



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Τομέας II: Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών & Συστημάτων



ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας – Ακτινοπροστασίας
Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων & Βιομηχανικής Ασφάλειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ Σ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ



Αθήνα, 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Τομέας II: Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών & Συστημάτων



ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας – Ακτινοπροστασίας
Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων & Βιομηχανικής Ασφάλειας

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

Γεωργιάδου Σ. Παρασκευή (Εύη)

Διδακτορική Διατριβή

Επιβλέπων Καθηγητής

Μαρκάτος Νικόλαος - Χρήστος

Καθηγητής

Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Μέλη Συμβουλευτικής Επιτροπής

Παπάζογλου Ιωάννης

Διευθυντής Ερευνών

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Λυγερός Αργύριος

Ομότιμος Καθηγητής

Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Τομέας II: Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών & Συστημάτων



ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας – Ακτινοπροστασίας
Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων & Βιομηχανικής Ασφάλειας

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

Γεωργιάδου Σ. Παρασκευή (Εύη)

Διδακτορική Διατριβή

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Μαρκάτος Νικόλαος – Χρήστος (επιβλέπων) Καθηγητής Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ	Ζιώμας Ιωάννης Καθηγητής Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ	Λυμπεράτος Γεράσιμος Καθηγητής Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ	Ασημακόπουλος Διονύσιος Καθηγητής Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ
Παπάζογλου Ιωάννης Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»	Κυρανούδης Χρήστος Αναπλ. Καθηγητής Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ	Χριστοδουλάκη – Χαλουλάκου Αρχοντούλα Αναπλ. Καθηγήτρια Σχ. Χημ. Μηχ. ΕΜΠ	

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμών της συγγραφέα» (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

στο σύντροφό μου Μάκη

Πρόλογος

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Νικόλαο-Χρήστο Μαρκάτο για την ανάθεση της εκπόνησης της διατριβής και την ανεκτίμητη επιστημονική και ηθική στήριξη του μέχρι και την ολοκλήρωσή της. Ευχαριστώ το Δρ. Ιωάννη Α. Παπάζογλου και τον Αναπλ. Καθηγητή Χρήστο Κυρανούδη, η καθοδηγητική βοήθεια των οποίων σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διατριβής ήταν καθοριστική για το τελικό αποτέλεσμα. Ευχαριστώ, επίσης, τον Καθηγητή Αργύριο Αυγερό για τη συμβολή του μέσω της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, καθώς και την Αναπλ. Καθηγήτρια Αρχοντούλα Χριστοδουλάκη – Χαλουλάκου και τους Καθηγητές Ιωάννη Ζιάμα, Γεράσιμο Λυμπεράτο και Διονύσιο Ασημακόπουλο για τη συμβολή τους με ουσιαστικές παρατηρήσεις επί της διατριβής.

Η συνεργασία με τους ερευνητές Μιχάλη Χριστόλη, Γιώργο Παπαδάκη, Όλγα Ανεζίρη, Ζωή Νιβολιανίτου, Ηρώ Θεοδωράκη, Στάθη Κουρνιαώτη και Μυρτώ Κωνσταντινίδου, στην επιστημονική περιοχή της διαχείρισης τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης συνέβαλε στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος που διαπραγματεύεται η διατριβή. Ιδιαίτερα σημαντική για τη συνέχιση της ερευνητικής προσπάθειας μετά την απόκτηση του πτυχίου, ήταν η εμπειρία που αποκτήθηκε στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας σε συνεργασία με τη συνάδελφο Δρ. Μαρία Γιαννακούρου και επιβλέποντα τον Καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή. Σημαντική ήταν η συμβολή του Δρ. Χρήστου Χατζή για τον προσανατολισμό στην επιστημονική έρευνα στον τομέα της δημόσιας υγείας και ασφάλειας. Ευχαριστώ τις κ.κ. Χριστίνα Μαρκάτου, Ειρήνη Μαρκέτου, Κάλια Μαραμαθά, Σταματέλα Συγγιρίδου και Αγγελική Μάνεση, που βοήθησαν στη διευθέτηση διαδικαστικών ζητημάτων στο Πολυτεχνείο και στο Δημόκριτο. Ευχαριστώ, επίσης, τον Καθηγητή Βασίλειο Μακρόπουλο και τον κ. Ιωάννη Δραπανιώτη για την υποστήριξη του Ε.Α.Ι.Ν.Υ.Α.Ε. στην εκπόνηση της διατριβής.

Θα ήθελα να σταθώ ιδιαίτερα στη σημασία που είχε η ηθική και επιστημονική στήριξη της φίλης μου Δρ. Ξανθής Παπαγεωργίου, χωρίς τη βοήθειά της οποίας δύσκολα θα είχε ολοκληρωθεί η διατριβή. Ευχαριστώ, επίσης, τις φίλες μου Μαρία Γιαννακούρου, Λένα Ζαρέντη και Κατερίνα Μιχαλιού για τη στήριξη τους, τους/τις συναδέλφους μου από το Ε.Α.Ι.Ν.Υ.Α.Ε. και ιδιαίτερα τις Ντίνα Καφάλη και Φανή Θωμαδάκη για τη βοήθειά τους μέσω της Βιβλιοθήκης.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Σπύρο και Αγγέλα και τις αδελφές μου Στέλλα και Γεωργία για την ολόπλευρη στήριξη τους σε όλα τα βήματά μου τα προηγούμενα χρόνια και ειδικότερα τους γονείς μου για το εκπαιδευτικό υπόβαθρο που μου εξασφάλισαν και τον προσανατολισμό που μου έδωσαν σχετικά με την επιστήμη.

Την εργασία αυτή την αφιερώνω στο σύντροφό μου Μάκη Παπαδόπουλο, ο οποίος αποτελεί για μένα πηγή έμπνευσης, παράδειγμα στοχοπροσήλωσης και αποτελεσματικής προσπάθειας, κίνητρο αναζήτησης και συνεχούς βελτίωσης. Χωρίς την επιστημονική και συναισθηματική στήριξη του δεν θα είχε εκπονηθεί η διατριβή.

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

Περίληψη

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων για την αντιμετώπιση ατυχημάτων μεγάλης έκτασης. Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση ατυχήματος (δηλ. του συνδυασμού δράσεων προστασίας του πληθυσμού όπως η εκκένωση και η προστασία σε κτήρια γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες). Η ανάγκη βελτιστοποίησης έγκειται στη σοβαρότητα και την πολυκριτηριακή φύση των συνεπειών (π.χ. μια στρατηγική που ελαχιστοποιεί την επικινδυνότητα μπορεί να αντιστοιχεί σε αύξηση του «κοινωνικοοικονομικού κόστους» που σχετίζεται με την εφαρμογή της). Από την άλλη, ακόμη και με μοναδικό κριτήριο τις επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού, η βέλτιστη πολιτική προστασίας δεν αντιστοιχεί πάντα σε μεγαλύτερη περιοχή εκκένωσης (π.χ. λόγω επίδρασης του κυκλοφοριακού φόρτου).

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων βασίζεται στις αρχές των εξελικτικών αλγορίθμων. Το «κοινωνικοοικονομικό κόστος» εκτιμάται μέσω του αριθμού των ατόμων που συμμετέχουν στις διάφορες δράσεις. Αναπτύχθηκε, επίσης, ένα στοχαστικό και δυναμικό μοντέλο εκκένωσης που βασίζεται στις διαδικασίες Markov. Σκοπός του είναι η προσομοίωση της κίνησης του πληθυσμού ως στοχαστικής διαδικασίας προκειμένου να εκτιμηθούν οι συνέπειες στην υγεία του ανάλογα με τις διαφορετικές πολιτικές προστασίας και τη χωρο-χρονική κατανομή του. Η εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές περιπτώσεις αναδεικνύει ότι η πρακτική του προσδιορισμού πολιτικών απόκρισης που βασίζεται μόνο στον καθορισμό ζωνών επικινδυνότητας με βάση την ένταση του φαινομένου που ακολουθεί το ατύχημα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπο-προστασία του πληθυσμού.

Αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι επίλυσης του μοντέλου. Ο υπολογισμός των αναμενόμενων δόσεων (τοξικές ή θερμικές) στον πληθυσμό με βάση τη μέση τιμή των πιθανών χωρο-χρονικών κατανομών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των συνεπειών η οποία οφείλεται στην έντονη μη-γραμμικότητα της σχέσης δόσης-συνέπειας στην υγεία. Η υιοθέτηση της πλέον αναλυτικής λύσης του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης που βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo και εκτιμά τις επιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές εκκένωσης, είναι αναγκαία σε αυτές τις περιπτώσεις για μια ακριβέστερη εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ολόκληρη η πυκνότητα κατανομής πιθανότητας των αναμενόμενων δόσεων, αντί να υπολογίζεται απλά η μέση τιμή.

Λέξεις Κλειδιά: *τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης, Seveso, σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης, εκκένωση, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, εξελικτικοί αλγόριθμοι, Markov, Monte Carlo*

**DECISION SUPPORT METHODOLOGY FOR MAJOR ACCIDENTS EMERGENCY RESPONSE
USING MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS**

Abstract

The handling or transportation of hazardous materials can potentially create major accidents endangering the public and workers' health as well as the environment. In this dissertation a methodology is presented for multi-objective emergency response decision-making around hazardous materials installations. Emergency planning and response decision-making consists in assessing protective actions (e.g. evacuation, shelter-in-place) for the population adjacent to a hazardous facility. Optimization of the emergency response is necessary since the provided protection (as it is measured in terms of the adverse health effects to the population) it is not proportional to the "protected" area or to the size of the "protected population". Furthermore, there is a point beyond which added protection (i.e. more population protected) starts having diminishing returns in terms of reduced health effects while the associated socioeconomic cost keeps increasing.

The risk is estimated by taking into account the interaction between sub areas depending on the combinations of alternative protective actions applied (e.g. the congestion created by the evacuees of a number of sub-areas affects the effectiveness of the evacuation in additional ones). Given the size of the decision space and the non-linear nature of the dependence of the consequences on the assumed alternative solution, a Multi-Objective Evolutionary Algorithm approach was chosen for the optimization. The determination of health consequences of the population is based on the results of the Stochastic Non-homogeneous Markov Evacuation Model which is also presented. The model provides the spatial distribution of the evacuees by taking into account the initial population density in the area, the road connections and capacities, the effect of road congestion during evacuation and the type of vehicles used. The socioeconomic cost is estimated according to the size of the population taking part to different protective actions.

An algorithm for a Monte-Carlo solution of the evacuation model is also described. It provides actual trajectories of evacuees' movement, and thus an estimation of the distribution of the received dose of the population according to the possible evacuation routes of individuals. It is shown that in some cases the estimation of the health consequences by the average dose might be conservative or non-conservative relative to the one corresponding to the distribution of the received doses.

