβερνήσεις της Γαλλίας και

της Ιταλίας που εμπλέκονταν και η συνέπεια αυτής της διαδικασίας στην κοινωνία ήταν η διακοπή για 4 χρόνια ενός πολύ βασικού τρόπου ένωσης και επικοινωνίας των 2 αυτών χωρών.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση των μέτρων ασφαλείας , όπως αυτά προέκυψαν από προηγούμενη εξέταση μίας εικονικής σήραγγας σε λειτουργία, στην προσπάθεια της μείωσης της επικινδυνότητας (risk treatment) για την περίπτωση ατυχήματος φωτιάς εντός της σήραγγας. Η αξιολόγηση θα γίνει μέσω της πολυκριτήριας μεθόδου ELECTRE I, η οποία στηρίζεται στην θεωρία των σχέσεων υπεροχής. Για την σωστή απόδοση τιμών αξιολόγησης στις εναλλακτικές, έχουν ληφθεί δεδομένα τόσο από σχετικές έρευνες αξιολόγησης των υπό μελέτη εναλλακτικών όσο και από μελέτες της συμπεριφοράς των ανθρώπων σε συνθήκες ατυχήματος φωτιάς εντός οδικής σήραγγας. Τονίζεται πως παρόλο που στόχος της εργασίας είναι η εύρεση της μίας εναλλακτικής που συνεισφέρει καλύτερα σε αυτές τις συνθήκες ατυχήματος, στην πράξη όλες οι εναλλακτικές υπό εξέταση έχουν ρόλο και απαιτούνται για μία επιτυχή διάσωση των χρηστών της οδικής σήραγγας, σε μικρότερο ή σε μεγαλύτερο βαθμό και ανάλογα με την οπτική και τις επιδιώξεις του αποφασίζοντα.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο εισάγεται η βαρύτητα του προβλήματος των ατυχημάτων φωτιάς εντός των οδικών σηράγγων και αναφέρεται επιγραμματικά το νομοθετικό πλαίσιο που έχει εφαρμοστεί για την αποτροπή και την διαχείριση τέτοιων ατυχημάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μία βασική περιγραφή του ευρύτερου πλαισίου της ανάλυσης επικινδυνότητας και παραθέτονται βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των ανθρώπων αλλά και των χαρακτηριστικών της φωτιάς που θα επηρεάσουν την μετέπειτα αξιολόγηση των εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η αξιολόγηση των εναλλακτικών ως προς τα προαναφερθέντα κριτήρια σε μία συνεχή κλίμακα του 10 με χρήση βιβλιογραφικών παρατηρήσεων και δεδομένων από σχετικές έρευνες και ερωτηματολόγια. Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο θα αναλυθεί η μέθοδος έρευνας ELECTRE I που θα χρησιμοποιηθεί όπως και θα γίνει μία εισαγωγή στον ευρύτερο χώρο της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η εκτύλιξη του σεναρίου και η μελέτη περίπτωσης καθώς επίσης και ανάλυση ευαισθησίας για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο εντοπίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν καθόλη την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 Βασικό υπόβαθρο αξιολόγησης μέτρων ασφαλείας

2.1 Συμπεριφορά φωτιάς

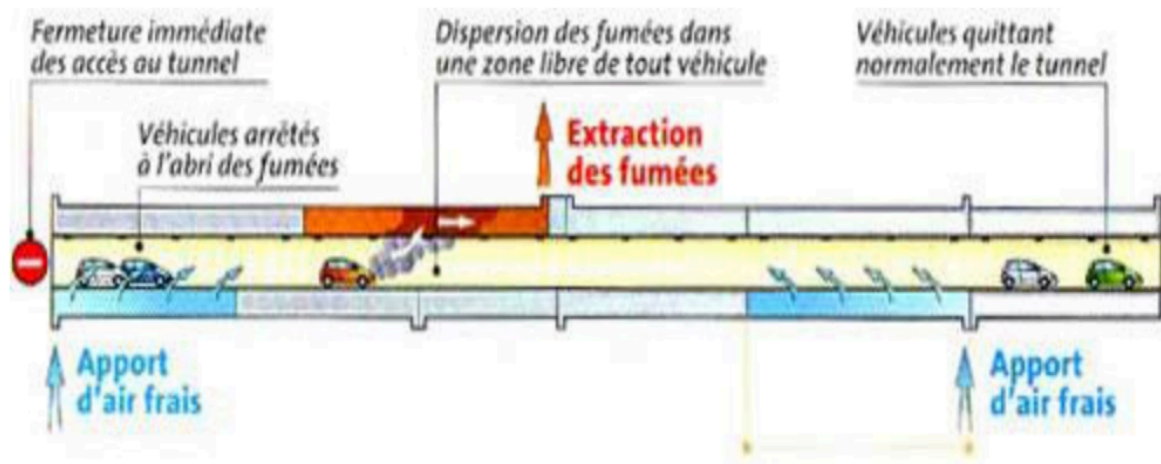
Ως φωτιά ορίζεται η ταυτόχρονη ανάπτυξη θερμότητας και φλόγας, λόγω καύσης (δηλαδή χημικής αντίδρασης: οξειδωσης και μάλιστα ταχείας —έντονης— οξειδωσης). Αποτέλεσμα της αντίδρασης αυτής είναι η παραγωγή ενέργειας (φως και θερμότητα) και συγκεκριμένων προϊόντων (καπνός και στάχτη), (Ζαφειρίου 2012).

Μία εκδήλωση φωτιάς σε έναν κλειστό χώρο όπως στις οδικές σήραγγες έχει δύο βασικές παραμέτρους που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης διότι δυσχεραίνουν σημαντικά την προσπάθεια των ανθρώπων για άμεση και με ορθό τρόπο αυτό-διάσωση. Οι δύο αυτές παράμετροι αναλύονται παρακάτω:

- Ο καπνός: Η παρουσία καπνών εντός της σήραγγας επιφέρει τα εξής αποτελέσματα:
 - a. Μείωση ορατότητας
 - b. Δημιουργία τοξικού περιβάλλοντος
 - c. Ταχύτητα εξάπλωσης καπνών
 - d. Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς

Η μείωση της ορατότητας σε περίπτωση πυρκαγιάς οφείλεται στη παραγωγή καπνού από την καύση στερεών ή υγρών υλικών, καπνού ο οποίος έχει διαφορετική ταχύτητα και πυκνότητα ανάλογα με το καιόμενο υλικό. Αποτέλεσμα της μειωμένης ορατότητας είναι ο αποπροσανατολισμός, το αίσθημα πανικού που προκαλεί η ελλιπής ορατότητα αλλά κυρίως η μερική ή ολική απόκρυψη των οδών διαφυγής.

Όταν αναπτύσσεται φωτιά σε ανοικτό χώρο, οι καπνοί που παράγονται αναπτύσσονται σε χώρο 3 διαστάσεων και αναμειγνύονται με ατελείωτη ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα. Όταν όμως η φωτιά αναπτύσσεται σε κλειστό χώρο, η ροή αέρα είναι διατεταγμένη και η διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου είναι μικρότερη από όση απαιτείται σύμφωνα με την αντίστοιχη στοιχειομετρική εξίσωση, επομένως πρόκειται για περίπτωση μη-τέλειας καύσης.



Σχήμα :2 Ροή αέρα σε περίπτωση φωτιάς σε οδική σήραγγα

Πηγή: Ζαφειρίου, 2012

Οι καπνοί που παράγονται σε τέτοιες συνθήκες είναι πολύ τοξικοί (Ζαφειρίου 2012). Τα συστατικά τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ασφυξιογόνα ή/και τοξικά αέρια και τα ερεθιστικά. Τα ασφυξιογόνα αέρια είναι αυτά που δύνανται να εισχωρήσουν στο αναπνευστικό σύστημα και επιφέρουν ακαριαίο θάνατο στους χρήστες του τούνελ εφόσον αυτοί δεν απομακρυνθούν άμεσα από το σύστημα. Ορισμένα από τα αέρια αυτά είναι το μονοξείδιο (CO) και το διοξείδιο (CO₂) του άνθρακα, το υδροχλωρικό (HCl) και τα οξειδία του αζώτου (NOX). Η παραγωγή των αερίων αυτών είναι άμεση συνάρτηση της θερμοκρασίας στον καίόμενο χώρο που διαρκώς αυξάνεται σε πυκνότητα και σε ποσότητα.

Το τοξικό περιβάλλον μέσα στις οδικές σήραγγες εντείνεται από την παρουσία πλαστικών και λοιπών παραγώγων πετρελαίου που βρίσκονται στον χώρο της φωτιάς ως συστατικά των αυτοκινήτων. Έτσι, η ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς αποτελεί ένα μεγάλο ζήτημα καθώς οι χρήστες της σήραγγας κινδυνεύουν να εγκλωβιστούν εξαιτίας των καπνών.

Γενεσιουργός αιτία στον κίνδυνο κάλυψης και εγκλωβισμού από τους καπνούς είναι το σχήμα του τούνελ που λειτουργεί ως καμινάδα και παράμετροι που καθορίζουν την εξάπλωση του καπνού είναι:

1. Μήκος τούνελ
2. Διαφορετική ατμοσφαιρική πίεση μεταξύ των εξόδων της σήραγγας
3. Η υπάρχουσα θερμοκρασία στον χώρο
4. Το φαινόμενο εμβόλου που προκαλείται από τα διερχόμενα οχήματα
5. Αντικείμενα/εμπόδια

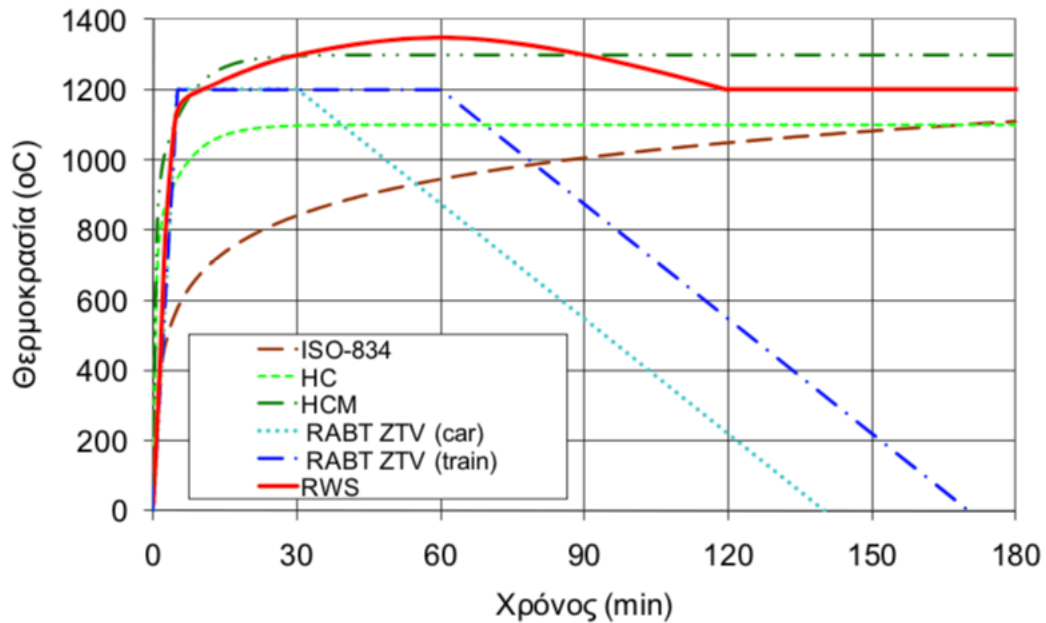
Έχει μελετηθεί πως ο καπνός επεκτείνεται με ταχύτητα της τάξης των 24 km/h ή 400 m/min (Ζαφειρίου 2012). Ο χρόνος μεταξύ της γέννησης της φωτιάς και της παραγωγής του καπνού είναι ελάχιστα δευτερόλεπτα όπως αυτό αποτυπώνεται και στα παρακάτω σχήματα 3 και 4

συνεπώς η επιβίωση των εμπλεκομένων σε τέτοιου είδους περιστατικά εξαρτάται από την ταχεία αποχώρησή τους από τα οχήματα προς ασφαλή σημεία.

- Η θερμότητα: Σε τέτοιου είδους πυρκαγιές σε κλειστούς χώρους, η θερμοκρασία μέσα στην σήραγγα μπορεί να ξεπεράσει και τους 1000 βαθμούς Κελσίου και η θερμική ακτινοβολία που παράγεται θα ήταν αρκετή ώστε η πυρκαγιά να εξαπλωθεί εκατοντάδες μέτρα μακριά από την κύρια εστία εφόσον ο χώρος είχε αποθέματα οξυγόνου. Επομένως, η συγκριτικά χαμηλή θερμική ακτινοβολία της φωτιάς στον κλειστό χώρο της σήραγγας οφείλεται στην έλλειψη οξυγόνου και στον φυσικό περιορισμό του ύψους που προκαλεί το τούνελ, η οποία όμως παραμένει επικίνδυνη για τους χρήστες, ειδικότερα αν η θερμοκρασία πλησιάσει τους 1000 βαθμούς Κελσίου. Βέβαια, αυτή η ιδιομορφία του εσωτερικού χώρου των σηράγγων μπορεί να οδηγεί σε χαμηλή θερμική ακτινοβολία όμως από την άλλη ευθύνεται για την συσσώρευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, που περιορίζεται στα τοιχώματα του τούνελ και δεν έχει διαφυγή. Ενδεικτικά, για το σενάριο του οποίου θα μελετηθεί στην συνέχεια η μείωση της επικινδυνότητας, η θερμοκρασία ξεπέρασε τους 200 βαθμούς Κελσίου σε κάποιες θέσεις της εν λειτουργία σήραγγας (Ντζερεμές 2012).

Η υψηλή θερμοκρασία που υπάρχει σε τέτοιες συνθήκες εντός σήραγγας μπορεί να προκαλέσει αυτανάφλεξη σε υλικά και υγρά που βρίσκονται αρκετά μακριά από την εστία της φωτιάς. Υλικά του οχήματος με χαμηλό όριο αυτανάφλεξης μπορεί να είναι η αιτία αλυσιδωτών αντιδράσεων μετά στα υπόλοιπα οχήματα πάντα εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Δεν έχουν όλα τα υλικά το ίδιο όριο αυτανάφλεξης. Για παράδειγμα, το χαρτί και το ξύλο έχουν θερμοκρασία αυτανάφλεξης κάτω από 300 βαθμούς Κελσίου ενώ υλικά όπως τα λάδια του κινητήρα και ο πολυεστέρας έχουν θερμοκρασία αυτανάφλεξης που ξεπερνά τους 400 βαθμούς Κελσίου. Τα συνηθέστερα υλικά που αναφλέγονται πρώτα σε συνθήκες φωτιάς σε οδικές σήραγγες είναι τα υλικά από μαλακό πλαστικό και καουτσούκ, όπως παραδείγματος χάριν τα ελαστικά των αυτοκινήτων.

Βασικό στοιχείο για την μετέπειτα αντιμετώπιση της φωτιάς είναι ο εντοπισμός της μέγιστης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την πυρκαγιά. Υπάρχουν διάφορες πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες πυρκαγιάς, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3: Θερμοκρασία ως συνάρτηση του χρόνου για διάφορες μορφές πυρκαγιών
Πηγή: Σακκάς, 2010

Οι κυριότερες μορφές των προτύπων καμπύλων πυρκαγιάς είναι οι παρακάτω (Σακκάς 2010):

1. Καμπύλη ISO (ISO-384): Στηρίζεται στο ρυθμό καύσης υλικών που εντοπίζονται στα κτίρια. Σε αυτή την περίπτωση, η θερμοκρασία μετά από μισή ώρα φτάνει τους 842 βαθμούς Κελσίου και η πυρκαγιά έχει διάρκεια τρεις ώρες και φτάνει ως τελική θερμοκρασία τους 1100 βαθμούς Κελσίου. Η θερμοκρασία ως συνάρτηση του χρόνου δίνεται από την εξίσωση:

$$T=20+345\log(8t+1)$$
όπου $T[^\circ\text{C}]$ και $t[\text{min}]$
2. Καμπύλη υδρογονανθράκων (HC): Αυτή η καμπύλη εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η πυρκαγιά προέρχεται από την καύση καύσιμων υλών. Σε αυτή την περίπτωση, η θερμοκρασία μετά από 15 min φτάνει τους 1100 βαθμούς Κελσίου και η πυρκαγιά διατηρεί την θερμοκρασία της καθόλη την υπόλοιπη διάρκεια των τριών ωρών. Η θερμοκρασία ως συνάρτηση του χρόνου δίνεται από την εξίσωση:

$$T=20+1080(1-0,325e^{-0,167t}-0,675e^{-2,5t})$$
όπου $T[^\circ\text{C}]$ και $t[\text{min}]$
3. Τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM): Και αυτή η καμπύλη εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η πυρκαγιά προέρχεται από την καύση καύσιμων υλών. Σε αυτή την περίπτωση όμως, η θερμοκρασία μετά από 15 min φτάνει τους 1300 βαθμούς Κελσίου και η πυρκαγιά διατηρεί την θερμοκρασία της

καθόλη την υπόλοιπη διάρκεια των τριών ωρών. Η θερμοκρασία ως συνάρτηση του χρόνου δίνεται από την εξίσωση:

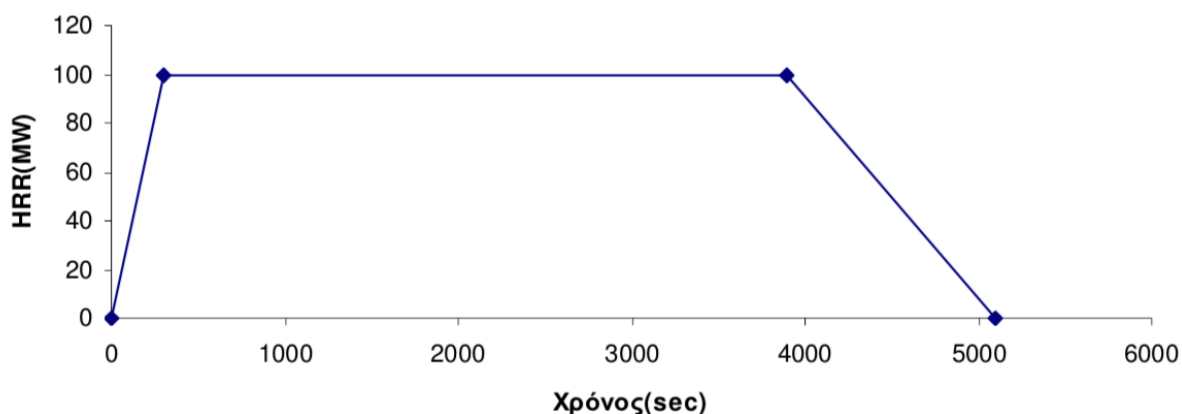
$$T=20+1280(1-0,325e^{-0,167t}-0,675e^{-2,5t})$$
 όπου $T[^\circ\text{C}]$ και $t[\text{min}]$

4. Καμπύλες RABT ZTV: Στις καμπύλες αυτές η θερμοκρασία αυξάνεται στους 1200 βαθμούς Κελσίου μετά από 5 min και αυτή την στιγμή φτάνει ταυτόχρονα στην μέγιστη θερμοκρασία της. Η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται στα 30 min για πυρκαγιά που εκτυλίσσεται σε αυτοκίνητο και στα 60 min για πυρκαγιά που εκτυλίσσεται σε τρένο. Είτε στην περίπτωση του αυτοκινήτου είτε σε αυτή του τρένου η διαδικασία της απόσβεσης της φωτιάς είναι 110 min.
5. Καμπύλη RWS: Η καμπύλη αυτή αφορά τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Αναπτύχθηκε από το ολλανδικό υπουργείο συγκοινωνιών και στηρίζεται στο σενάριο ότι η φωτιά προκαλείται από φορτηγό με 50 m³ πετρέλαιο. Σε αυτό το σενάριο, η ισχύς είναι 300 MW και διαρκεί 120 min. Η κατασκευή της καμπύλης στηρίζεται στα πειραματικά δεδομένα από την νορβηγική σήραγγα του Runehamar (Σακκάς 2010). Η ειδοποιός διαφορά της καμπύλης RWS είναι ότι η καμπύλη αυτή εκφράζει την πορεία της πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο κάτι που δεν ισχύει για τις υπόλοιπες καμπύλες επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι εφαρμόζεται και στην περίπτωση της σήραγγας. Η καμπύλη αυτή είναι η πιο απαιτητική καμπύλη από την άποψη των θερμικών φορτίων σχεδιασμού, όμως προσομοιώνει στον πιο ικανοποιητικό βαθμό την περίπτωση ατυχήματος φωτιάς σε οδική σήραγγα. Η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα στα πρώιμα στάδια της φωτιάς και αυτό είναι ένα στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά τις κινήσεις των ανθρώπων που προσπαθούν να διαφύγουν.

Κατά το ελληνικό πρότυπο, η Διοικητική Αρχή Σηράγγων έχει ορίσει μία τραπεζοειδή καμπύλη που δείχνει την πορεία της Ταχύτητας Έκλυσης Θερμότητας HRR (Heat Release Rate) ως προς τον χρόνο. Στην περίπτωση αυτή, ο HRR φτάνει στην μέγιστη τιμή του ο οποίος είναι 100 MW στα 300 sec , ξεκινάει να υποχωρεί στα 3900 sec και η πυρκαγιά διαρκεί για 5100 sec.

Η προτυποποίηση της φωτιάς εντός σήραγγας σύμφωνα με τις οδηγίες της Διοικητικής Αρχής Σηράγγων φαίνεται διαγραμματικά:

Σενάριο πυρκαγιάς - Καμπύλες HRR



Σχήμα 4: Καμπύλη Έκλυσης Θερμότητας

Πηγή : Ντζερεμές, 2012

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στις οδικές σήραγγες είναι πολύ υψηλές και ξεπερνάνε κατά πολύ τις θερμοκρασίες που αντέχει ένας μέσος οργανισμός. Πιο συγκεκριμένα, ο μέσος άνθρωπος αντέχει σε θερμοκρασίες της τάξεως των 60 βαθμών Κελσίου για 30 λεπτά. Αντίστοιχα, για θερμοκρασίες που ξεπερνάνε τους 100 βαθμούς Κελσίου μπορεί να αντέξει λιγότερο από 10 λεπτά ενώ αποδεδειγμένο είναι πως ο θερμός αέρας που αναπνέει σε τέτοιο περιβάλλον μπορεί να του τραυματίσει μοιραία το ζωτικό όργανο των πνευμόνων. Για θερμοκρασίες αέρα κάτω από 100 βαθμούς Κελσίου, η δυνατότητα επιβίωσης των ανθρώπων χωρίς να πάθουν ζημιά οι πνεύμονες είναι περίπου 5 λεπτά ενώ τέλος οι άνθρωποι μπορούν να αντιμετωπίσουν θερμοκρασίες άνω των 200 βαθμών Κελσίου για 30 δευτερόλεπτα το πολύ.

Συνοψίζοντας, οι πυρκαγιές που προκαλούνται μέσα σε οδικές σήραγγες οδηγούν στην δημιουργία τοξικών καπνών και θερμότητας τέτοιας που είναι επιβλαβής, επικίνδυνη για τον ανθρώπινο οργανισμό και δυσχεραίνει την προσπάθεια του για αποτελεσματική και άμεση πρόσβαση στα σημεία ασφαλής εξόδου από την σήραγγα.

2.2 Συμπεριφορά ανθρώπων

Για την καλύτερη μελέτη και επιλογή των μέτρων ασφαλείας που πρέπει να παρθούν ή να τροποποιηθούν σε περιπτώσεις φωτιάς σε οδικές σήραγγες πρώτιστο ρόλο έχει η μελέτη της συμπεριφοράς των ανθρώπων (οδηγών και συνεπιβατών) σε τέτοιες καταστάσεις.

Όπως και σε όλες τις μεθόδους ανάλυσης επικινδυνότητας, έτσι και στην περίπτωση αυτή, θα προσεγγιστεί το ζήτημα ολιστικά. Το σύστημα περιλαμβάνει:

- Χρήστες
- Οχήματα
- Εξοπλισμός
- Λειτουργίες



Σχήμα 5: Ολιστική προσέγγιση αποτίμησης επικινδυνότητας (WORLD ROAD ASSOCIATION)

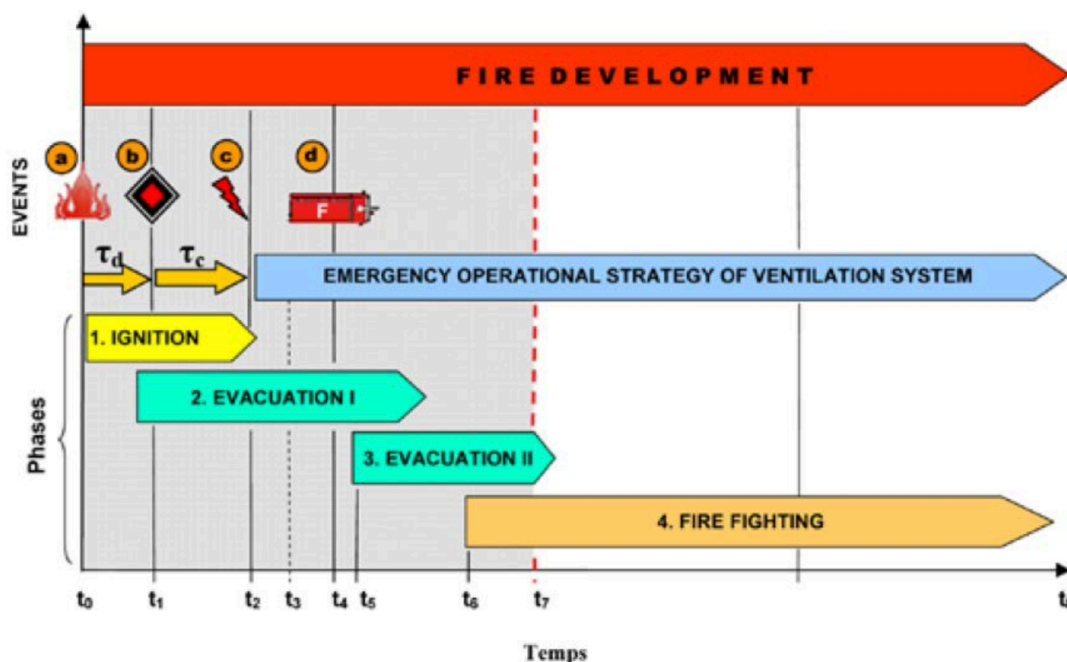
Σύμφωνα με την ολιστική προσέγγιση, κάθε στοιχείο του συστήματος πρέπει να εφαρμόζει μέτρα όχι μόνο ως οντότητα αλλά και ως μέλος ενός συστήματος που αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα μέλη του συστήματος. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η διάσωση ανθρώπινων ζωών επομένως σε αυτό το πνεύμα κινούνται και όλα τα υπό συζήτηση μέτρα.

Έρευνες έχουν δείξει ότι ένα κύριο πρόβλημα σε φαινόμενα φωτιάς σε οδικές σήραγγες είναι ότι οι άνθρωποι δεν ακολουθούν τις ενδεδειγμένες κινήσεις αυτό-διάσωσης τους (Amundsen 1994). Οι άνθρωποι, όπως έδειξαν και έρευνες στη Νορβηγία, την Σιγκαπούρη (Yeung et al. 2013) αλλά και την Ελλάδα, δρουν πολύ διαφορετικά από αυτό που έχει οριστεί ως η σωστή δράση ανά περίπτωση.

Πιο συγκεκριμένα, πρόσφατη έρευνα στην Ελλάδα (Kirytoroulos και λοιποί 2016) που έγινε σε 1129 οδηγούς, δείγμα αντιπροσωπευτικό της ελληνικής οδηγικής κοινότητας, έδειξε ότι σε περίπτωση που η έξοδος επικοινωνίας με τον υπόλοιπο δρόμο ήταν αποκλεισμένη από

κάποια φωτιά, μόνο το 58,1% των οδηγών απάντησε ορθά πως θα απομακρυνόταν από το όχημα του και θα κατευθυνόταν πεζός στην πλησιέστερη έξοδο κινδύνου. Επιπλέον, ακόμα και κατά την διαδικασία της απομάκρυνσης από το όχημα, οι οδηγοί καθυστέρησαν αισθητά προκειμένου να πάρουν μαζί τους τιμαλή. Επιπρόσθετα το 54,4% των ερωτηθέντων θεωρεί ότι η οδήγηση σε τούνελ απαιτεί τις ίδιες δράσεις με την οδήγηση σε ανοιχτό δρόμο. Συνήθως η συμπεριφορά των χρηστών, οι οποίοι νομίζουν ότι δεν κινδυνεύουν εξίσου όσο παραμένουν εντός του οχήματος τους, καθυστερεί δραματικά την διαδικασία της αυτό-διάσωσης τους και επιφέρει ολέθριες συνέπειες για την ζωή τους. Ακόμα και η απάντηση που δόθηκε από το 38,7% μόνο των ανθρώπων ότι θα έφευγαν γρήγορα από την σήραγγα αν διαπίστωναν ότι το κινούμενο όχημα τους έβγαζε καπνούς δείχνει ότι οι χρήστες έχουν βασικές ελλείψεις ενημέρωσης για τους σωστούς κανόνες οδήγησης σε τούνελ.

Με τον όρο αυτό-διάσωση αναφέρεται η διαδικασία κατά την οποία οι χρήστες μετά το κρίσιμο συμβάν απομακρύνονται με ίδια μέσα προς ασφαλές σημείο. Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ασφαλή πραγμάτωση της διαδικασίας της αυτό-διάσωσης από τους χρήστες ισούται με το άθροισμα του χρόνου συνειδητοποίησης της κατάστασης και του χρόνου πραγματοποίησης της απόστασης προς τον ασφαλή χώρο. Η εξέλιξη των γεγονότων που συμβαίνουν κατά την εξάπλωση φωτιάς σε σήραγγα φαίνονται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 6: Εξέλιξη δράσεων ως προς τον χρόνο σε περίπτωση φωτιάς

Πηγή: Μπακογιάννης, 2014

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει η κατάλληλη πληροφόρηση προς τους οδηγούς για τις ιδιαιτερότητες της οδήγησης σε οδική σήραγγα αλλά επίσης δεν υπάρχει

ενημέρωση για τις επιθυμητές δράσεις σε περίπτωση ατυχήματος εντός αυτών. Αυτά τα αποτελέσματα της έρευνας θα μας βοηθήσουν παρακάτω να ποσοτικοποιήσουμε ανάλογα τα βάρη και τις τιμές με βάση τις οποίες η μέθοδος ELECTRE θα υποδείξει τα μέτρα ασφαλείας.