Keywords: *major industrial accidents, emergency response, Seveso, evacuation, multi-objective optimization, evolutionary algorithms, Markov, Monte Carlo*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	XIII
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	XVII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1	9
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	10
1.2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ	10
1.2.1.1 Εισαγωγή	10
1.2.1.2 Έκθεση σε τοξικές ουσίες	11
1.2.1.3 Πυρκαγιές	11
1.2.1.3.1 Φωτιά Λίμνης	12
1.2.1.3.2 Φωτιά Πυρσού	12
1.2.1.3.3 Κατάκαυση Αερίου Νέφους	12
1.2.1.3.4 Πύρινη Σφαίρα	13
1.2.1.4 Εκρήξεις	13
1.2.1.4.1 Έκρηξη Αερίου Νέφους	14
1.2.1.4.2 Φαινόμενο “BLEVE”	14
1.2.1.4.3 Έκρηξη Πυκνής Φάσης	14
1.2.1.4.4 Εκρήξεις Σκόνης	15
1.2.1.5 Επιπτώσεις στο περιβάλλον	15
1.2.2 ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	16
1.2.3 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	17
1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	18
1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1.3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	21
1.3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	23
1.3.3.1 Feyzin, Γαλλία 1966	23
1.3.3.2 Flixborough, Ηνωμένο Βασίλειο 1974	23
1.3.3.3 Seveso, Ιταλία 1976	24
1.3.3.4 Three Mile Island, ΗΠΑ 1978	25
1.3.3.5 Mexico City, Μεξικό 1984	26
1.3.3.6 Bhopal, Ινδία 1984	26
1.3.3.7 Chernobyl, Ουκρανία 1986	27
1.3.3.8 Basel, Ελβετία 1986	28
1.3.3.9 Nantes, Γαλλία 1987	28
1.3.3.10 Piper Alpha, Β.Θάλασσα 1988	29
1.3.3.11 Pesadena, Τέξας 1989	29
1.3.3.12 Enschede, Ολλανδία 2000	30
1.3.3.13 Toulouse, Γαλλία 2001	30

1.3.3.14	Bancefield, Ηνωμένο Βασίλειο 2005	31
1.3.3.15	Texas, ΗΠΑ 2005	31
1.3.3.16	Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης στην Ελλάδα	32
1.3.3.16.1	Εισαγωγή	32
1.3.3.16.2	Jet Oil, Θεσσαλονίκη 1986	33
1.3.3.16.3	Πετρόλα, Ελευσίνα 1992	34
1.3.3.16.4	Εκρηξη βυτιοφόρου, Καμένα Βούρλα 1999	35
1.3.3.16.5	Πυρκαγιά στις εγκαταστάσεις της ΧΥΜΑ ΑΕ, Λαύριο 2006	35
1.4	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	36
1.4.1	ΓΕΝΙΚΑ	36
1.4.2	ΟΔΗΓΙΑ SEVESO	37
1.4.2.1	Γενικά	37
1.4.2.2	Εγκαταστάσεις που υπάγονται στις προβλέψεις της νομοθεσίας	38
1.4.2.2.1	Γενικά	38
1.4.2.2.2	Εγκαταστάσεις που υπάγονται στην οδηγία στην Ελλάδα	39
1.4.2.2.3	Κοινοποίηση	40
1.4.2.2.4	Πολιτική πρόληψης μεγάλων ατυχημάτων	40
1.4.2.2.5	Μελέτη ασφάλειας	40
1.4.2.2.6	Σύστημα διαχείρισης ασφάλειας	41
1.4.2.2.7	Εσωτερικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης	41
1.4.2.2.8	Εξωτερικά σχέδια αντιμετώπισης τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης	42
1.4.2.2.9	Επιθεωρήσεις – έλεγχοι	43
1.4.2.2.10	Πολλαπλασιαστικά αποτελέσματα (φαινόμενο ντόμινο)	44
1.4.2.2.11	Σχεδιασμός χρήσεων γης	44
1.4.2.2.12	Ενημέρωση και συμμετοχή των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής	44
2		47
	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ	47
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	47
2.2	ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	49
2.2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
2.2.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΗΓΩΝ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΒΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	50
2.2.2.1	Προσδιορισμός Πηγών Κινδύνου	50
2.2.2.1.1	Κατανόηση Λειτουργίας Εγκατάστασης και Συλλογή Πληροφοριών	51
2.2.2.1.2	Προσδιορισμός Σημείων Δυνατών Εκλύσεων	51
2.2.2.1.3	Προσδιορισμός Φάσεων Λειτουργίας που ενδιαφέρουν	51
2.2.2.1.4	Καθορισμός Αφορμών Ατυχημάτων (Εναρκτήρια Γεγονότα)	52
2.2.2.1.5	Λειτουργίες Ασφάλειας	52
2.2.2.1.6	Συστήματα Ασφαλείας	53
2.2.2.1.7	Λειτουργικές Απαιτήσεις Συστημάτων	53
2.2.2.1.8	Ομαδοποίηση και Τελική Επιλογή Εναρκτήριων Γεγονότων	54
2.2.2.2	Προσδιορισμός Ακολουθιών Ατυχημάτων	54
2.2.2.2.1	Δένδρα Σφαλμάτων (Fault trees)	54
2.2.2.2.2	Δένδρα Γεγονότων (Event Trees)	56
2.2.2.3	Ορισμός Καταστάσεων Βλάβης της Εγκατάστασης	56
2.2.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΒΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	57
2.2.3.1	Συλλογή Δεδομένων & Προσδιορισμός Παραμέτρων	57

2.2.3.2	Ποσοτικοποίηση των Ακολουθιών Ατυχημάτων και των καταστάσεων Βλάβης της Εγκατάστασης	57
2.2.4	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΕΚΛΥΣΕΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	57
2.2.4.1	Προσδιορισμός κατηγοριών έκλυσης για τοξικές ή εύφλεκτες ουσίες	57
2.2.4.1.1	Τοξικές ουσίες	57
2.2.4.1.2	Εύφλεκτες ουσίες	58
2.2.4.1.3	Υπολογισμός ρυθμού εκροής	58
2.2.4.1.4	Υπολογισμός ρυθμού εξάτμισης	59
2.2.4.2	Προσδιορισμός συνεπειών έκλυσης τοξικών ή εύφλεκτων ουσιών	59
2.2.4.2.1	Διασπορά επικίνδυνης ουσίας (τοξικής ή/και εύφλεκτης)	60
2.2.4.2.2	Έκρηξη αερίου νέφους	62
2.2.4.2.3	Ταχεία καύση (Flash fire)	64
2.2.4.2.4	Φωτιά λίμνης (POOL FIRE)	64
2.2.4.2.5	Φωτιά πυρσού (Jet fire)	66
2.2.4.2.6	Φαινόμενο BLEVE	67
2.2.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	68
2.2.5.1	Ατομική διακινδύνευση	68
2.2.5.1.1	Καθορισμός Δόσης	69
2.2.5.1.2	Καθορισμός Πιθανότητας Θανάτου	70
2.2.5.2	Συλλογική διακινδύνευση	71
2.3	ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	72
3	-----	75
	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ	75
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	75
3.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ	77
3.2.1	ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΣ	78
3.2.2	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ	78
3.2.2.1	Οργανωτικά ζητήματα	79
3.2.2.2	Συλλογή δεδομένων	79
3.2.2.3	Διαχείριση σε «πραγματικό χρόνο»	81
3.2.2.4	Ενημέρωση κοινού	82
3.2.2.5	Μετάβαση στον τόπο του ατυχήματος	82
3.2.2.6	Διαδικασίες αντιμετώπισης	83
3.2.3	ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	85
3.3	ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ	85
3.3.1	ΓΕΝΙΚΑ	85
3.3.2	ΕΚΚΕΝΩΣΗ	86
3.3.3	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ	86
3.3.4	ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ	87
3.3.4.1	Μέσα ατομικής προστασίας	87
3.3.4.2	Άλλα μέτρα	87
3.3.5	ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΡΑΖΟΜΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΠΛΗΘΥΣΜΟ	87
3.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	91
3.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	91
3.4.2	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	91

3.4.2.1	Γενικά	91
3.4.2.2	Αρχιτεκτονική και λειτουργία του επιχειρησιακού κέντρου	92
3.4.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	95
3.4.3.1	Γενικά	95
3.4.3.2	Προστασία κοινού	96
3.4.3.2.1	Ευαίσθητες ζώνες (ζώνες επικινδυνότητας)	96
3.4.3.2.2	Προστατευτικές Δράσεις για το κοινό	98
4		101
	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	101
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	101
4.2	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	102
4.2.1	ΓΕΝΙΚΑ	102
4.2.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΑΡΚΟΒ	103
4.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO	108
4.4	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	109
4.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	109
4.4.2	ΣΥΝΟΛΟ ΜΗ –ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΜΕΝΩΝ ΛΥΣΕΩΝ	110
4.4.3	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	112
4.4.3.1	Πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας	112
4.4.3.2	Τεχνικές βασισμένες σε σχέσεις υπεροχής	113
4.5	ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	113
4.5.1	ΓΕΝΙΚΑ	113
4.5.2	ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ	114
4.5.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	116
4.5.4	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	118
4.5.5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	123
4.5.5.1	Εισαγωγή	123
4.5.5.2	Απόδοση ποιότητας και επιλογή (fitness assignment and selection)	124
4.5.5.3	Διασπορά λύσεων	124
4.5.5.4	Βέλτιστες λύσεις κατά Pareto	125
4.5.5.5	Εξελικτικοί αλγόριθμοι πολλαπλών σκοπών	126
4.5.5.5.1	Γενικά	126
4.5.5.5.2	Vector - Evaluated Genetic Algorithm	128
4.5.5.5.3	Pareto Ranking Method	129
4.5.5.5.4	Pareto Tournament Method	130
4.5.5.5.5	Random Weighted approach	130
4.5.5.5.6	Hajela and Lin's Weighting-based Genetic Algorithm	131
4.5.5.5.7	Goal programming approach	131
4.5.5.5.8	Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)	131
5		135
	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	135
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	135
5.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	136
5.2.1	ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	136
5.2.2	ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	136
5.2.2.1	Γενικά	136

5.2.2.2	Καθορισμένη επιλογή διαδρομής εκκένωσης	139
5.2.2.3	Βελτιστοποίηση διαδρομής εκκένωσης	140
5.2.2.4	Δυναμική επιλογή διαδρομής εκκένωσης	141
5.3	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ MARKON	143
5.3.1	ΓΕΝΙΚΑ	143
5.3.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	145
5.3.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	154
5.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ	158
5.4.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΔΟΣΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ Ο ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ	158
5.4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO	161
5.4.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	167
5.4.3.1	Εφαρμογή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markon με τη μέθοδο Monte Carlo	174
6		187
	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	187
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	187
6.2	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ – ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	188
6.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	191
6.3.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	191
6.3.1.1	Γενικά	191
6.3.1.2	Επιπτώσεις στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού	193
6.3.1.3	«Κοινωνικοοικονομικό κόστος»	194
6.3.2	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ	196
6.3.2.1	Εισαγωγή	196
6.3.2.2	Αναπαράσταση λύσεων	197
6.3.2.3	Αρχικοποίηση	198
6.3.2.4	Απόδοση «ποιότητας» λύσεων	199
6.3.2.5	Επιλογή λύσεων για αναπαραγωγή	200
6.3.2.6	Αναπαραγωγή	201
6.3.3	ΣΥΝΟΨΗ	201
6.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	202
6.4.1	ΑΤΥΧΗΜΑ BLEVE	202
6.4.2	ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΟΞΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	207
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	213
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	221
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	253

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3.1: Επιπτώσεις θερμικής ακτινοβολίας. -----	73
Πίνακας 2.3.2: Χρόνος απαραίτητος για την πρόκληση αίσθησης πόνου σαν συνάρτηση της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας. -----	73
Πίνακας 2.3.3: Προτεινόμενα επίπεδα σχεδιασμού θερμικής ακτινοβολίας από πυρσούς. -----	74
Πίνακας 3.3.1: Λίστα ελέγχου για επιλογή προστατευτικών ενεργειών. -----	89
Πίνακας 3.3.2: Επιλογή στρατηγικής για πολιτική προστασίας. -----	90
Πίνακας 3.4.1: Ευαίσθητες ζώνες και οριακές τιμές έντασης φαινομένων.-----	98
Πίνακας 5.4.1: Πολιτικές εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.2. -----	168
Πίνακας 5.4.2: Πολιτικές εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου. -----	172
Πίνακας 5.4.3: Εφαρμογή πολιτικών εκκένωσης για διαφορετικά σενάρια έκλυσης αμμωνίας. -----	176
Πίνακας 5.4.4: Εκτίμηση επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού μέσω της μέσης δόσης επικίνδυνης ουσίας και της κατανομής των δόσεων για τα σενάρια έκλυσης αμμωνίας του Πίνακα 5.4.4. -----	177
Πίνακας Π. 1: Τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης.	222
Πίνακας Π. 2: Τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης με επιπτώσεις στο περιβάλλον.	239
Πίνακας Π.3: Κατονομαζόμενες Ουσίες & Οριακές Ποσότητες (οδηγία Seveso II, ΚΥΑ 12044/613/2007).	245
Πίνακας Π. 4: Κατηγορίες ουσιών και παρασκευασμάτων που δεν κατονομάζονται συγκεκριμένα στο Μέρος 1 & Οριακές ποσότητες (οδηγία Seveso II, ΚΥΑ 12044/613/2007).	248

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.3.1: Τεχνολογικές καταστροφές (περίοδος 1900 – 2010) που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.	19
Σχήμα 1.3.2: Θάνατοι ως αποτέλεσμα τεχνολογικών καταστροφών που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.	20
Σχήμα 1.3.3: Αριθμός ατόμων που επηρεάστηκαν από τεχνολογικές καταστροφές που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.	20
Σχήμα 2.2.1: Γενικές φάσεις εκτίμησης επικινδυνότητας σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.	50
Σχήμα 2.2.2: Βασικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα Δένδρα Σφαλμάτων.	55
Σχήμα 2.2.3: Τυπικό παράδειγμα Δένδρου Σφαλμάτων.	56
Σχήμα 2.2.4: Τυπικό παράδειγμα καμπύλης F-N.	71
Σχήμα 3.4.1: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων για τις Νομαρχίες.	93
Σχήμα 3.4.2: Φόρμα δεδομένων χημικών ουσιών.	94
Σχήμα 3.4.3: Σύστημα στήριξης αποφάσεων (εκκένωση).	94
Σχήμα 4.3.1: Γενικό διάγραμμα ροής μιας τυπικής διαδικασίας Monte Carlo.	108
Σχήμα 4.4.1: Παράδειγμα γεωμετρικής απεικόνισης κυριαρχίας.	111
Σχήμα 4.5.1: Αναπαράσταση λύσεων – χώρος αποφάσεων και αντικειμενικών συναρτήσεων.	120
Σχήμα 4.5.2: Διασταύρωση ενός σημείου.	122
Σχήμα 4.5.3: Μετάλλαξη.	122
Σχήμα 4.5.4: Εξελικτικός κύκλος.	123
Σχήμα 4.5.5: Διασπορά λύσεων.	125
Σχήμα 4.5.6: Διάγραμμα ροής βασικού εξελικτικού αλγορίθμου.	128
Σχήμα 4.5.7: Αναπαράσταση επιλογής λύσεων για διάφορους MOEA.	133
Σχήμα 5.3.1: Επίπεδο συνωστισμού οχημάτων («αντίσταση» $r_i(t)$ κόμβου i) ως συνάρτηση της πυκνότητας οχημάτων $n_i(t)$ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων εκκένωσης M_i	151
Σχήμα 5.3.2: Πυκνοκατοικημένη περιοχή ($2.916 \times 10^7 \text{ m}^2$).	154
Σχήμα 5.3.3: Τμήμα του δικτύου της περιοχής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.2.	155
Σχήμα 5.3.4: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο $P_i = P_1$, $M_i = M_1$, $U = U_1$	156
Σχήμα 5.3.5: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές πυκνότητες πληθυσμού $P_i = P_1$, $P_i = P_2 = 0.3 \cdot P_1$, $P_i = P_3 = 2 \cdot P_1$, $M_i = M_1$, $U = U_1$	156
Σχήμα 5.3.6: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές τιμές της μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων $M_i = M_1$, $M_i = M_2 = 4 \cdot M_1$, $M_i = M_3 = 0.3 \cdot M_1$, $P_i = P_1$, $U = U_1$	157
Σχήμα 5.3.7: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές τιμές της μέσης ταχύτητας των οχημάτων $U = U_1$, $U = U_2 = 2 \cdot U_1$, $U = U_3 = 0.5 \cdot U_1$, $M_i = M_1$, $P_i = P_1$	157
Σχήμα 5.4.1: Κατανομή δόσεων για τρία σενάρια ατυχημάτων.	162
Σχήμα 5.4.2: Εκτίμηση επιπτώσεων στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού μέσω της μέσης δόσης (1^n εκδοχή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov).	165

Σχήμα 5.4.3: Εκτίμηση επιπτώσεων στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές εκκένωσης ($2^{\text{η}}$ εκδοχή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov – προσομοίωση Monte Carlo).....	166
Σχήμα 5.4.4: Πιθανότητα θανάτου σε σχέση με την απόσταση από το σημείο του ατυχήματος (σενάριο: BLEVE, κυλινδρική δεξαμενή υγραερίου 2000 m ³)......	167
Σχήμα 5.4.5: Γραφική παράσταση πολιτικών εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.2.	168
Σχήμα 5.4.6: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων M_1).	169
Σχήμα 5.4.7: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων $M_2 = 4 \cdot M_1$).	170
Σχήμα 5.4.8: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων $M_3 = 0.5 \cdot M_1$).	170
Σχήμα 5.4.9: Περιοχή Θριασίου Πεδίου - Ζώνες επικινδυνότητας (σενάριο BLEVE).	172
Σχήμα 5.4.10: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για δυο πολιτικές εκκένωσης (Θριάσιο Πεδίο, σενάριο BLEVE).	173
Σχήμα 5.4.11: Μεταβολή της αντίστασης ορισμένων κόμβων (περιοχή Θριασίου Πεδίου).	174
Σχήμα 5.4.12: Κατανομή δόσεων (σενάριο 1, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	179
Σχήμα 5.4.13: Κατανομή δόσεων (σενάριο 2, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	179
Σχήμα 5.4.14: Κατανομή δόσεων (σενάριο 3, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	179
Σχήμα 5.4.15: Κατανομή δόσεων (σενάριο 4, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	180
Σχήμα 5.4.16: Κατανομή δόσεων (σενάριο 5, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	180
Σχήμα 5.4.17: Κατανομή δόσεων (σενάριο 6, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	180
Σχήμα 5.4.18: Κατανομή δόσεων (σενάριο 7, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	181
Σχήμα 5.4.19: Κατανομή δόσεων (σενάριο 8, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	181
Σχήμα 5.4.20: Κατανομή δόσεων (σενάριο 9, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	181
Σχήμα 5.4.21: Κατανομή δόσεων (σενάριο 10, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	182
Σχήμα 5.4.22: Κατανομή δόσεων (σενάριο 11, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	182
Σχήμα 5.4.23: Κατανομή δόσεων (σενάριο 12, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	182
Σχήμα 5.4.24: Κατανομή δόσεων (σενάριο 13, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	183
Σχήμα 5.4.25: Κατανομή δόσεων (σενάριο 14, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	183
Σχήμα 5.4.26: Κατανομή δόσεων (σενάριο 15, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	183
Σχήμα 5.4.27: Κατανομή δόσεων (σενάριο 16, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	184
Σχήμα 5.4.28: Κατανομή δόσεων (σενάριο 17, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	184
Σχήμα 5.4.29: Κατανομή δόσεων (σενάριο 18, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	184
Σχήμα 5.4.30: Κατανομή δόσεων (σενάριο 19, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	185
Σχήμα 5.4.31: Κατανομή δόσεων (σενάριο 20, Πίνακας 5.4.3, Πίνακας 5.4.4).	185
Σχήμα 6.3.1: Εφαρμογή προστατευτικών δράσεων σε περιοχή γύρω από μια χημική εγκατάσταση.	192
Σχήμα 6.3.2: Βασικά βήματα εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης.	197
Σχήμα 6.3.3: Κωδικοποίηση εναλλακτικών λύσεων (παράδειγμα).	198
Σχήμα 6.3.4: Παράδειγμα διασταύρωσης και μετάλλαξης ενός σημείου.	201
Σχήμα 6.3.5: Μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης.	202

Σχήμα 6.4.1: Παράδειγμα εξέλιξης πληθυσμών προς αναπαραγωγή «καλύτερων» λύσεων από γενεά σε γενεά.....	203
Σχήμα 6.4.2: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο BLEVE, Θριάσιο Πεδίο).	204
Σχήμα 6.4.3: Γραφική παράσταση λύσης (a) σε GIS.....	204
Σχήμα 6.4.4: Γραφική παράσταση λύσης (b) σε GIS.....	205
Σχήμα 6.4.5: Γραφική παράσταση λύσης (c) σε GIS.	205
Σχήμα 6.4.6: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο BLEVE, Θριάσιο Πεδίο) για διαφορετικούς χρόνους προειδοποίησης και διαφορετική χωρητικότητα οδικού δικτύου.....	207
Σχήμα 6.4.7: Μεταβολή συγκέντρωσης τοξικής ουσίας εντός των κτηρίων ανάλογα με το βαθμό προστασίας τους (ACH).	208
Σχήμα 6.4.8: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο 1 έκλυσης αμμωνίας, Θριάσιο Πεδίο). .	209
Σχήμα 6.4.9: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο 2 έκλυσης αμμωνίας, Θριάσιο Πεδίο). .	210
Σχήμα 6.4.10: Γραφική απεικόνιση επιλεγμένης λύσης σεναρίου 1 (solution 1).....	210
Σχήμα 6.4.11: Γραφική απεικόνιση επιλεγμένης λύσης σεναρίου 2 (solution 2).....	211
Σχήμα Π. 1: Βιομηχανικές εγκαταστάσεις που υπάγονται στην οδηγία Seveso II (άνω όριο και κάτω όριο)	251

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

<i>ACH</i>	:	<i>Air changes per hour</i>
<i>ADR</i>	:	<i>Accord Dangereux Routier</i>
<i>AEGLs</i>	:	<i>Acute Exposure Guideline Levels</i>
<i>AETLs</i>	:	<i>Acute Exposure Threshold Levels</i>
<i>AIChE</i>	:	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
<i>AIHA</i>	:	<i>American Industrial Hygiene Association</i>
<i>ALARA</i>	:	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
<i>API</i>	:	<i>American Petroleum Institute</i>
<i>ARIPAR</i>	:	<i>Analisi dei Rischi Industriali e Portuali dell' Area di Ravenna</i>
<i>BLEVE</i>	:	<i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i>
<i>CAMEO</i>	:	<i>Computer - Aided Management of Emergency Operations (EPA- NOAA)</i>
<i>CCPS</i>	:	<i>Center for Chemical Process Safety (USA)</i>
<i>CDCIR</i>	:	<i>Community Documentation Centre on Industrial Risks</i>
<i>CEPPO</i>	:	<i>Chemical Emergency Prevention and Preparedness Office (USA)</i>
<i>CFD</i>	:	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>COMAH</i>	:	<i>Control of Major-Accident Hazards</i>
<i>DG</i>	:	<i>Directorate General (European Commission)</i>
<i>DYLAM</i>	:	<i>Dynamic Logical Analytical Methodology</i>
<i>EC</i>	:	<i>European Commission</i>
<i>EEC</i>	:	<i>European Economic Community</i>
<i>EM-DAT</i>	:	<i>The International Disasters Database</i>
<i>EPA</i>	:	<i>Environmental Protection Agency (USA)</i>
<i>EPSC</i>	:	<i>European Process Safety Centre</i>
<i>ERNS</i>	:	<i>Emergency Response Notification System (EPA-CEPPO, USA)</i>

<i>ERP</i>	:	<i>Emergency Response Policy</i>
<i>ERPG</i>	:	<i>Emergency Response Planning Guidelines for air contaminants</i>
<i>ESReDA</i>	:	<i>European Safety Reliability & Data Association</i>
<i>ESRRDA</i>	:	<i>European Safety and Reliability Research Development Association</i>
<i>EU</i>	:	<i>European Union</i>
<i>EuReData</i>	:	<i>European Reliability Data Association</i>
<i>FAO</i>	:	<i>Food and Agriculture Organization of the UN</i>
<i>FFGA</i>	:	<i>Fonseca and Fleming's Multi-objective Genetic Algorithm</i>
<i>FMEA</i>	:	<i>Failure Modes Effects Analysis</i>
<i>F-N Curve</i>	:	<i>Frequency – Number Curve</i>
<i>GIS</i>	:	<i>Geographical Information System</i>
<i>HAZOP</i>	:	<i>Hazard and Operability (Study)</i>
<i>HLGA</i>	:	<i>Hajela and Lin's Genetic Algorithm</i>
<i>HMSO</i>	:	<i>Her Majesty's Stationary Office (UK)</i>
<i>HSE</i>	:	<i>Health and Safety Executive (UK)</i>
<i>IAEA</i>	:	<i>International Atomic Energy Agency</i>
<i>IChemE</i>	:	<i>Institution of Chemical Engineers (UK)</i>
<i>IDLH</i>	:	<i>Immediately Dangerous for Life and Health</i>
<i>IEEE</i>	:	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers (USA)</i>
<i>IIASA</i>	:	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
<i>ILO</i>	:	<i>International Labour Office</i>
<i>ISIS</i>	:	<i>Institute for Systems, Informatics and Safety (JRC)</i>
<i>ITOPF</i>	:	<i>The International Tanker Owners Pollution Federation Limited</i>
<i>JRC</i>	:	<i>Joint Research Centre (European Commission)</i>
<i>LC₅₀</i>	:	<i>Median Lethal Concentration</i>
<i>LD₅₀</i>	:	<i>Median Lethal Dose</i>
<i>LFL</i>	:	<i>Lower Flammability Limit</i>