Αξίζει να επισημανθεί, πως αν λάβουμε υπόψη ότι οι άνθρωποι επηρεάζονται σημαντικά από την συμπεριφορά των γύρω τους, τα μέτρα ασφαλείας που θα εξεταστούν αν επηρέαζαν έστω ένα ποσοστό των γύρω οδηγών, αυτό θα είχε θετικό αποτέλεσμα σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού του τούνελ. Η επιρροή που έχει η παρουσία άλλων ανθρώπων κατά την διαδικασία λήψης μιας απόφασης λέγεται κοινωνική επιρροή (social influence). Χωρίζεται στην κανονιστική και την πληροφοριακή επιρροή. Η κανονιστική επιρροή στην ουσία υποδηλώνει ότι οι άνθρωποι δρουν με βάση τις προσδοκίες που θέτουν οι άλλοι για αυτούς δηλαδή τους κανόνες με τους οποίους είναι επιφορτισμένοι. Η πληροφοριακή επιρροή δηλώνει ότι η δράση ή η μη δράση των γύρω ανθρώπων πάνω σε μία συνθήκη δημιουργεί ανάδραση στους ανθρώπους και επηρεάζει και την δική τους κρίση για την συνθήκη αυτή. Πειραματικοί έλεγχοι στην οδική σήραγγα στο Gota της Σουηδίας από τον Nilsson το 2009 επιβεβαίωσαν ότι οι συμπεριφορές των εμπλεκόμενων ανθρώπων την στιγμή της εκκένωσης επηρέαζαν σημαντικά την ατομική απόφαση για απομάκρυνση από τα εκάστοτε οχήματα. (Nilsson και λοιποί 2009)

Μία άλλη σημαντική διάκριση των χρηστών που επηρεάζει την συμπεριφορά τους και την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης αφορά την σχέση των χρηστών μεταξύ τους. Χωρίζονται στα αναπτυσσόμενα σύνολα (emerging groups) και στα ήδη υπάρχοντα σύνολα (established groups) όπως είναι η οικογένεια και οι φίλοι. Η συμπεριφορά μέσα στα αναπτυσσόμενα σύνολα είναι ιδιοτελής και μπορούν να συγκεντρωθούν ή να διασπαστούν τα μέλη εξίσου εύκολα. Από την άλλη, η φυσική αντίδραση των ήδη υπάρχοντων συνόλων είναι να παραμείνουν ενωμένα και να εξασφαλίσουν την ασφαλή διάσωση όλων των μελών. Αυτό έχει ως συνέπεια η ταχύτητα εκκένωσης τους να ισούται με την ταχύτητα του αργότερου μέλους του συνόλου.

Οι επιμέρους χρόνοι που παρατηρούνται κατά την φωτιά σε οδική σήραγγα είναι πολύ σημαντικοί καθώς μία μικρή μείωση σε κάθε έναν από αυτούς μπορεί να αποτελέσει την διαφορά στο τέλος ανάμεσα σε μία επιτυχή και μία ανεπιτυχή διαδικασία αυτοδιάσωσης. Συγκεκριμένα, οι καθοριστικοί χρόνοι και οι συνήθεις τιμές τους σύμφωνα με τον Ming-xuan Li είναι (Ming-xuan Li και λοιποί 2018):

- Χρόνος εντοπισμού του κρίσιμου γεγονότος από το σύστημα SCADA ή τον επόπτη της σήραγγας και μεταβίβασης της πληροφορίας στους ανθρώπους που βρίσκονται στα οχήματα: 2-5 λεπτά για σήραγγες για τις οποίες υπάρχει εξωτερική υποστήριξη από κέντρο ελέγχου

- Χρόνος συνειδητοποίησης της κατάστασης από τους χρήστες της σήραγγας και λήψη απόφασης για εγκατάλειψη του οχήματος και διαφυγή: 2-10 λεπτά. Αυτό εξαρτάται από τον τρόπο μεταβίβασης της πληροφορίας από το κέντρο ελέγχου και την άμεση αντίληψη και αποδοχή της κατάστασης που επικρατεί.
- Χρόνος εκκένωσης του οχήματος (από τη στιγμή που το άτομο λαμβάνει την απόφαση να αφήσει το όχημα και να κινηθεί): 0,5 – 5 λεπτά, με τις μεγάλες τιμές να αντιστοιχούν σε λεωφορεία και βαρεού τύπου οχήματα.

Οι παραπάνω χρόνοι έχουν διακύμανση καθώς υπάρχουν διάφορα εύρη χρηστών. Για παράδειγμα, πολλοί χρήστες αρνούνται να αποχωριστούν τα τιμαλφή τους και καθυστερούν να ξεκινήσουν την πορεία τους προς τις εξόδους κινδύνου. Από την έρευνα που μελετήθηκε προέκυψε ότι το 18% των ερωτηθέντων θεώρησε το όχημα τους ασφαλές μέρος και δεν ήταν διατεθειμένοι να αποχωρίσουν από αυτό αν δεν το ζήταγε το σύστημα ειδοποίησης. Αυτά τα ευρήματα είναι πολύ σημαντικά καθώς υποδηλώνουν την άγνοια των χρηστών για την αποτελεσματική πρακτική της αυτό-διάσωσης και υποχρεώνουν τους λήπτες των αποφάσεων για τα μέτρα ασφάλειας σε τέτοιες καταστάσεις να προχωράνε με το σκεπτικό ότι οι χρήστες χρειάζονται ισχυρή εξωτερική καθοδήγηση για να εκκενώσουν γρήγορα και με τον σωστό τρόπο μία σήραγγα.

Επιπρόσθετα, οι παραπάνω χρόνοι στηρίχτηκαν στην λογική ότι η μέση ταχύτητα βαδίσματος του ανθρώπου είναι 1 m/sec με καλή ορατότητα, 0,5 m/sec με μειωμένη ορατότητα και 0,3 m/sec χωρίς καθόλου ορατότητα από την παρουσία καπνού (Korhonen & Hostikka, 2010). Η ταχύτητα μπορεί να αυξηθεί μέχρι 1,5 m/sec εφόσον υπάρχουν επαρκώς φωτιζόμενα σήματα, φωτισμός της οδού διαφυγής και η ατμοσφαιρική κατάσταση δεν είναι αποπνικτική χάρη στην χρήση του συστήματος του μηχανικού αερισμού.

Όσον αφορά τα επίπεδα ορατότητας που απαιτούνται προκειμένου οι χρήστες να εκκενώσουν την σήραγγα σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς και οι εργαζόμενοι στα σωστικά συνεργεία να μπορούν να εισέλθουν στην σήραγγα, πρέπει η σήραγγα να είναι εφοδιασμένη με σύστημα φωτισμού που θα παρέχει τουλάχιστον ένα μέσο επίπεδο φωτισμού στα 10 lux και σε κανένα σημείο της σήραγγας δεν θα υπάρχει φωτεινότητα χαμηλότερη των 2 lux. Φωτεινότητα της τάξης των 140 lux θεωρείται ότι είναι άνετη για τους ανθρώπους και δεν τους αναγκάζει να προσπαθήσουν συνειδητά για να αντικρίσουν ένα αντικείμενο σε κανονικές συνθήκες και στις συνθήκες ατυχήματος αν δεν επιτευχθεί μέση φωτεινότητα τουλάχιστον πάνω από 10 lux τότε είναι αβέβαιο κατά πόσο θα μπορέσουν να δούνε γρήγορα την θέση της εξόδου κινδύνου, που είναι και η επιθυμητή δράση.

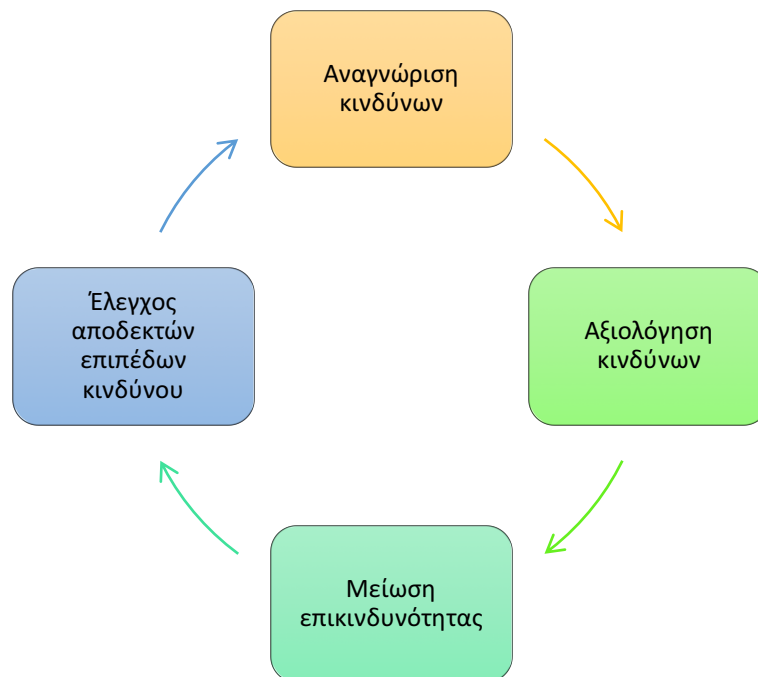
2.3 Γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης κινδύνου

Προκειμένου να γίνει η επιλογή των μέτρων ασφαλείας που θα εξεταστούν, πρέπει πρώτα ο υπεύθυνος ασφαλείας να διεξάγει αποτίμηση επικινδυνότητας (Risk assessment). Η διαδικασία αυτή έγκειται στην ευρύτερη κατηγορία της διαχείρισης κινδύνου (risk management) και αποτελείται από τα εξής 3 μέρη:

- **Ανάλυση επικινδυνότητας (risk analysis):** Η ανάλυση επικινδυνότητας είναι η διαδικασία που διευκολύνει τον αναλυτή στον εντοπισμό και την διαχείριση πιθανών προβλημάτων που θα υποσκάψουν την απρόσκοπτη λειτουργία του έργου, και στην περίπτωση μας την ομαλή αντιμετώπιση φωτιάς εντός σήραγγας εν ώρα λειτουργίας της. Ως επικινδυνότητα ορίζεται το γινόμενο της πιθανότητας εμφάνισης ενός κινδύνου επί τις συνέπειες που αυτός ο κίνδυνος θα επιφέρει. Η μέθοδος αυτή μπορεί να γίνει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Συνεισφέρει στην συστηματική ανάλυση των συνεπειών των ατυχημάτων, διακρίνει αδύναμα σημεία του σχεδιασμού του συστήματος και μέσω αυτών υποδεικνύει σε πρώτο στάδιο τα μέτρα που θα εξεταστούν για την επίλυση του προβλήματος ανάμεσα από τις εναλλακτικές λύσεις. Τονίζεται ότι στην επιλογή των μέτρων λαμβάνεται υπόψη η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας του κάθε μέτρου καθώς οικονομικά μη βιώσιμες λύσεις δεν αποτελούν πραγματική λύση στο πρόβλημα.
- **Αξιολόγηση επικινδυνότητας (risk evaluation) :** Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας είναι η διαδικασία που ακολουθεί την ανάλυση της επικινδυνότητας και σκοπό έχει να αξιολογήσει εφόσον οι επικινδυνότητες που έχουν ήδη υπολογιστεί, αν έγινε ποσοτική μελέτη, είναι εντός επιτρεπόμενων ορίων ή τα έχουν ξεπεράσει.
- **Μείωση επικινδυνότητας (risk reduction/risk treatment) :** Η μείωση επικινδυνότητας είναι η διαδικασία που ακολουθεί την αξιολόγηση επικινδυνότητας στην περίπτωση που διαπιστωθούν κίνδυνοι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων με σκοπό την λήψη μέτρων που θα μειώσουν τα επίπεδα επικινδυνότητας.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης επικινδυνότητας , πρέπει ο αναλυτής να υπολογίσει την συχνότητα που συμβαίνουν τα διάφορα σενάρια ανάλογα με την θέση τους σε σχέση με την σήραγγα. Για αυτό τον λόγο, η σήραγγα διαιρείται κατά μήκος σε ομοιογενή τμήματα. Το κριτήριο με το οποίο κατατάσσονται τα τμήματα δεν είναι πάντα σταθερό και η διάκριση μπορεί να γίνει ανάλογα με τα στοιχεία του δρόμου, τον κυκλοφοριακό φόρτο, τις λωρίδες που επιτρέπονται τα οχήματα που μεταφέρουν εύφλεκτα υλικά. Τα μέτρα ασφαλείας επιδιώκουν είτε να μειώσουν είτε την πιθανότητα να συμβεί ένας κίνδυνος είτε να περιορίσουν τις συνέπειες που επιφέρει η εκδήλωση του οποιουδήποτε κινδύνου προκειμένου να μειώσουν τελικά την επικινδυνότητα του κάθε ένα σεναρίου. Η διάκριση των μέτρων ασφαλείας γίνεται

σε προληπτικά και κατασταλτικά ανάλογα με την δράση τους πριν ή μετά την εκδήλωση του κινδύνου.



Σχήμα 7: Διαδικασία διαχείρισης κινδύνου

Η ανάλυση επικινδυνότητας έχει ήδη μελετηθεί επιστημονικά σε σενάριο με φωτιά σε οδική σήραγγα (Ντζερεμές 2012) επομένως τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη θα αποτελέσουν βάση για τις εναλλακτικές που θα εξεταστούν παρακάτω. Στην ουσία, στην συνέχεια της εργασίας θα μελετηθεί το τρίτο μέρος της αποτίμησης επικινδυνότητας, αυτό της μείωσης επικινδυνότητας για το σενάριο της εξάπλωσης φωτιάς σε σήραγγα σε λειτουργία με σκοπό να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο επίπεδο ασφάλειας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στοιχειοθέτηση της ανάλυσης επικινδυνότητας όπως αυτή ορίζεται στο νομοθετικό πλαίσιο της Ελλάδας σύμφωνα με το Προεδρικό Διάταγμα 230/2007. Σύμφωνα λοιπόν με το ΠΔ 230/2007, πρέπει να αιτιολογούνται επαρκώς τα εναλλακτικά μέτρα μίας σήραγγας τα οποία οφείλουν να παρέχουν ισοδύναμο επίπεδο ασφάλειας. Επίσης, στην ανάλυση επικινδυνότητας πρέπει να εξετάζεται η επίδραση των ιδιομορφιών της εκάστοτε σήραγγας, όπως η ύπαρξη έντονης κατά μήκος κλίσης ή η ύπαρξη λωρίδων μικρότερου του συνηθισμένου πλάτους.

Το ΠΔ 230/2007 ακόμα ορίζει να εξετάζονται στην ανάλυση επικινδυνότητας τα συστήματα αποχέτευσης και αερισμού αλλά και η ακριβής θέση των υπηρεσιών διάσωσης. Τέλος, ακόμα και η απόφαση για την δυνατότητα προσπέρασης των βαρέων οχημάτων σε σήραγγες που έχουν παραπάνω από μία λωρίδες ανά κατεύθυνση προϋποθέτει την διεξαγωγή ανάλυσης επικινδυνότητας.

3 Αξιολόγηση εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας

3.1 Επιλογή εξεταζόμενων μέτρων ασφαλείας

Από την ανάλυση επικινδυνότητας λοιπόν προκύπτουν οι 6 εξής εναλλακτικές, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν λύση τόσο αν εφαρμοστούν μεμονωμένα όσο και σε συνεργασία με άλλες εναλλακτικές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η απόδοση του κάθε μέτρου ασφαλείας ξεχωριστά. Οι μέθοδοι και οι τρόποι συνδυασμού των μέτρων αυτών είναι αντικείμενο μεταγενέστερου βήματος ανάλυσης. Οι 6 εναλλακτικές είναι λοιπόν :

1. Έξοδος κινδύνου: Ο καλός σχεδιασμός της σήραγγας μπορεί να μειώσει δραστικά τον κίνδυνο της απώλειας ανθρώπινων ζωών. Η σωστή τοποθέτηση της εξόδου κινδύνου μπορεί να μειώσει μέχρι και κατά 60% τον χρόνο εκκενώσεως της σήραγγας, κάτι που θα έχει ως αποτέλεσμα την προστασία των ανθρώπων
2. Μηχανικός αερισμός: Ο μηχανικός αερισμός λειτουργεί κατασταλτικά για την φωτιά σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης καθώς σταματάει για λίγο την παροχή οξυγόνου στο σύστημα, επομένως ελαττώνεται ο ρυθμός καύσης στην εστία της φωτιάς που απαιτεί οξυγόνο. Επιπλέον , μέσω των εναλλακτών ο μηχανικός αερισμός πετυχαίνει την απομάκρυνση των καπνών με σκοπό να μπορούν να απομακρυνθούν οι άνθρωποι από την σήραγγα με ασφάλεια.
3. Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου: Η ειδοποίηση από το κέντρο ελέγχου για την σωστή διαδικασία με την οποία θα εκκενωθεί η οδική σήραγγα είναι πολύ σημαντική καθώς επιτρέπει ακόμα και σε άτομα που δεν ξέρουν ποιες είναι οι επιθυμητές ενέργειες σε τέτοια περίπτωση, να ενημερωθούν για τις κινήσεις που θα κάνουν.
4. Σήμανση: Η σήμανση είτε σε μορφή ηλεκτρονικού πίνακα είτε σε μορφή συμβόλων δρα συμβουλευτικά για τους επιβάτες των οχημάτων, δεν μπορεί να τους απαγορέψει κάποια κίνηση όμως είναι μια σημαντική βοήθεια στην προσπάθεια των ανθρώπων να εκκενώσουν την σήραγγα όσο πιο γρήγορα γίνεται και με την μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια.
5. Φανάρι: Το φανάρι είναι ένας ακόμα τρόπος προσέλκυσης της προσοχής των οδηγών προκειμένου να σταματήσουν την οδήγηση τους και να περιμένουν μετά το επόμενο μήνυμα που θα τους παρουσιαστεί.
6. Μπάρες: Οι μπάρες όταν κρίνεται απαραίτητο είναι σε θέση να ανοιγοκλείνουν αυτόματα και να υποδεικνύουν την πορεία των οχημάτων. Πρόκειται για ένα βοηθητικό μέτρο που στοχεύει κυρίως στην ρύθμιση της κυκλοφορίας εν ώρα ατυχήματος.

Αξίζει να τονιστεί πως όλα τα προαναφερθέντα μέτρα βελτιώνουν την εσωτερική απόδοση της οδικής σήραγγας και από μόνα τους δεν μπορούν να αποτελέσουν λύση στο πρόβλημα της φωτιάς σε οδικές σήραγγες. Σκοπός είναι με την τροποποίηση των υπάρχοντων μέτρων και με την τοποθέτηση των νέων μέτρων ασφαλείας (μπάρες), το επίπεδο ασφαλείας να πηγαίνει στα επιθυμητά όρια. Όσο τεχνικά άρτιο και να είναι το σύστημα προστασίας των οδικών σήραγγων, η συμπεριφορά, οι δράσεις και η συνεργασία των ανθρώπων θα καθορίσουν το αποτέλεσμα της αυτό-διάσωσης των ανθρώπων.

Στόχος λοιπόν των παραπάνω μέτρων είναι ή να βελτιώσουν τις εξωτερικές συνθήκες κατά τις οποίες πραγματοποιείται η διαδικασία της αυτό-διάσωσης ή να καθοδηγήσουν τους ανθρώπους στην περάτωση αυτό-διάσωσης σύμφωνα με την πρότυπη διαδικασία ανά περίπτωση. Εξάλλου, η επικινδυνότητα ως οντότητα ορίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας να συμβεί ένας κίνδυνος επί την συνέπεια που θα επιφέρει αυτός ο κίνδυνος πρωτίστως στους χρήστες της σήραγγας και δευτερευόντως στα δομικά στοιχεία της σήραγγας ή στο περιβάλλον κ.λπ. Αφού λοιπόν η επικινδυνότητα επηρεάζεται από τις συνέπειες ενός κινδύνου, οι υπό μελέτη εναλλακτικές είναι σε θέση να μειώσουν την επικινδυνότητα του συστήματος επιδρώντας θετικά στις συνέπειες του κινδύνου.

Σημειώνεται τέλος ότι στα πιθανά ληφθέντα μέτρα δεν βρίσκονται τα σωστικά συνεργεία διότι στο σενάριο λειτουργίας μελετώνται τα εναλλακτικά μέτρα ασφαλείας ως προς την διαδικασία της αυτό-διάσωσης των χρηστών. Εξάλλου, πολλές φορές τα σωστικά συνεργεία καταφτάνουν στον χώρο της εστίας της φωτιάς όταν πλέον έχει περάσει ήδη υπερπολύτιμος χρόνος για τις ανθρώπινες ζωές.

3.2 Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών μέτρων ασφαλείας

Στα πλαίσια της της μετέπειτα επιλογής της κατάλληλης εναλλακτικής ή του συνδυασμού εναλλακτικών για το πρόβλημα της φωτιάς σε οδικές σήραγγες μέσω της μεθόδου ELECTRE που θα ακολουθήσει, οι 6 εναλλακτικές που παρουσιάστηκαν παραπάνω (έξοδος κινδύνου, μηχανικός αερισμός, ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου, σήμανση, φανάρι, μπάρες) θα αξιολογηθούν με ποσοτική εκτίμηση καταλληλότητας.

Η εν λόγω αξιολόγηση θα γίνει ως προς 5 βασικά κριτήρια, τα οποία είναι καθοριστικά για την επιτυχή εφαρμογή των εναλλακτικών. Πιο συγκεκριμένα:

- Χρόνος κατασκευής: Πρόκειται για τον χρόνο κατασκευής που απαιτείται για την υλοποίηση της εκάστοτε εναλλακτικής. Θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση των 6 υπό μελέτη εναλλακτικών και όχι ποσοτική. Θα δοθούν στοιχεία προκειμένου να μην περιοριστούν οι χρονικές αξιολογήσεις μόνο σε σήραγγα σε λειτουργία.

- **Κόστος κατασκευής:** Πρόκειται για το αναγκαίο αρχικό κόστος κατασκευής που απαιτείται προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή της κάθε εναλλακτικής. Η αξιολόγηση θα γίνει ποιοτικά και όχι αυστηρά οικονομικά. Θα δοθούν στοιχεία προκειμένου να μην περιοριστούν οι οικονομικές αξιολογήσεις μόνο σε σήραγγα σε λειτουργία και άρα σε τροποποιήσεις υπάρχουσων μέτρων αλλά και να γενικεύονται και σε νεοσύστατες σήραγγες.
- **Κόστος λειτουργίας:** Το κόστος λειτουργίας ως μέγεθος είναι ένα τελείως διαφορετικό μέγεθος από το κόστος κατασκευής. Αυτό το κριτήριο αξιολογεί τις εναλλακτικές ως προς τα λειτουργικά έξοδα της κάθε εναλλακτικής τόσο σε ομαλές συνθήκες όσο και σε κρίσιμες καταστάσεις εντός της οδικής σήραγγας. Στο κόστος λειτουργίας ανήκει και το κόστος συντήρησης των εξαρτημάτων της κάθε εναλλακτικής. Η αξιολόγηση θα στηριχτεί σε συγκεκριμένα οικονομικά παραδείγματα αλλά κατά κύριο λόγο θα είναι ποιοτική.
- **Αποδοτικότητα:** Η αποδοτικότητα αφορά την εσωτερική λειτουργία της κάθε εναλλακτικής. Στην ουσία δηλώνει την ικανότητα της εναλλακτικής να συμβάλει στην αυτό-διάσωση των χρηστών, χωρίς όμως να ελέγχεται η βιωσιμότητα του σεναρίου εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα.
- **Αποτελεσματικότητα:** Η αποτελεσματικότητα ως μέγεθος εκφράζει τον βαθμό στον οποίο η κάθε εναλλακτική πετυχαίνει τον στόχο της. Καλύπτει ως έννοια ακριβώς το κενό που εντοπίστηκε με το κριτήριο της αποδοτικότητας.

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια θα γίνει με βαθμολόγηση στο εύρος [1,10]. Η αξιολόγηση θα παίρνει συνεχείς τιμές στο πεδίο αυτό και τμηματοποιούνται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Πίνακας βαθμολόγησης εναλλακτικών ως προς κάθε κριτήριο

Εναλλακτικές	Κλίμακα του 10
Κακές	$\leq 2,5$
Μέτριες	≤ 5
Καλές	$\leq 7,5$
Εξαιρετικές	≤ 10

3.2.1 Αξιολόγηση της εξόδου κινδύνου

Κατά την ανάπτυξη φωτιάς εντός οδικής σήραγγας, άμεσο επακόλουθο είναι η προσπάθεια εκκένωσης της γρήγορα και αποτελεσματικά. Οι εξοδοί κινδύνου έχουν λοιπόν ως σκοπό την προστασία των ανθρώπων από την έκθεση τους εντός της σήραγγας στις δυσμενείς συνθήκες που επικρατούν σε συνθήκες ατυχήματος. Πρόκειται στην ουσία για χώρους διαφυγής που είναι ασφαλείς, αεριζόμενοι, προστατευμένοι με αντιπυρική κατασκευή, εφοδιασμένοι με τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης και πολλές φορές συνδέονται με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω ειδικά σχεδιασμένου αγωγού.



Σχήμα 8: Έξοδος κινδύνου

Πηγή: World Road Association (PIARC), 2008

Για να αξιολογηθούν οι εξοδοί κινδύνου, πρέπει να εξεταστεί πόσο καλά είναι σχεδιασμένες για να γίνουν ορατές από τους χρήστες κάτω από την μολυσμένη ατμόσφαιρα και τον πανικό που υπάρχει λόγω της φωτιάς. Μελέτες έχουν δείξει ότι η θέση των χρηστών στην οδική σήραγγα επηρέαζε καθοριστικά την απόφασή τους να κατευθυνθούν προς τις εξόδους κινδύνου (Kirytoroulos και λοιποί 2016). Για παράδειγμα, από τους συμμετέχοντες στις μελέτες αυτές φάνηκε ότι οι χρήστες που περπατούσαν από την πλευρά που ήταν η έξοδος κινδύνου είχαν πιο πολλές πιθανότητες να την χρησιμοποιήσουν σε σχέση με αυτούς που βρίσκονταν στην απέναντι πλευρά της εξόδου κινδύνου. Γίνεται λοιπόν σαφές πως έμφαση θα πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό σημάτων που θα οδηγούν και τους πεζούς από την απέναντι πλευρά από αυτή των σήραγγων να αντιλαμβάνονται αρχικά και να πείθονται στην συνέχεια να κατευθυνθούν προς την κοντινή έξοδο κινδύνου.

Η αναποτελεσματική χρήση των εξόδων κινδύνου αυξάνει τους χρόνους εκκένωσης και αυξάνει τον κίνδυνο σοβαρού ατυχήματος εντός της σήραγγας. Το πρόβλημα εντείνεται από την τάση των χρηστών να αναζητούν τις εξόδους με τις οποίες είναι πιο εξοικειωμένοι, δηλαδή τις εισόδους και τις εξόδους του τούνελ αντί για την έξοδο κινδύνου, ακόμα και αν οι χρήστες βρίσκονται στη μέση της σήραγγας. Ο δισταγμός αυτός των χρηστών καθιστά αναγκαίο τον σωστό σχεδιασμό της σήμανσης για τις εξόδους διαφυγής.

Προκειμένου να επισημαίνονται ευκρινώς και αποτελεσματικώς οι θέσεις των εξόδων διαφυγής κινδύνου στη σήραγγα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι εξής εγκαταστάσεις:

Φωτεινές πινακίδες σήμανσης της εγκάρσιας οδεύσεως διαφυγής. Τοποθετούνται δύο πινακίδων στην εγκάρσια όδευση, μία πάνω από την όδευση και μία σε ύψος ενός μέτρου από το πεζοδρόμιο, για να είναι ορατή τουλάχιστον η κάτω πινακίδα όδευσης σε περίπτωση ύπαρξης καπνού που καλύπτει την επάνω πινακίδα. Οι πινακίδες (εικονοσύμβολα) έχουν το ευρωπαϊκό σύμβολο σήμανσης εξόδων κινδύνου (σύμφωνα με EEC/92/58) για να μην περιορίζεται η κατανόηση τους στους ημεδαπείς χρήστες.

Αυτόνομα φωτιστικά ασφαλείας εντός της εγκάρσιας οδεύσεως διαφυγής.

Περιστρεφόμενοι φανοί (φάροι). Τοποθετούνται φάροι πράσινου χρώματος πάνω από την εγκάρσια έξοδο διαφυγής. Όπως έχει αποδειχθεί, οι φάροι προσελκύουν την προσοχή του κοινού και είναι ιδιαίτερα ορατοί ακόμη και μέσα σε καπνό. Η επιλογή πράσινου χρώματος σχετίζεται με την ευρωπαϊκή οδηγία (το πράσινο έχει συνδεθεί με την ασφάλεια στο υποσυνείδητο των ανθρώπων), αλλά και με μελέτες που έδειξαν ότι αποδίδει καλύτερα σε συνθήκες μειωμένης ορατότητας. Η ενεργοποίησή τους γίνεται από το διαχειριστή της σήραγγας μόνο σε περίπτωση ανάγκης εκκένωσης της.

Βάψιμο των πεζοδρομίων. Με βαφή κίτρινου χρώματος βάφεται το πεζοδρόμιο (π.χ. 5 μέτρα πριν και μετά), μπροστά από την έξοδο διαφυγής, σαν επιπρόσθετο μέτρο σήμανσεως όταν υπάρχει μεγάλη ποσότητα καπνού.

Πινακίδια πληροφόρησης απόστασης πλησιέστερων εξόδων διαφυγής. Τοποθετούνται δύο πινακίδες στα τοιχώματα της σήραγγας, ανά 25 μέτρα, σε ύψος ενός μέτρου πάνω από το πεζοδρόμιο, τα οποία με το εικονοσύμβολο της εξόδου κινδύνου και της απόστασης σε μέτρα, πληροφορούν τους χρήστες για τις δύο πλησιέστερες εξόδους διαφυγής (σύμφωνα με EEC/92/58).

Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED). Οι δίοδοι εκπομπής φωτός LED βρίσκονται συνήθως σε ύψος ενός μέτρου πάνω από το πεζοδρόμιο φωτεινών οριοδεικτών, ανά 25 μέτρα. Οι φωτεινοί αυτοί οριοδείκτες είναι συνεχώς αναμμένοι και βοηθούν όχι μόνο σε περίπτωση

καπνού εντός της σήραγγας, αλλά και κατά την οδήγηση καθώς είναι ευκρινώς διακριτά τα όρια της σήραγγας, ειδικά όταν μετά από κάποιο διάστημα λειτουργίας τα τοιχώματα έχουν μαυρίσει.

Φωτιστικά τύπου LED για τη σήμανση της εγκάρσιας οδεύσεως διαφυγής. Φωτιστικά σώματα πράσινου χρώματος τύπου LED υπάρχουν στις πλευρές της εισόδου της εγκάρσιας όδευσης διαφυγής . Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης τα φωτιστικά αναβοσβήνουν με μια συχνότητα μεταξύ 0,5Hz και 5Hz για να τραβήξουν την προσοχή των πεζών (σύμφωνα με το πρότυπο EN 16276:2013).