LNG	:	<i>Liquefied Natural Gas</i>
LPG	:	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
MAHB	:	<i>Major Accident Hazards Bureau (JRC)</i>
MAPP	:	<i>Major-Accident Prevention Policy</i>
MARS	:	<i>Major Accident Reporting System</i>
MCDA	:	<i>Multi-criteria Decision Aid</i>
MHIDAS	:	<i>Major Incidents Data Service (HSE)</i>
MIACC	:	<i>Major Industrial Accidents Council of Canada</i>
MOEA	:	<i>Multi-objective Evolutionary Algorithm</i>
MOP	:	<i>Multi-objective Optimization Problem</i>
NIOSH	:	<i>National Institute for Occupational Safety and Health (USA)</i>
NOAA	:	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)</i>
NPD	:	<i>Norwegian Petroleum Directorate</i>
NPGA	:	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
NRC	:	<i>National Response Center (USA)</i>
NSGA	:	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
OECD	:	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OREDA	:	<i>Offshore Reliability Data Handbook</i>
OSHA	:	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PAHO	:	<i>Pan American Health Organization</i>
PRA	:	<i>Probabilistic Risk Assessment</i>
Probit	:	<i>Probability Unit Method</i>
PSA	:	<i>Probabilistic Safety Assessment</i>
QRA	:	<i>Quantitative Risk Assessment</i>
SMS	:	<i>Safety Management Systems</i>
SPEA	:	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SRD	:	<i>Safety and Reliability Directorate (UK)</i>

<i>TCDD</i>	:	<i>Tetra-Chloro-Dibenzo-Para-Dioxin</i>
<i>TNO</i>	:	<i>The Netherlands' Organisation for Applied Scientific Research</i>
<i>TNT</i>	:	<i>Trinitrotoluene</i>
<i>TWG</i>	:	<i>Technical Working Group</i>
<i>UFL</i>	:	<i>Upper Flammability Limit</i>
<i>UK</i>	:	<i>United Kingdom</i>
<i>UKAEA</i>	:	<i>United Kingdom Atomic Energy Authority</i>
<i>UNEP</i>	:	<i>United Nations Environment Programme</i>
<i>USA</i>	:	<i>United States of America</i>
<i>UVCE</i>	:	<i>Unconfined Vapour Cloud Explosion</i>
<i>VCE</i>	:	<i>Vapour Cloud Explosion</i>
<i>VROM</i>	:	<i>Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment (Netherlands)</i>
<i>WHO</i>	:	<i>World Health Organisation</i>

<i>BAME</i>	:	<i>Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης</i>
<i>ΓΑ</i>	:	<i>Γενετικός Αλγόριθμος</i>
<i>ΓΓΠΠ</i>	:	<i>Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας</i>
<i>ΕΑ</i>	:	<i>Εξελικτικός Αλγόριθμος</i>
<i>ΕΔΠΠ</i>	:	<i>Εθνικό Δίκτυο Πληροφοριών Περιβάλλοντος</i>
<i>ΕΕΑΕ</i>	:	<i>Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας</i>
<i>ΕΛΠΕ ΒΕΑ</i>	:	<i>Ελληνικά Πετρέλαια – Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Ασπροπύργου</i>
<i>ΕΛΠΕ ΒΕΕ</i>	:	<i>Ελληνικά Πετρέλαια – Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Ελευσίνας</i>
<i>ΕΜΑΚ</i>	:	<i>Ειδική Μονάδα Αντιμετώπισης Καταστροφών</i>
<i>ΕΜΠ</i>	:	<i>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο</i>
<i>ΚΥΑ</i>	:	<i>Κοινή Υπουργική Απόφαση</i>
ΜΑ	:	Μελέτη Ασφάλειας

<i>ΠΚΕ</i>	:	<i>Ποσοτικός Καθορισμός Επικινδυνότητας</i>
<i>ΠΠΜΑ</i>	:	<i>Πολιτική Πρόληψης Μεγάλων Ατυχημάτων</i>
<i>ΣΑΤΑΜΕ</i>	:	<i>Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικού Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης</i>
<i>ΣΕΑ</i>	:	<i>Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης</i>
<i>ΤΕΕ</i>	:	<i>Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας</i>
<i>ΥΑΕ</i>	:	<i>Υγεία & Ασφάλεια της Εργασίας</i>

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αποθήκευση, μεταφορά και διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων *επικίνδυνων ουσιών* (εύφλεκτων, εκρηκτικών, τοξικών), όπως επίσης και η λειτουργία πυρηνικών εγκαταστάσεων, εγκυμονούν τον κίνδυνο πρόκλησης *τεχνολογικού ή βιομηχανικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης (major industrial accident)*. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει καταγραφεί πλήθος ατυχημάτων αυτού του είδους. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα ατυχήματα σε χημικές βιομηχανίες στις πόλεις Bhopal της Ινδίας και Mexico City του Μεξικό το 1984, στην πόλη Seveso της Ιταλίας το 1976, στην Τουλούζη της Γαλλίας το 2001 και Buncfield του Ηνωμένου Βασιλείου το 2005. Αντίστοιχα, από τα πιο γνωστά πυρηνικά ατυχήματα είναι αυτά που συνέβησαν στις πόλεις Three Mile Island των ΗΠΑ το 1978 και Chernobyl της Ουκρανίας το 1986, καθώς και το πρόσφατο στη Fukushima της Ιαπωνίας το 2011.

Οι *επιπτώσεις* τέτοιου είδους ατυχημάτων στον άνθρωπο και το περιβάλλον μπορεί να είναι πολύ σοβαρές και να επηρεάσουν την ευρύτερη περιοχή γύρω από την εγκατάσταση στην οποία εκδηλώθηκαν. Οι άμεσες συνέπειες μπορεί να αντιστοιχούν σε μεγάλο αριθμό νεκρών και τραυματιών, πρόκληση σοβαρών προβλημάτων υγείας στον πληθυσμό, καταστροφές καλλιιεργειών από καύση και επικίνδυνες ουσίες, ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ. Από την άλλη, σύμφωνα με σχετικές επιδημιολογικές μελέτες ιδιαίτερα σημαντικές μπορεί να είναι και οι μακροπρόθεσμες συνέπειες στην υγεία του πληθυσμού.

Για την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τέτοιου είδους ατυχήματα εφαρμόζονται κανονισμοί πρόληψης με σκοπό την αποτροπή εκδήλωσής τους, όπως επίσης και κανονισμοί σχετικά με το σχεδιασμό χρήσεων γης και την αντιμετώπισή τους σε περίπτωση που αυτά συμβούν. Για παράδειγμα, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης βρίσκεται σε ισχύ η *οδηγία Seveso*, η οποία ονομάστηκε έτσι με αφορμή το ατύχημα στην ομώνυμη πόλη της Ιταλίας το 1976.

Ωστόσο, η διεθνής και η ελληνική εμπειρία έχει δείξει ότι η ύπαρξη κανονισμών πρόληψης δεν αναιρεί τον κίνδυνο εκδήλωσης τέτοιου είδους ατυχημάτων. Ατυχήματα εξακολουθούν να συμβαίνουν λόγω ελλιπούς εφαρμογής των κανονισμών, ανθρωπίνων λαθών και άλλων παραγόντων που σχετίζονται με την ίδια τη φύση των σχετικών παραγωγικών δραστηριοτήτων. Κατά συνέπεια, η ανάγκη συνεχούς βελτίωσης των μεθοδολογιών που σχετίζονται με την προσπάθεια ελαχιστοποίησης των συνεπειών τους παραμένει ένα ιδιαίτερα σημαντικό πεδίο έρευνας.

Αναφερόμαστε σε έναν αποτελεσματικό *σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης* (emergency response planning) για την αντιμετώπιση ενός τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης. Σημαντική πλευρά του σχεδιασμού είναι η χάραξη από τους αποφασίζοντες (decision makers) κατάλληλης *στρατηγικής απόκρισης*, η οποία αφορά στον καθορισμό *δράσεων προστασίας (protective actions)* για τον πληθυσμό που εργάζεται και κατοικεί στην

ευρύτερη περιοχή γύρω από τον τόπο εκδήλωσης του ατυχήματος. Οι δράσεις αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την εκκένωση μιας περιοχής με απομάκρυνση τμήματος του πληθυσμού (evacuation), την προστασία του πληθυσμού στις κατοικίες ή και σε άλλου είδους κατάλληλα διαμορφωμένα κτήρια που προσφέρουν μεγαλύτερο βαθμό προστασίας (in-place sheltering), τη χρήση μέσων ατομικής προστασίας (π.χ. μάσκες και κατάλληλη ενδυμασία), τη χορήγηση φαρμακευτικών ουσιών - αντιδότων ανάλογα με τη φύση του ατυχήματος (π.χ. ταμπλέτες ιωδίου στην περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος) και άλλα μέτρα (π.χ. οδηγία να μην καταναλώνονται ορισμένα είδη τροφίμων).

Πέρα από μια σειρά οργανωτικές πλευρές που σχετίζονται με την υλοποίηση τέτοιου είδους δράσεων, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το ζήτημα της επιλογής από τους αποφασίζοντες του κατάλληλου συνδυασμού αυτών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των συνεπειών. Με κριτήριο την προστασία της ασφάλειας και της υγείας του πληθυσμού, η απόφαση μεταξύ των βασικών κατευθύνσεων δράσης δεν είναι μονοδιάστατη. Για παράδειγμα, η επιλογή μεταξύ εκκένωσης ή προστασίας στα κτήρια πρέπει να λάβει υπόψη το αν η δεύτερη θα είναι επαρκής. Η προστασία σε κτήρια που δεν εμποδίζουν επαρκώς την είσοδο ενός τοξικού νέφους όχι μόνο δεν θα προστατεύσει τον πληθυσμό, αλλά αντίθετα, μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη έκθεσή του σε επικίνδυνες ουσίες.

Αντίστοιχα, στο βαθμό που δεν υπάρχει επαρκής «χρόνος προειδοποίησης» (χρόνος έναρξης εκκένωσης σε σχέση με χρόνο εκδήλωσης ατυχήματος), η εκκένωση μεγάλου τμήματος μιας περιοχής μπορεί να αυξήσει την επικινδυνότητα. Αυτό μπορεί να συμβεί διότι ο κυκλοφοριακός φόρτος που θα δημιουργηθεί στο οδικό δίκτυο μπορεί με τη σειρά του να αποτελέσει αιτία καθυστέρησης της εκκένωσης του τμήματος του πληθυσμού που βρίσκεται πλησιέστερα στον τόπο του ατυχήματος και κινδυνεύει περισσότερο.

Επιπλέον, η συνήθης πρακτική προσδιορισμού των πολιτικών απόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης βασίζεται στον ορισμό του «χειρότερου» σεναρίου ατυχήματος και στον προσδιορισμό «ζωνών» επικινδυνότητας βασισμένων απλά στην ένταση του φαινομένου που ακολουθεί το ατύχημα (πχ. συγκέντρωση τοξικής ουσίας, ένταση θερμικής ακτινοβολίας, υπερπίεση). Η πρακτική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρότατη υποπροστασία του πληθυσμού και είναι κατά βάση λανθασμένη. Η ένταση του φαινομένου δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει τις συνέπειες της έκθεσης του πληθυσμού. Σημαντικότερο ρόλο παίζει και η διάρκεια της έκθεσης. Συνεπώς, η διαδρομή που ακολουθούν τα άτομα που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση (χωρο-χρονική κατανομή του πληθυσμού) έχει καθοριστική σημασία στην αναμενόμενη επίπτωση (π.χ. αναμενόμενο αριθμό θανάτων). Επίσης, η χάραξη πολιτικής προστασίας με βάση το «χειρότερο» σενάριο δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη για άλλα λιγότερο σοβαρά και πολύ πιο πιθανά σενάρια ατυχημάτων. Εξάλλου, το «χειρότερο» σενάριο είναι συχνά θέμα υποκειμενικής εκτίμησης, μια και συνήθως κανείς μπορεί να σκεφθεί ένα ακόμη χειρότερο από το «χειρότερο» σενάριο.

Επιπρόσθετα, κάθε προστατευτική δράση (εκκένωση, προστασία σε κτήρια κ.ά.) συνεπάγεται και μια σειρά από κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της (στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος «κοινωνικοοικονομικό κόστος»). Αναφερόμαστε στις κοινωνικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη διατάραξη του κανονικού

ρυθμού ζωής και τις ψυχολογικές επιπτώσεις (άγχος, ανασφάλεια, πανικός) που μπορεί να εκδηλώσει τμήμα του πληθυσμού, στην πιθανότητα πρόκλησης φυσικών κινδύνων κατά την εφαρμογή μιας προστατευτικής δράσης (π.χ. ατυχήματα κατά τη μετακίνηση, διακοπή παραγωγικών δραστηριοτήτων κρίσιμων τομέων για τη δημόσια υγεία και ασφάλεια), στις οικονομικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τους οργανωτικούς όρους εφαρμογής κάθε προστατευτικής πολιτικής και διακοπής δραστηριοτήτων κ.ά.

Η χάραξη, λοιπόν, κατάλληλης στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης συνιστά ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικρουόμενους στόχους, πολλές παραμέτρους και μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας.

Στη σχετική βιβλιογραφία οι εργασίες που διαπραγματεύονται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης με πολλαπλά κριτήρια σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, αφορούν σε περιπτώσεις τεχνολογικών ατυχημάτων σε πυρηνικές εγκαταστάσεις και όχι σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες (εύφλεκτες, τοξικές, εκρηκτικές). Επιπλέον, σε ορισμένες από τις προσεγγίσεις που περιγράφονται στη βιβλιογραφία η αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων του πολυκριτηριακού προβλήματος προϋποθέτει τη χρήση υποκειμενικών συντελεστών «βαρύτητας» στα κριτήρια που εξετάζονται. Το ζήτημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί έως ένα βαθμό με την προσπάθεια εύρεσης του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων (Pareto optimal set ή efficient frontier), που δίνει στη συνέχεια τη δυνατότητα στους αποφασίζοντες να επιλέξουν με βάση τις προτιμήσεις τους μεταξύ των λύσεων αυτών (μια λύση ονομάζεται μη-κυριαρχούμενη ή ικανή, αν δεν υπάρχει άλλη η οποία να είναι καλύτερη από αυτή σε όλα τα κριτήρια που εξετάζονται).

Η προσέγγιση της εύρεσης του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων απαντάται σε προηγούμενες εργασίες για πυρηνικές εγκαταστάσεις, όπου κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό εναλλακτικών δράσεων προστασίας (όπως η εκκένωση και η παραμονή στα κτήρια) σε γεωγραφικά τμήματα της περιοχής γύρω από την πυρηνική εγκατάσταση. Ωστόσο, η μεθοδολογία πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων που εφαρμόζεται προϋποθέτει την ανεξαρτησία των συνεπειών κάθε επιμέρους γεωγραφικού τμήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα. Δηλαδή, για την εκτίμηση των επιπτώσεων που συνεπάγεται κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος, δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των δράσεων προστασίας που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή. Η αλληλεπίδραση αυτών, ωστόσο, έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι για παράδειγμα η εκκένωση σε μια υποπεριοχή πιθανά αυξάνει τον κυκλοφοριακό φόρτο σε γειτονικές υποπεριοχές, επηρεάζοντας έτσι την επικινδυνότητα (επίδραση στην επιλογή διαδρομής του πληθυσμού, καθυστέρηση τμήματος του πληθυσμού να απομακρυνθεί).

Η ανάγκη να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των δράσεων προστασίας που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή για μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της επικινδυνότητας, αναδεικνύει και τις αδυναμίες των μοντέλων εκκένωσης που περιγράφονται στη βιβλιογραφία. Στην πλειοψηφία των μοντέλων δεν λαμβάνεται υπόψη η δυναμική και στοχαστική φύση της επιλογής διαδρομής από τα άτομα που λαμβάνουν μέρος στην

εκκένωση (evacuees). Σε ορισμένες προσεγγίσεις η προσομοίωση της κίνησης γίνεται για καθορισμένες από πριν διαδρομές (pre-determined route choice), ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις σκοπός είναι η βελτιστοποίηση των διαδρομών εκκένωσης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του χρόνου εκκένωσης ή της απόστασης που θα διανυθεί (system or user optimal route choice) για καθορισμένη από πριν περιοχή εκκένωσης (π.χ. με βάση τις ζώνες επικινδυνότητας σύμφωνα με την ένταση του φαινομένου).

Ωστόσο, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο καθορισμός της περιοχής εκκένωσης μόνο με βάση την ένταση του φαινομένου ή με βάση το «χειρότερο» σενάριο δεν αντιστοιχεί πάντα στη βέλτιστη πολιτική προστασίας. Παράγοντες που σχετίζονται με τις συνθήκες κυκλοφορίας που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φύση και την αβεβαιότητα που σχετίζεται με την επιλογή διαδρομής τμημάτων του πληθυσμού που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επιδρά στην επικινδυνότητα. Γι' αυτό, για μια ολοκληρωμένη εκτίμηση των επιπτώσεων στον πληθυσμό, σκοπός είναι η εύρεση των συνδυασμών δράσεων προστασίας που αντιστοιχούν σε μη-κυριαρχούμενες εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος με βάση ορισμένα κριτήρια (υγεία, «κοινωνικοοικονομικό κόστος» κ.λπ.), λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική και στοχαστική φύση της επιλογής διαδρομής κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Κάθε εναλλακτική μη-κυριαρχούμενη λύση θα καθορίζει και τις υποπεριοχές που πρέπει να εκκενωθούν. Ορισμένα δυναμικά (dynamic route choice) και στοχαστικά μοντέλα εκκένωσης που περιγράφονται στη βιβλιογραφία, παρουσιάζουν αδυναμίες σχετικά με το υπολογιστικό κόστος και την ευελιξία ενσωμάτωσης παραμέτρων του προβλήματος για το επιθυμητό αποτέλεσμα ως προς την καταγραφή της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της μετακίνησης προκειμένου να εκτιμηθούν οι συνέπειες στην υγεία του.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ – ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας υποστήριξης των αποφάσεων για τη χάραξη κατάλληλης στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.

Η στρατηγική απόκρισης συνίσταται στον καθορισμό δράσεων προστασίας του πληθυσμού από τις συνέπειες των ακραίων φαινομένων που ακολουθούν τα ατυχήματα αυτά. Η περιοχή ενδιαφέροντος γύρω από την εγκατάσταση χωρίζεται σε υποπεριοχές (γεωγραφικά τμήματα), σε κάθε μία από τις οποίες εφαρμόζεται μια προστατευτική δράση ή αποφασίζεται η συνέχιση της κανονικής δραστηριότητας. Ενδεικτικά, οι δράσεις προστασίας που μπορούν να εφαρμοστούν είναι: εκκένωση, προστασία με παραμονή στα σπίτια, συγκέντρωση και παραμονή σε μεγάλα κτήρια, σταδιακή εκκένωση (παραμονή εντός κτηρίων για ένα χρονικό διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση), λήψη φαρμάκων, χρήση μέσων ατομικής προστασίας κ.ά.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια. Τα κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί να γίνει αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων, ενδεικτικά μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού

από ενδεχόμενο ατύχημα στην εγκατάσταση και η ελαχιστοποίηση του «κοινωνικοοικονομικού κόστους».

Για την αποφυγή καθορισμού υποκειμενικών συντελεστών «βαρύτητας» στα κριτήρια, η μεθοδολογία που περιγράφεται στοχεύει στην εύρεση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων του προβλήματος. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στις αρχές των *εξελικτικών αλγορίθμων*. Πρόκειται για στοχαστικές μεθόδους που προσομοιάζουν τη διαδικασία της φυσικής εξέλιξης και τις δυο τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη βελτιστοποίηση πολυκριτηριακών προβλημάτων.

Μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος χωρίς την προϋπόθεση ανεξαρτησίας των συνεπειών μεταξύ διαφορετικών σταδίων, δηλαδή λύσεων που αντιστοιχούν σε αλληλεπίδραση των επιμέρους δράσεων που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών πολυκριτηριακών μεθόδων (π.χ. έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίσουν πολλές μη-κυριαρχούμενες λύσεις ταυτόχρονα σε μια συγκεκριμένη επανάληψη του αλγορίθμου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μη συνεχών ή μη κυρτών «μετώπων» Pareto). Επίσης, πέρα από τις «κλασσικές» δράσεις προστασίας (π.χ. εκκένωση, προστασία σε κτήρια κ.λπ.), δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και άλλων εναλλακτικών πολιτικών (όπως για παράδειγμα η σταδιακή εκκένωση, δηλ. η παραμονή εντός κτηρίων για ένα διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση).

Η ακριβής εκτίμηση των συνεπειών συγκεκριμένων στρατηγικών που συνεπάγονται την εκκένωση περιοχών, προϋποθέτει τη γνώση της κατανομής του πληθυσμού χωρικά και χρονικά, ώστε σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις των εντάσεων των φαινομένων που ακολουθούν ένα «μεγάλο ατύχημα» να προκύψει η εκτίμηση των συνεπειών στην υγεία του «υπό προστασία» πληθυσμού. Για την εκτίμηση της χωρο-χρονικής πληθυσμιακής κατανομής αναπτύχθηκε ένα *στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της μετακίνησης του πληθυσμού*, το οποίο βασίζεται στις διαδικασίες *Markov* και ενσωματώνεται στον πολυκριτηριακό εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης έκτακτης ανάγκης. Σκοπός του μοντέλου είναι η κατά το δυνατόν ρεαλιστική προσομοίωση της κίνησης του πληθυσμού ως στοχαστικής διαδικασίας, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα επιλογής διαδρομής των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση με βάση την ευκολία μετακίνησης μέσω του οδικού δικτύου, η οποία μεταβάλλεται δυναμικά καθώς εξελίσσεται η εκκένωση.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής μπορεί ευέλικτα να προσαρμοστεί σε δίκτυα διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικές απαιτήσεις προσομοίωσης της κίνησης των οχημάτων μέσω των παραμέτρων που αφορούν σε γεωγραφικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, στο είδος και την επικινδυνότητα διαφορετικών σεναρίων ατυχημάτων, στα επιθυμητά από το χρήστη χαρακτηριστικά της καταγραφής της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού που μετακινείται, στον τύπο οχημάτων μεταφοράς του πληθυσμού κ.ά.

Αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι επίλυσης του μοντέλου που παρέχουν διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας της κίνησης, με αντίστοιχα διαφορετικό υπολογιστικό κόστος. Η πρώτη λύση παρέχει τις μέσες τιμές της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού. Ο υπολογισμός, ωστόσο, των αναμενόμενων δόσεων (τοξικές ή θερμικές) στον πληθυσμό με βάση τη μέση τιμή των πιθανών χωρο-χρονικών κατανομών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των επιπτώσεων. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε και η πλέον λεπτομερής λύση που βασίζεται στη μέθοδο *Monte-Carlo*. Μέσω αυτής της εκδοχής του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης είναι δυνατή η εκτίμηση της κατανομής των δόσεων επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ο πληθυσμός κατά τη διάρκεια της μετακίνησης και κατά συνέπεια η εκτίμηση των επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές διαδρομές εκκένωσης.