Ακόμα και να γνωρίζουν οι χρήστες για τις εξόδους κινδύνου, τείνουν να μην τις χρησιμοποιούν όλοι γιατί δεν έχουν εξοικείωση με αυτές (Gandit και λοιποί 2009). Αυτό επιβεβαιώνεται και από αναφορές ατυχημάτων (Fridolf και λοιποί 2011). Επομένως, ο δισταγμός των χρηστών ως προς τις εξόδους κινδύνου είναι κάτι που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Είναι μία αποδοτική λύση που γλυτώνει τους χρήστες από την έκθεση σε περιβάλλον με καπνούς και μεγάλη θερμότητα.

Ο χρόνος και το κόστος κατασκευής εξαρτάται από το αν πρόκειται για αναβάθμιση των υπάρχουσών εξόδων κινδύνου ή αν πρόκειται για κατασκευή από την αρχή της εξόδου. Θα θεωρηθεί ότι για την σήραγγα που θα μελετήσουμε με την μέθοδο ELECTRE παρακάτω, υπάρχει η υποδομή για την έξοδο κινδύνου και γίνονται βελτιώσεις στη σήμανση της οδού διαφυγής. Το κόστος λειτουργίας της εξόδου κινδύνου είναι πολύ μικρό καθώς απαιτεί την παροχή ρεύματος και αυξάνεται σε μικρά πάλι πλαίσια στις κρίσιμες καταστάσεις. Ως προς το κόστος προληπτικής συντήρησης που υπάγεται στο κόστος λειτουργίας αναφέρεται ότι χρειάζεται καθαρισμός των ειδικά σχεδιασμένων θυρών (fire resistant doors) και των οδεύσεων διαφυγής κάθε 3 μήνες (Παπαδημητρίου 2014). Όμως και πάλι, πρόκειται για ένα κόστος ασήμαντο σε σχέση με τα οφέλη που προσφέρει η ασφαλής διάσωση των ανθρώπων.

Ενδεικτικά ,όμως, παραθέτεται ότι η μορφολογία της γης στην Ελλάδα είναι τέτοια που δυσχεραίνει τις διαδικασίες εκσκαφής και διάτρησης επομένως αν στόχος ήταν η δημιουργία εκ του μηδενός εξόδου κινδύνου, θα απαιτούνταν γύρω στα 18.000 € ανά μέτρο προσχώρησης σύμφωνα με το ενδεικτικό εγχειρίδιο της Εγνατίας Οδού. Με δεδομένο επίσης ότι μία μέση τιμή της διατομής της εξόδου ασφαλείας είναι 25 m², προκύπτει το κόστος στα 2.750 € ανά μέτρο προσχώρησης. Δεν πρόκειται για ασήμαντο κόστος, όμως στην διαδικασία της αξιολόγησης πρέπει να παραμένει απόλυτη προτεραιότητα η διάσωση όσο περισσότερων χρηστών γίνεται.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση της εξόδου κινδύνου ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

Πίνακας 2: Αξιολόγηση εξόδου κινδύνου

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Έξοδος κινδύνου	2	3	9	8	5

3.2.2 Αξιολόγηση του μηχανικού αερισμού

Μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες για την διαδικασία της αυτό-διάσωσης αλλά και την μετέπειτα αντιμετώπιση της φωτιάς είναι η απομάκρυνση από την οδική σήραγγα του περισσότερου δυνατού καπνού αλλά και η αποβολή μέρους της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, τόσο προς όφελος των χρηστών όσο και για την διευκόλυνση των πυροσβεστικών υπηρεσιών. Αν η οδική σήραγγα είναι απαλλαγμένη από καπνούς, η ταχύτητα μετακίνησης στο σημείο της φωτιάς αυξάνεται για τα σωστικά συνεργεία και η διάσωση έχει περισσότερες πιθανότητες επιτυχίας. Αντίστοιχα, αν το ύψος της έκθεσης των πυροσβεστών στη θερμότητα μειωθεί, ο χρόνος που δύνανται να αντιμετωπίσουν την φωτιά και να βοηθήσουν τους χρήστες παρατείνεται.

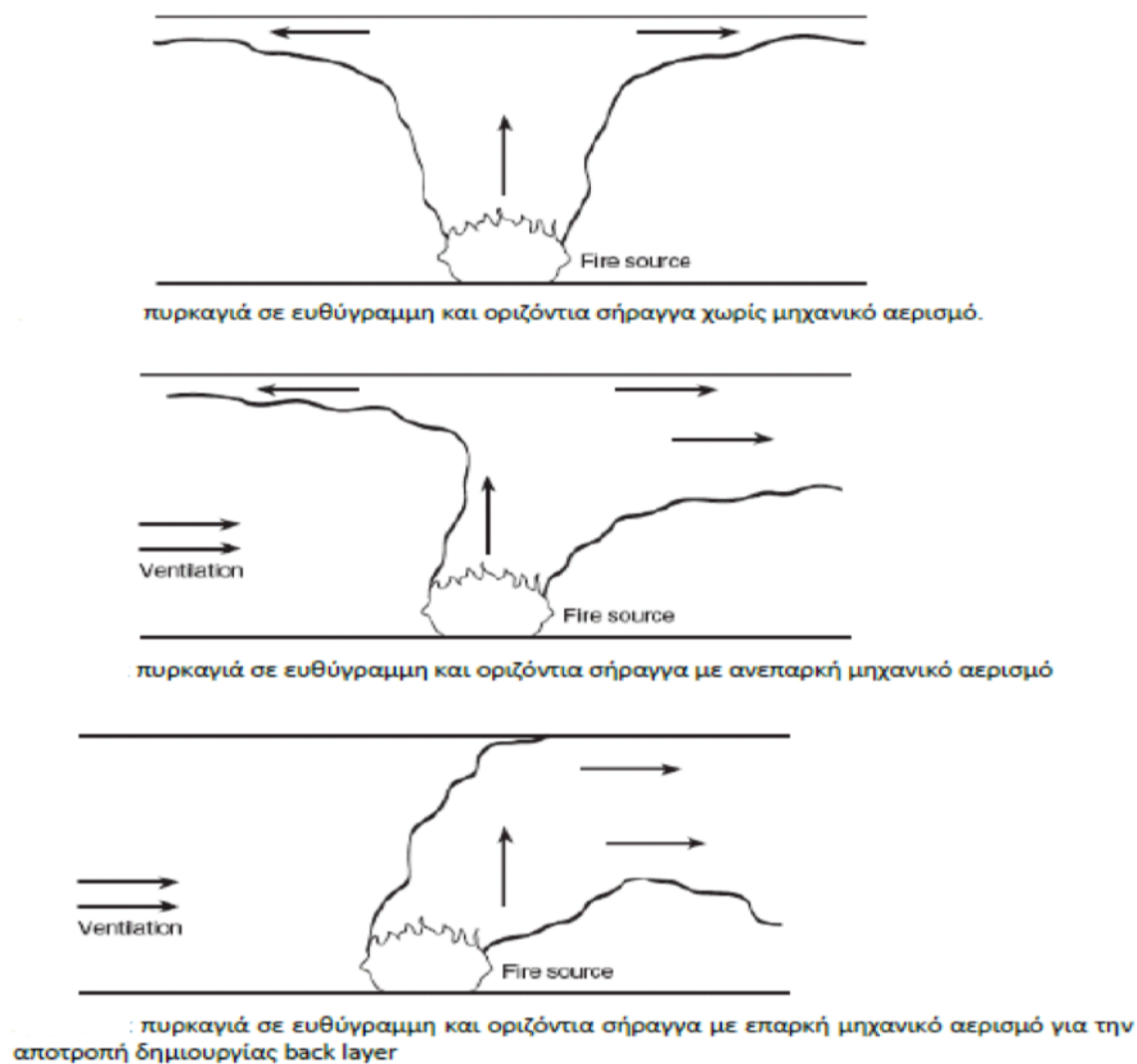
Για αυτό τον σκοπό, η χρήση αερισμού είναι απαραίτητη σε καταστάσεις φωτιάς εντός μίας οδικής σήραγγας. Υπάρχουν 2 κύριες κατηγορίες αερισμών, ο φυσικός αερισμός και ο μηχανικός αερισμός.

Πιο συγκεκριμένα, ο φυσικός αερισμός χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρές σήραγγες, ενώ ο μηχανικός αερισμός απαιτείται σε μεγαλύτερες σήραγγες. Η διάκριση ανάμεσα σε μικρές και μεγάλες σήραγγες είναι ασαφής και δεν ορίζεται από κάποιον κανονισμό επομένως ο καλύτερος τρόπος για να γίνει αντιληπτό πότε τοποθετείται φυσικός αερισμός και πότε μηχανικός αερισμός είναι μέσω των οδηγιών που έχουν δωθεί στην κάθε χώρα από τους αρμόδιους φορείς. Στην Γερμανία, για παράδειγμα, μηχανικός αερισμός ζητείται σε σήραγγες με μήκος άνω των 700m ενώ στην Μεγάλη Βρετανία μπορεί να λειτουργεί σήραγγα έως 400m χωρίς μηχανική υποστήριξη αν δικαιολογείται αυτό από την αρχική τεχνική μελέτη.

Η επιλογή ανάμεσα σε φυσικό και μηχανικό αερισμό εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του τούνελ. Για παράδειγμα, οδική σήραγγα μήκους 1km με κλίση 10% μπορεί να προκαλέσει φυσική ροή (0,5 lkm/s) ως αποτέλεσμα της διαφοράς στατικής πίεσης στις οπές (bores) της σήραγγας. Πρόκειται στην ουσία για το φαινόμενο πιστονιού, όπου οι ροές αυτές παράγονται από την κίνηση των οχημάτων και εξαρτάται το μέτρο τους από την συχνότητα διέλευσης των οχημάτων, την ταχύτητα τους, την διατομή της κλπ. Η ανάγκη να

καθοριστούν τα κριτήρια εξαερισμού έκτακτης ανάγκης με βάση τα επιμέρους φυσικά χαρακτηριστικά της σήραγγας επιβεβαιώθηκε επιστημονικά από τις πολλαπλές δοκιμές στο πρόγραμμα δοκιμών MTFVTP εξαερισμού στη σήραγγα Memorial της Δυτικής Βιρτζίνια από το 1993 μέχρι το 1995.

Σε περίπτωση που τα χαρακτηριστικά της οδικής σήραγγας απαιτούν την εγκαθίδρυση μηχανικού αερισμού, η τοπική απαγωγή του καπνού από την εστία της φωτιάς είναι η βέλτιστη λύση αφού έτσι αντιμετωπίζεται η απώλεια ορατότητας στην διαδικασία της εκκένωσης. Αυτό διευκολύνει τους χρήστες να κατευθυνθούν πιο γρήγορα και με περισσότερη ασφάλεια στις εξόδους διαφυγής ενώ επιτρέπει στα σωστικά συνεργεία να κινηθούν στον χώρο με μόνο περιορισμό την αυξημένη ακτινοβολούμενη θερμότητα.

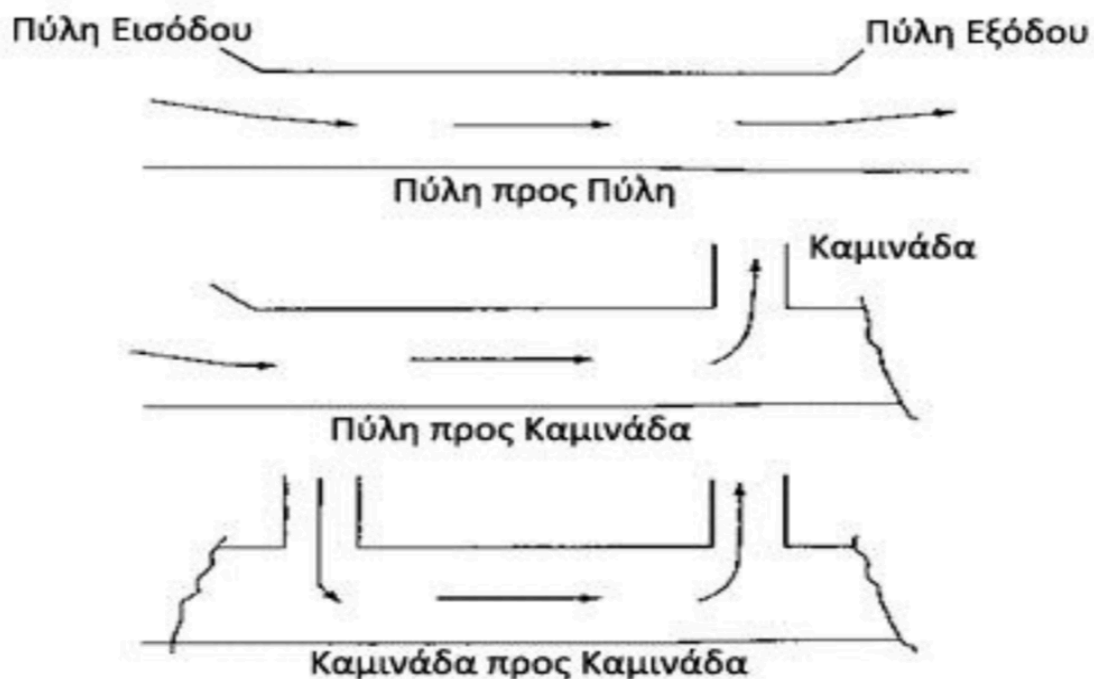


Σχήμα 9: Πυρκαγιά με/χωρίς μηχανικό αερισμό

Πηγή: Ευσταθίου, 2013

Ο αερισμός γενικότερα διακρίνεται στις 3 βασικές κατηγορίες: διαμήκης σύστημα αερισμού, ημιεγκάρσιο σύστημα αερισμού και εγκάρσιο σύστημα αερισμού. Αυτές οι 3 κατηγορίες διακρίνονται και στον μηχανικό αερισμό ειδικότερα.

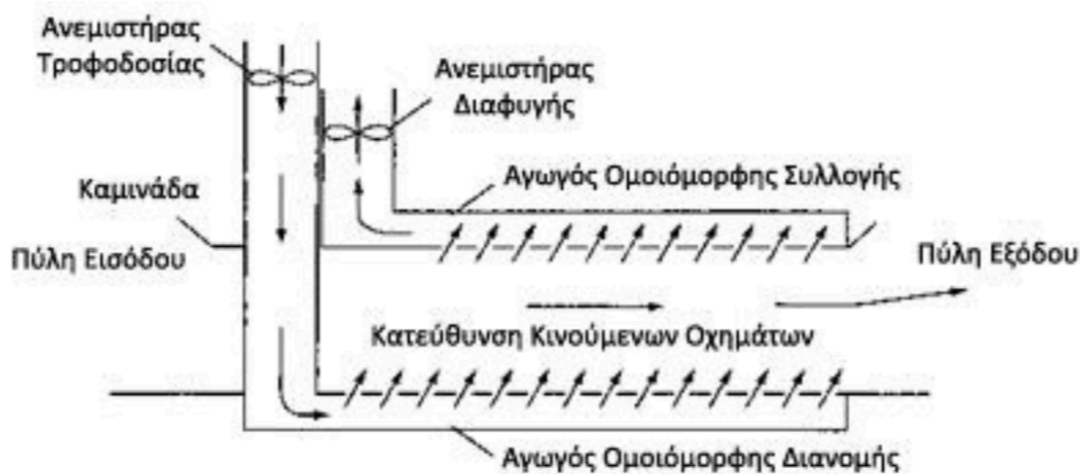
Πιο συγκεκριμένα, στον διαμήκη αερισμό η ροή του αέρα είναι διαμήκης μέσα στη σήραγγα και ουσιαστικά μετακινεί μαζί του τους ρύπους, τα θερμαινόμενα αέρια και τον νέο εισερχόμενο αέρα παρέχοντας φρέσκο αέρα στο σημείο της σήραγγας που απαιτείται. Επίσης αποβάλλει τον μολυσμένο αέρα σε θυρίδα της σήραγγας ή τον μεταφέρει έξω από το τέλος αυτής. Ο διαμήκης αερισμός διαμορφώνεται είτε πύλη προς πύλη (bore to bore), είτε πύλη προς καμινάδα, είτε καμινάδα προς πύλη. Το διαμήκης σύστημα αερισμού συναντάται κυρίως σε υπόγειες σήραγγες μετρό και σιδηροδρομικές σήραγγες, όμως μπορεί να εφαρμοστεί και σε οδικές σήραγγες άμα είναι δύσκολη η τοποθέτηση εγκάρσιου συστήματος αερισμού. Στην σήραγγα του σεναρίου που θα αναλυθεί στην συνέχεια, το σύστημα αερισμού είναι διαμήκης.



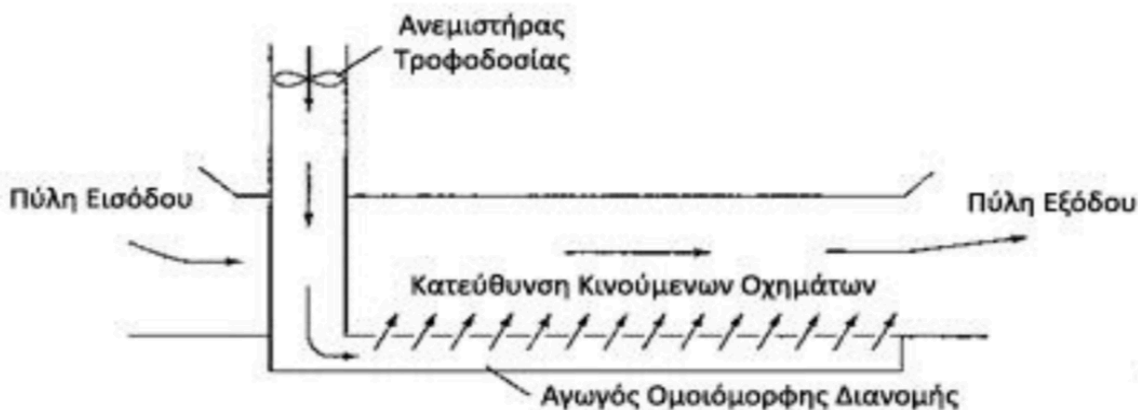
Σχήμα 10: Διαμήκης αερισμός

Πηγή: Ευσταθίου, 2013

Όσον αφορά τον εγκάρσιο αερισμό, η εγκάρσια ροή του αέρα δημιουργείται μέσω της ομοιόμορφης κατανομής του αέρα και της ομοιόμορφης συγκέντρωσης του καιόμενου αέρα. Αυτή η μορφή αερισμού συναντάται κυρίως στις οδικές σήραγγες ενώ η υλοποίηση του εγκάρσιου αερισμού μπορεί να χωριστεί σε πλήρως εγκάρσιο αερισμό και ημι-εγκάρσιο αερισμό.



Σχήμα 11: Πλήρως εγκάρσιος αερισμός



Σχήμα 12: Ημι-εγκάρσιος αερισμός

Πηγή: Ευσταθίου, 2013

Έμφαση θα δοθεί στα συστήματα μηχανικού αερισμού καθώς αργότερα θα γίνει μελέτη περίπτωσης για σήραγγα μεγάλου μήκους. Τα διαμήκη συστήματα είναι αποτελεσματικά όταν η εστία της φωτιάς είναι κοντά στον ανεμιστήρα. Είναι τέτοια η λειτουργία τους διαμήκους συστήματος εξαερισμού που ο χώρος διακίνησης είναι παράλληλα και ο αγωγός εξαερισμού. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν υπάρχει ανάγκη για ξεχωριστή οπή εξαερισμού ούτε για μεγάλη αύξηση της οπής κίνησης. Οι απαιτούμενοι ανεμιστήρες τοποθετούνται σε φρέατα έξω από την σήραγγα ή μικρότεροι ανεμιστήρες με μικρή διάμετρο τύπου jet τοποθετούνται και εντός σήραγγας στην οροφή με ίση απόσταση μεταξύ τους. Στον διαμήκη μηχανικό αερισμό γίνεται να παρέχεται καθαρός αέρας πριν την εστία της φωτιάς, που θα κατευθύνει τον καπνό, δημιουργώντας ένα καθαρό πεδίο

δράσης για τους χρήστες και για τα σωστικά συνεργεία, όπως προτάθηκε από τους Fuller, Eisner και Smith.

Στα πλήρως εγκάρσια συστήματα, η παροχή φρέσκου αέρα αλλά και η απομάκρυνση του υπάρχοντα αέρα μέσα στην σήραγγα γίνεται κατά μήκος όλης της σήραγγας με ένα σύστημα από 2 διαφορετικούς θαλάμους που βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές της σήραγγας (συνήθως πάνω και κάτω από την επιφάνεια των οχημάτων). Τα ρεύματα εισροής φρέσκου αέρα και εκροής του υπάρχοντα αέρα δημιουργούν μία ροή στο χώρο κίνησης, κάθετη προς το διαμήκη άξονα της σήραγγας.

Τα ημι-εγκάρσια συστήματα έχουν λειτουργία παρόμοια με τα εγκάρσια συστήματα με βασική διαφορά ότι δεν έχουν ειδικό συλλέκτη καυσαερίων. Όπου είναι δυνατή η αντιστροφή της ροής, τα ημι-εγκάρσια συστήματα δύνανται να παρέχουν τον φρέσκο αέρα που περιβάλλει τις οπές της σήραγγας και να απομακρύνουν τον μολυσμένο αέρα κατά μήκος της σήραγγας.

Ένα πρόβλημα που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού είναι πως η άνωση έχει την τάση να προκαλέσει στο ρεύμα του καπνού κίνηση αντίθετη από την ροή του εξαερισμού. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως *back-layering* και αντιμετωπίζεται με την παροχή μικρής μέσης διαμήκους ταχύτητας του αέρα στον χώρο κίνησης, που ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα.

Τα οφέλη από την χρήση μηχανικού αερισμού είναι πολλαπλά και έχουν αναφερθεί ενδελεχώς παραπάνω. Όμως, σημαντικό είναι να επισημανθεί πως ελλοχεύουν και κίνδυνοι από την μη ορθή λειτουργία του μηχανικού αερισμού. Η παροχή υψηλών ταχυτήτων αέρα επομένως η παροχή επιπλέον οξυγόνου μπορεί να αναζοπυρώσει την φωτιά (Carvel 2017). Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ατυχήματος στη σήραγγα στο Mont Blanc όπου ο ημι-εγκάρσιος αερισμός της σήραγγας αναζοπύρωσε την φωτιά αντί να την καταστείλει (Lacroix 2001).

Συνοψίζοντας, ο μηχανικός αερισμός είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για την αντιμετώπιση της φωτιάς εντός οδικής σήραγγας αφού με σωστή χρήση απομακρύνει τον καπνό και μειώνει τα επίπεδα θερμότητας. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς δεν στηρίζεται στην αλληλεπίδραση με τους χρήστες αφού δρα αυτόνομα και επικουρικά.

Ο χρόνος κατασκευής ενός συστήματος μηχανικού αερισμού διαφέρει ανάλογα με την υποδομή που υπάρχει ήδη στην σήραγγα. Κυμαίνεται από 3 βδομάδες για αναβάθμιση ενός υπάρχοντος συστήματος μέχρι 2 μήνες για δημιουργία του συστήματος από το μηδέν. Ως προς τα κόστη λειτουργίας και κατασκευής, το κόστος λειτουργίας είναι αρκετά μικρό στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας της οδικής σήραγγας και αυξάνεται λίγο (παραμένοντας σε χαμηλά πλαίσια) στις κρίσιμες συνθήκες.

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής, εξαρτάται άμεσα από το μήκος της σήραγγας, το επίπεδο ασφάλειας που θέλει να επιτευχθεί και την τεχνολογία του εξαερισμού. Πιο

συγκεκριμένα, δεδομένα από προμελέτη που πραγματοποιήθηκε για οδική σήραγγα στην Στερεά Ελλάδα μήκους 2,2 km υποδεικνύουν ένα κόστος κατασκευής του συστήματος ημι-εγκάρσιου αερισμού στα 1.104.500 € . Με αναγωγή λοιπόν προκύπτει ότι ένα μέσο κόστος ημι-εγκάρσιου αερισμού κυμαίνεται στα 502,05 €/m της σήραγγας. Από εμπειρικές παρατηρήσεις, το κόστος κατασκευής εγκάρσιου συστήματος αερισμού κυμαίνεται περίπου στα 602,4 €/m της σήραγγας ενώ το κόστος κατασκευής διαμήκους συστήματος αερισμού κυμαίνεται στα 401,6 €/m της σήραγγας. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί πως οι κυριότερες πηγές κόστους του συστήματος μηχανικού αερισμού είναι η τοποθέτηση των ανεμιστήρων σήραγγας συμπεριλαμβανομένου του ρυθμιστή συχνότητας όπου η τιμή μονάδας βρίσκεται στις 85.000 € και η εγκαθίδρυση των αισθητήρων CO, NOx και των αισθητήρων ορατότητας όπου η τιμή μονάδας εντοπίζεται στα 25.000 €.

Σχετικά με το κόστος τακτικής συντήρησης που υπάγεται στο κόστος λειτουργίας αναφέρεται ότι το σύστημα του μηχανικού αερισμού δέχεται την βασική του συντήρηση στα 5 έως 7 χρόνια λειτουργίας. Επίσης, κάθε 6 μήνες συνηθίζεται να γίνεται η λίπανση των εξαρτημάτων και ο γενικός έλεγχος λειτουργικότητας (Παπαδημητρίου 2014).

Όμως, δεν γίνεται αυστηρή ποσοτική σύγκριση στα κόστη κατασκευής και λειτουργίας γιατί δεν υπάρχει κλιμακοποίηση 'χαμηλού' και 'υψηλού' κόστους όταν στην εξίσωση μπαίνει η ανθρώπινη ζωή. Αυτή η λογική θα υπάρξει και στην ανάλυση των υπολοίπων εναλλακτικών μιάς και τα κόστη θα εκτιμώνται συγκριτικά ως προς τις άλλες εξεταζόμενες εναλλακτικές, όχι πάντα με αυστηρά οικονομικά κριτήρια , εφόσον προφανώς δεν υπερβαίνουν τα όρια που διαθέτει μία μέση κοινωνία για την ασφάλεια των πολιτών της.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση του μηχανικού αερισμού ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

Πίνακας 3: Αξιολόγηση μηχανικού αερισμού

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Μηχανικός αερισμός	5	3	6	9	9

3.2.3 Αξιολόγηση του συστήματος ειδοποίησης

Η άγνοια των χρηστών για τις ορθές πρακτικές της αυτό-διάσωσης καθιστά αναγκαίο μέτρο την εξωτερική τους βοήθεια μέσω ηχείων. Ο υπεύθυνος που βρίσκεται στο κέντρο ελέγχου της οδικής σήραγγας παρατηρεί τα χαρακτηριστικά του προβλήματος της φωτιάς

αλλά και τις αντιδράσεις των χρηστών και τους κατευθύνει από τα μεγάφωνα προς την σωστή δράση.

Ουσιαστικά, ο υπεύθυνος για την ασφάλεια της σήραγγας χρησιμοποιεί ένα σύστημα παρακολούθησης της κυκλοφορίας που συνεργάζεται με το σύστημα SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - Εποπτικός Έλεγχος Και Ανάκτηση Δεδομένων) και CCTV και θα εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

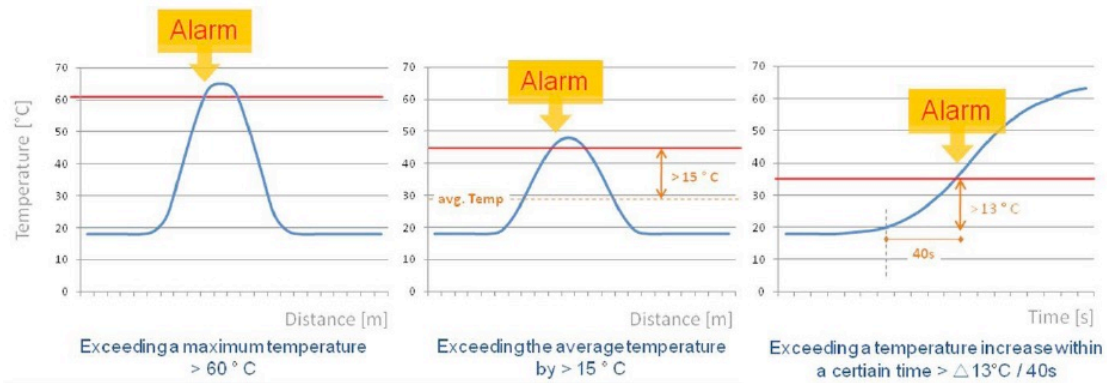
- Μέτρηση κυκλοφορίας οχημάτων
- Επιτήρηση ταχύτητας των οχημάτων
- Ανίχνευση σταματημένων οχημάτων.

Το σύστημα παρακολούθησης επικοινωνεί με το σύστημα CCTV μέσω του συστήματος ελέγχου (SCADA) ώστε να ενεργοποιούνται οι κάμερες για λήψεις φωτογραφιών μόλις ανιχνευθεί εντός της σήραγγας σταματημένο ή αργά κινούμενο όχημα.

Τα συστήματα επεξεργασίας εικόνας CCTV θεωρούνται ως συμπληρωματικά μέσα ανίχνευσης σε ένα εξελιγμένο σύστημα συναγερμού πυρκαγιάς, το οποίο συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα. Η πλειοψηφία των οδικών σηράγγων διαθέτει κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης CCTV. Φροντίζεται να καλύπτεται όλο το μήκος της σήραγγας χωρίς όμως να καταγράφεται συνεχώς κάθε σημείο της σήραγγας, αλλά τα συμβάντα που ενδιαφέρουν και ενδέχεται να ανησυχήσουν τον χειριστή. Τότε, μέσω ενός συστήματος SCADA προειδοποιείται ο επόπτης της σήραγγας.