Μέρος της έρευνας περιλαμβάνεται στις ακόλουθες δημοσιεύσεις:

- Georgiadou P.S., Papazoglou I.A., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., *Emergency response optimization for major hazard industrial sites, In: Spitzer C., Schmocker U., Dang V.N., (editors), Proceedings of International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM7 -ESREL '04), Berlin, Germany, 2004, p. 128-133*
- Georgiadou P.S., Papazoglou I.A., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., *Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites, Reliability Engineering & Systems Safety 2007, 92 (10), p. 1388-1402*
- Georgiadou P.S., Papazoglou I.A., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., *Multi-Objective Emergency Response Optimization Around Chemical Plants, in: Rangaiah G.P. (editor), Multi-objective Optimization - Techniques and Applications in Chemical Engineering, World Scientific, 2008, p. 339-362*
- Georgiadou P.S., Papazoglou I.A., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., *Multi-objective evolutionary emergency response optimization for major accidents, Journal of Hazardous Materials 2010, 178(1-3), p. 792-803*

ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα περιεχόμενα των κεφαλαίων που ακολουθούν:

- **Κεφάλαιο 1:** αναφέρεται στα τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τις επακόλουθες συνέπειες. Περιλαμβάνεται συνοπτική περιγραφή των συνθηκών πρόκλησης και των σχετικών συνεπειών

για ορισμένα σοβαρά τεχνολογικά ατυχήματα, ενώ στο Παράρτημα περιλαμβάνονται σχετικοί πίνακες με αναφορά σε βασικά στοιχεία (τοποθεσία, ημερομηνία, συνέπειες σε αριθμούς κλπ) ατυχημάτων που έχουν καταγραφεί διεθνώς και στη χώρα μας. Στο κεφάλαιο αυτό, όπως επίσης και στο Παράρτημα, παρουσιάζονται, επιπλέον, βασικές αρχές των κανονισμών για ατυχήματα μεγάλης έκτασης που ισχύουν για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και την Ελλάδα (οδηγία Seveso).

- **Κεφάλαιο 2:** αναφέρεται στη μεθοδολογία ποσοτικής εκτίμησης της επικινδυνότητας για τεχνολογικά ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται επικίνδυνες ουσίες (εύφλεκτες, εκρηκτικές, τοξικές). Επιπλέον, γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε προσεγγίσεις που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία σχετικά με τις οριακές τιμές έκθεσης σε περίπτωση ατυχήματος.
- **Κεφάλαιο 3:** αναφέρεται στο σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης για τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης. Περιγράφονται τα είδη των προστατευτικών δράσεων που εφαρμόζονται και το μεθοδολογικό υπόβαθρο αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο μεθοδολογικό πλαίσιο αντιμετώπισης των τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης στη χώρα μας.
- **Κεφάλαιο 4:** γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε βασικές έννοιες σχετικά με το μεθοδολογικό υπόβαθρο της διδακτορικής διατριβής. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις στοχαστικές διαδικασίες Markov, την πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων, τη μέθοδο Monte-Carlo και τις βασικές αρχές των εξελικτικών αλγορίθμων με έμφαση στους πολυκριτηριακούς εξελικτικούς αλγόριθμους.
- **Κεφάλαιο 5:** περιγράφονται οι δυο εκδοχές του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης (εκκένωσης) που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής. Περιλαμβάνεται εισαγωγή όπου γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών που αφορούν στη μοντελοποίηση της εκκένωσης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης των συνεπειών με τη βοήθεια του μοντέλου, το οποίο λαμβάνει υπόψη παράγοντες κυκλοφοριακού φόρτου και αλληλεπίδρασης μεταξύ των εναλλακτικών δράσεων προστασίας του πληθυσμού. Παρουσιάζεται η λεπτομερέστερη εκδοχή του μοντέλου που βασίζεται στη μέθοδο Monte-Carlo και η δυνατότητα που δίνει να εκτιμηθούν οι συνέπειες στην υγεία του πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές εκκένωσης. Περιλαμβάνονται ενότητες με σχετικές εφαρμογές.
- **Κεφάλαιο 6:** παρουσιάζεται η μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης που βασίζεται στους πολυκριτηριακούς εξελικτικούς αλγορίθμους. Περιλαμβάνεται εισαγωγή με αναφορά στη σχετική βιβλιογραφία και ενότητες όπου παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής.
- **Συμπεράσματα:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και αναφέρονται στόχοι για μελλοντική έρευνα.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η εκτεταμένη εφαρμογή της σε ορισμένους κλάδους όπως η χημική βιομηχανία, οδήγησε στη δημιουργία κινδύνων από σοβαρά τεχνολογικά ατυχήματα τα οποία χαρακτηρίζονται με τον όρο «ατυχήματα μεγάλης έκτασης» ή «μεγάλα ατυχήματα» (major accidents). Σε αυτού του είδους εντάσσονται εκείνα στα οποία εμπλέκονται μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων χημικών ουσιών (εύφλεκτες, εκρηκτικές, τοξικές) και τα πυρηνικά ατυχήματα.

Τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης μπορεί να έχουν πολύ σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον, άμεσες και μακροπρόθεσμες. Ενδεικτικά, οι *επιπτώσεις* μπορεί να είναι (Γεωργιάδου 2001; Casal 2008; Christolis and Markatos 2008; Eckhoff 1997; ILO 1988; Lees 1996):

- μεγάλος αριθμός νεκρών (άμεσων ή καθυστερημένων) και τραυματιών (εγκαύματα, αναπνευστικά προβλήματα, κ.ά.), για τους οποίους απαιτείται ειδική νοσοκομειακή περίθαλψη, πρόκληση μιας σειράς προβλημάτων υγείας (διαταραχές στο νευρικό σύστημα, καρδιακά προβλήματα, διάφοροι τύποι καρκίνων, γενετικές ανωμαλίες κ.ά.)
- μεγάλη πιθανότητα για επέκταση των επιπτώσεων και εκτός των ορίων μιας εγκατάστασης, πιθανά σε μεγάλη απόσταση γύρω από το ατύχημα, που μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη εφαρμογής προστατευτικών ενεργειών για τον πληθυσμό της ευρύτερης περιοχής (π.χ. εκκένωση, προστασία σε κτήρια)
- μεγάλη πιθανότητα για δημιουργία αλυσιδωτών ατυχημάτων (φαινόμενο domino)
- διατάραξη του ρυθμού ζωής, ψυχολογικές επιπτώσεις για τους εργαζόμενους και το κοινό
- επιπτώσεις στο περιβάλλον: καταστροφές από καύση, καταστροφές από υπερπίεση, ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους, του υδροφόρου ορίζοντα και των καλλιεργειών
- υλικές ζημιές (καταστροφή εξοπλισμού, κτηρίων, οδικών αξόνων κ.ά.).

Για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των συνεπειών αυτών εφαρμόζονται κανονισμοί που αφορούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας, στη λήψη τεχνικών και οργανωτικών μέτρων πρόληψης, στα σχέδια έκτακτης ανάγκης για κάθε δραστηριότητα και εγκατάσταση,

καθώς και για την ευρύτερη περιοχή, στα μέτρα αποκατάστασης των τραυματιών και του περιβάλλοντος μετά το ατύχημα κ.ά.

Αντίστοιχες, ωστόσο, με τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης είναι και οι επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν και από φυσικές καταστροφές (natural disasters), όπως οι δασικές πυρκαγιές, οι πλημμύρες, οι σεισμοί και οι τυφώνες (θάνατοι, τραυματισμοί, προβλήματα υγείας, καταστροφή περιβάλλοντος, υλικές ζημιές κ.λπ.). Στο πλαίσιο της διαχείρισης της επικινδυνότητας συνήθως σε περίπτωση σοβαρών κρίσεων, στους κανονισμούς και τα σχέδια έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνονται εκτός των τεχνολογικών ατυχημάτων και οι φυσικές καταστροφές.

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε μεγάλα ατυχήματα που έχουν καταγραφεί διεθνώς. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών, δεδομένου ότι η διδακτορική διατριβή επικεντρώνει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης για αυτού του είδους τα ατυχήματα.

1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

1.2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

1.2.1.1 Εισαγωγή

Μεγάλα τεχνολογικά ατυχήματα μπορεί να προκληθούν σε δραστηριότητες που σχετίζονται με την αποθήκευση, χρήση και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων επικίνδυνων ουσιών (εύφλεκτων, εκρηκτικών, τοξικών).

Συνήθως, η πρόληψη και αντιμετώπιση ατυχημάτων με επικίνδυνες ουσίες σε σταθερές εγκαταστάσεις (π.χ. διυλιστήρια πετρελαίου, εγκαταστάσεις υγραερίων και αποθήκευσης καυσίμων, εγκαταστάσεις φυτοφαρμάκων και άλλες χημικές βιομηχανίες) αντιμετωπίζεται από διαφορετικούς κανονισμούς από αυτούς που αφορούν στη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (χερσαία, θαλάσσια, αεροπορική μεταφορά, μεταφορά καυσίμων μέσω αγωγών).

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία Seveso (Council Directive 2003/105/EC 2003; Council Directive 96/82/EC 1996) η οποία εφαρμόζεται για τις εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών (εξαιρείται η μεταφορά επικίνδυνων φορτίων), ένα «μεγάλο ατύχημα» ορίζεται σαν «ένα γεγονός όπως η διάχυση, η πυρκαγιά ή η έκρηξη που έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης έκτασης, σε συνδυασμό με ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μιας βιομηχανικής δραστηριότητας, που να προκαλεί σοβαρό κίνδυνο άμεσο ή έμμεσο, για τον άνθρωπο, στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της εγκατάστασης ή/και για το περιβάλλον και στην οποία να χρησιμοποιούνται μια ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες όπως αυτές ορίζονται στη σχετική οδηγία».

Ωστόσο, τα είδη των ατυχημάτων στα οποία εμπλέκονται επικίνδυνες ουσίες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από το αν αφορούν σε σταθερές εγκαταστάσεις ή μεταφορά και μπορεί να σχετίζονται με μεγάλες πυρκαγιές, εκρήξεις, διαρροή τοξικών ουσιών ή συνδυασμό αυτών των φαινομένων (βλ. επόμενες παραγράφους).

1.2.1.2 Έκθεση σε τοξικές ουσίες

Η αποθήκευση και χρήση επικίνδυνων τοξικών ουσιών (toxic substances) περιλαμβάνει τον κίνδυνο πρόκλησης ατυχήματος μεγάλης έκτασης, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μετά από αστοχία του περιβλήματος που περιέχει τις επικίνδυνες ουσίες (δεξαμενή, δοχεία κ.λπ.). Επιπλέον, τοξικές ουσίες μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια ατυχημάτων που σχετίζονται με πυρκαγιές (προϊόντα καύσης συγκεκριμένων υλικών).

Οι χημικές ουσίες μπορεί να εισέλθουν στο ανθρώπινο οργανισμό μέσω του δέρματος, των ματιών, μέσω της κατάποσης ή της αναπνοής. Οι συνέπειες από την έκθεση σε τοξικές ουσίες εξαρτώνται από τη δόση των επικίνδυνων ουσιών που λαμβάνει ένα άτομο, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την τοξικότητα της ουσίας, τη συγκέντρωση των ουσιών στην ατμόσφαιρα, το χρόνο και γενικότερα τις συνθήκες έκθεσης των ανθρώπων σε αυτές, καθώς και από την ευαισθησία κάθε ατόμου που εξαρτάται από μια σειρά παράγοντες (π.χ. ηλικία, φύλο, κατάσταση υγείας).

Η έκθεση μπορεί να έχει άμεσες επιπτώσεις (π.χ. προβλήματα στο δέρμα, ζάλη, ερεθισμός βλεννογόνων – αναπνευστικού, διαταραχές νευρικού συστήματος, σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα, θάνατο) ή και μακροπρόθεσμες (εκδήλωση ασθενειών όπως διάφορα είδη καρκίνου, γενετικές ανωμαλίες, καθυστερημένοι θάνατοι κ.ά.) (Wisner and Adams 2002).

Οι συνέπειες ενός ατυχήματος με τοξικές ουσίες μπορεί να επηρεάσουν τον πληθυσμό που κατοικεί και εργάζεται στην ευρύτερη περιοχή γύρω από το σημείο που εκδηλώνεται το ατύχημα (το τοξικό νέφος μπορεί να «ταξιδέψει» σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το σημείο του ατυχήματος).