Επιπρόσθετα, το σύστημα παρακολούθησης και κατά συνέπεια ειδοποίησης της σήραγγας συνεργάζεται με το σύστημα πυρανίχνευσης. Η πυρανίχνευση στην σήραγγα βασίζεται στην συνεχή επιτήρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε όλο το μήκος αυτής. Η λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω ενός γραμμικού αισθητήρα θερμοκρασίας τύπου καλωδίου αποτελούμενου από ένα ζεύγος οπτικών ινών. Το καλώδιο διαθέτει μανδύα ανθεκτικό στην φωτιά (flame-retardant / halogen free) για να είναι προστατευμένο σε περίπτωση ατυχήματος. Η λειτουργία του συστήματος (σύμφωνα με τα παρακάτω διαγράμματα) στηρίζεται :

1. Στην υπέρβαση της μέγιστης θερμοκρασίας (δίδεται alarm όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει μία μέγιστη τιμή για έναν προκαθορισμένο χρόνο)
2. Στη ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας (δίδεται alarm όταν η μεταβολή της θερμοκρασίας σε μικρό χρονικό διάστημα υπερβεί μία προκαθορισμένη τιμή)
3. Στην υπέρβαση της τιμής της θερμοκρασίας πάνω από τον μέσο όρο θερμοκρασίας

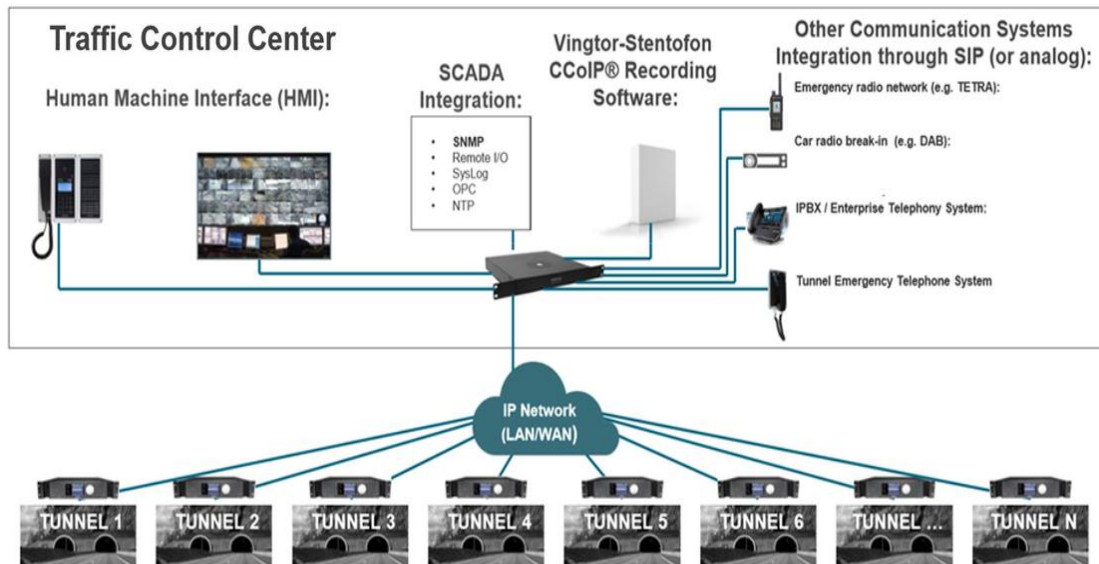


Σχήμα 13: Λειτουργία ενδεικτικού συστήματος πυρανίχνευσης

Πηγή: Φυλλάδιο εταιρίας

Το σύστημα πυρανίχνευσης περιλαμβάνει τους γραμμικούς αισθητήρες θερμοκρασίας, τα καλώδια σύνδεσης των αισθητήρων μεταξύ τους και με Πίνακα Ελέγχου που τοποθετείται εντός του κτηρίου εξυπηρέτησης σήραγγας. Εφόσον υπάρξει μία από τις 3 καταστάσεις που συζητήθηκαν παραπάνω, το σύστημα πυρανίχνευσης ενημερώνει τον υπεύθυνο του κτηρίου εξυπηρέτησης σήραγγας μέσω ενός συστήματος SCADA.

Με αυτά τα βήματα, ενημερώνεται ο επόπτης της σήραγγας του οποίου κύριο μέλημα είναι μετά να καθοδηγήσει τους χρήστες της σήραγγας για το επόμενο τους βήμα προς την αυτό-διάσωση.



Σχήμα 14: Σύστημα ειδοποίησης κινδύνου σε οδική σήραγγα

Πηγή: Zenitel, 2018

Σε καταστάσεις φωτιάς, οι άνθρωποι είναι επιρρεπείς στο να κάνουν αναστροφές με τα οχήματα τους στην θέα της φωτιάς, να οδηγούν με την όπισθεν και να προσπαθούν να προσπεράσουν τα φλεγόμενα οχήματα (Kirytoroulos και λοιποί 2016). Είναι πολύ σημαντικό να ενημερωθούν οι χρήστες από τα μεγάφωνα της σήραγγας πώς τέτοιες κινήσεις είναι εσφαλμένες.

Επίσης, η αυτό-διάσωση για να είναι επιτυχής πρέπει οι χρήστες να μην καταναλώνουν άσκοπο χρόνο για να παίρνουν μαζί τους τα τιμαλφή τους προϊόντα κατά την εγκατάλειψη των οχημάτων. Ένα άλλο δείγμα που υποδηλώνει ότι ένα σύστημα ειδοποίησης είναι απαραίτητο για την καθοδήγηση των χρηστών είναι ότι έρευνα (Kirytoroulos και λοιποί 2016) έδειξε πως το 18% όσων απάντησαν θεώρησαν πως η παραμονή εντός του οχήματος τους σε περίπτωση φωτιάς συνιστά ένα ασφαλές καταφύγιο, κάτι που είναι εντελώς αντίθετο με τους κανόνες ασφαλείας που έχουν υιοθετηθεί για τέτοιες καταστάσεις.

Αυτός ο δισταγμός και η παθητικότητα των χρηστών να δράσουν άμεσα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση των μεγαφώνων. Μελέτη της ομάδας Boer & Veldhuijzen van Zanten [2005] έδειξε χαρακτηριστικά πως μόνο το 18% των οδηγών εγκατέλειψε το όχημα του πριν από την εντολή αυτή του επόπτη του συστήματος ειδοποίησης.

Οι ιδανικές οδηγίες από το σύστημα ειδοποίησης δεν περιέχουν πολλή πληροφορία ανά μήνυμα και ο ιδανικός αριθμός φράσεων ανά μήνυμα για να ληφθεί αποτελεσματικά από τους χρήστες είναι από 5 έως 7 προτάσεις (Ronchi και λοιποί 2018). Έτσι, τηρώντας τις αρχές της γνωστικής εργονομίας, για καταστάσεις φωτιάς πειράματα έδειξαν ότι οι συμμετέχοντες όταν άκουγαν από τα μεγάφωνα σωστά σχεδιασμένα κατευθυντήρια μηνύματα, τότε μέσα σε 35 δευτερόλεπτα είχαν ανοίξει την πόρτα του οχήματος και ξεκινούσαν την εκκένωση της σήραγγας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν ληφθεί υπόψη ότι χωρίς εξωτερική βοήθεια από το σύστημα ειδοποίησης, οι επιβάτες μπορεί να παραμείνουν στα οχήματα τους αδρανείς για έως 5 με 6 λεπτά, που είναι χρόνος σημαντικά μεγάλος και ελλοχεύει κινδύνους μη δυνατής εκκένωσης (Gandit και λοιποί 2009). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ιταλικές αρμόδιες αρχές μεταφοράς ορίζουν ως επιθυμητό μέσο χρόνο εγκατάλειψης του οχήματος τα 5 λεπτά ή το 1,5 λεπτό για οδηγούς επιβατικών και φορτηγών αντίστοιχα.

Εκτός από τις οδηγίες για εγκατάλειψη των οχημάτων, τα συστήματα ειδοποίησης δρουν πληροφοριακά για τους χρήστες αφού τους ενημερώνουν για την τοποθεσία των εξόδων κινδύνου. Σε περιβάλλον με έντονο καπνό, δεν είναι εύκολα διακριτή η σήμανση της εξόδου διαφυγής, ειδικά για όσους βρίσκονται από την απέναντι πλευρά του τοίχου. Έτσι, υπάρχει ειδοποίηση ηχητική για την θέση των θυρών διαφυγής, κάτι που αν αναλογιστεί κανείς ότι οι θύρες μπορεί να απέχουν πάνω από 100-120 μέτρα μεταξύ τους, είναι ικανό να σώσει ζωές.

Γενικότερα, από την αξιολόγηση των αποτελεσματικότερων μεθόδων καθοδήγησης των χρηστών προς την έξοδο αποδείχτηκε ότι οι εντολές από μεγάφωνο ήταν η πιο πρακτική

μέθοδος. Εξίσου αποτελεσματική προέκυψε πως είναι η τοποθέτηση ενός ηχογραφημένου μηνύματος κοντά στην πόρτα εξόδου για να προσελκύει τους χρήστες σε περίπτωση ατυχήματος ανεξάρτητα από την πλευρά της σήραγγας που αυτοί βρίσκονται.

Τα συστήματα ειδοποίησης των χρηστών της σήραγγας καταφέρνουν να δώσουν λύση στο πρόβλημα που δημιουργείται από την τάση των ανθρώπων να ακολουθούν την κίνηση άλλων ανθρώπων μέσα στην σήραγγα, ακόμα και αν αυτή είναι εσφαλμένη (Norén & Winér 2003).

Από την άλλη, έχουν παρουσιαστεί προβλήματα κατά την χρήση των μεγαφώνων καθώς σε συνθήκες γενικευμένου πανικού, η ακουστική είναι πολύ κακή μέσα στη σήραγγα και τα μηνύματα του συστήματος ειδοποίησης δεν γίνονται πάντα αντιληπτά από τους χρήστες της σήραγγας. Ειδικότερα, οι βοές από τα αναστατωμένα πλήθη, ο θόρυβος των οχημάτων και η φασαρία που προκαλεί η έναρξη του συστήματος του μηχανικού αερισμού δυσχεραίνουν την ακουστική στη σήραγγα. Ένα ακόμα μειονέκτημα του συστήματος ειδοποίησης είναι πως δεν έχει καθολικό νόημα, όπως πχ. τα σήματα, και απευθύνεται μόνο στους ντόπιους χρήστες της κάθε σήραγγας.

Ως προς το κόστος του συστήματος ειδοποίησης, χωρίζεται στο κόστος εγκατάστασης μεγάφωνων που είναι μικρό και στο κόστος εγκατάστασης κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης CCTV. Πιο συγκεκριμένα, από προϋπολογισμό προμελέτης για σήραγγα μήκους 2,2 km στην Στερεά Ελλάδα προέκυψε πως ένα κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης CCTV κοστολογείται στα 171.500 €. Με αναγωγή γίνεται εύκολο να προσδιοριστεί το κόστος του κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης CCTV, που είναι στα 77,95 € ανά μέτρο της σήραγγας. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Αττικής Οδού, οι κάμερες του συστήματος CCTV τοποθετούνται κάθε 100 μέτρα οπότε το συνολικό κόστος για τις κάμερες CCTV ισούται με τον αριθμό των συστημάτων CCTV που χωράνε για κάθε 100 μέτρα πολλαπλασιασμένο με το μέσο κόστος ενός συστήματος CCTV που είναι γύρω στα 4.500 € λαμβάνοντας υπόψη την ίδια προμελέτη. Η πιο δαπανηρή συνιστώσα του κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης CCTV είναι το κέντρο CCTV που περιλαμβάνει τον σταθμό ελέγχου με λογισμικό, οθόνες και χειριστήρια και κοστολογείται στις 20.000 €. Αντίστοιχα, από την ίδια προμελέτη λήφθηκε ότι το κόστος των μεγαφώνων κυμαίνεται στα 42.000 € οπότε με την κατάλληλη αναγωγή προκύπτει ένα ενδεικτικό κόστος για τα μεγάφωνα ανά μέτρο της σήραγγας της τάξης των 19 €.

Το κόστος λειτουργίας του συστήματος ειδοποίησης είναι μεσαίου κόστους καθώς απαιτεί την ύπαρξη επόπτη ασφαλείας σε μόνιμη βάση ενώ και η συντήρηση του κόστους απαιτεί ορισμένους πόρους. Πιο αναλυτικά, ο έλεγχος του συστήματος παρακολούθησης γίνεται κάθε 6 μήνες και η γενική συντήρηση του συστήματος αυτού γίνεται κάθε ένα χρόνο. Ομοίως, ο έλεγχος των μεγαφώνων γίνεται κάθε 3 μήνες και η συντήρηση όλων των συστημάτων επικοινωνίας γίνονται κάθε 12 με 24 μήνες.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση του συστήματος ειδοποίησης ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

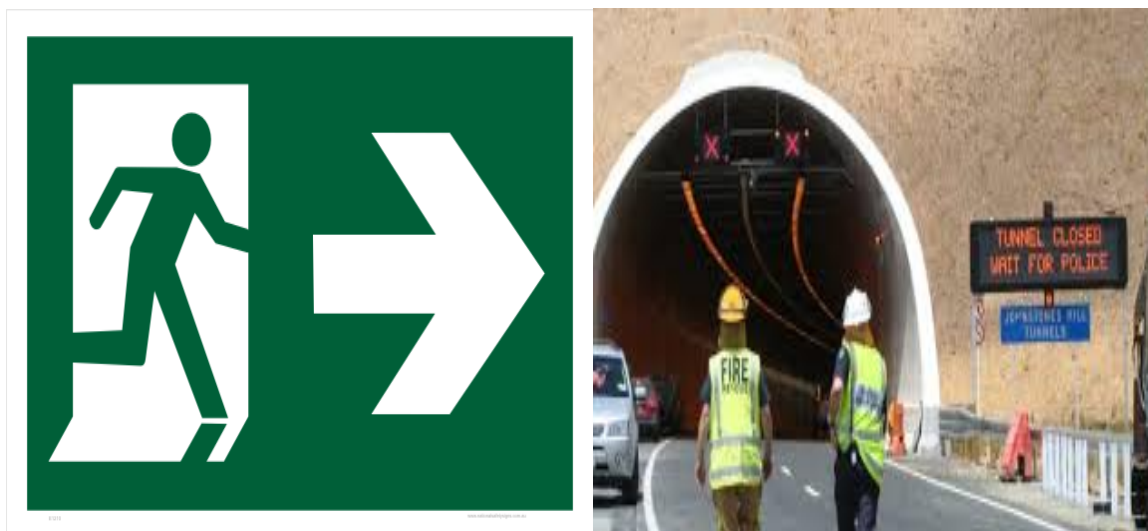
Πίνακας 4: Αξιολόγηση συστήματος ειδοποίησης

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Ειδοποίηση	5	5	4	6	7

3.2.4 Αξιολόγηση της σήμανσης

Η εγκατάσταση σήμανσης σκοπό έχει την μετάδοση πληροφοριών, σχετικά με την κυκλοφοριακή κατάσταση της σήραγγας, στους διερχόμενους οδηγούς και κατά κύριο λόγο περιλαμβάνει :

- Πινακίδες καθορισμού λωρίδων κυκλοφορίας (LCS). Τρία ζεύγη σε κάθε κλάδο σήραγγας, ένα στην είσοδο, ένα στην εγκάρσια στοά (μέσο) και ένα στην έξοδο.
- Πινακίδα μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) εντός ή εκτός της σήραγγας
- Πινακίδα μεταβλητού ορίου ταχύτητας εντός της σήραγγας (VSLS)
- Πληροφοριακές πινακίδες πλήρως αντανακλαστικές
- Πλευρικές πινακίδες με αναγραφές και σύμβολα συνήθως από μεμβράνη
- Πινακίδες ένδειξης επικίνδυνων θέσεων και πινακίδες ρυθμιστικές διαφόρων μεγεθών
- Στύλοι πινακίδων ως επί τω πλείστων κατασκευασμένοι από γαλβανισμένο σιδηροσωλήνα
- Πινακίδα που ορίζει την θέση της οδού διαφυγής



Σχήμα 15: Σύστημα σήμανσης σε περιπτώσεις ατυχήματος φωτιάς

Πηγή: National Safety Signs, 2018

Η χρήση σήμανσης παίζει έναν επικουρικό ρόλο σε καταστάσεις φωτιάς εντός οδικής σήραγγας, καθώς ενημερώνει τους χρήστες για την θέση της εξόδου κινδύνου ενώ επίσης μέσω μηνυμάτων στην πινακίδα ενημερώνει τους οδηγούς να μην εισέλθουν στην σήραग्γα ή τους χρήστες να κινηθούν σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζονται ανά συνθήκη.

Πολύ σημαντικός είναι ο ρόλος της σήμανσης διότι σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς, οι άνθρωποι περπατούν παράλληλα προς τα τοιχώματα της σήραγγας για να έχουν κάποιες μορφές προσανατολισμό και η σήμανση πάνω στα τοιχώματα τους δίνει μία αίσθηση της απόστασης και κατεύθυνσης προς την οποία πρέπει να κινηθούν για να είναι ασφαλείς. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση λαμπτήρων μέσα στις πινακίδες είναι χρήσιμη για τους χρήστες καθώς λειτουργεί σαν πηγή φωτισμού σε ένα περιβάλλον που οι καπνοί δυσχεραίνουν τις μετακινήσεις.

Έχει παρατηρηθεί όμως ότι οι οδηγοί έχουν την τάση να αγνοούν τα μηνύματα της σήμανσης για να συνεχίσουν την πορεία τους. Σχετική έρευνα έδειξε πως μόνο το 24% των ερωτηθέντων θα σταματούσε περιμένοντας την επόμενη οδηγία από την πινακίδα μεταβλητών μηνυμάτων, όπως όριζε το μήνυμα (Kirytoroulos και λοιποί 2016).

Επίσης, η αποτελεσματικότητα του συστήματος σήμανσης κρίνεται μειωμένη καθώς η πιθανότητα αντίληψης του περιεχομένου της σήμανσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, ένα σήμα για να επιτελεί τον σκοπό του πρέπει, εκτός από το να είναι ορατό κάτω από τις συνθήκες εγκλωβισμού του καπνού μέσα στη σήραग्γα, να γίνεται αντιληπτό από τους χρήστες όταν βρίσκονται σε πανικό σύμφωνα με τον ορισμό που έδωσαν οι Gibson το 1978 και Hartson το 2003. Επίσης, ένα σήμα πρέπει να περνάει άμεσα το μήνυμα που χρειάζεται στον λήπτη και να μην του γεννά αμφιβολίες ή χρονοτριβές.

Ένα σύστημα σήμανσης απαιτεί ελάχιστο χρόνο εγκατάστασης αφού δεν πρόκειται για δομική αλλά για επιφανειακή κατασκευή. Το κόστος κατασκευής εξαρτάται από το μήκος της σήραγγας και τον τύπο πινακίδας που θα τοποθετηθεί. Μία συνήθης πρακτική είναι η τοποθέτηση σημάτων για την θέση των εξόδων κινδύνου κάθε 8-10 μέτρα, όμως συνολικά πρόκειται για ένα μέτρο με μικρό κόστος κατασκευής και χαρακτηριστικό είναι ότι για σήραγγα μήκους 4,66 km στην Στερεά Ελλάδα οι εργασίες σήμανσης κόστισαν 980.000 €. Αυτό το κόστος αντιστοιχεί σε 210 €/m της σήραγγας και αν υποθεθεί ότι η κοστολόγηση στην συγκεκριμένη σήραγγα είναι χαρακτηριστική του συνόλου του κόστους των συστημάτων σήμανσης, επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός πως το σύστημα σήμανσης δεν απαιτεί για την κατασκευή του δυσθεώρητα ποσά, σε σχέση πάντα με τα επίπεδα που φτάνει το κόστος των λοιπών εργασιών μιάς οδικής σήραγγας. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί πως η κυριότερη πηγή κόστους του συστήματος σήμανσης είναι η τοποθέτηση της φωτεινής πινακίδας μεταβλητών μηνυμάτων VMS όπου η τιμή μονάδας βρίσκεται στις 103.000 €.

Ομοίως, το κόστος λειτουργίας είναι μικρό αφού το μόνο κόστος είναι η σύνδεση της πινακίδας μεταβλητών μηνυμάτων και των σημάτων των εξόδων κινδύνου με παροχή ρεύματος και ο έλεγχος και η αντικατάσταση των λαμπτήρων που υποβοηθούν το σύστημα για να είναι πιο ορατό προς τους χρήστες. Οι πινακίδες σήμανσης ελέγχονται και καθαρίζονται κάθε 3 μήνες προκειμένου να παραμένουν ορατές και ευδιάκριτες για τους χρήστες της σήραγγας ενώ αντικαθίστανται ετησίως στα πλαίσια της τακτικής συντήρησης του εξοπλισμού της οδικής σήραγγας.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση του συστήματος σήμανσης ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

Πίνακας 5: Αξιολόγηση συστήματος σήμανσης

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Σήμανση	7,5	7,5	7	6	4

3.2.5 Αξιολόγηση των φαναριών

Η εγκατάσταση φωτεινής σηματοδότησης σκοπό έχει την μετάδοση πληροφοριών, σχετικά με την κυκλοφοριακή κατάσταση της σήραγγας, στους διερχόμενους οδηγούς και κατά κύριο λόγο περιλαμβάνει :

- Φωτεινούς σηματοδότες 3 πεδίων (κόκκινο / κίτρινο / πράσινο) πλησίον των μετώπων των στομιών εισόδου (αμφίπλευρα), και εντός της σήραγγας στη θέση της εξόδου κινδύνου (αμφίπλευρα).
- Ζεύγος φωτεινών σηματοδοτών δύο ή τριών πεδίων σε ιστό ή/και βραχίονα
- Προειδοποιητικούς φωτεινούς σηματοδότες 2 πεδίων πριν από τα μέτωπα των στομιών.
- Πινακίδα στατικού μηνύματος με αναλάμποντες φανούς



Σχήμα 16: Φωτεινοί σηματοδότες στο εξωτερικό της σήραγγας

Πηγή: Μπακογιάννης, 2014

Η χρήση φαναριών παίζει έναν επικουρικό ρόλο σε καταστάσεις φωτιάς εντός οδικής σήραγγας, καθώς ενημερώνει τους χρήστες πως υπάρχει κίνδυνος εντός της σήραγγας και παρέχει μία πηγή φωτισμού δευτερευόντως στους ανθρώπους. Επίσης, η τοποθέτηση φαναριών έξω από την σήραγγα λειτουργεί ως ενημέρωση για τους οδηγούς ότι δεν πρέπει να εισέλθουν στην σήραγγα.

Δοκιμές έχουν δείξει ότι η συνεχής εναλλαγή άσπρου και πράσινου φωτός σε φανάρι μπερδεύει τους χρήστες την ώρα της εκκένωσης και τους καθυστερεί ως προς τον χρόνο της εκκένωσης της σήραγγας, γιατί αισθάνονται ανασφάλεια ως προς την διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουν. Παρόλο που οι χρήστες αντιλαμβάνονται το φανάρι, δεν έχουν συνδέσει κάποια δράση με την παρουσία εναλλασσόμενου άσπρου και πράσινου φαναριού και εντείνεται η σύγχυση τους ως προς το σχέδιο δράσης τους.

Αντίθετα, πράσινου χρώματος φανάρια δρουν καλύτερα στο μάτι των χρηστών σε σχέση με τα σήματα για την θέση των εξόδων κινδύνου. Το πράσινο χρώμα τραβά την προσοχή των χρηστών και για αυτό τον λόγο έχει αποτέλεσμα και επιταχύνει την εκκένωση η χρήση σημάτων με εσωτερικό πράσινο φωτισμό αλλά και η χρήση πράσινων φαναριών (Nilsson και λοιποί 2009).

Επίσης, τα κόκκινα φανάρια που ανάβουν εκτός της οδικής σήραγγας για να αποτρέψουν την είσοδο επιπλέον οχημάτων στην σήραγγα δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά γιατί παρερμηνεύονται από τους χρήστες και επίσης δεν αποτελούν αυστηρό περιορισμό αφού

είναι στην ευχέρεια του οδηγού αν θα σταματήσει και δεν θα εισέλθει στη σήραγγα ακόμα και αν καταλάβει το μήνυμα του φαναριού.

Η τοποθέτηση φαναριών σε σημεία κοντά στις εξόδους κινδύνου και πριν την είσοδο της οδικής σήραγγας είναι μια οικονομική και γρήγορη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, ενδεικτικά αναφέρεται ότι από προϋπολογισμό μελέτης της Εγνατίας Οδού για σήραγγα 7 km στο τμήμα Ηγουμενίτσας-Ιωαννίνων απαιτήθηκαν 368.000 € ή για καλύτερη εποπτεία 52,6 € για κάθε μέτρο της οδικής σήραγγας.

Αντίστοιχα, τα λειτουργικά κόστη από ένα σύστημα φωτεινής σηματοδότησης είναι πολύ μικρά αφού σε κανονικές συνθήκες τα φανάρια είναι κλειστά και η λειτουργία τους απαιτεί μόνο αυτόματη σύνδεση με το σύστημα SCADA ή το κέντρο ελέγχου της σήραγγας. Ο καθαρισμός και παράλληλα ο έλεγχος των φανών σήμανσης πραγματοποιείται κάθε 3 μήνες ενώ η προληπτική αντικατάσταση όλων των λαμπτήρων σήμανσης πραγματοποιείται κάθε 1 χρόνο.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση των φαναριών ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

Πίνακας 6: Αξιολόγηση συστήματος φαναριών

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Φανάρια	7,5	8,5	9	5	4

3.2.6 Αξιολόγηση των μπαρών

Ένας από τους οργανωτικούς στόχους που υπάρχουν πάντα σε περιπτώσεις ατυχήματος φωτιάς είναι να μην υπάρχουν μετακινήσεις προς και από την σήραγγα οχημάτων. Αυτή η μετακίνηση μπορεί να αποτραπεί μέσω κάποιων φαναριών και σήμανσης έξω από την σήραγγα, όμως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος είναι ο αυστηρός αποκλεισμός της σήραγγας με την χρήση μπαρών στις οπές εισόδου και εξόδου της οδικής σήραγγας.



Σχήμα 17: Απαγορευτικό εισόδου σε σήραγγα στην Αυστραλία

Πηγή: Laservision, n.d.

Ειδικότερα σε περιπτώσεις ατυχήματος φωτιάς, οι οδηγοί επιχειρούν να κάνουν αναστροφές για να αποφύγουν το καιόμενο όχημα, να οδηγήσουν με την όπισθεν για να απομακρυνθούν από την εστία της φωτιάς ή ακόμα και να προσπεράσουν με γρήγορο ελιγμό το σημείο της φωτιάς για να απομακρυνθούν γρήγορα από την σήραγγα (Kirytoroulos και λοιποί 2016). Αυτή είναι μία πολύ εσφαλμένη τακτική που μπορούν όμως οι μπάρες να την περιορίσουν αφού με το πέσιμο των μπαρών από τον υπεύθυνο της σήραγγας γίνεται δυνατός ο αποκλεισμός της για τα άλλα οχήματα.

Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει ως προς τον επικουρικό ρόλο των μπαρών είναι πως υπάρχει ο φόβος να κατευθυνθούν τα οχήματα προς τα σημεία εισόδου και εξόδου της σήραγγας και να συνωστιστούν εκεί δημιουργώντας μεγάλο πρόβλημα και καθυστερώντας ακόμα παραπάνω την διαδικασία της εκκένωσης και την έλευση των σωστικών συνεργείων. Αυτό το πρόβλημα όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί με την ενημέρωση για την κάθοδο των μπαρών από το σύστημα ειδοποίησης.

Η τοποθέτηση μπαρών στην είσοδο και την έξοδο της σήραγγας είναι ένα οικονομικό μέτρο που δεν απαιτεί σημαντικούς πόρους ενώ το κόστος κατασκευής είναι ασήμαντο σε σχέση πάντα με το όφελος που παρέχει στους χρήστες της σήραγγας. Ενδεικτικά, από έρευνα που διεξάχθηκε σε τιμοκαταλόγους γερμανικών εταιριών το κόστος της κάθε μπάρας κυμαίνεται από 13.000 € έως 20.000 € ανάλογα με το μέγεθος της διατομής των σημείων εισόδου και εξόδου της οδικής σήραγγας. Πρόκειται για ένα κόστος που είναι προσιτό σε σχέση με τα υπόλοιπα κόστη που σχετίζονται με την εξασφάλιση ενός συγκεκριμένου επιπέδου ασφάλειας σε μία οδική σήραγγα.

Με όλα αυτά υπόψιν, προκύπτει ότι η αξιολόγηση των μπαρών ως προς τα κριτήρια που έχουν συζητηθεί είναι η παρακάτω:

Πίνακας 7: Αξιολόγηση συστήματος μπαρών

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Μπάρες	6	7,5	9	6	6

4 Μέθοδος Έρευνας

4.1 Πολυκριτήρια λήψη αποφάσεων

Τα περισσότερα από τα οικονομικά, βιομηχανικά, πολιτικά ή ακόμα και τα καθημερινά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε είναι πολυκριτηριακά. Κάνεις δεν πρόκειται να επιλέξει την διαδρομή που θα ακολουθήσει από το σπίτι του για την δουλειά βασιζόμενος μόνο στο οικονομικό κριτήριο ή μόνο στην χρονική διάρκεια της διαδρομής κ.λπ. Επιπλέον, κανείς δεν αντιδρά στα κριτήρια αυτά με τον ίδιο τρόπο. Η επιλογή καθορίζεται από την προσωπική κρίση του λήπτη αποφάσεων, αφού τα βάρη που ο ίδιος θα δώσει στα κριτήριά του είναι καθαρά θέμα επιλογής, και είναι αυτά που θα καθορίσουν την τελική λήψη της εκάστοτε απόφασης.

Η διαπίστωση ότι η επίλυση πολύπλοκων και αναγκαίων προβλημάτων λήψης αποφάσεων δεν μπορεί να πραγματοποιείται μέσω μίας μονοδιάστατης ανάλυσης, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και διάδοση της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (multicriteria decision aid, MCDA, ή multicriteria decision making, MCDM). Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων έχει ως βασικό αντικείμενο την αντιμετώπιση ενός προβλήματος που παρουσιάζεται κατά την προσπάθεια εξέτασης όλων των παραμέτρων ενός προβλήματος που επηρεάζουν τη λήψη της κατάλληλης απόφασης. Το πρόβλημα αυτό αφορά τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει η σύνθεση όλων των παραμέτρων ώστε να επιτευχθεί η λήψη ορθολογικών αποφάσεων για τον χρήστη, σύμφωνα με την βαρύτητα των κριτηρίων όπως ο ίδιος έχει θέσει.

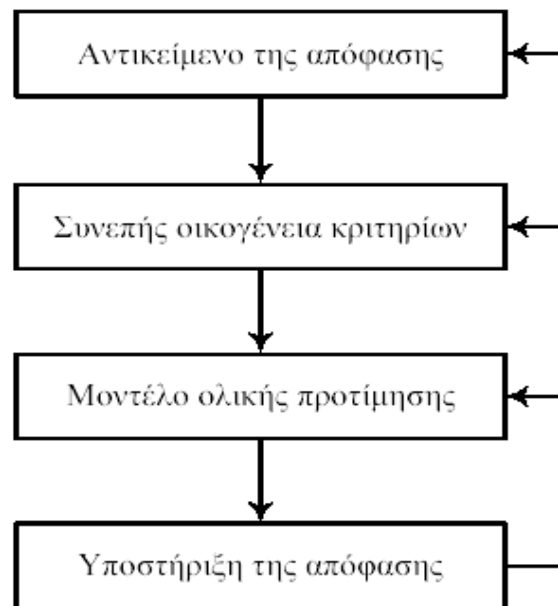
Βασικό χαρακτηριστικό λοιπόν, αλλά παράλληλα και σημαντική διαφορά της πολυκριτήριας ανάλυσης από άλλες εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι ότι η επίλυση του εκάστοτε προβλήματος πραγματοποιείται σύμφωνα με το σύστημα προτιμήσεων και αξιών, το οποίο χρησιμοποιείται συνειδητά ή ασυνείδητα, από αυτόν που αποφασίζει. Έτσι, η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων ενσωματώνει τον decision maker και τις προτιμήσεις του στη διαδικασία ανάπτυξης των εναλλακτικών, χωρίς να μετατρέπει απλά τον αποφασίζοντα έναν άβουλο παρατηρητή που δεν μπορεί να καθορίσει καθόλου το τελικό αποτέλεσμα. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι η παροχή των αναγκαίων πληροφοριών για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των βασικών χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου προβλήματος, των ιδιοτήτων των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων και των διαφορετικών βαρυτήτων που ο αποφασίζων θέτει για τα διάφορα κριτήρια του προβλήματος.