1.2.1.3 Πυρκαγιές

Η χρήση και αποθήκευση εύφλεκτων ουσιών (flammable substances) ενέχει τον κίνδυνο πρόκλησης ατυχημάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες πυρκαγιές με σοβαρές συνέπειες για τον πληθυσμό και τις εγκαταστάσεις.

Οι συνέπειες αυτές σχετίζονται με την ένταση της θερμικής ακτινοβολίας (heat radiation) που εκλύεται (ανάλογα με το είδος και τις ποσότητες των εύφλεκτων ουσιών και τις συνθήκες που επικρατούν), καθώς και με το χρόνο έκθεσης των ανθρώπων και αντικειμένων σε αυτή. Σχετίζονται, επίσης, όπως ήδη αναφέρθηκε, με την έκθεση σε επικίνδυνες ουσίες που πιθανά δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της καύσης, ανάλογα με το είδος των καιγόμενων υλικών.

Στη συνέχεια αναφέρονται βασικά είδη ατυχημάτων αυτού του είδους (Γεωργιάδου 2001; ΕΛΙΝΥΑΕ 2007; CCPS 1994; ILO 1988; Lees 1996; Ρήγας 2005; Παπάζογλου & Γιακουμάτος 1998).

1.2.1.3.1 Φωτιά Λίμνης

Η Φωτιά λίμνης (pool fire) συμβαίνει στην περίπτωση που ένα υγρό εκρέει σε επίπεδη επιφάνεια, απλώνεται και σχηματίζει μια λίμνη. Εάν το υγρό είναι πηκτικό, εξατμίζεται και αν είναι εύφλεκτο η ατμόσφαιρα πάνω απ' τη λίμνη βρίσκεται στην περιοχή εύφλεκτων συγκεντρώσεων. Εάν αναφλεγεί το μίγμα ατμού αέρα, δημιουργείται μια φωτιά ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της λίμνης. Η θερμοκρασία καύσης θα προκαλέσει την εξάτμιση και επιπλέον ποσότητας υγρού και από τις πλευρές της λίμνης θα απορροφηθεί αέρας για να διατηρήσει την καύση.

Ο κύριος κίνδυνος που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι και ο πληθυσμός οφείλεται στην πιθανότητα έκθεσης σε υψηλά επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, οι υλικές ζημιές στις εγκαταστάσεις μπορεί να είναι σοβαρές, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα προϊόντα καύσης μπορεί να είναι επικίνδυνα.

1.2.1.3.2 Φωτιά Πυρσού

Η φωτιά πυρσού (Jet Fire) συμβαίνει μετά από έκλυση εύφλεκτου αερίου υπό υψηλή πίεση από μικρό άνοιγμα (π.χ. θραύση σωλήνωσης). Αν υπάρξει ανάφλεξη δημιουργείται ένας «πυρσός».

Η φλόγα αυτή (που μπορεί να φτάνει και αρκετά μέτρα μακριά) αποτελεί κίνδυνο για τους ανθρώπους που μπορεί να βρεθούν σε κοντινή απόσταση. Ωστόσο, ο μεγαλύτερος κίνδυνος αφορά τυχόν γειτονικά δοχεία που περιέχουν εύφλεκτα υλικά. Ένας μεγάλος αριθμός φαινομένων BLEVE (βλ. σε επόμενη παράγραφο) που έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία ήταν επακόλουθο φωτιάς πυρσού.

1.2.1.3.3 Κατάκαυση Αερίου Νέφους

Όταν ένα μείγμα εύφλεκτου αερίου και αέρα αναφλεγεί, δημιουργείται το φαινόμενο της κατάκαυσης αερίου νέφους (flash fire). Τα όρια της φωτιάς που προκαλείται καθορίζονται από το σχήμα και την έκταση του νέφους πριν από την ανάφλεξη, υπάρχει ωστόσο και εξάρτηση από το σημείο το νέφους στο οποίο θα υπάρξει η πηγή ανάφλεξης.

Στις περιπτώσεις που η διαφυγή αερίου δεν έχει περατωθεί και το νέφος εκτείνεται μέχρι την πηγή διαφυγής, η ανάφλεξη του μπορεί να προκαλέσει μια φωτιά πυρσού ή μια φωτιά λίμνης στο σημείο διαφυγής, ανάλογα με τη φύση της διαφυγής. Όταν το νέφος αναφλεγεί, το μέτωπο της φλόγας μεταδίδεται μέσα στο νέφος με μεγάλη ταχύτητα. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατόν να επιταχυνθεί η φλόγα σε τέτοιο βαθμό ώστε να προκληθεί έκρηξη (βλ. σε επόμενη παράγραφο).

Άτομα και υλικά αγαθά εντός του νέφους και κοντά σε αυτό εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα προϊόντα καύσης μπορεί να είναι επικίνδυνα.

1.2.1.3.4 Πύρινη Σφαίρα

Το είδος αυτό της φωτιάς συνδέεται συνήθως με τα υγροποιημένα αέρια. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει ο εξής διαχωρισμός: πύρινη σφαίρα (fireball) προερχόμενη από έκρηξη δεξαμενής υπό πίεση και πύρινη σφαίρα από το σχηματισμό νέφους αερίου. Στην πρώτη περίπτωση (βλ. στις επόμενες παραγράφους) η έκρηξη είναι δυνατό να γίνει είτε παρουσία φωτιάς στα πλαίσια ενός φαινομένου BLEVE, είτε απουσία φωτιάς. Η μεγάλη ορμή υποδηλώνει έκρηξη δεξαμενής, ενώ όταν επικρατούν οι δυνάμεις άνωσης η φωτιά οφείλεται σε ανάφλεξη νέφους αερίου.

Δημιουργία πύρινης σφαίρας έχουμε και στην περίπτωση θραύσης αγωγού υγραερίου και ανάφλεξης της διαρροής. Με τον τρόπο αυτό καίγεται το αέριο που δεν ανεφλέγη και ακολουθεί φωτιά πυρσού.

1.2.1.4 Εκρήξεις

Έκρηξη ονομάζεται η ξαφνική και βίαιη απελευθέρωση ενέργειας. Η βιαιότητα της έκρηξης εξαρτάται από το ρυθμό απελευθέρωσης της ενέργειας αυτής. Υπάρχουν διαφορετικά είδη ενέργειας που μπορεί να εκλυθούν σε μία έκρηξη. Τα τρία βασικότερα είναι (1) φυσική ενέργεια, (2) χημική ενέργεια και (3) πυρηνική ενέργεια. Η δυναμική (φυσική) ενέργεια υπάρχει με τη μορφή της πίεσης σε πεπιεσμένα αέρια, της τάσης σε μεταλλικές κατασκευές ή της ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΛΙΝΥΑΕ 2007; Mannan 2005).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα βίαιης εκτόνωσης φυσικής ενέργειας είναι η έκρηξη δοχείου λόγω υπερπίεσης ή η ξαφνική διάρρηξή του λόγω ύπαρξης αδύνατου σημείου στο τοίχωμα από φθορά. Άλλη μία σημαντική μορφή φυσικής ενέργειας είναι η θερμική. Συνήθως παίζει ρόλο στη δημιουργία συνθηκών για πρόκληση έκρηξης και όχι ως πηγή ενέργειας για την ίδια την έκρηξη. Για παράδειγμα, η υπερθέρμανση δοχείου που περιέχει υγρό υπό πίεση προκαλεί απότομη εκτόνωση του υγρού αν ανοιχθεί σε ατμοσφαιρική πίεση.

Οι χημικές εκρήξεις σχετίζονται με τη βίαιη αποσύνθεση μια ασταθούς ένωσης ή ταχύτατης αντίδρασης μίγματος ενώσεων που ονομάζεται εκρηκτική ύλη (Ρήγας 2005). Η φυσική κατάσταση μιας εκρηκτικής ύλης ενός συστατικού ή ενός εκρηκτικού μίγματος μπορεί να είναι αέρια (π.χ. υγραέριο), υγρή (π.χ. νέφος σταγονιδίων βενζίνης) ή στερεή (π.χ. σκόνη αλουμινίου).

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε είδη μεγάλων ατυχημάτων που σχετίζονται με εκρήξεις που αφορούν σε αποθήκευση και διαχείριση εύφλεκτων ή εκρηκτικών ουσιών. Στις πυρηνικές εκρήξεις θα αναφερθούμε σε επόμενη παράγραφο.

1.2.1.4.1 Έκρηξη Αερίου Νέφους

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν αναφλεγεί ένα νέφος αποτελούμενο από μείγμα ατμών εύφλεκτης ουσίας και αέρα σε συγκεντρώσεις εντός των ορίων αναφλεξιμότητας, ακολουθεί είτε κατάκαυση είτε έκρηξη.

Οι εκρήξεις αερίου νέφους (Vapour Cloud Explosion) διακρίνονται σε εκρήξεις αερίων χωρίς περιορισμό (unconfined vapour explosion) και σε εκρήξεις αερίων με περιορισμό (π.χ. μέσα σε κτήρια, λέβητες, χημικές μονάδες).

Μια έκρηξη αερίου νέφους μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και τα υλικά αγαθά λόγω της θερμικής ακτινοβολίας και της υπερπίεσης που δημιουργείται. Οι συνέπειες επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το βαθμό ελευθερίας στην εξάπλωση του νέφους και από το κατά πόσο τυρβώδης είναι η διαδικασία εξάπλωσης.

1.2.1.4.2 Φαινόμενο “BLEVE”

Ο όρος BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), δηλ. «έκρηξη εκτονούμενου ατμού ζέοντος υγρού», χρησιμοποιείται για να περιγράψει την έκρηξη ενός δοχείου λόγω απότομης εκτόνωσης του υγρού περιεχομένου του υπό μορφή ατμών σε υπέρθερμη κατάσταση. Το αποτέλεσμα είναι η βίαιη ατμοποίηση του υγρού και η δημιουργία κρουστικού κύματος μέσα στη μάζα του υγρού.

Η κύρια αιτία πρόκλησης του φαινομένου αυτού είναι η πρόσπτωση μιας εξωτερικής φλόγας στο κέλυφος της δεξαμενής με συνέπεια την ελάττωση της αντοχής του κελύφους και την απότομη ρήξη του. Η απότομη εκτόνωση της πίεσης και του υγρού που ακολουθεί, δημιουργεί ωστικό κύμα και πιθανόν προκαλεί και εκσφενδόνιση θραυσμάτων. Στην περίπτωση που η δεξαμενή περιέχει υγροποιημένο, εύφλεκτο αέριο υπό πίεση η άμεση ανάφλεξη του διασταλμένου μείγματος αέρα και καυσίμου οδηγεί σε μια έντονη καύση του μείγματος και στη δημιουργία πύρινης σφαίρας (fireball) (CCPS 1994; Ρήγας 2005).

Οι επιπτώσεις από τη θερμική ακτινοβολία και το ωστικό κύμα εξαρτώνται από τις συνθήκες και την ποσότητα των επικίνδυνων ουσιών και μπορεί να επεκταθούν σε μεγάλη απόσταση από το σημείο του ατυχήματος.

1.2.1.4.3 Έκρηξη Πυκνής Φάσης

Μια έκρηξη πυκνής φάσης (dense phase explosion) λαμβάνει χώρα όταν ένα υγρό ή στερεό μετατρέπεται ταχύτατα σε αέριο. Η απότομη αύξηση του όγκου που συνεπάγεται η μεταβολή αυτή δημιουργεί ένα κύμα πίεσης το οποίο μεταδίδεται ακτινικά με ταχύτητα μεγαλύτερη του ήχου στον αέρα.

Η πιο κοινή προσέγγιση στον υπολογισμό των συνεπειών από έκρηξη πυκνής φάσης συνίσταται στον προσδιορισμό της ισοδύναμης ποσότητας TNT (τρινιτριτολουόλιο) που προκαλεί ισοδύναμες συνέπειες.

1.2.1.4.4 Εκρήξεις Σκόνης

Τα περισσότερα καύσιμα υλικά στη μορφή λεπτής σκόνης μπορεί να σχηματίζουν εκρηκτικά μίγματα όταν διασπείρονται στον αέρα (ILO 1988; Ρήγας 2005). Οι εκρήξεις σκόνης μπορεί να είναι πολύ ισχυρές και να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στην εγκατάσταση. Υπάρχουν πολλά υλικά που μπορεί να προκαλέσουν εκρήξεις σκόνης, όπως φυσικά οργανικά υλικά (π.χ. αλεύρι, ζάχαρη), συνθετικά υλικά (πλαστικά, φυτοφάρμακα), άνθρακας, μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο, σίδηρος, ψευδάργυρος) κ.ά. (Eckhoff 1997).