4.2 Γενικό πλαίσιο πολυκριτήριας ανάλυσης

Με βάση τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα προβλήματα λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια, η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων έχει τρεις βασικούς στόχους:

1. την ανάλυση της ανταγωνιστικής φύσης των κριτηρίων
2. Τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του αποφασίζοντος
3. Τον εντοπισμό ικανοποιητικών λύσεων.

Ο Roy (1996) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο για την επίτευξη αυτών των στόχων.



Σχήμα 18:Μεθοδολογικό πλαίσιο κατά Roy

Πηγή : Σπανός, 2004

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο (αντικείμενο της απόφασης) καθορίζονται το σύνολο των εναλλακτικών δραστηριοτήτων που θα μελετηθούν. Ως 'εναλλακτική' ορίζεται κάθε πιθανή επιλογή η οποία αποτελεί λύση του προβλήματος και η οποία πρέπει να αξιολογηθεί τελικά ως προς την καταλληλότητά της. Το σύνολο των εναλλακτικών μπορεί να οριστεί είτε ως ένα διακριτό σύνολο στο οποίο είναι δυνατή η πλήρης καταγραφή όλων των εναλλακτικών δραστηριοτήτων είτε ως ένα συνεχές σύνολο στο οποίο η εξαντλητική καταγραφή των εναλλακτικών δεν είναι δυνατή.

Πολύ σημαντικό βήμα που είναι και προαπαιτούμενο μιας σωστής επίλυσης πολυκριτήριου προβλήματος αποτελεί ο εντοπισμός της φύσης του προβλήματος και η χρήση αντίστοιχης μεθόδου που ταιριάζει με την προβληματική της απόφασης. Οι 4 κυριότερες προβληματικές (decision problematic) που εντοπίζονται στην πλειοψηφία των γνωστών αναλύσεων είναι:

1. Η προβληματική που αφορά την επιλογή (choice) μίας ή περισσότερων εναλλακτικών, όπως αυτή προκύπτει από τα κριτήρια και τα βάρη που έχουν τεθεί.

2. Η προβληματική που αφορά την ταξινόμηση των εναλλακτικών (sorting) και μετέπειτα την τοποθέτηση τους σε προκαθορισμένες κατηγορίες.
3. Η προβληματική που αφορά την κατάταξη (ranking) των εναλλακτικών λύσεων. Η κατάταξη μπορεί να έχει είτε αύξουσα σειρά είτε φθίνουσα ανάλογα με την φύση του προβλήματος και την θέληση του decision maker.
4. Η προβληματική που αφορά την περιγραφή (description) των εναλλακτικών, πάντα σε συνάρτηση με τα επιμέρους κριτήρια απόφασης.

Έπειτα, στο επόμενο στάδιο (συνεπής οικογένεια κριτηρίων) καθορίζεται από τον αποφασίζοντα μία οικογένεια κριτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, ως κριτήριο ορίζουμε την συνάρτηση x στην οποία είναι έκδηλες οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Δηλαδή, έστω δύο εναλλακτικές x' και x'' όπου στην ουσία x' και x'' είναι οι εφαρμογές των εναλλακτικών x' και x'' πάνω στο κριτήριο x . Τότε ισχύει ότι :

$$x' > x'' \Leftrightarrow x'Px''$$

$$x' = x'' \Leftrightarrow x'Ix''$$

Όπου P και I είναι οι σχέσεις προτίμησης (preference) και αδιαφορίας (indifference) αντίστοιχα, για τις οποίες ισχύουν οι παρακάτω ισοδυναμίες:

$x'Px'' \Leftrightarrow$ η εναλλακτική x' είναι προτιμότερη από την x'' (προτίμηση)

$x'Ix'' \Leftrightarrow$ οι εναλλακτικές x' και x'' είναι ισοδύναμες (αδιαφορία)

Προκειμένου να παρθεί μια ορθή απόφαση έπειτα από συνυπολογισμό όλων των διαφορετικών, και πιθανώς αντικρουόμενων εν γένει κριτηρίων, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τα επιλεγόμενα κριτήρια συνιστούν όλα μαζί μία οικογένεια κριτηρίων.

Στη συνέχεια, στο επόμενο στάδιο (μοντέλο ολικής προτίμησης) συνδυάζονται όλα τα κριτήρια και διαμορφώνουν ένα μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του ζητήματος, πάντα σε αρμονία με την προβληματική που έχει σαφώς οριστεί. Με το μοντέλο αυτό, συγκρίνονται ανά δύο οι εναλλακτικές και αναπτύσσεται τελικά το μοντέλο απόφασης που είναι απόρροια των ιεραρχήσεων και επιλογών που έχει θέσει ο αποφασίζων.

4.3 Μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης

Υπάρχουν πάνω από 50 μέθοδοι Πολυκριτήριας Ανάλυσης όπου κατατάσσονται σε 2 κύριες κατηγορίες ανάλογα με το μοντέλο απόφασης που χρησιμοποιούν. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν με βάση τις εξής 2 θεωρίες:

- Θεωρία χρησιμότητας
- Θεωρία σχέσεων υπεροχής

Στην κάθε θεωρία εντοπίζονται οι παρακάτω εφαρμογές:

- Για την θεωρία χρησιμότητας:
 - Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (MAUT)
 - Πολυκριτήρια θεωρία κατάταξης (MAVT)
 - Απλή πολυκριτήρια τεχνική βαθμολόγησης (SMART)
 - Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (AHP)
 - Στοχαστικές πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποδοχής (SMAA)
- Για την θεωρία σχέσεων υπεροχής:
 - Οικογένεια μεθόδων Electre
 - Οικογένεια μεθόδων Promethee
 - Μέθοδος SMAA-3

Στη συνέχεια θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης. Έμφαση θα δοθεί στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE και πιο συγκεκριμένα στην μέθοδο ELECTRE I, εφαρμογή της οποίας θα αναλυθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.4 Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας MAUT

Σκοπός της πολυκριτήριας θεωρίας χρησιμότητας MAUT (multiattribute utility theory) είναι η μοντελοποίηση και αναπαράσταση του συστήματος αξιών που συνειδητά ή ασυνείδητα ακολουθεί ο αποφασίζων, μέσω μιας συνάρτησης αξιών/χρησιμότητας $U(g)$ (Σπανός 2004). Η συνάρτηση αυτή εκφράζεται βάσει του συνόλου των κριτηρίων αξιολόγησης τα οποία καθορίζουν το αποτέλεσμα της αξιολόγησης:

$$U(g) = U(g_1, g_2, \dots, g_n)$$

όπου g είναι το διάνυσμα των κριτηρίων αξιολόγησης g_1, g_2, \dots, g_n .

Γενικά, οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι μη γραμμικές αύξουσες συναρτήσεις οριζόμενες στο πεδίο τιμών των αντίστοιχων κριτηρίων αξιολόγησης, οι οποίες ανταποκρίνονται στις ακόλουθες δύο βασικές ιδιότητες:

$$U(x) > U(x') \Leftrightarrow \text{δηλαδή η εναλλακτική } x \text{ προτιμάται της } x'$$

$$U(x) = U(x') \Leftrightarrow \text{δηλαδή η εναλλακτική } x \text{ είναι ισοδύναμη της } x'$$

Η πλέον συνηθισμένη μορφή συνάρτησης χρησιμότητας που χρησιμοποιείται σε ερευνητικό και πρακτικό επίπεδο, είναι η προσθετική:

$$U(g) = p_1 u_1(g_1) + p_2 u_2(g_2) + \dots + p_n u_n(g_n) \text{ όπου:}$$

u_1, u_2, \dots, u_n είναι οι συναρτήσεις μερικών χρησιμοτήτων των κριτηρίων αξιολόγησης (κάθε συνάρτηση μερικής χρησιμότητας $u_i(g_i)$ καθορίζει την αξία/χρησιμότητα των εναλλακτικών δραστηριοτήτων βάση των επιδόσεών τους στο κριτήριο g_i).

p_1, p_2, \dots, p_n είναι οι σταθερές που υποδηλώνουν τη σημαντικότητα (βάρος) των κριτηρίων

αξιολόγησης, έτσι ώστε το άθροισμα των σταθερών/βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης να ισούται με την μονάδα.

4.5 Πολυκριτήρια θεωρία κατάταξης MAVT

Η μέθοδος MAVT (multiattribute value theory) χρησιμοποιείται σε προβλήματα κατάταξης. Το βασικό μοντέλο της είναι :

$$V(X_j) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_{ij}) \quad \text{όπου:}$$

$V(X_j)$ είναι η ολική συνάρτηση προσθετικής αξίας για κάθε εναλλακτική j

w_i το βάρος που δηλώνεται για το κάθε κριτήριο i

Οι κατατάξεις που προκύπτουν τελικά είναι άμεσα εξαρτώμενες από την επιλογή των βαρών.

4.6 Θεωρία σχέσεων υπεροχής

Κύριο χαρακτηριστικό της σχέσης υπεροχής είναι ότι δεν είναι απαραίτητα πλήρης (complete) ή μεταβατική (transitive). Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας MAUT μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων συναρτήσεων χρησιμότητας οδηγεί σε μια πλήρη αξιολόγηση των εναλλακτικών, η οποία βασίζεται στις σχέσεις προτίμησης (P) και αδιαφορίας (I). Επομένως, για οποιοσδήποτε δυο εναλλακτικές x' και x'' θα ισχύει $x' P x''$ ή $x' I x''$. Ταυτόχρονα οι σχέσεις προτίμησης και αδιαφορίας θεωρούνται μεταβατικές, δηλαδή αν $x' P x''$ και $x'' P x'''$ τότε $x' P x'''$.

Αντιθέτως, στη θεωρία των σχέσεων υπεροχής (outranking methods ή outranking relations theory-ORT) οι προτιμήσεις του decision maker δεν είναι υποχρεωτικά μεταβατικές και επιπρόσθετα μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των εναλλακτικών δεν είναι πάντα εφικτή. Με άλλα λόγια, οι μέθοδοι σχέσεων υπεροχής επιτρέπουν την διάταξη των εναλλακτικών ενώ παράλληλα η μέθοδος δεν συγκρίνει ζεύγη για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία. Βασίζεται στην ανά ζεύγη σύγκριση των επιλογών σε κάθε μεμονωμένο κριτήριο με βάση τις επιδόσεις τους και τις ενδοκριτηριακές προτιμήσεις του λήπτη απόφασης.

Η σχέση υπεροχής αναπαριστά τις επιλογές του αποφασίζοντα, με δεδομένες κάποιες βαρύτητες κριτηρίων. Μαθηματικά, η σχέση υπεροχής ορίζεται για 2 εναλλακτικές x' και x'' : $x' S x'' \Leftrightarrow$ η εναλλακτική x' είναι τουλάχιστον εξίσου καλή όσο η εναλλακτική x''

Η παραπάνω σχέση υπεροχής στηρίζεται στην βάση ότι η ισχύς των θετικών ενδείξεων είναι υψηλή και ταυτόχρονα η ισχύς των αρνητικών ενδείξεων είναι περιορισμένη, καθώς μόνο με τον συνδυασμό και των 2 έχει ισχύ μία σχέση υπεροχής.

Οι κυριότεροι μέθοδοι θεωρίας σχέσεων υπεροχής είναι οι οικογένειες μεθόδων ELECTRE (Roy 1986,1991) και PROMETHEE (Brans και λοιποί 1986).

Όταν γίνεται λόγος πως στην ORT δεν ικανοποιούνται απαραίτητα τα κριτήρια της μεταβατικότητας και της πληρότητας σημαίνει ότι:

- Μεταβατικότητα: Στην πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας MAUT τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από αξιολόγηση των εναλλακτικών ως προς τα ζητούμενα κριτήρια κάθε φορά υπακούουν στην μεταβατική ιδιότητα. Δηλαδή αν για 3 εναλλακτικές a,b,c από την εφαρμογή κάποιας μεθόδου προκύπτει ότι:

$$a > b$$

$$b > c \quad \text{τότε} \quad a > c$$

ή

$$a = b$$

$$b = c \quad \text{τότε} \quad a = c$$

Από την άλλη, η λογική πίσω από τις σχέσεις υπεροχής είναι τέτοια που γίνεται να υπάρχει περίπτωση όπου εναλλακτική a προτιμάται (ή είναι αδιάφορη) έναντι εναλλακτικής b , και αντίστοιχα η εναλλακτική b να προτιμάται (ή να είναι αδιάφορη) έναντι εναλλακτικής c , αλλά εν τέλει η εναλλακτική a ΔΕΝ προτιμάται (ή δεν είναι αδιάφορη) έναντι της εναλλακτικής c.

- Πληρότητα: Με τον όρο πληρότητα εννοείται η ύπαρξη της δυνατότητας πλήρους αξιολόγησης όλων των εναλλακτικών δραστηριοτήτων. Στην ORT δεν είναι αναγκαία μία πλήρης αξιολόγηση όλων των εναλλακτικών καθώς αυτό δεν είναι πάντα μία εφικτή περίπτωση. Για αυτό τον λόγο, εισάγεται εκτός από τις γνωστές σχέσεις προτίμησης και αδιαφορίας και μία σχέση ασυγκρισιμότητας (incomparability) των εναλλακτικών.

Η ιδιότητα της μη απαραίτητης πληρότητας των μεθόδων υπεροχής αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων υπεροχής έναντι των μεθόδων MAUT. Υπάρχουν σενάρια στον πραγματικό κόσμο που δεν έχει νόημα η σύγκριση δύο εναλλακτικών μεταξύ τους γιατί άπτονται δύο τελείως διαφορετικών χώρων.

4.6.1 Οικογένεια μεθόδων ELECTRE

Μία σημαντική μέθοδος που στηρίζεται στην θεωρία σχέσεων υπεροχής είναι η ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalite') που αναπτύχθηκε από τον Bernard Roy (1968, 1978, 1991, 1996). Η δημιουργία της ELECTRE ήταν απόρροια της ανάγκης για βελτίωση των μοντέλων λήψης αποφάσεων που υπήρχαν ως τότε. Στην ευρεία τους μορφή, η οικογένεια της ELECTRE επιλύει προβλήματα που αποτελούνται από εναλλακτικές , από κριτήρια αλλά και από τα βάρη των κριτηρίων αυτών. Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των μεθόδων της οικογένειας ELECTRE είναι πως μια πολύ κακή τιμή δεν

ισοσταθμίζεται από μια πολύ καλή τιμή. Αυτό σε συγκεκριμένα παραδείγματα είναι πολύ χρήσιμο, καθώς δημιουργείται ένα φίλτρο που απομονώνει τις κακές τιμές και δεν τις υπολογίζει στην ουσία στην μετέπειτα επίλυση. Αυτός είναι και ο λόγος που στην μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε ως μέθοδος έρευνας η μέθοδος ELECTRE I, καθώς σε καμία περίπτωση δεν πρέπει η κακή αποδοτικότητα μίας εναλλακτικής να ισοσταθμίζεται από άλλα, λιγότερο ουσιώδη, κριτήρια.

Η μέθοδος ELECTRE έχει αναπτυχθεί σε 5 βασικές υπομεθόδους, πάντα στηριζόμενοι σε κοινές αρχές λειτουργίας, και χρησιμοποιούνται ανάλογα με την φύση του προβλήματος και την ανάγκη του αναλυτή.

Πιο συγκεκριμένα:

- Η ELECTRE I χρησιμοποιείται σε προβλήματα επιλογής
- Οι ELECTRE II, III, IV χρησιμοποιούνται σε προβλήματα κατάταξης
- Η ELECTRE TRI χρησιμοποιείται σε προβλήματα ταξινόμησης

Σε όλες τις μορφές της, η ELECTRE επιδιώκει την δημιουργία μίας σχέσης υπεροχής. Η σχέση αυτή πετυχαίνεται με την ανά ζεύγη σύγκριση των εναλλακτικών και τον μαθηματικό έλεγχο τους. Το ερώτημα αν η εναλλακτική x' είναι τουλάχιστον εξίσου καλή με την εναλλακτική x'' ή ισοδύναμα $x'Sx''$, εξετάζεται με τον έλεγχο $x'Sx''$ ή όχι σε κάθε ζεύγος εναλλακτικών x' και x'' και καταλήγει στις εξής περιπτώσεις:

$(x'Sx'') \& \text{όχι } (x''Sx')$ => υπεροχή του x' σε σχέση με το x''

$(x''Sx') \& \text{όχι } (x'Sx'')$ => υπεροχή του x'' σε σχέση με το x'

$(x'Sx'') \& (x''Sx')$ => αδιαφορία ανάμεσα σε x' και x''

$\text{όχι}(x'Sx'') \& \text{όχι } (x''Sx')$ => ασυμβατότητα ανάμεσα σε x' και x''

Ο προσδιορισμός μίας σχέσης υπεροχής ανάμεσα σε δύο εναλλακτικές x' και x'' γίνεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μέθοδο, όμως σε όλες τις μεθόδους απαιτούνται 2 έλεγχοι, ο έλεγχος συμφωνίας και ο έλεγχος ασυμφωνίας.

-Έλεγχος συμφωνίας: Ο έλεγχος συμφωνίας (concordance test) αξιολογεί τα κριτήρια στα οποία η εναλλακτική x' υπερέρχει της εναλλακτικής x'' . Ο έλεγχος αυτός στην πράξη δηλώνεται με έναν δείκτη συμφωνίας, ο οποίος έχει εύρος τιμών [0,1]. Η τιμή 1 του δείκτη συμφωνίας υποδηλώνει πλήρη συμφωνία του ελέγχου για την εν λόγω εφαρμογή, η τιμή 0 του δείκτη συμφωνίας υποδηλώνει την διαφωνία του ελέγχου με την εν λόγω εφαρμογή, ενώ ενδιάμεσες τιμές δηλώνουν ανάλογη συμφωνία όσο πλησιάζει η τιμή τα άκρα.

-Έλεγχος ασυμφωνίας: Ο έλεγχος ασυμφωνίας (discordance test) εξετάζει την αντίθεση στον έλεγχο "εναλλακτική x' είναι τουλάχιστον εξίσου καλή με την εναλλακτική x'' ". Ο έλεγχος αυτός στην πράξη δηλώνεται με έναν δείκτη ασυμφωνίας, ο οποίος έχει εύρος τιμών [0,1]. Η τιμή 1 του δείκτη ασυμφωνίας δείχνει ισχυρή αντίθεση με την εφαρμογή, και αντίστοιχα τιμές κοντά στο 0 δηλώνουν την απουσία αντίθεσης.

Έπειτα, ορίζονται τα κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας, τα οποία έχουν και αυτά εύρος τιμών [0,1]. Ο δείκτης συμφωνίας πρέπει να ξεπερνά σε τιμή το κατώφλι συμφωνίας και ο δείκτης ασυμφωνίας πρέπει να υπολείπεται σε τιμή του κατωφλιού ασυμφωνίας για να καταλήξουμε ότι μία εναλλακτική υπερέρχει μίας άλλης. Οι τιμές στα κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας δίνονται αυθαίρετα από τον αποφασίζοντα, όμως η επιλογή των τιμών τους καθορίζει σημαντικά την τελική ανάλυση. Για παράδειγμα, η επιλογή ενός υψηλού κατωφλιού συμφωνίας που τείνει στην μονάδα υποδηλώνει πως για να είναι αποδεκτή η πρόταση πρέπει να υπάρχει εναλλακτική που συντριπτικά να υπερिशχύει έναντι κάποιας άλλης εναλλακτικής για όλα τα κριτήρια ενώ από την άλλη κατώφλια υπεροχής με τιμές κάτω από 0,5 μειώνουν το επίπεδο υπεροχής της πρότασης.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί πως τα βάρη των κριτηρίων και τα κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας είναι αποφάσεις του χρήστη. Διαφοροποιήσεις στις τιμές τους οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα έπειτα από εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE και χρήζουν περαιτέρω αναζήτησης μέσω εργαλείων όπως η ανάλυση what if (ανάλυση ευαισθησίας).

4.6.1.1 Η μέθοδος ELECTRE I

Η μέθοδος ELECTRE I ανήκει στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE και αναπτύχθηκε από τον Roy το 1968. Χρησιμοποιείται σε προβλήματα επιλογής μίας ή και περισσότερων εναλλακτικών από ένα σύνολο εναλλακτικών. Προκειμένου να δημιουργηθούν οι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας πρέπει πρώτα να κανονικοποιηθούν τα βάρη των κριτηρίων προκειμένου μετά να γίνει ασφαλής σύγκριση.

Τα βήματα εκτέλεσης της μεθόδου ELECTRE I (Ψαρράς και λοιποί 2016) φαίνονται παρακάτω:

1. Αρχικά, δημιουργείται πίνακας $m \times n$ όπου m εναλλακτικές και n τα κριτήρια του προβλήματος. Ορίζεται από τον αναλυτή η κλίμακα (συνεχής ή διακριτή) με την οποία θα αξιολογηθούν οι τιμές των εναλλακτικών ξεχωριστά για κάθε κριτήριο και στη συνέχεια συμπληρώνεται ο πίνακας από τον αναλυτή με τις τιμές που θεωρεί αυτός κατάλληλες ανά εναλλακτική και ανά κριτήριο.
2. Έπειτα σε κάθε κριτήριο j αντιστοιχίζεται ένα βάρος w_j που επιτρέπει στην ανάλυση να δώσει έμφαση στα κριτήρια που επηρεάζουν πρακτικά πιο πολύ το πρόβλημα.
3. Ο δείκτης συμφωνίας (concordance index) προκύπτει ως εξής:

$$C(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{g_j(a) \geq g_j(b)} w_j$$

$$\text{Όπου } W = \sum_{j=1}^n w_j$$

Επομένως ο δείκτης συμφωνίας προκύπτει με τιμές στο σύνολο [0,1]

4. Ο δείκτης ασυμφωνίας (discordance index) ορίζεται ως εξής:

$$D(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_j(a) \geq g_j(b) \\ \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)] & \text{αλλιώς} \end{cases}, \text{ όπου } \delta = \max_{c,d,j} [g_j(c) - g_j(d)]$$

Επομένως ο δείκτης ασυμφωνίας προκύπτει με τιμές στο σύνολο [0,1]

5. Ορίζονται τα κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας c και d αντίστοιχα
6. Δημιουργείται ο δυαδικός πίνακας επικράτησης $m \times m$ E για τον οποίο:
 $a \succ b \Leftrightarrow C(a,b) \geq c$ και $D(a,b) \leq d$ και παίρνει την τιμή TRUE
, ειδάλλως παίρνει την τιμή FALSE.
7. Από τον δυαδικό πίνακα επικράτησης E_{\max} προκύπτει η κορυφαία ή η το σύνολο κορυφαίων εναλλακτικών από την διαφορά των περιπτώσεων που υπερέρχει με την διαφορά των καλύτερων εναλλακτικών.

Έτσι, προκύπτει η βέλτιστη λύση ενός ζητήματος με την μέθοδο ELECTRE I. Η λειτουργία της μεθόδου ELECTRE I φαίνεται συγκεντρωτικά μέσω διαγράμματος ροής (flowchart) στο **Παράρτημα Β**.

4.6.1.2 Η μέθοδος ELECTRE II

Η μέθοδος ELECTRE II ανήκει στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE και εφαρμόζεται σε προβλήματα κατάταξης. Στην μέθοδο αυτή, υπάρχει η τροποποίηση σε σχέση με την μέθοδο ELECTRE I ότι υπάρχουν δύο σχέσεις υπεροχής, οι S_F και S_f με αντίστοιχα κατώφλια συμφωνίας c_1 και c_2 .

Για τις σχέσεις υπεροχής S_F και S_f ισχύει ότι:

$$S_F(a, b) \begin{cases} c(a, b) \geq c_1 \\ \sum_{j: g_j(a) > g_j(b)} p_j > \sum_{j: g_j(a) < g_j(b)} p_j \\ (g_j(a), g_j(b)) \notin D_j, \forall j \end{cases} \quad \text{και} \quad S_f(a, b) \begin{cases} c(a, b) \geq c_2 \\ \sum_{j: g_j(a) > g_j(b)} p_j > \sum_{j: g_j(a) < g_j(b)} p_j \\ (g_j(a), g_j(b)) \notin D_j, \forall j \end{cases} .$$

Αρχικά, δημιουργείται ένα σύνολο N από το αρχικό σύνολο A για το οποίο οι εναλλακτικές δεν υπολείπονται ισχυρά άλλων εναλλακτικών σύμφωνα με τις σχέσεις S_F . Στη συνέχεια, το δημιουργηθέν σύνολο N χωρίζεται σε δύο υποσύνολα N_1 και N_2 , αυτή την φορά με βάση τις σχέσεις υπεροχής S_f . Έπειτα, το σύνολο που προκύπτει από την διαφορά $A-N$ διαιρείται και αυτό με την σειρά του σε δύο υποσύνολα N'_1 και N'_2 με βάση τις σχέσεις S_f . Με αυτή την διαδικασία, δημιουργείται μία διάταξη υποσυνόλων του A ξεκινώντας από τις καλύτερες προς τις λιγότερο καλές εναλλακτικές. Στη συνέχεια γίνεται η ακριβώς αντίθετη

λογική δηλαδή, δημιουργείται μία διάταξη υποσυνόλων ξεκινώντας από τις λιγότερο καλές εναλλακτικές προς τις καλύτερες εναλλακτικές.

Το αποτέλεσμα προκύπτει τελικά από την τομή των δύο αυτών διατάξεων. Σε περίπτωση που η διαδικασία αυτή δεν καταλήγει σε κάποια λύση, ένας εναλλακτικός τρόπος είναι η βαθμολόγηση κάθε εναλλακτικής ως προς τον αριθμό των εναλλακτικών των οποίων υπερέχει ισχυρά μείον των εναλλακτικών των οποίων υπολείπεται ισχυρά. Έπειτα, οι πιθανές ισοβαθμίες που θα προκύψουν αντιμετωπίζονται λαμβάνοντας υπόψιν τις ασθενείς σχέσεις υπεροχής των εν λόγω εναλλακτικών.

4.6.1.3 Η μέθοδος ELECTRE III

Η μέθοδος ELECTRE III ανήκει στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE και αναπτύχθηκε από τον Roy το 1978. Πρόκειται για μία μέθοδο που σκοπό έχει την επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών ενός προβλήματος. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών γίνεται μέσω μίας ομάδας ψευδοκριτηρίων ενώ λειτουργεί και αυτή η παραλλαγή της ELECTRE με τρία διαφορετικά κατώφλια για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που υπάρχει κατά την λήψη μίας απόφασης.

Συγκεκριμένα, τα τρία αυτά κατώφλια είναι το κατώφλι προτίμησης, το κατώφλι veto και το κατώφλι αδιαφορίας. Το κατώφλι προτίμησης (p) δείχνει την τιμή πάνω από την οποία μία εναλλακτική προτιμάται έναντι μίας άλλης, το κατώφλι veto (v) υποδηλώνει πως αν μία εναλλακτική παραβαίνει μία επιλογή του λήπτη απόφασης τότε αυτή η εναλλακτική δεν εξετάζεται άλλο ανεξαρτήτως τι αποτέλεσμα βγάζουν τα κριτήρια ενώ τέλος, το κατώφλι αδιαφορίας (q) δείχνει την τιμή κάτω από την οποία ο αποφασίζων δεν έχει ενδιαφέρον ως προς δύο εναλλακτικές. Τα κατώφλια αυτά παίρνουν τιμές που καθορίζονται από τον λήπτη της απόφασης ανάλογα με τους σκοπούς που έχει και επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου.

Υπάρχει ένα μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στις συγκρίσεις των εναλλακτικών που ο λήπτης της απόφασης είναι αδιάφορος και σε αυτές που έχει μία ξεκάθαρη προτίμηση. Στην ELECTRE III καλύφθηκε αυτή η ανάγκη και δημιουργήθηκε αυτό το μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στην αδιαφορία και την αυστηρή προτίμηση, μία ζώνη δηλαδή που ο αποφασίζων διστάζει ανάμεσα στην αδιαφορία και την προτίμηση (Buchanan 1999). Αυτή η ζώνη αποκαλείται αδύναμη προτίμηση και εκφράζεται στις σχέσεις υπεροχής με το γράμμα Q.

Έτσι, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις υπεροχής:

- $a \mathbf{P} b$ (η εναλλακτική a προτιμάται ισχυρά έναντι της b) $\Leftrightarrow g(a) - g(b) > p$
- $a \mathbf{Q} b$ (η εναλλακτική a προτιμάται ελαφρά έναντι της b) $\Leftrightarrow q < g(a) - g(b) \leq p$

- $a I b$ (η εναλλακτική a είναι αδιάφορη ως προς την b και το αντίστροφο) \Leftrightarrow
 $-q \leq g(a) - g(b) \leq q$

Με την χρήση των κατώφλιων αυτών, η μέθοδος προσπαθεί να δημιουργήσει μία σχέση υπεροχής S . Υπενθυμίζεται ότι η σχέση υπεροχής ($a S b$) σημαίνει ότι η εναλλακτική a είναι τουλάχιστον όσο καλή είναι η εναλλακτική b .

Για τον έλεγχο του ισχυρισμού $a S b$, αρχικά αναπτύσσεται η αρχή της συμφωνίας μέσω του δείκτη συμφωνίας $C(a,b)$. Ο δείκτης συμφωνίας υπολογίζεται από την σχέση:

$$C(a,b) = \sum_{k=1}^n w_k * c_k(a, b) \quad \text{όπου } w_k \text{ το βάρος του } k\text{-οστού κριτηρίου.}$$

$c_k(a, b)$ ο μερικός δείκτης συμφωνίας.

Ο μερικός δείκτης συμφωνίας $c_k(a, b)$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$c_k(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{για } g_k(a) + q_k \geq g_k(b) \\ 0, & \text{για } g_k(a) + p_k \leq g_k(b) \\ \frac{p_k + g_k(a) - g_k(b)}{p_k - q_k}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Επισημαίνεται ότι p_k και q_k είναι τα κατώφλια προτίμησης (preference threshold) και αδιαφορίας (indifference threshold) αντίστοιχα του k -οστού κριτηρίου.

Στη συνέχεια, για να ελεγχθεί η ασυμφωνία των εναλλακτικών, ορίζεται το κατώφλι veto (veto threshold). Το κατώφλι veto v_k επιτρέπει την πιθανότητα να μην ισχύσει το $a S b$ εάν για οποιοδήποτε k κριτήριο ισχύει :

$$g_k(b) > g_k(a) + v_k$$

Ο δείκτης ασυμφωνίας (discordance index) για κάθε κριτήριο k , $d_k(a,b)$ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$d_k(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{αν } g_k(a) + p_k \geq g_k(b) \\ 1, & \text{αν } g_k(a) + v_k \leq g_k(b) \\ \frac{g_k(b) - g_k(a) - p_k}{v_k - p_k}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Για κάθε ζεύγος εναλλακτικών (a,b) που ανήκουν στο σύνολο A όλων των πιθανών εναλλακτικών υπάρχει μετά από τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν ένα μέτρο συμφωνίας και ένα μέτρο ασυμφωνίας. Απομένει ένα ακόμα στάδιο για την ολοκλήρωση του υποβάθρου της ELECTRE III και αυτό είναι ο συνδυασμός των μέτρων συμφωνίας και ασυμφωνίας για να βρεθεί ο τελικός βαθμός υπεροχής (Buchanan 1999).

Αυτό θα επιτευχθεί με την δημιουργία του πίνακα αξιοπιστίας (credibility matrix) που κρίνει κατά πόσον η εναλλακτική a είναι τουλάχιστον εξίσου καλή όσο η εναλλακτική b. Ο βαθμός αξιοπιστίας ενός ζεύγους εναλλακτικών (a,b) του συνόλου A δίνεται από την σχέση:

$$S(a,b) = \begin{cases} C(a,b), & \text{αν } dk(a,b) \leq C(a,b) \quad \forall k \\ C(a,b) * \prod_{k \in (a,b)} \frac{1-dk(a,b)}{1-C(a,b)}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Αυτή η σχέση στηρίζεται στην λογική ότι αν η 'δύναμη' της συμφωνίας ξεπερνάει την 'δύναμη' της ασυμφωνίας, τότε η τιμή της συμφωνίας δεν μεταβάλλεται. Σε αντίθετη περίπτωση, τίθεται υπό αμφισβήτηση ο ισχυρισμός aSb και μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη συμφωνίας $C(a,b)$ σύμφωνα με την παραπάνω σχέση.

Εάν η ασυμφωνία ενός ζεύγους εναλλακτικών (a,b) για οποιοδήποτε κριτήριο k ισούται με την μονάδα, τότε δεν υπάρχει καμμία ένδειξη ότι αληθεύει ο ισχυρισμός

aSb επομένως για αυτή την περίπτωση $S(a,b)=0$.

Με την ολοκλήρωση του πίνακα αξιοπιστίας, έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του μοντέλου υπεροχής της ELECTRE III. Το επόμενο βήμα για την μέθοδο ELECTRE III είναι η παραγωγή κατάταξης των εναλλακτικών μέσω του πίνακα αξιοπιστίας (Buchanan 1999). Ο γενικός τρόπος είναι κατασκευάζοντας 2 σύνολα Z_1 και Z_2 χρησιμοποιώντας αντίστοιχα μία φθίνουσα και μία αύξουσα διαδικασία φιλτραρίσματος, και στη συνέχεια κατασκευάζοντας ένα μερικό σύνολο Z τέτοιο ώστε $Z=Z_1 \cap Z_2$.

Η διαδικασία φθίνοντος φιλτραρίσματος ξεκινάει με τον ορισμό μιας τιμής λ όπου

$$\lambda = \max_{a,b \in A} S(a,b)$$

Ορίζουμε μία τιμή αξιοπιστίας $\lambda-s(\lambda)$ τέτοια ώστε να υπολογίζονται μόνο τιμές του πίνακα αξιοπιστίας $S(a,b)$ που είναι αρκετά κοντά στο λ .

Στη συνέχεια, ορίζεται ο πίνακας $T(a,b)$ έτσι ώστε:

$$T(a,b) = \begin{cases} 1, & \text{αν } S(a,b) > \lambda - s(\lambda) \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Για την δημιουργία της φθίνουσας διαδικασίας φιλτραρίσματος για να προκύψει το Z_1 , αρχικά για κάθε εναλλακτική a υπολογίζεται η 'ικανότητα' της $Q(a)$ η οποία ορίζεται ως η διαφορά του πλήθους των εναλλακτικών που υστερούν έναντι της a μείον το πλήθος των εναλλακτικών που υπερέχουν έναντι της a . Στην ουσία, το $Q(a)$ είναι το άθροισμα της γραμμής του πίνακα T μείον το άθροισμα της στήλης του πίνακα T .

Έπειτα, ορίζεται ένα σύνολο D_1 ως το σύνολο των εναλλακτικών με την μεγαλύτερη ικανότητα Q . Αν το σύνολο D_1 περιλαμβάνει μόνο 1 εναλλακτική τότε επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, μόνο που αυτή την φορά δεν υπολογίζεται η εναλλακτική που αποτελούσε το σύνολο D_1 . Αν το σύνολο D_1 περιλαμβάνει παραπάνω από 1 εναλλακτικές, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία εντός του συνόλου του D_1 .

Σε αυτή την περίπτωση, ορίζεται ένα σύνολο D_2 που είναι υποσύνολο του συνόλου D_1 και περιέχει τις εναλλακτικές με την μεγαλύτερη τιμή του Q . Αν το σύνολο D_2 περιλαμβάνει μόνο 1 εναλλακτική τότε επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, μόνο που αυτή την φορά δεν υπολογίζεται η εναλλακτική που αποτελούσε το σύνολο D_2 , δηλαδή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το σύνολο $D_1 - D_2$. Αλλιώς, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία εντός του συνόλου του D_2 , κλπ μέχρι να τελειώσει το σύνολο του D_1 .

Η διαδικασία στη συνέχεια επαναλαμβάνεται για το σύνολο $A - D_1$.

Η δημιουργία της αύξουσας διαδικασίας φιλτραρίσματος προκειμένου να προκύψει το Z_2 γίνεται με παρόμοιο τρόπο με την διαφορά ότι οι εναλλακτικές με την μικρότερη τιμή του Q ελέγχονται πρώτες.

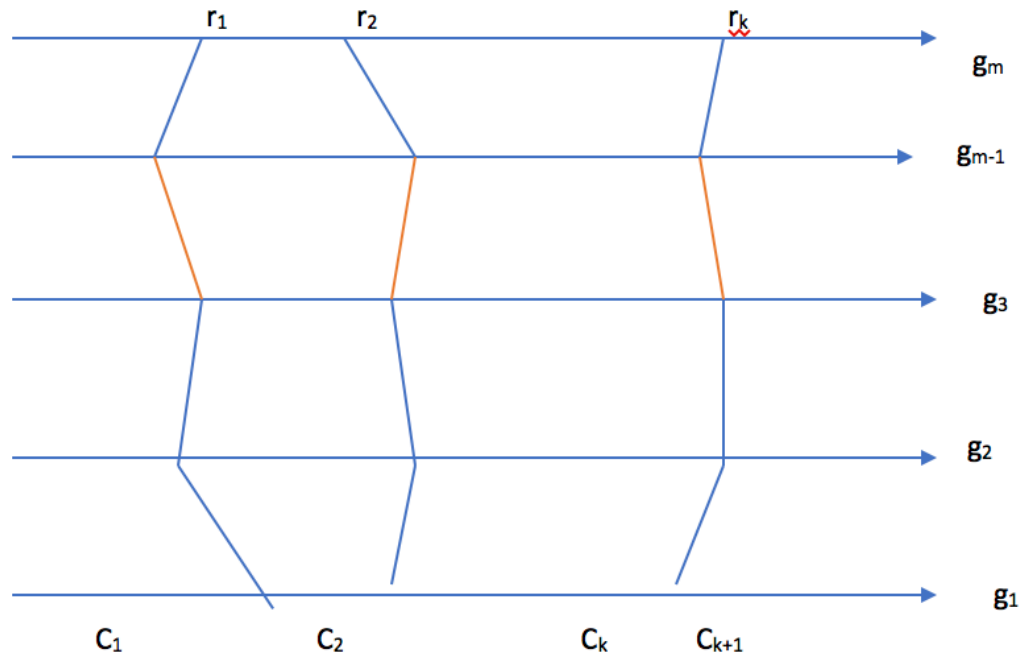
Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών προκύπτει από την τομή των 2 συνόλων.

4.6.1.4 Η μέθοδος ELECTRE TRI

Η μέθοδος ELECTRE TRI (Yu 1992) ανήκει στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE και χρησιμοποιείται σε προβλήματα ταξινόμησης όπου, οι εναλλακτικές επιλογές κατανέμονται σε προκαθορισμένες κατηγορίες $C_1, C_2, C_3, \dots, C_q$. Οι κατηγορίες αυτές δημιουργούνται με την λογική ότι στην πρώτη κατηγορία C_1 ανήκουν οι καλύτερες εναλλακτικές, στην δεύτερη κατηγορία C_2 ανήκουν οι αμέσως επόμενες καλύτερες εναλλακτικές κ.ο.κ.

Κάθε επιλογή εξετάζεται ανεξάρτητα από τις άλλες, με βάση ένα σύνολο κριτηρίων και εντάσσεται σε κάποια από τις προκαθορισμένες κατηγορίες. Η ταξινόμηση μιας εναλλακτικής a έρχεται σαν αποτέλεσμα της σύγκρισής της με τα πρότυπα αναφοράς (reference profiles), τα οποία καθορίζουν τα όρια των δυνατών κατηγοριών. Κάθε ένα πρότυπο αναφοράς r_k αποτελεί το κριτήριο διαχωρισμού ανάμεσα στις κατηγορίες C_k και C_{k+1} . Το πρότυπο

αναφοράς r_k είναι στην ουσία το άνω όριο της κατηγορίας C_k και ταυτόχρονα το κάτω όριο της κατηγορίας C_{k+1} .



Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση προτύπων αναφοράς ως προς τις κατηγορίες

Η αρχική παραδοχή ότι οι κατηγορίες είναι διατεταγμένες προτάσσει τον καθορισμό των προτύπων αναφοράς με τέτοιο τρόπο ώστε $r_{ki} > r_{k+1}$, για κάθε k .

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των εναλλακτικών με τα πρότυπα αναφοράς και να κατασκευαστεί έτσι η σχέση υπεροχής, πρέπει να γίνει ο έλεγχος συμφωνίας, ο έλεγχος ασυμφωνίας αλλά και ο έλεγχος αξιοπιστίας. Οι έλεγχοι συμφωνίας και ασυμφωνίας πραγματοποιούνται με τον ίδιο τρόπο όπως στην ELECTRE III.

Στη συνέχεια, ο έλεγχος αξιοπιστίας πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού του δείκτη αξιοπιστίας (credibility index). Προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση των εναλλακτικών x_i ως προς τα πρότυπα αναφοράς r_k και πιο συγκεκριμένα για να φανεί τότε οι εναλλακτικές x_i υπερέχουν των προτύπων r_k , πρέπει ο δείκτης αξιοπιστίας $\sigma(x_i, r_k)$ να είναι μεγαλύτερος από μία τιμή λ και υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην ELECTRE III.

Το λ είναι στην ουσία είναι ένα κατώφλι αποκοπής που συνεισφέρει στην μετατροπή ασαφούς σχέσης υπεροχής σε συμπαγή σχέση υπεροχής. Το λ παίρνει τιμές από 0,5 έως 1 και η τιμή του καθορίζεται από τον decision maker.

Με βάση την σχέση υπεροχής που προκύπτει αντλούνται οι εξής σχέσεις ανάμεσα στις εναλλακτικές x_i και τα πρότυπα αναφοράς r_k :

- $x_i I r_k \Leftrightarrow (x_i S r_k) \text{ και } (r_k S x_i)$ όπου I: αδιαφορία
- $x_i > r_k \Leftrightarrow (x_i S r_k) \text{ και όχι } (r_k S x_i)$
- $x_i < r_k \Leftrightarrow \text{όχι } (x_i S r_k) \text{ και } (r_k S x_i)$
- $x_i R r_k \Leftrightarrow \text{όχι } (x_i S r_k) \text{ και όχι } (r_k S x_i)$ όπου R: ασυγκριτότητα

Η μέθοδος ELECTRE Tri πετυχαίνει δύο ειδών ταξινομήσεις: την απαισιόδοξη (pessimistic) και την αισιόδοξη (optimistic). Η απαισιόδοξη προσέγγιση εφαρμόζεται όταν απαιτείται συντηρητική προσέγγιση του προβλήματος ενώ η αισιόδοξη προσέγγιση είναι δόκιμη όταν ο αποφασίζων θέλει να δώσει ένα πλεονέκτημα στις εναλλακτικές που κρίνει ως πιο χρήσιμες για το πρόβλημα του έναντι κάποιων άλλων εναλλακτικών.

4.6.2 Λογισμικά για τις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE

Η εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE στα προβλήματα απόφασης του πραγματικού κόσμου απαιτεί από τους αποφασίζοντες (decision makers) την χρήση λογισμικών πακέτων. Πολλά από αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλες εταιρίες και για πανεπιστημιακούς σκοπούς, για προβλήματα που απαιτείται πολυκριτήρια ανάλυση. Σχετικά με την μέθοδο που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, την ELECTRE I, στο διαδίκτυο δεν συναντώνται λογισμικά έτοιμα πέρα από φύλλα Excel καθώς πρόκειται για μία μέθοδο που μπορεί να μοντελοποιηθεί εύκολα και γρήγορα στο λογισμικό Excel.

Τα λογισμικά της οικογένειας ELECTRE έχουν αναπτυχθεί είτε από εταιρίες για να καλύπτουν τους ενδοεταιρικούς τους σκοπούς, είτε από ελεύθερες βάσεις λογισμικών (πχ. diviz) είτε από πανεπιστήμια για ερευνητικό ενδιαφέρον όπως το λογισμικό ELECTRE III-IV που αναπτύχθηκε με πρωτοβουλία του LAMSADE, Université Paris-Dauphine στην Γαλλία σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο του Πόζναν.

Συνοπτικά, κάποια από τα λογισμικά που υπάρχουν στο διαδίκτυο και αφορούν την οικογένεια μεθόδων της ELECTRE παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 21: Συνοπτικός πίνακας λογισμικών οικογένειας ELECTRE

Λογισμικά για τις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE	
Λογισμικό	Μέθοδος που εφαρμόζεται
ChemDecide	ELECTRE III
DEFINITE 3.1	ELECTRE II

ELECTRE IS	Γενίκευση της ELECTRE I
ELECTRE III-IV	ELECTRE III, ELECTRE IV
ELECTRE TRI	ELECTRE TRI
IRIS	ELECTRE TRI
SFR	Εκτίμηση των παραγόντων των μεθόδων της οικογένειας ELECTRE
diviz	ELECTRE IV, ELECTRE IS, ELECTRE TRI
SANNA (βασισμένο σε λογισμικό Excel)	ELECTRE I, ELECTRE II
JSMAA	ELECTRE TRI

4.6.3 Οικογένεια μεθόδων PROMETHEE

Οι μέθοδοι της οικογένειας PROMETHEE (PROMETHEE I και II) αποτελούν δύο πολύ βασικές και συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους της πολυκριτήριας ανάλυσης. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1980 από τους Brans και Vincke. Στην μεθοδολογία τους ακολουθούν όμοια τακτική με την ELECTRE III και ταξινομούν τις πιο καλές εναλλακτικές.

Πιο συγκεκριμένα, η PROMETHEE I παρέχει μερική (partial) ταξινόμηση ενώ η PROMETHEE II παρέχει ολική (complete) ταξινόμηση (Brans και λοιποί 1986). Σχετικά με την χρήση των υπόλοιπων μεθόδων της οικογένειας PROMETHEE, η PROMETHEE III επιτρέπει την προσέγγιση προβλημάτων σε στοχαστικό περιβάλλον απόφασης ενώ η PROMETHEE IV αντιμετωπίζει προβλήματα αξιολόγησης μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων. Τέλος, η PROMETHEE V χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων διάθεσης πόρων ενώ η PROMETHEE VI στη διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας.

Σχετικά με την λειτουργία τους, η PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) απαιτεί μία σχέση προτίμησης για κάθε κριτήριο, σε αντίθεση με την σχέση συμφωνίας της ELECTRE. Αυτή η σχέση προτίμησης υπολογίζει θετικές και αρνητικές ροές προτίμησης για κάθε εναλλακτική, μέσω συγκρίσεων σε ζεύγη. Θετική ροή προτίμησης δείχνει το ποσοστό κυριαρχίας μίας εναλλακτικής έναντι των υπολοίπων, ενώ αρνητική ροή προτίμησης δείχνει το ποσοστό κυριαρχίας μίας εναλλακτικής από τις υπόλοιπες. Έτσι, στην PROMETHEE δεν έχει υπόσταση η ύπαρξη ελέγχου ασυμφωνίας ούτε κατά συνέπεια και κατωφλιού ασυμφωνίας.

4.6.4 Μέθοδοι PROMETHEE I & II

Οι μέθοδοι PROMETHEE I και II, όπως αναφέρθηκε και στο σχετικό κεφάλαιο για την οικογένεια μεθόδων PROMETHEE, αποτελούν δύο από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης που στηρίζονται στην θεωρία υπεροχής. Υπάρχει η περιρρέουσα αντίληψη ότι οι μέθοδοι αυτοί καλό είναι να μην εφαρμόζονται αυτόνομα γιατί επηρεάζεται έντονα το αποτέλεσμα τους από την παρουσία μη επιθυμητών δράσεων, αλλά είναι προτιμότερο να συνδυάζονται με την χρήση κάποιας μεθόδου από την οικογένεια ELECTRE. Αυτό βέβαια εξαρτάται κυρίως από την φύση του εκάστοτε προβλήματος και από τις απαιτήσεις του λήπτη της απόφασης.

Για την διαδικασία κατασκευής της ζητούμενης σχέσης υπεροχής, αρχικά δημιουργείται ο βαθμός υπεροχής κάθε ζεύγους εναλλακτικών (a,b) που είναι το αντίστοιχο μέγεθος της του δείκτη συμφωνίας που έχει οριστεί για την μέθοδο ELECTRE.

Ο βαθμός υπεροχής λοιπόν $\pi(a,b)$ ορίζεται από την σχέση:

$$\pi(a,b) = \sum_{k=1}^n w_k * p_k(a,b)$$

Για λόγους πληρότητας, δίνεται ότι ο βαθμός υπεροχής της εναλλακτικής b έναντι της a δίνεται αντίστοιχα από την σχέση:

$$\pi(b,a) = \sum_{k=1}^n w_k * p_k(b,a)$$

Σταθερή προϋπόθεση είναι το άθροισμα των επιμέρους βαρών των κριτηρίων να ισούται με την μονάδα.

Ο μερικός δείκτης προτίμησης $p_k(a,b)$ που συναντήθηκε στον υπολογισμό του βαθμού υπεροχής δίνεται από την σχέση:

$$p_k(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{για } a_k < b_k \\ h_k * (a_k - b_k), & \text{για } a_k \geq b_k \end{cases}$$

Όπου a_k και b_k οι τιμές των εναλλακτικών a,b για το κριτήριο k.

Για τον τύπο της συνάρτησης h_k υπάρχουν έξι διαφορετικά κριτήρια (Δούκας, Ξυδώνας & Ψαρράς 2016). Πιο συγκεκριμένα, τα κριτήρια αυτά είναι:

1. Το συνήθες κριτήριο (usual criterion): Ο λήπτης της απόφασης θεωρεί αδιάφορες 2 εναλλακτικές a και b ως προς το k κριτήριο μόνο αν $a_k = b_k$. Στην περίπτωση που $a_k > b_k$ τότε υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής a έναντι της b ως προς το κριτήριο k. Επομένως, η συνάρτηση έχει την μορφή :

$$h_k * (a_k - b_k) = \begin{cases} 0, & \text{αν } a_k = b_k \\ 1, & \text{αν } a_k > b_k \end{cases}$$

2. Το σχεδόν κριτήριο (quasi criterion): Ο λήπτης της απόφασης θεωρεί αδιάφορες 2 εναλλακτικές a και b ως προς το k κριτήριο όταν η διαφορά $a_k - b_k$ υπερβαίνει ένα κατώφλι αδιαφορίας q_k . Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει ξεκάθαρη προτίμηση ανάμεσα στις 2 εναλλακτικές. Επομένως, η συνάρτηση έχει την μορφή:

$$h_k^*(a_k - b_k) = \begin{cases} 0, & \text{αν } a_k - b_k \leq q_k \\ 1, & \text{αν } a_k - b_k > q_k \end{cases}$$

3. Το κριτήριο γραμμικής προτίμησης (criterion with linear preference): Το κριτήριο αυτό ορίζει πως άμα η διαφορά $a_k - b_k$ δεν ξεπερνά το κατώφλι προτίμησης p_k που ορίζει ο αποφασίζων, τότε ο βαθμός προτίμησης της a αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της διαφοράς $a_k - b_k$. Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει ξεκάθαρη προτίμηση ανάμεσα στις 2 εναλλακτικές. Επομένως, η συνάρτηση έχει την μορφή:

$$h_k^*(a_k - b_k) = \begin{cases} \frac{a_k - b_k}{p_k}, & \text{αν } a_k - b_k \leq p_k \\ 1, & \text{αν } a_k - b_k > p_k \end{cases}$$

4. Το κριτήριο επιπέδου (level criterion): Εδώ παίζουν ρόλο τόσο το κατώφλι αδιαφορίας q_k όσο και το κατώφλι προτίμησης p_k . Αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μέσα στο εύρος που ορίζεται από τα κατώφλια q_k και το κλειστό p_k , τότε ορίζεται ελαφριά προτίμηση (0,5) για την εναλλακτική a . Ειδάλλως, αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μικρότερη ή ίση του κατωφλιού αδιαφορίας q_k τότε υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των 2 εναλλακτικών, ενώ αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μεγαλύτερη του κατωφλιού προτίμησης p_k τότε υπάρχει ξεκάθαρη προτίμηση ανάμεσα στις 2 εναλλακτικές. Επομένως, η συνάρτηση έχει την μορφή:

$$h_k^*(a_k - b_k) = \begin{cases} 0 & \text{αν } a_k - b_k \leq q_k \\ 0.5, & \text{αν } q_k < a_k - b_k \leq p_k \\ 1, & \text{αν } a_k - b_k > p_k \end{cases}$$

5. Το κριτήριο γραμμικής προτίμησης και περιοχής αδιαφορίας (criterion with linear preference and indifference area) : Εδώ αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μέσα στο εύρος που ορίζεται από τα κατώφλια q_k και το κλειστό p_k , τότε ο βαθμός προτίμησης αυξάνεται γραμμικά. Αντίθετα, αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μικρότερη ή ίση του κατωφλιού αδιαφορίας q_k τότε υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των 2 εναλλακτικών, ενώ αν η διαφορά $a_k - b_k$ είναι μεγαλύτερη του κατωφλιού προτίμησης p_k τότε υπάρχει

ξεκάθαρη προτίμηση ανάμεσα στις 2 εναλλακτικές. Επομένως, η συνάρτηση έχει την μορφή:

$$h_k^*(a_k - b_k) = \begin{cases} 0 & \text{αν } ak - bk \leq qk \\ \frac{ak - bk - qk}{pk - qk}, & \text{αν } qk < ak - bk \leq pk \\ 1, & \text{αν } ak - bk > pk \end{cases}$$

6. Το κριτήριο του Gauss (Gaussian criterion) : Σε αυτή την περίπτωση , ο βαθμός προτίμησης έχει την μορφή:

$$h_k^*(a_k - b_k) = 1 - \exp \left[-\frac{(ak - bk)^2}{2\sigma^2} \right] \quad \text{όπου } \sigma \text{ παράμετρος που ελέγχει το ακριβές σημείο που αλλάζει η καμπή της συνάρτησης}$$

Μετά από την παράθεση όλων των διαφορετικών περιπτώσεων για την τιμή της συνάρτησης h_k , γίνεται δυνατός ο υπολογισμός του βαθμού υπεροχής $\pi(a, b)$. Υπενθυμίζεται ότι όμοια με την λογική στην ELECTRE, αν $\pi(a, b)$ τείνει προς το 0 τότε διακρίνεται μία ασθενής συνολική προτίμηση της a έναντι της b . Αντίστοιχα, αν $\pi(a, b)$ τείνει προς την μονάδα τότε διακρίνεται μία ισχυρή συνολική προτίμηση της a έναντι της b .

Αν θεωρηθεί $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, a_n)$ το σύνολο όλων των εναλλακτικών, τότε κάθε εναλλακτική συγκρίνεται με $n-1$ εναλλακτικές επιλογές.

Το μέτρο της υπεροχής της εναλλακτικής a_i έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών υπολογίζεται από την θετική ροή κατάταξης Φ^+ . Η θετική ροή κατάταξης δίνεται από την σχέση:

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n \pi(a_i, a_m)$$

Με όμοια λογική, το μέτρο της υπεροχής των υπόλοιπων εναλλακτικών έναντι της εναλλακτικής a_i εκφράζεται από την αρνητική ροή κατάταξης Φ^- . Η αρνητική ροή κατάταξης δίνεται από την σχέση:

$$\Phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n \pi(a_m, a_i)$$

Στην μέθοδο PROMETHEE I, η οποία επιτρέπει μερική κατάταξη, ο υπολογισμός των θετικών και αρνητικών ροών κατάταξης Φ^+ και Φ^- δίνει την δυνατότητα για κατάταξη των εναλλακτικών με την χρήση σχέσεων προτίμησης P, αδιαφορίας I και ασυγκριτότητας R.

Οι σχέσεις υπεροχής που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$aPb \text{ για } \begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \end{cases}$$

$$aIb \text{ για } \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

$$aRb \text{ για } \begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) < \Phi^+(b) \text{ και } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases}$$

Στην μέθοδο PROMETHEE II η οποία επιτρέπει πλήρη κατάταξη, υπάρχει μία μόνο κατάταξη των εναλλακτικών η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την καθαρή ροή των εναλλακτικών. Ως καθαρή ροή Φ_{net} ορίζεται η διαφορά της θετικής ροής Φ^+ με την αρνητική ροή Φ^- δηλαδή $\Phi_{net} = \Phi^+ - \Phi^-$ για την κάθε εναλλακτική.

Η κατάταξη των εναλλακτικών διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τις δομές προτίμησης P και αδιαφορίας I και προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις :

$$aPb \text{ όταν } \Phi_{net}(a) > \Phi_{net}(b)$$

$$aIb \text{ όταν } \Phi_{net}(a) = \Phi_{net}(b)$$

5 Ανάλυση σεναρίου και μελέτη περίπτωσης

Το ζήτημα της εξάπλωσης φωτιάς εντός οδικής σήραγγας είναι πολύ ιδιαίτερο όπως προαναφέρθηκε. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι αξιοποιώντας τα αριθμητικά δεδομένα και τα συμπεράσματα από την μελέτη που προηγήθηκε, να εφαρμοστεί τώρα η ELECTRE I για να προκύψει και μέσω της μεθόδου η καταλληλότητα των 6 εναλλακτικών που έχουν αναλυθεί και πληροφορίες για αυτές βρίσκονται στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συγκεντρωτικά, οι 6 εναλλακτικές που θα μελετηθούν είναι:

- Έξοδος κινδύνου
- Μηχανικός αερισμός
- Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου
- Σήμανση
- Φανάρι
- Μπάρες

Και η αξιολόγηση των εναλλακτικών θα γίνει ως προς τα παρακάτω κριτήρια:

- Χρόνος κατασκευής
- Κόστος κατασκευής
- Κόστος λειτουργίας
- Αποδοτικότητα
- Αποτελεσματικότητα

5.1 Στοιχεία μελετηθείσας οδικής σήραγγας

Προκειμένου να εξεταστούν οι εναλλακτικές του σεναρίου, πρέπει πρώτα να παρατεθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της σήραγγας καθώς τα μέτρα ασφαλείας λαμβάνονται έπειτα από γνώση των παραμέτρων του συστήματος της οδικής σήραγγας (ΠΔ 230/2007). Τονίζεται ότι οι παράμετροι της μελετηθείσας οδικής σήραγγας έχουν ληφθεί από την διπλωματική εργασία του κ. Ντζερεμέ . Πρόκειται για εικονική σήραγγα και οι παράμετροι της συνάδουν με αντίστοιχες σήραγγες του πραγματικού κόσμου.

Συγκεκριμένα, έχοντας ήδη εξετάσει την σήραγγα και την απόδοση των μέτρων σε αυτή, μελετάται πλέον η αξιολόγηση των μέτρων αυτών.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της σήραγγας δίνονται από τον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών της σήραγγας

Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά σήραγγας	
Μήκος σήραγγας	784 m
Διατομή σήραγγας	66 m ²
Υδραυλική διάμετρος	8,3 m
Κλίση	2,75 %
Μέσο υψόμετρο	800 m
Βασικά στοιχεία σεναρίου	
Κατεύθυνση	Μονή
Λωρίδες κυκλοφορίας	2
Ποσοστό επιβατηγών	64 %
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	36 %
Κυκλοφοριακός φόρτος AADT	1617 v/24 hrs
Επιτρεπόμενη ταχύτητα	60 km/h

Τονίζεται ότι έχει επιλεγθεί το σενάριο αρ.7 της προτυποποίησης που έχει ορίσει η Διοικητική Αρχή . Όλα τα στοιχεία του εξοπλισμού της σήραγγας για την αποτίμηση της επικινδυνότητας έχουν υπολογιστεί με τήρηση του συνοπτικού πίνακα στοιχειωδών απαιτήσεων, όπως αυτός ορίζεται στο ΦΕΚ αριθμό φύλλου 264 από τον Νοέμβριο του 2007 και στην ουσία παρέχει πληροφορίες για τις ελάχιστες απαιτήσεις που ορίζει το ΦΕΚ ανά κατηγορία προκειμένου να τηρούνται τα ζητούμενα επίπεδα ασφάλειας.

Σχετικά με την προτυποποίηση της φωτιάς του σεναρίου, η Διοικητική Αρχή Σηράγγων έχει ορίσει μία τραπεζοειδή καμπύλη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας έκλυσης θερμότητας HRR σε συνάρτηση με τον χρόνο. Οπότε, στο υπάρχον σενάριο λειτουργίας σε 300 sec ο HRR παίρνει την μέγιστη τιμή του που είναι 100 MW.

Με την παράθεση των βασικών γεωγραφικών και κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών της σήραγγας, είναι δυνατή η περιγραφή της εξέλιξης ενός ατυχήματος φωτιάς σε σήραγγα. Υπάρχουν κατάλληλα λογισμικά όπως το CAMATT (CAIcul Monodimensionnel Anisotherme

Transitoire en Tunnel) που ο χρήστης εισάγει στο πρόγραμμα δεδομένα της σήραγγας και του ατυχήματος, και λαμβάνει ως έξοδο (output) αναλύσεις και διαγράμματα χρήσιμα στην εύρεση των συνεπειών του ατυχήματος.

Αυτή η ανάλυση είναι πολύ σημαντική καθώς αποτελεί εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του αποφασίζοντα (decision maker) μετέπειτα στην προσπάθεια που γίνεται για την μείωση των συνεπειών παρόμοιων ατυχημάτων.

Για τον προσδιορισμό των εναλλακτικών που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, έχει ληφθεί υπόψιν η αποτίμηση επικινδυνότητας σε παρόμοια ατυχήματα σιδηρόδρομων όμοιων χαρακτηριστικών όπως η μελέτη πάνω στο σχετικό θέμα του κ. Ντζερεμέ.

5.2 Καθορισμός των βαρών

Για τον καθορισμό των βαρών λήφθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές οι οποίες αναφέρονται ενδελεχώς. Τονίζεται πως η επιλογή των βαρών είναι στην ευχέρεια του αποφασίζοντα και επηρεάζει σημαντικά την έκβαση της μεθόδου και για αυτό θα παρατεθεί και ανάλυση ευαισθησίας των βαρών.

Συγκεκριμένα, για τα κριτήρια επισημαίνεται πως:

- Χρόνος κατασκευής: Πρόκειται για τον χρόνο κατασκευής που απαιτείται για την υλοποίηση της εκάστοτε εναλλακτικής. Θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση των 6 υπό μελέτη εναλλακτικών και όχι ποσοτική. Με την έννοια του χρόνου κατασκευής ορίζεται όλο το χρονικό διάστημα που υπάρχει από την σύλληψη της ιδέας της κατασκευής έως και την τελική παράδοση του έργου. Περιλαμβάνει την φάση της έγκρισης του έργου, την φάση της μελέτης, την πιθανή αναμονή μέχρι την κατασκευή του έργου αλλά και την περίοδο των δοκιμών. Στην ουσία, ο χρόνος κατασκευής ενός έργου ορίζεται μέχρι το σημείο της οριστικής παράδοσης του έργου στην αρμόδια αρχή, και στην περίπτωση μας ορίζεται όταν ολοκληρωθούν οι κατασκευές και η εκάστοτε εναλλακτική είναι έτοιμη για χρήση από τον επόπτη της σήραγγας.

Το κριτήριο του χρόνου κατασκευής για την αξιολόγηση των εναλλακτικών έχει την αξία του καθώς πολλές φορές η κατασκευή ενός έργου εντός μίας οδικής σήραγγας συνεπάγεται την προσωρινή διακοπή της λειτουργίας της σήραγγας και αυτό οδηγεί στην ταλαιπωρία των χρηστών αλλά και σε μεγάλες οικονομικές απώλειες. Όμως, η λογική και ο στόχος όλων των εναλλακτικών που θα εξεταστούν είναι να αποτελέσουν σημαντικά εφόδια για τους χρήστες της σήραγγας που θα τους βοηθήσουν να πραγματοποιήσουν αποτελεσματική αυτό-διάσωση. Ο χρόνος που θα χρειαστεί προκειμένου να επιτευχθεί αυτό δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας καθώς όλο το βάρος δίνεται στην προστασία των ανθρώπινων ζωών. Εξάλλου, δεν υπάρχει δείκτης που να αξιολογεί την ποσότητα του χρόνου που απαιτείται για την κατασκευή έργων όταν το μακροχρόνιο αποτέλεσμα ενδέχεται να είναι η αποφυγή ανθρώπινων

απωλειών. Αυτή είναι η βασική αρχή με την οποία σχεδιάστηκαν όλες οι εναλλακτικές και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η βαρύτητα του κριτηρίου του χρόνου κατασκευής θα ληφθεί ίσο με 1/13.

- Κόστος κατασκευής: Πρόκειται για το αναγκαίο αρχικό κόστος κατασκευής που απαιτείται προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή της κάθε εναλλακτικής. Η αξιολόγηση θα γίνει ποιοτικά και όχι αυστηρά οικονομικά. Στο κόστος κατασκευής περιλαμβάνονται όλα τα κόστη που αφορούν την αρχική εγκαθίδρυση της κάθε εναλλακτικής από το αρχικό στάδιο της απόφασης εγκατάστασης της κάθε εναλλακτικής έως την τελική παράδοση των εναλλακτικών για την εκμετάλλευσή τους από τους φορείς της σήραγγας. Πολλές φορές το κόστος κατασκευής τέτοιων έργων είναι τέτοιο που συμφωνείται ανάμεσα στον ανάδοχο και τον κύριο του έργου να δοθεί το προβλεπόμενο χρηματικό ποσό σε δόσεις, όπου ο αριθμός των δόσεων και η μορφή τους (άτοκες ή μη) καταλήγουν έπειτα από συμφωνία των δύο μερών. Σε αυτή την περίπτωση το σύνολο των επιμέρους ποσών αποτελεί το συνολικό κόστος κατασκευής όπου τα μελλοντικά επιμέρους ποσά ανάγονται στο παρόν σύμφωνα με το εκάστοτε επιτόκιο αναγωγής για λόγους εποπτείας και καλύτερης σύγκρισης.

Το κριτήριο του κόστους κατασκευής για την αξιολόγηση των εναλλακτικών μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό κριτήριο σε οικονομίες ευάλωτες όμως ιδανικά κανένας οικονομικός παράγοντας δεν θα έπρεπε να ελαττώνει τις πιθανότητες ασφαλούς εκκένωσης της σήραγγας. Η διασφάλιση ότι θα πραγματοποιηθούν όλα τα αναγκαία μέτρα για να απεμπλακούν τόσο οι παρόντες εντός της σήραγγας όσο και να προστατευτούν όσοι πιθανά θα εισέρθουν σε μία σήραγγα που έχει ξεσπάσει φωτιά στο εσωτερικό της κρίνεται απαραίτητη και δεν χωράει οικονομικούς περιορισμούς. Προφανώς, κατά την επιλογή του βάρους του κριτηρίου λήφθηκε υπόψη πως το ύψος του κόστους κατασκευής επηρεάζει την δυνατότητα της εκάστοτε κυβέρνησης να υλοποιήσει την εκάστοτε εναλλακτική αλλά και πως τέτοια κοινωνικής φύσης έργα αρκετά συχνά συγχρηματοδοτούνται από φορείς διασφάλισης της ποιότητας ζωής των πολιτών (πχ. Ευρωπαϊκή Ένωση). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, προκύπτει η επιλογή του βάρους του κριτηρίου του κόστους κατασκευής να είναι ίσο με 2/13 για τους σκοπούς της μεθόδου ELECTRE I.

- Κόστος λειτουργίας: Το κόστος λειτουργίας ως μέγεθος είναι ένα τελείως διαφορετικό μέγεθος από το κόστος κατασκευής. Αυτό το κριτήριο αξιολογεί τις εναλλακτικές ως προς τα λειτουργικά έξοδα της κάθε εναλλακτικής τόσο σε ομαλές συνθήκες όσο και σε κρίσιμες καταστάσεις εντός της οδικής σήραγγας. Στο κόστος λειτουργίας ανήκει και το κόστος συντήρησης των εξαρτημάτων της κάθε εναλλακτικής. Στο κόστος λειτουργίας συμπεριλαμβάνονται στην ουσία όλα τα κόστη που αφορούν την ομαλή λειτουργία της σήραγγας είτε είναι κόστη σύνδεσης στο ρεύμα είτε είναι ο μισθός του επόπτη που είναι απαραίτητος για την δράση των μέτρων (πχ. Κέντρο Ελέγχου).

Επίσης, στην έννοια του κόστους λειτουργίας ανήκουν και τα κόστη προληπτικής συντήρησης, τα κόστη ολικής ή μερικής αντικατάστασης των εξαρτημάτων των εναλλακτικών. Τέλος, στο κόστος λειτουργίας ανήκει και η συνθήκη του ατυχήματος, όπου οι εναλλακτικές λειτουργούν στο μέγιστο της δυναμικότητας τους με αποτέλεσμα το κόστος λειτουργίας τους τις συνθήκες αυτές να είναι αυξημένο. Η αξιολόγηση θα στηριχτεί σε συγκεκριμένα οικονομικά παραδείγματα αλλά κατά κύριο λόγο θα είναι ποιοτική.

Το κριτήριο του κόστους λειτουργίας για την αξιολόγηση των εναλλακτικών έχει προφανώς κάποια αξία καθώς εμπεριέχει μέσα του την έννοια του χρήματος, ενός παράγοντα δηλαδή που επηρεάζει το επίπεδο ασφάλειας όχι μόνο στις σήραγγες αλλά και σε οποιαδήποτε ενέργεια εμπεριέχει ρίσκο. Με δεδομένο όμως ότι παγκοσμίως οι ώρες ομαλής λειτουργίας είναι συντριπτικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις ώρες λειτουργίας σε συνθήκες ατυχήματος για τις εναλλακτικές λύσεις, τότε εύλογα συμπεραίνεται πως το ύψος του κόστους λειτουργίας για τις εναλλακτικές κυμαίνεται σε επίπεδα τέτοια που δεν αποτελεί μη διαχειρίσιμο έξοδο για τους αρμόδιους φορείς. Επομένως, με βασική αρχή πάντα την αποφυγή ανθρώπινων απωλειών και υπολογίζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι το βάρος του κριτηρίου του κόστους λειτουργίας θα ληφθεί ίσο με 1/13.

- Αποδοτικότητα: Η αποδοτικότητα αφορά την εσωτερική λειτουργία της κάθε εναλλακτικής. Στην ουσία δηλώνει την ικανότητα της εναλλακτικής να συμβάλει στην αυτό-διάσωση των χρηστών, χωρίς όμως να ελέγχεται η βιωσιμότητα του σεναρίου εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα. Στην διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών είναι πολύ σημαντικό σαν πρώτο στάδιο να ελέγχεται η ικανότητα της κάθε εναλλακτικής να βοηθάει τους χρήστες της σήραγγας και να πετυχαίνει τον σκοπό για τον οποίο έχει σχεδιαστεί και έχει τοποθετηθεί στην σήραγγα. Πρώτα ελέγχεται αν μία υπό δοκιμή λύση πετυχαίνει τον επιθυμητό στόχο και έπειτα μπαίνει στη συζήτηση αν και εφόσον οι χρήστες, που είναι και αυτοί που τελικά καθορίζουν την επιτυχία της κάθε εναλλακτικής, είναι σε θέση να καταλάβουν τον ρόλο της κάθε εναλλακτικής και να δράσουν όπως αυτές προστάζουν.

Επομένως, όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, η αποδοτικότητα εκφράζει τον βαθμό λειτουργίας της εσωτερικής απόδοσης της κάθε εναλλακτικής και είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση των εναλλακτικών παρόλο που κάποιες από τις εναλλακτικές στηρίζουν την λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση με τους χρήστες. Από όλα τα προαναφερθέντα προκύπτει η βαρύτητα του κριτηρίου της αποδοτικότητας ίσο με 3/13.

- Αποτελεσματικότητα: Η αποτελεσματικότητα ως μέγεθος εκφράζει τον βαθμό στον οποίο η κάθε εναλλακτική πετυχαίνει τον στόχο της. Καλύπτει ως έννοια ακριβώς το κενό που εντοπίστηκε με το κριτήριο της αποδοτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, στον όρο αποτελεσματικότητα αξιολογείται η επιρροή στο τελικό ζητούμενο στόχο που έχει η

κάθε εναλλακτική επιλογή. Αυτό κατά κύριο λόγο περιλαμβάνει την δυνατότητα της κάθε εναλλακτικής να καθοδηγεί σωστά και να επηρεάζει τις κινήσεις των χρηστών, για όσες εναλλακτικές βέβαια στηρίζονται στην συνεργασία χρηστών και εξοπλισμού. Είναι σύνηθες φαινόμενο να παρατηρούνται εναλλακτικές που ενώ στην θεωρία λειτουργούν ιδανικά, στην πράξη αδυνατούν να συνεργαστούν ομαλά με τους χρήστες και πολλές φορές όχι μόνο δεν βοηθάνε τους χρήστες να πάρουν την σωστή απόφαση αλλά και συγχέουν τους χρήστες και τους καθυστερούν με ολέθριες συνέπειες.

Κάθε εναλλακτική έχει διαφορετικό σκοπό όμως υπάρχει ένα κοινό μέτρο αξιολόγησης του βαθμού επίτευξης του στόχου τους, η αποτελεσματικότητά τους. Συνεπώς, το κριτήριο της αποτελεσματικότητας είναι το πιο καθοριστικό για την τελική έκβαση της πολυκριτήριας μεθόδου ELECTRE I καθώς μέσω της αποτελεσματικότητας, βγαίνει συμπέρασμα για το επίπεδο συνεργασίας ανάμεσα στα εναλλακτικά μέτρα και τους χρήστες, η διάσωση αυτών σε κάποια συνθήκη ατυχήματος είναι που στο τέλος θα κρίνει κατά πόσο ήταν πετυχημένη ή όχι η επιλογή των μέτρων.

Με δεδομένο λοιπόν πως το σύστημα έχει ως απόλυτο προτεραιότητα την προστασία των πολιτών και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερθέντα, προκύπτει ότι το βάρος του κριτηρίου της αποτελεσματικότητας λαμβάνεται ίσο με 6/13, ένα βάρος αισθητά αυξημένο σε σχέση με αυτά των υπολοίπων κριτηρίων.

Επομένως, προκύπτει ο πίνακας βαρών-κριτηρίων:

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας βαρών-κριτηρίων

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Βαρύτητα	1/13	2/13	1/13	3/13	6/13

Με την επιλογή των βαρών προκύπτει ολοκληρωμένος ο αρχικός πίνακας m_{ij} όπου m εναλλακτικές και n τα κριτήρια του προβλήματος.

Πίνακας 10: Πίνακας βαρών και αξιολόγησης εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Βάρη	0,08	0,15	0,08	0,23	0,46
Έξοδος κινδύνου	2	3	9	8	5
Μηχανικός αερισμός	5	3	6	9	9
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	5	5	4	6	7
Σήμανση	7,5	7,5	7	6	4
Φανάρι	7,5	8,5	9	5	4
Μπάρες	6	7,5	9	6	6

5.3 Πίνακας συμφωνίας

Έπειτα από την συμπλήρωση του πίνακα βαρών και αξιολόγησης των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια, ακολουθεί η δημιουργία του πίνακα συμφωνίας.

Από τον πίνακα συμφωνίας φαίνονται οι εναλλακτικές των γραμμών που υπερέρχουν των εναλλακτικών των στηλών. Ο υπολογισμός του δείκτη συμφωνίας έγινε σύμφωνα με το τυπολόγιο που παρατέθηκε στο Κεφάλαιο 'Η μέθοδος ELECTRE I'

Πίνακας 11: Πίνακας συμφωνίας

	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου		0,23	0,31	0,77	0,77	0,31
Μηχανικός αερισμός	0,92		0,85	0,69	0,69	0,69
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	0,69	0,23		0,69	0,69	0,69
Σήμανση	0,23	0,31	0,54		0,77	0,46
Φανάρι	0,31	0,31	0,31	0,77		0,31
Μπάρες	0,77	0,31	0,54	0,92	0,77	

5.4 Πίνακας ασυμφωνίας

Στη συνέχεια, ακολουθεί η δημιουργία του πίνακα ασυμφωνίας.

Από τον πίνακα ασυμφωνίας, ελέγχεται αν υπάρχει ισχυρή αντίθεση κάποιας εναλλακτικής έναντι κάποιας άλλης. Ο υπολογισμός του δείκτη ασυμφωνίας έγινε σύμφωνα με το τυπολόγιο που παρατέθηκε στο Κεφάλαιο 'Η μέθοδος ELECTRE I'

Πίνακας 12: Πίνακας ασυμφωνίας

	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου		0,57	0,43	0,79	0,79	0,64
Μηχανικός αερισμός	0,43		0,29	0,64	0,79	0,64
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	0,71	0,43		0,43	0,71	0,71
Σήμανση	0,29	0,71	0,43		0,29	0,29
Φανάρι	0,43	0,71	0,43	0,14		0,29
Μπάρες	0,29	0,43	0,14	0,21	0,21	

5.5 Κατασκευή πυρήνα

Στο επόμενο στάδιο, θα δοθούν τιμές στο κατώφλι συμφωνίας c και στο κατώφλι ασυμφωνίας d . Έπειτα, δημιουργείται ο δυαδικός πίνακας επικράτησης $m \times m$ E για τον οποίο:

$a \text{ S } b \Leftrightarrow C(a, b) \geq c$ και $D(a, b) \leq d$ και παίρνει την τιμή TRUE

, ειδάλλως παίρνει την τιμή FALSE.

Αυτό το στάδιο θα ξεκινήσει για τιμές των κατώφλιών συμφωνίας και ασυμφωνίας ‘αυστηρές’ και θα επαναληφθεί μέχρι να καταλήξουμε σε μία εναλλακτική. Προφανώς, ενδέχεται η ενδεδειγμένη εναλλακτική στο πρόβλημα της φωτιάς σε οδική σήραγγα να περιλαμβάνει συνδυασμό εναλλακτικών, αλλά αυτό θα εξεταστεί αργότερα στα συμπεράσματα.

Πίνακας 13: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,92$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,21$

Κατώφλι συμφωνίας c	0,92
Κατώφλι ασυμφωνίας d	0,21

Πίνακας 14: Πίνακας επικράτησης για το πρώτο τρίμηνο του βασικού σεναρίου

ΠΡΩΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE

Φανάρι	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μπάρες	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE

Από το πρώτο τρέξιμο συμπεραίνουμε ότι:

Απορρίπτεται σε πρώτη φάση η επιλογή της σήμανσης.

Πίνακας 15: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,85$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,29$

Κατώφλι συμφωνίας c	0,85
Κατώφλι ασυμφωνίας d	0,29

Πίνακας 16: Πίνακας επικράτησης για το δεύτερο τρέξιμο του βασικού σεναρίου

ΔΕΥΤΕΡΟ ΤΡΕΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE

Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Φανάρι	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μπάρες	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE

Από το δεύτερο τρέξιμο συμπεραίνουμε ότι:

Απορρίπτεται σε πρώτη φάση η επιλογή του συστήματος ειδοποίησης.

Πίνακας 17: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,77$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,29$

Κατώφλι συμφωνίας c	0,77
Κατώφλι ασυμφωνίας d	0,29

Πίνακας 18: Πίνακας επικράτησης για το τρίτο τρέξιμο του βασικού σεναρίου

ΤΡΙΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες

Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE
Φανάρι	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μπάρες	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE

Από το τρίτο τρέξιμο συμπεραίνουμε ότι:

Απορρίπτεται σε πρώτη φάση η επιλογή της εξόδου κινδύνου και της φωτεινής σηματοδότησης.

Πίνακας 19: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,69$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,64$

Κατώφλι συμφωνίας c	0,69
Κατώφλι ασυμφωνίας d	0,64

Πίνακας 20: Πίνακας επικράτησης για το τέταρτο τρέξιμο

ΤΕΤΑΡΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Φανάρι	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μπάρες	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE

Από το τέταρτο τρέξιμο συμπεραίνουμε ότι:

Απορρίπτεται η εναλλακτική των μπαρών που αποκόβουν την είσοδο και την έξοδο της οδικής σήραγγας.

Επομένως, σύμφωνα με την μέθοδο ELECTRE I προκρίνεται ως βέλτιστο πρόσθετο μέτρο ασφαλείας μίας οδικής σήραγγας σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς, την εγκατάσταση συστήματος μηχανικού αερισμού.

5.6 Λογισμικό για εκτύλιξη σεναρίου και ανάλυση ευαισθησίας

Η εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE I τόσο κατά την εκτύλιξη του βασικού σεναρίου όσο και κατά την ανάλυση ευαισθησίας έγινε με χρήση του λογισμικού Excel. Μοντελοποιήθηκαν τα βήματα της μεθόδου ELECTRE I σε λογισμικό Excel από τον γράφοντα έτσι ώστε να συνάδουν απόλυτα με την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο με το θεωρητικό υπόβαθρο της ELECTRE I. Ενδεικτικές εικόνες από την μοντελοποίηση της ELECTRE I στο λογισμικό Excel παραθέτονται στο **Παράρτημα Α**.

5.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Μέχρι τώρα, οι παράμετροι του εξεταζόμενου μοντέλου έχουν θεωρηθεί σταθερές. Προέρχονται από ανάλυση βιβλιογραφίας, νομοθεσίας και σχετικών σεναρίων προηγούμενων διπλωματικών. Προφανώς, έχουν παρθεί τιμές έπειτα από ενδελεχή μελέτη όμως αυτές οι τιμές επηρεάζονται και από εξωγενείς παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν κατά την συρραφή της διπλωματικής. Για παράδειγμα, εφόσον βελτιωθεί η εκπαίδευση των χρηστών της σήραγγας ή εφόσον ο χρονικός παράγοντας για κάποιο λόγο είναι μείζονος σημασίας, τότε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την μέθοδο ELECTRE θα είναι διαφορετικά.

Με την παραπάνω εισαγωγή, γίνεται σαφές πως χρειάζεται να γίνει ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων συνθηκών του προβλήματος για να εξαχθεί πόσο επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της ELECTRE. Η υπαρκτή αβεβαιότητα κατά την διαδικασία της απόφασης (decision making) καθιστά την ανάλυση ευαισθησίας απαραίτητη.

Ως ανάλυση ευαισθησίας ορίζεται η ανάλυση της επίδρασης της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων ενός προβλήματος στην τελική λύση και έχει σαν αποτέλεσμα τον καθορισμό των σχετικών ορίων των τιμών αυτών έτσι ώστε η βέλτιστη λύση να παραμένει σταθερή.

5.7.1 Ανάλυση ευαισθησίας του κόστους κατασκευής

Σε αυτό το σημείο, θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας όσον αφορά το κόστος κατασκευής των εναλλακτικών. Πιο συγκεκριμένα, ως τώρα κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε η παραδοχή ότι στον βωμό της κατά το δυνατόν αυξημένης προστασίας της ανθρώπινης ύπαρξης, θα ληφθούν εναλλακτικές που θα επιδρούν στοχευμένα και γρήγορα στις συνθήκες που δυσχεραίνουν τους χρήστες της σήραγγας. Όμως, η επιλογή των εναλλακτικών επιλογών

αυτών συνεπάγεται και το αντίστοιχο κόστος κατασκευής τους που ορισμένες φορές είναι αρκετά μεγάλο ιδιαίτερα στην δημιουργία εξόδων κινδύνου και συστήματος μηχανικού αερισμού.

Έτσι, έχει ιδιαίτερη σημασία να δούμε τι αποτέλεσμα εξάγεται από την χρήση της μεθόδου ELECTRE I εφόσον αυξηθεί η βαρύτητα του κριτηρίου του κόστους κατασκευής, το οποίο θα είναι εις βάρος του κριτηρίου της αποτελεσματικότητας. Επομένως, ο πίνακας των βαρών των κριτηρίων γίνεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης ανάλυσης ευαισθησίας ο παρακάτω:

Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας βαρών-κριτηρίων για την πρώτη ανάλυση ευαισθησίας

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Βαρύτητα	1/13	4/13	1/13	3/13	4/13

Για τους καινούργιους διαμορφωμένους πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας ξεκινάει η επιλογή κατωφλιού συμφωνίας c και ασυμφωνίας d μέχρι να καταλήξουμε σε μία βέλτιστη εναλλακτική. Αυτό συμβαίνει στα πλαίσια αξιολόγησης των εναλλακτικών παρόλο που στην πράξη είναι βέβαιο πως προτείνεται συνδυασμός εναλλακτικών.

Από το πρώτο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,69$ και $d=0,19$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτεται η εναλλακτική της σήμανσης.

Από το δεύτερο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,69$ και $d=0,25$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτεται η εναλλακτική της ειδοποίησης.

Από το τρίτο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,62$ και $d=0,25$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτονται οι εναλλακτικές των φαναριών αλλά και της μπάρας.

Στη συνέχεια, παραθέεται ο πίνακας επικράτησης για το τέταρτο τρέξιμο, που θα προκρίνει και την εναλλακτική που είναι σύμφωνα με την μέθοδο η βέλτιστη σε περίπτωση που αυξηθεί η βαρύτητα του κριτηρίου του κόστους κατασκευής.

Πίνακας 23: Σχέση επικράτησης για κατώφλι συμφωνίας $c=0,62$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,29$

Κατώφλι συμφωνίας c	0,62
Κατώφλι ασυμφωνίας d	0,29

Πίνακας 24: Πίνακας επικράτησης για το τέταρτο τρίμημο της πρώτης ανάλυσης ευαισθησίας

ΤΕΤΑΡΤΟ ΤΡΙΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE
Φανάρι		FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
Μπάρες	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	FALSE

Επομένως, από το τέταρτο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,62$ και $d=0,29$ καταλήγουμε ότι η βέλτιστη εναλλακτική λύση είναι η χρήση του συστήματος του μηχανικού αερισμού.

Παρατηρείται ότι αυτή η λύση συμπίπτει με την λύση που προέκυψε από το αρχικό τρέξιμο της μεθόδου στην ανάλυση σεναρίου. Επομένως, το σύστημα του μηχανικού αερισμού κρίνεται ως το πιο κατάλληλο είτε τεθούν πιο αυστηροί οικονομικοί περιορισμοί είτε αν αναζητηθεί καθαρά χρηστοκεντρική λύση.

5.7.2 Ανάλυση ευαισθησίας σε περίπτωση ενημέρωσης των χρηστών

Κατά τις εναλλακτικές λύσεις που εξετάστηκαν, υπάρχουν εναλλακτικές που στηρίζουν την λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση με τους χρήστες όπως τα φανάρια και η σήμανση. Ομοίως, υπάρχουν εναλλακτικές όπως ο μηχανικός αερισμός και εν μέρει το σύστημα ειδοποίησης από το κέντρο ελέγχου που λειτουργούν παράλληλα και ανεξάρτητα με τις κινήσεις των χρηστών.

Κατά την ανάλυση του σεναρίου που πραγματοποιήθηκε και έχοντας γνώση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από σχετικές έρευνες, προέκυψε πως οι χρήστες δεν έχουν τις απαραίτητες γνώσεις σχετικά με τις ενδεδειγμένες κινήσεις εντός σήραγγας. Αυτό έχει ως συνέπεια να μειώνεται και η αποδοτικότητα των εναλλακτικών που στηρίζονται στην μετάγγιση μηνυμάτων προς τους χρήστες. Το επίπεδο ενημέρωσης και εκπαίδευσης των χρηστών είναι άμεσα

Έχει λοιπόν ιδιαίτερη αξία να μελετηθεί η περίπτωση που οι χρήστες είναι πιο ενημερωμένοι για τις συνθήκες ασφαλείας εντός οδικών σηράγγων. Τότε είναι εύλογο πως θα αλλάξει η αποτελεσματικότητα ορισμένων εναλλακτικών προς το καλύτερο, αφού πλέον τα μηνύματα που δίνουν προς τους υποψιασμένους χρήστες γίνονται πιο εύληπτα και κατανοητά. Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση της συμπεριφοράς των χρηστών, αρκεί μία ομάδα χρηστών να είναι πληροφορημένη για το κατάλληλο ανά περίπτωση σχέδιο δράσης προκειμένου να την ακολουθήσει και να την μιμηθεί και το υπόλοιπο πλήθος των χρηστών της σήραγγας σε κίνδυνο.

Επομένως, στα πλαίσια της συγκεκριμένης ανάλυσης ευαισθησίας θα μελετηθεί πως η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της σήμανσης και των φαναριών επηρεάζουν την τελική έκβαση της ELECTRE I. Ο αναθεωρημένος πίνακας βαρών και αξιολόγησης εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια είναι ο παρακάτω:

Πίνακας 25: Πίνακας βαρών και αξιολόγησης εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια στην δεύτερη ανάλυση ευαισθησίας

Κριτήριο	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα
Βάρη	0,08	0,15	0,08	0,23	0,46
Έξοδος κινδύνου	2	3	9	8	5
Μηχανικός αερισμός	5	3	6	9	9
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	5	5	4	6	7
Σήμανση	7,5	7,5	7	6	7
Φανάρι	7,5	8,5	9	5	6
Μπάρες	6	7,5	9	6	6

Για τους καινούργιους διαμορφωμένους πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας ξεκινάει η επιλογή κατωφλιού συμφωνίας c και ασυμφωνίας d μέχρι να καταλήξουμε σε μία βέλτιστη εναλλακτική. Αυτό συμβαίνει στα πλαίσια αξιολόγησης των εναλλακτικών παρόλο που στην πράξη είναι βέβαιο πως προτείνεται συνδυασμός εναλλακτικών και όχι μεμονωμένη χρήση μίας εναλλακτικής.

Από το πρώτο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=1,00$ και $d=0,00$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτεται η εναλλακτική της ειδοποίησης.

Από το δεύτερο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,77$ και $d=0,29$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτονται οι εναλλακτικές των μπαρών στα σημεία εισόδου και εξόδου, των φαναριών και της εξόδου κινδύνου.

Από το τρίτο τρέξιμο της μεθόδου ELECTRE I για $c=0,69$ και $d=0,43$ συμπεραίνουμε ότι απορρίπτεται η εναλλακτική της σήμανσης.

Στη συνέχεια, δίνεται ο πίνακας επικράτησης του τρίτου και τελικού τρεξίματος της ELECTRE I που θα προκρίνει την βέλτιστη εναλλακτική σε περίπτωση καλύτερης εκπαίδευσης των χρηστών σε θέματα ασφάλειας σηράγγων για κατώφλι συμφωνίας $c=0,69$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,43$

Πίνακας 26: Πίνακας επικράτησης για το τρίτο τρέξιμο για $c=0,69$ και $d=0,43$

ΤΡΙΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ						
	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
Ειδοποίηση από κέντρο ελέγχου	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
Σήμανση	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE
Φανάρι	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
Μπάρες	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE

Επομένως, από το τρίτο και τελικό τρέξιμο της ELECTRE I στην ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος σε περίπτωση ενημέρωσης των χρηστών προκύπτει ότι η βέλτιστη εναλλακτική είναι η εγκατάσταση του συστήματος του μηχανικού αερισμού. Αυτό το συμπέρασμα έχει εξαχθεί και στα προηγούμενα 2 σενάρια οπότε δίνει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα στην προσπάθεια αξιολόγησης των εναλλακτικών.

6 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λαμβάνονται ως δεδομένα τα αποτελέσματα από την ανάλυση επικινδυνότητας που έχει γίνει σε σήραγγα με συγκεκριμένα γεωμετρικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά και γίνεται προσπάθεια για την αξιολόγηση έξι μέτρων ασφαλείας που θα επιδράσουν θετικά στην προσπάθεια αντιμετώπισης των ατυχημάτων φωτιάς στις οδικές σήραγγες.

Τα έξι αυτά μέτρα ασφαλείας είναι η έξοδος κινδύνου, το σύστημα μηχανικού αερισμού, η ειδοποίηση από το κέντρο ελέγχου της σήραγγας και τα συστήματα σήμανσης, φανών και μπαρών της σήραγγας. Η εν λόγω αξιολόγηση έγινε με βάση πέντε βασικά κριτήρια καθορισμού απόφασης και αυτά τα κριτήρια ήταν ο χρόνος κατασκευής, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας αλλά και η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές αυτές, έγινε μελέτη της συμπεριφοράς των χρηστών της σήραγγας αλλά και παρατέθηκαν τα βασικά στοιχεία της φωτιάς. Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της αξιολόγησης, χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτήρια μέθοδος ανάλυσης ELECTRE I. Σύμφωνα με την μέθοδο ELECTRE I, η εναλλακτική που προκρίθηκε ως η βέλτιστη από τις προαναφερθείσες εναλλακτικές είναι το σύστημα του μηχανικού αερισμού. Μάλιστα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός πως το σύστημα του μηχανικού αερισμού της σήραγγας για την απομάκρυνση των επιβλαβών αερίων προέκυψε ως η βέλτιστη εναλλακτική ακόμα και στις 2 αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν, όπου στο ένα σενάριο το κριτήριο του κόστους κατασκευής ήταν πιο καθοριστικό για την τελική λήψη της απόφασης και στο άλλο σενάριο οι χρήστες είχαν ορθότερες αντιδράσεις καθώς ήταν πιο ενημερωμένοι.

Προσπαθώντας να ερμηνευτεί το αποτέλεσμα αυτό της μεθόδου ELECTRE I, παρατηρείται ότι το σύστημα του μηχανικού αερισμού ήταν το μόνο υπό εξέταση μέτρο ασφαλείας που η ενεργοποίησή του δεν στηριζόταν στην αλληλεπίδραση συστήματος με χρήστη ενώ και η επιτυχής λειτουργία του έχει μικρή εξάρτηση από την δράση των χρηστών. Το γεγονός ότι ο μηχανικός αερισμός επιτελεί τον σκοπό του, που είναι καθοριστικός όσο συμβαίνει ταυτόχρονα η κρίσιμη διαδικασία της αυτό-διάσωσης, χωρίς να καθυστερεί τους χρήστες της σήραγγας ή να απαιτεί από αυτούς κάποιου είδους εκπαίδευση και γνώση συμπεριφοράς σε τέτοιες συνθήκες καθιστά τον μηχανικό αερισμό την βέλτιστη εναλλακτική από τις μελετηθείσες σε καταστάσεις φωτιάς εντός οδικών σηράγγων με παρουσία ανθρώπων μέσα σε αυτές.

Βέβαια, είναι καθοριστικό να τονιστεί οι τιμές των εναλλακτικών ως προς τα διάφορα κριτήρια στο σύστημα μπορεί να δόθηκαν έπειτα από έρευνα της συμπεριφοράς των χρηστών σε παρόμοιες συνθήκες ή με βάση παρόμοια ατυχήματα στο παρελθόν και επικαλούμενοι τις αναφορές των ατυχημάτων και σε καμμία περίπτωση τυχαία όμως, πρέπει να λαμβάνεται

υπόψιν ότι η επιλογή των τιμών για την αξιολόγηση των εναλλακτικών αποτελεί κρίση του αποφασίζοντα που διεξάγει το στάδιο της μείωσης επικινδυνότητας (risk treatment). Το ποσοστό υποκειμενικότητας της επιλογής των τιμών που υπάρχει στα πλαίσια της χρήσης της πολυκριτηριακής μεθόδου ανάλυσης καθιστά το τελικό συμπέρασμα της μεθόδου μεταβλητό καθώς διαφορετικοί αναλυτές μπορεί να τροποποιήσουν τα δεδομένα (input) της μεθόδου επηρεάζοντας εν τέλει και το αποτέλεσμα αυτής. Όμως, έχουν γίνει πολλές δοκιμαστικές τιμές στα πλαίσια διαφόρων σεναρίων και στην συντριπτική πλειοψηφία αυτών η τελική εναλλακτική ήταν αυτή του μηχανικού αερισμού και απλώς υπήρχε διαφοροποίηση ως προς τα τελικά κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας στα οποία βρισκόταν η τελευταία μοναδική εναλλακτική.

Το συμπέρασμα ότι το πιο χρήσιμο μέτρο ασφαλείας είναι το σύστημα του μηχανικού αερισμού ισχύει με τις δεδομένες συνθήκες όπου οι χρήστες των σηράγγων δεν έχουν αποκτήσει την κατάλληλη εκπαίδευση ως προς την συμπεριφορά τους σε τέτοιες συνθήκες και αυτό επηρεάζει αρνητικά την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών όπως η επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου της σήραγγας ή τα συστήματα της φωτεινής ειδοποίησης και της σήμανσης. Έγινε μια απαραίτητη ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο όπου οι χρήστες είναι πιο ενημερωμένοι και εκμεταλλεύονται καλύτερα την παρουσία των μέτρων ασφαλείας και πάλι η βέλτιστη εναλλακτική φάνηκε να είναι το σύστημα του μηχανικού αερισμού. Όμως, σε περίπτωση που βελτιωθούν οι αποτελεσματικότητες αισθητά όλων των άλλων εναλλακτικών μπορεί είτε η μέθοδος ELECTRE I να βγάλει άλλο συμπέρασμα, είτε το ίδιο συμπέρασμα να έχει μεγαλύτερη ισχύ, δηλαδή να καταλήγει η μέθοδος στο σύστημα του μηχανικού αερισμού με λιγότερα τρεξίματα και με υψηλότερο τελικό κατώφλι συμφωνίας και αντίστοιχα με χαμηλότερο τελικό κατώφλι ασυμφωνίας.

Ιδιαίτερη μνεία και προσοχή αξίζει να δοθεί στο γεγονός πως το αποτέλεσμα της μεθόδου της ELECTRE I (όποιο και να ήταν) βοηθάει στην εποπτεία των μέσων ασφαλείας αδιαμφισβήτητα και επιτρέπει τον εντοπισμό της πιο αξιόλογης εναλλακτικής όμως θα ήταν εσφαλμένο να θεωρηθεί ότι υποδηλώνει το μέτρο που πρέπει να χρησιμοποιείται και από μόνο του αρκεί για την αντιμετώπιση αυτού του πολύπλευρου και λεπτού ζητήματος. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεσματική προστασία των χρηστών μπορεί να υπάρξει μόνο με τον συνδυασμό όλων των εναλλακτικών μαζί καθώς κάθε μία επιτελεί διαφορετικό σκοπό και η παράλειψη έστω μέρους αυτών θα προκαλούσε κάποια συνθήκη πολύ δυσμενής για τους χρήστες. Επομένως, με την αξιολόγηση του μηχανικού αερισμού ως το καλύτερο μέτρο ασφαλείας εντοπίζεται το μέτρο ασφαλείας που συνεισφέρει το περισσότερο σε μία πετυχημένη αυτό-διάσωση σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς σε σήραγγα και αυτό βοηθάει στην πολιτική της περαιτέρω εμβάθυνσης και βελτιστοποίησης των μηχανισμών του συστήματος αερισμού.

Επιπρόσθετα, πολύ σημαντική παρατήρηση είναι η ταύτιση των αποτελεσμάτων της αποτελεσματικότητας των επιμέρους εναλλακτικών με τα ευρήματα από την βιβλιογραφική αναζήτηση. Υπάρχει περιθώριο για βελτίωση τόσο της αποδοτικότητας όσο και της αποτελεσματικότητας ορισμένων εναλλακτικών. Για παράδειγμα, η αναβάθμιση των θυρών των εξόδων κινδύνου ώστε να έχουν πάνω τους μεγάφωνο με μαγνητοφωνημένο μήνυμα προς τους χρήστες, θα βοηθούσε τους εκκενωτές της σήραγγας να αντιληφθούν πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ακρίβεια την θέση της εξόδου κινδύνου. Επίσης, σχολιάστηκε πως φωτεινή υποβοήθηση στα σήματα γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες συνήθως όμως δεν καταλαβαίνουν το μήνυμα με το οποίο συνδέονται. Επομένως, ο τομέας του σχεδιασμού των συστημάτων σήμανσης χρήζει περαιτέρω ανάλυσης καθώς πολλές φορές η παρουσία των σημάτων αγνοείται εξαιτίας του σκοτεινού και γεμάτου καπνού περιβάλλοντος.

Στα πλαίσια της μελέτης για την αξιολόγηση των εναλλακτικών, εντοπίστηκαν και άλλες μέθοδοι ασφάλειας οι οποίες δεν εξετάστηκαν αναλυτικά όμως παραθέτονται τώρα καθώς έχουν επικουρικό ρόλο και καλό είναι να εφαρμοστούν και αυτές προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερο επίπεδο ασφάλειας. Πιο συγκεκριμένα, από προσομοιώσεις των κινήσεων των χρηστών φανερώθηκε ότι πολλοί από τους χρήστες κατευθύνονται προς τους τοίχους σε περίπτωση ατυχήματος και διασχίζουν την σήραγγα κρατώντας με το ένα ή και με τα δύο χέρια τα τοιχώματα της σήραγγας επομένως ένα πρόσθετο μέτρο ασφαλείας θα ήταν η εγκατάσταση χειρολαβών κατά μήκος των τοιχωμάτων της σήραγγας ώστε να προσανατολίζονται πιο γρήγορα οι χρήστες (Frantzich και Nilsson 2004).

Στην ίδια λογική, η τοποθέτηση συστήματος πυρανίχνευσης είναι σε θέση να επιταχύνει τις διαδικασίες και να προλάβει ορισμένες δυσάρεστες καταστάσεις. Το σύστημα πυρανίχνευσης στηρίζεται σε αισθητήρες μονοξειδίου του άνθρακα και της ομίχλης και επικοινωνεί αυτόματα με το σύστημα SCADA του εποπτικού κέντρου της σήραγγας. Δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα ως μέτρο ασφαλείας καθώς συχνό είναι το φαινόμενο να μην μπορούν οι αισθητήρες να διαχωρίσουν τα παράγωγα της φωτιάς με τους ρύπους που εύλογα εκλύονται από τα οχήματα που διαπερνούν την σήραγγα.

Σχετικά με πιθανούς περιορισμούς της διπλωματικής εργασίας, επισημαίνεται ότι η επιλογή των υπό εξέταση εναλλακτικών έγινε έπειτα από ανάλυση επικινδυνότητας σήραγγας συγκεκριμένων γεωμετρικών και κυκλοφοριακών δεδομένων και δεν μπορεί να γενικευτεί στο σύνολο όλων των διαφορετικών σηράγγων παγκοσμίως αποτελεί όμως μία καλή προσέγγιση μίας μέσης σήραγγας τόσο στον ελληνικό όσο και στον παγκόσμιο χώρο. Επίσης, ακριβής ποσοτική σύγκριση των κοστών κατασκευής και λειτουργίας δεν έχει φυσική υπόσταση καθώς οι εναλλακτικές δεν εξετάστηκαν από την καθαρή οικονομική σκοπιά αλλά κυρίως ως προς την σχέση αποτελεσματικότητας-κόστους που παρείχαν.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία πέτυχε σε σημαντικό βαθμό τους σκοπούς της. Η τελική κατάταξη του συστήματος του μηχανικού αερισμού ως η βέλτιστη από

τις προαναφερθείσες εναλλακτικές παρόλο που συνοδευόταν από μεγάλο κόστος κατασκευής υποδεικνύει ότι πιο αποτελεσματική είναι η εναλλακτική που δεν απαιτεί από την μεριά των χρηστών της σήραγγας κάποιου είδους επιμόρφωση πάνω σε πρότυπα συμπεριφοράς σε σήραγγες. Γνωρίζοντας πλέον το μέτρο ασφαλείας που συνεισφέρει με τις υπάρχουσες συνθήκες το περισσότερο, είναι εφικτό να γενικευτεί το αποτέλεσμα της μεθόδου και να επικεντρωθούν οι προσπάθειες στην βελτίωση της αποδοτικότητας του μηχανικού αερισμού, στην εύρεση της διάταξης ανεμιστήρων που ανά τύπο σήραγγας ελέγχει καλύτερα τον καπνό και δεν δημιουργεί back layering και στην επιλογή είδους αερισμού (εγκάρσιος, ημιεγκάρσιος ή διαμήκης) ανάλογα με τις απαιτήσεις της σήραγγας.

Η φιλοσοφία της μελέτης κατά την διάρκεια όλης της παρούσας εργασίας ήταν χρηστοκεντρική και η προστασία των ανθρώπων από ατυχήματα πυρκαγιάς σε οδικές σήραγγες αποτέλεσε αυτοσκοπό και δεν περιορίστηκε από οικονομικούς περιορισμούς κατά την διαδικασία της αξιολόγησης των μέτρων ασφαλείας. Από την μελέτη που προηγήθηκε προέκυψαν 2 πεδία προβληματισμού τα οποία δύνανται να αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας στο μέλλον προκειμένου να βελτιωθεί το συνολικό επίπεδο ασφαλείας στις σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, οι εσωτερικές αποδόσεις πολλών μέτρων ασφαλείας χρήζουν μελέτης και βελτίωσης καθώς δεν επιτελούν στον βέλτιστο βαθμό τον σκοπό τους. Επίσης, τόσο σε αυτή την διπλωματική εργασία όσο και σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές έχει τονιστεί ότι η γνώση των ανθρώπων για τις πρότυπες δράσεις εντός σήραγγας είναι περιορισμένες και χρειάζεται οργανωμένη προσπάθεια ενημέρωσης των χρηστών προκειμένου να αξιοποιούνται στο έπακρο τα μέτρα ασφαλείας, να μειώνονται δραστικά οι αρνητικές συνέπειες των ατυχημάτων φωτιάς εντός των οδικών σηράγγων και τέλος οι σωστά ενημερωμένοι να αποτελούν παράδειγμα προς μίμηση για τους υπόλοιπους χρήστες τις κρίσιμες στιγμές της διαδικασίας της εκκένωσης της σήραγγας.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Amundsen, F.H., 1994, 'Studies of driver behaviour in Norwegian road tunnels'. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 9, 9–15.

Beard A. and Carvel R., 2005, *The Handbook of tunnel fire safety*, Thomas Telford, London.

Brans, J. P., Vincke, P. H., and Mareschall, B., 1986, 'How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method', *European Journal of Operational Research*, vol. 24, no. 2, pp. 228-238.

Buchanan J., 1999, 'Project ranking using Electre III', *Research Gate*

Carvel R., 2017, 'Numerical study on fire smoke movement and control n curved road tunnels', *Tunnelling and Underground Space Technology* 67, 1-7.

Datwyler 2011, *System Circuit Integrity in the Event of Fire*.

Fridolf, K., Nilsson, D., Frantzich, H., 2011. Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research. *Fire Technol.* 49 (2), 451–475. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-011-0217-x>.

Gandit, M., Kouabenan, D.R., Caroly, S., 2009. Road-tunnel fires: risk Perception and management strategies among users. *Saf. Sci.* 47, 105–114.

Hoye A., 2004, *The handbook of road safety measures*, Emerald, Norway.

Kirytopoulos, K., Kazaras, K., Papapavlou, P., Ntzeremes, P., Tatsiopoulos, I., 2016. 'Exploring driving habits and safety critical behavioural intentions among road tunnel users: A questionnaire survey in Greece', *Tunnelling and Underground Space Technology* 63, 244–251.

Lacroix, D., 2001. The Mont Blanc Tunnel fire: what has happened and what has been learned. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Madrid, pp. 3–16.

Laservision (n.d). *SOFTSTOP Barrier System*. [image] Available at: <http://www.laservision.com.au/portfolio/softstop/> [Accessed 23 May 2018].

Li, M.-X., Zhang, Z.-J., Milke, J., Lu, G.-J., Mei, X.-J., 2018. Experimental Research on the Smoke Control System in a Complex Road Tunnel Fire. *Procedia Engineering* 211, 379-387.

Naevestad, T.-O., Meyer, S., 2014. A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008-2011. *Tunnelling and Underground Space Technology* 41, 104-112.

National Safety Signs (2018). *Exit Arrows*. [image] Available at: <https://nationalsafetysigns.com.au/product-category/emergency-and-first-aid-signs/emergency-exit-signs/> [Accessed 22 May 2018].

Nilsson, D., Johansson, M., Frantzich, H., 2009. Evacuation experiment in a road tunnel: a study of human behaviour and technical installations. *Fire Saf. J.* 44, 458–468.

Noren & Winer. 2003, Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations. Available from: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1688832&fileId=1765602> [16th April 2018]

PIARC, 2008. Human Factors and Road Tunnel Safety Regarding Users. World Road Association (PIARC), France.

Ronchi, E., Fridolf, K., Frantzich, H., Nilsson, D., Walter, A.-L., Modig, H., 2018, 'A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke', *Fire Safety Journal* 97, 126-136.

Roy, B. and Bouyssou, D. (1993): "Aide multicritère à la decision: Méthodes *et cas*", *Economica, Collection Gestion; Paris*.

Roy (1996), *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

World Road Association (PIARC) (2008). *Emergency exit*. [image] Available at: <https://tunnels.piarc.org/en/transverse-aspects/human-factors> [Accessed 23 May 2018].

Yeung, S.J., Wong, D.Y., Xu, H., 2013. Driver perspectives of open and tunnel expressways. *J. Environ. Psychol.* 36, 248–256.

Yu, W. (1992). ELECTRE TRI. Aspects méthodologiques et guide d'utilisation, *Document du LAMSADE*, No. 74, Université Paris-Dauphine.

Zenitel (2018). *Traffic Control Centre*. [image] Available at: <https://www.zenitel.com/transportation/tunnels> [Accessed 18 May 2018].

Βιβλιογραφία στην ελληνική γλώσσα

Διοικητική Αρχή Σηράγγων Δ.Α.Σ, 2011, Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα μέσα από οδικές σήραγγες που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ 230/07 (σεναριακή προσέγγιση), Διοικητική Αρχή Σηράγγων, Ελλάδα .

Ευσταθίου Χ. (2013). Σχεδιασμός Πυρασφάλειας & Διαδικασίες Αντιμετώπισης Πυρκαγιών σε Οδικά Τούνελ. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ζαφειρίου Σ. 2012. Ατυχήματα πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες. Διαθέσιμο από: <http://www.fire.gr/?p=1703> [10 Απριλίου 2018].

Κηρυττόπουλος Κ., 2010, Εγχειρίδιο διαχείρισης κινδύνων έργων: Η οπτική του μάντζμεντ, Κλειδάριθμος, Αθήνα.

Μπακογιάννης Γ. 2014, Η προσέγγιση της ασφάλειας των οδικών σηράγγων και η αποτίμηση της επικινδυνότητας. Διαθέσιμο από: <http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/20/118/Mpakogianis-Dialeksi-2014.pdf> [7 Μαΐου 2018].

Ντζερεμές, Π. (2012). *Αποτίμηση επικινδυνότητας οδικών σηράγγων σε ατυχήματα με ύπαρξη φωτιάς*. Ph.D. ΕΜΠ.

Παπαδημητρίου, Μ. (2014). Αξιολόγηση αναβάθμισης μέτρων ασφαλείας σε οδικές σήραγγες. ΕΜΠ.

Σακκάς, Κ.Μ.Γ. 2010, 'Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά', 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος .

Σπανός, Σ. (2004). Αναλυτική μελέτη πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων. ΕΜΠ.

ΦΕΚ 264/Α/23-11-2007, Προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην Οδηγία 2004/54/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 29ης Απριλίου 2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου, Ελληνική Δημοκρατία, Αθήνα .

Χάρης Δούκας, Παναγιώτης Ξυδώνας & Γιάννης Ψαρράς. 2016, Θεωρία σχέσεων υπεροχής & μέθοδος ELECTRE I, σημειώσεις μαθήματος που διανεμήθηκαν στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα Μάιος 2016.

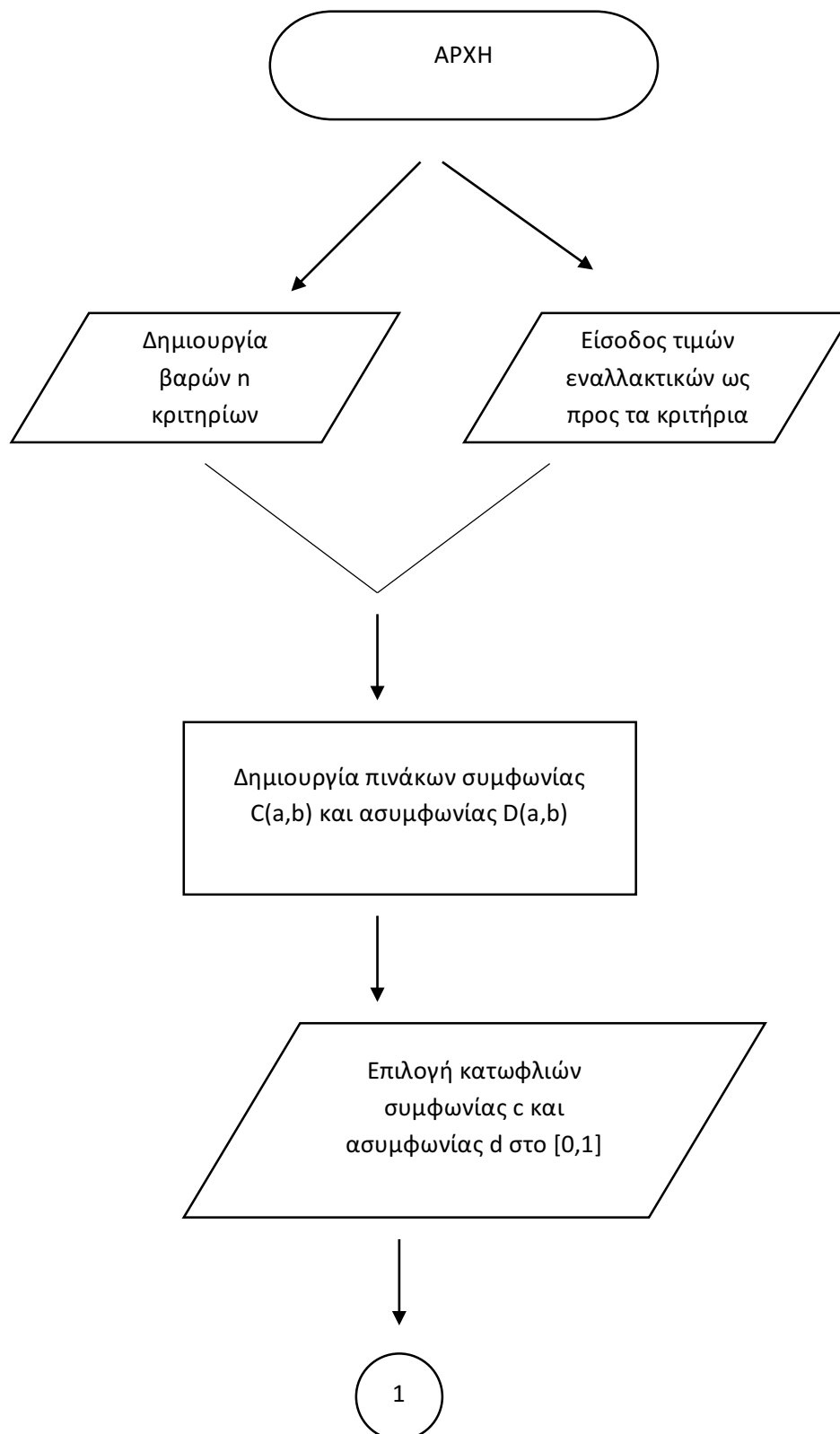
Χάρης Δούκας, Παναγιώτης Ξυδώνας & Γιάννης Ψαρράς. 2016, Η μέθοδος PROMETHEE, σημειώσεις μαθήματος που διανεμήθηκαν στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα Μάιος 2016.

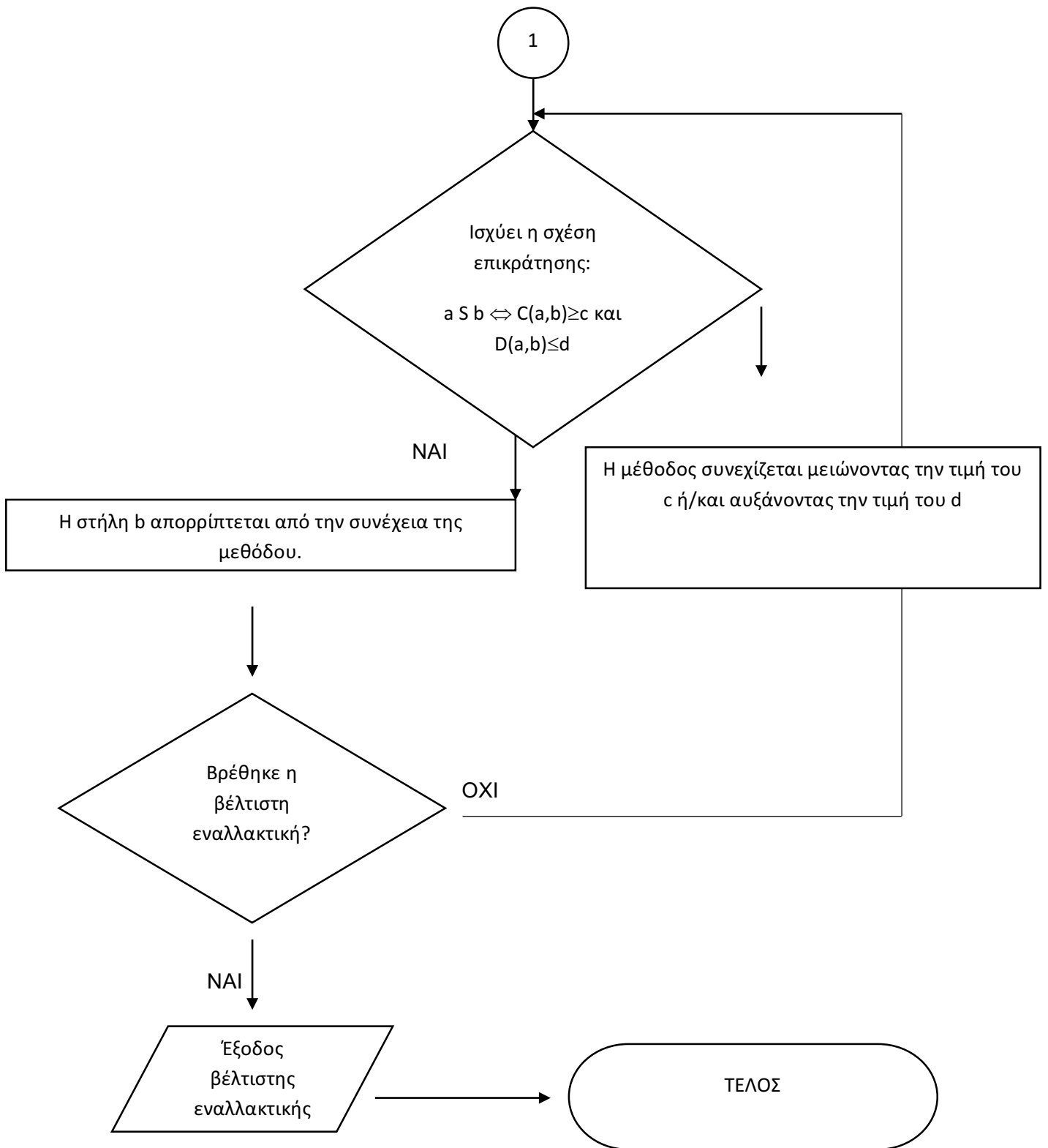
Παράρτημα Α: Στιγμιότυπο οθόνης (screenshot) λογισμικού Excel κατά την τελική επικράτηση του συστήματος του μηχανικού αερισμού στην μελέτη περίπτωσης με την βοήθεια της ELECTRE I

Κλίμακα του 10						
	Κακές	Μέτριες	Καλές	Εξαιρετικές		
	<=2,5	<=5	<=7,5	<=10		
Κριτήρια	Χρόνος κατασκευής	Κόστος κατασκευής	Κόστος λειτουργίας	Αποδοτικότητα	Αποτελεσματικότητα	
Βάρη	0,08	0,15	0,08	0,23	0,46	
Έξοδος κινδύνου	2	3	9	8	5	
Μηχανικός αερισμός	5	3	6	9	9	
Ειδοποίηση	5	5	4	6	7	
Σήμανση	7,5	7,5	7	6	4	
Φανάρι	7,5	8,5	9	5	4	
Μπάρες	6	7,5	9	6	6	
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου		0,23	0,31	0,77	0,77	0,31
Μηχανικός αερισμός	0,92		0,85	0,69	0,69	0,69
Ειδοποίηση	0,69	0,23		0,69	0,69	0,69
Σήμανση	0,23	0,31	0,54		0,77	0,46
Φανάρι	0,31	0,31	0,31	0,77		0,31
Μπάρες	0,77	0,31	0,54	0,92	0,77	
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΣΥΜΦΩΝΙΑΣ	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου		0,57	0,43	0,79	0,79	0,64
Μηχανικός αερισμός	0,43		0,29	0,64	0,79	0,64
Ειδοποίηση	0,71	0,43		0,43	0,71	0,71
Σήμανση	0,29	0,71	0,43		0,29	0,29
Φανάρι	0,43	0,71	0,43	0,14		0,29
Μπάρες	0,29	0,43	0,14	0,21	0,21	

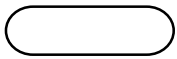
		ΣΧΕΣΗ ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗΣ				
		c	0,69			
		d	0,64			
ΤΕΤΑΡΤΟ ΤΡΕΞΙΜΟ	Έξοδος κινδύνου	Μηχανικός αερισμός	Ειδοποίηση	Σήμανση	Φανάρι	Μπάρες
Έξοδος κινδύνου	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
Μηχανικός αερισμός	TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE
Ειδοποίηση	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
Σήμανση	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE
Φανάρι	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
Μπάρες	TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE

Παράρτημα Β: Διάγραμμα ροής (flowchart) της λειτουργίας της πολυκριτήριας μεθόδου ELECTRE I





ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ



Αρχή/ Τέλος



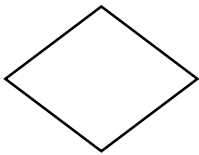
Βέλος πορείας



Είσοδος/ Έξοδος δεδομένων



Διαδικασία



Συνθήκη/ Ερώτηση