1.2.1.5 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Τα ατυχήματα με επικίνδυνες ουσίες μπορεί να προκαλέσουν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Γι' αυτό και ο συγκεκριμένος κίνδυνος καλύπτεται από την οδηγία Seveso II.

Οι επιπτώσεις μπορεί να είναι ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα, καταστροφές καλλιεργειών, επιπτώσεις σε ζωικούς και υδρόβιους οργανισμούς κ.ά. (OECD 2000). Στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται ότι κυρίως οι επιπτώσεις σχετίζονται με το υδάτινο περιβάλλον (Vince 2008).

Οι ουσίες οι οποίες μπορούν να επιφέρουν επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον συμβολίζονται με τις φράσεις R50, R51, R52 που χαρακτηρίζουν την οξεία τοξικότητά τους και R53 που χαρακτηρίζει την παραμονή τους (persistence) στο υδάτινο περιβάλλον. Κατηγοριοποιούνται έτσι με βάση την ικανότητα αποσύνθεσής τους (degradability), την οξεία τοξικότητά τους και τη βιο-συσσώρευσή τους (bioaccumulation). Επίσης, έχουν γίνει προσπάθειες εκτίμησης της μικρότερης ποσότητας (οριακή τιμή) από αυτές τις ουσίες που μπορεί να προκαλέσει καταστροφές στο υδάτινο περιβάλλον. Το συμπέρασμα που έχει προκύψει είναι ότι και πολύ μικρές ποσότητες από κάποιες ουσίες μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη καταστροφή στο υδάτινο περιβάλλον (Christou 2000).

Στο πλαίσιο της διερεύνησης των επιπτώσεων στο περιβάλλον, έχουν μελετηθεί τυπικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης που έχουν συμβεί στο παρελθόν στα οποία υπήρξε είσοδος επιβλαβών ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον. Ορισμένες πληροφορίες για ατυχήματα αναφέρονται στον Πίνακα Π.2 του Παραρτήματος.

Τα βασικά συμπεράσματα από την ανάλυση αυτή είναι τα ακόλουθα (Christou 2000):

- ✓ Οι περισσότερο συνηθισμένες ουσίες που εμπλέκονται σε τέτοιου είδους ατυχήματα είναι ουσίες πολύ τοξικές για το υδάτινο περιβάλλον που παραμένουν στο νερό (οργανικές και ανόργανες), πολύ τοξικές ουσίες που δεν παραμένουν στο νερό, ουσίες τοξικές για το περιβάλλον που παραμένουν στο νερό, φυτοφάρμακα, εντομοκτόνα-παρασιτοκτόνα, πετρελαϊκές ουσίες (40-70% των ατυχημάτων αλλά με μικρότερες περιβαλλοντικές συνέπειες για τις ίδιες ποσότητες), πυροσβεστικά υλικά κατάσβεσης και προϊόντα πυρόλυσης, υπολείμματα από ορυχεία και εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και ουσίες που δεν κατηγοριοποιούνται ως επιβλαβείς.

- ✓ Οι πιο συχνές εγκαταστάσεις στις οποίες συμβαίνουν τέτοιου είδους ατυχήματα είναι: μόνιμες εγκαταστάσεις, αποθήκες χημικών και γεωργικών φαρμάκων (agrochemical), εγκαταστάσεις αποθήκευσης σε εγκαταστάσεις ενέργειας, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, κατά τις διαδικασίες μεταφοράς (σιδηρόδρομος, πλοία, αεροδρόμια, λιμάνια, αγωγοί), σε αποθήκες και διαδικασίες σε εγκαταστάσεις εξόρυξης.
- ✓ Οι περισσότερο συχνόι οδοί ρύπανσης είναι: το νερό πυρόσβεσης που εισέρχεται στο υδάτινο περιβάλλον, το αποχετευτικό σύστημα, οι υδρορροές, το νερό επεξεργασίας λυμάτων, η άμεση είσοδος από αγωγούς, η υπερχειλίση δεξαμενών, η διαρροή κατά τη μεταφορά, η απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια με τη βροχή είσοδος στο νερό, η είσοδος στο νερό με υπόγειο τρόπο.
- ✓ Οι επιπτώσεις αφορούν πολλούς υδάτινους οργανισμούς και πουλιά, οργανισμούς που κατοικούν κοντά στα μολυσμένα νερά, θαλάσσιες καλλιέργειες, ρύπανση του πόσιμου νερού, απώλειες στον τουρισμό και την αλιεία, κόστος για την αποκατάσταση, μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα.

Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι οι επιπτώσεις μπορεί να είναι βραχυπρόθεσμες ή και μακροπρόθεσμες για το υδάτινο περιβάλλον και επίσης ότι πολλές χημικές ουσίες μπορούν να δράσουν ταυτόχρονα και να προκαλέσουν συνεργικές επιπτώσεις (synergistic effects) με ακόμη μεγαλύτερη βλάβη στο περιβάλλον.

Σημασία έχει, επίσης, και το μέγεθος της διασποράς της ρύπανσης (η λίμνη είναι κλειστή με αποτέλεσμα να προκαλείται μεγαλύτερη βλάβη από ότι στον ποταμό) και η ανάγκη να γίνονται μελέτες πριν την εγκατάσταση μίας επιχείρησης σε συγκεκριμένο χώρο, ώστε να μη γειτνιάζουν καλλιέργειες και ευαίσθητες περιοχές με επικίνδυνες εγκαταστάσεις.

1.2.2 ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

Η ενέργεια από πυρηνικές εκρήξεις προέρχεται από τη σχάση ή σύντηξη ατομικών πυρήνων (Ρήγας 2005). Η λειτουργία πυρηνικών εγκαταστάσεων εγκυμονεί κινδύνους πρόκλησης μεγάλων ατυχημάτων, αν δεν τηρούνται τα απαραίτητα μέτρα ασφάλειας. Πυρηνικά ατυχήματα μπορούν επίσης να συμβούν κατά τη διάρκειας μεταφοράς ραδιενεργών υλικών (IAEA 2002a).

Πέρα από την πιθανότητα πρόκλησης θανάτων και τραυματισμών εξαιτίας της πυρκαγιάς και του ωστικού κύματος σε περίπτωση μιας πυρηνικής έκρηξης, ένα πυρηνικό ατύχημα μπορεί να οδηγήσει στην έκθεση των εργαζομένων και του πληθυσμού σε ραδιενέργεια (ιοντίζουσα ακτινοβολία).

Ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν ενέργεια ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιοντισμό των ατόμων της, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες σε ζώντες οργανισμούς (ΕΕΑΕ 2011). Ο ιοντισμός του ατόμου είναι φυσικό φαινόμενο που ακολουθεί την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας με την ύλη. Είναι η βίαιη εκδίωξη ηλεκτρονίου από το άτομο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζεύγους αντίθετα φορτισμένων ιόντων. Οι γνωστότερες ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτίνες Χ που παράγονται στις

λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική, καθώς και οι ακτινοβολίες α, β, και γ που εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες ατόμων.

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι διεισδυτικές. Η διεισδυτικότητά τους στην ύλη εξαρτάται από το είδος τους και την ενέργεια που μεταφέρουν. Η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται από την ακτινοβολία στην ύλη ανά χιλιόγραμμο μάζας, καλείται δόση ακτινοβολίας. Η πιθανότητα βλάβης της υγείας σχετίζεται άμεσα με το μέτρο της δόσης ακτινοβολίας.

Οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων μπορεί να είναι: ναυτία και ερεθισμός του δέρματος έως πολύ σοβαρές επιπτώσεις, όπως σοβαρά εγκαύματα, σοβαρά προβλήματα υγείας και θάνατος. Αυτού του είδους οι επιπτώσεις συνήθως χαρακτηρίζονται ως «ντετερμινιστικές» (deterministic) λόγω του ότι παρατηρούνται μετά από υπέρβαση ενός ορίου της δόσης ακτινοβολίας την οποία λαμβάνει ένα άτομο. Αντίστοιχα, άλλες επιπτώσεις όπως διάφορα είδη καρκίνου, εντάσσονται στις λεγόμενες «στοχαστικές» (stochastic) επιπτώσεις λόγω της αβεβαιότητας με την οποία σχετίζεται η εκδήλωσή τους (IAEA 2006; Wisner and Adams 2002).

Θα πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι σοβαρές επιπτώσεις από ένα πυρηνικό ατύχημα μπορεί να προκύψουν για το περιβάλλον (ρύπανση εδάφους, υδροφόρου ορίζοντα, καταστροφή καλλιεργειών κ.λπ.) και άλλους ζώντες οργανισμούς εκτός από τους ανθρώπους (IAEA 2006).

Οι ερευνητές είχαν την ευκαιρία να συγκεντρώσουν σημαντικό όγκο πληροφοριών σχετικά με τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας σε ανθρώπους και άλλους ζώντες οργανισμούς παρακολουθώντας την εξέλιξη της υγείας των θυμάτων των πυρηνικών βομβαρδισμών της Χιροσίμα και του Ναγκαασάκι (Λοϊζος 1996). Επιπλέον, ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε πυρηνικές εγκαταστάσεις έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. για παράδειγμα (Bennett et al. 2006; Kletz 2001; Lees 1996)). Δυο από αυτά έχουν χαρακτηριστεί ως τα πιο σοβαρά. Το ατύχημα στην πόλη Three Mile Island (ΗΠΑ, 1979) και Chernobyl (Ουκρανία, 1986) στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Πρόσφατα (Μάρτιος 2011) έλαβε χώρα πυρηνικό ατύχημα στην πόλη Φουκούσιμα της Ιαπωνίας ως επακόλουθο του σεισμού και του τσουνάμι που ακολούθησε.

1.2.3 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται οι επιπτώσεις στην οικονομία από την καταστροφή υλικών και εγκαταστάσεων και τη διακοπή δραστηριοτήτων μετά από ένα ατύχημα μεγάλης έκτασης, καθώς επίσης και το οικονομικό κόστος για την αντιμετώπιση και αποκατάσταση των επιπτώσεων (αποκατάσταση υγείας πληθυσμού, συντάξεις αναπηρίας, αποκατάσταση περιβάλλοντος, επισκευές κατασκευών που υπέστηκαν ζημιές κ.ά.) (Wisner and Adams 2002).

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις κοινωνικές επιπτώσεις που μπορεί να σχετίζονται με (Georgiadou et al. 2010; WHO 1997; WHO - World Health Organization 1997):

- άγχος που δημιουργείται στους εργαζόμενους και τον πληθυσμό και το προσωπικό έκτακτης ανάγκης από το φόβο των συνεπειών ενός ατυχήματος (του συγκεκριμένου ατυχήματος ή/και ενός πιθανού στο μέλλον), το οποίο μπορεί να διαρκέσει για πολύ μεγάλο διάστημα και να προκαλέσει σοβαρές ψυχολογικές διαταραχές (π.χ. μετατραυματική αγχώδης διαταραχή, κατάθλιψη)
- η διατάραξη της καθημερινής δραστηριότητας και οι ψυχολογικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου πρέπει να εφαρμοστούν προστατευτικές ενέργειες για τον πληθυσμό (π.χ. προστασία σε κτήρια, εκκένωση)
- ψυχολογικές επιπτώσεις στους εργαζόμενους και τον πληθυσμό λόγω της απώλειας προσώπων του περιβάλλοντός τους
- κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. απώλεια εργασίας λόγω αναπηρίας ή διακοπής της δραστηριότητας) κ.ά.

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τις ψυχολογικές επιπτώσεις στο προσωπικό έκτακτης ανάγκης όπως η «μετατραυματική αγχώδης διαταραχή», το «σύνδρομο επαγγελματικής εξουθένωσης» και η κατάθλιψη, που μπορεί να σχετίζονται με την εντατική εργασία σε πολύ δύσκολες συνθήκες, εργασία για πολλές ώρες, την ψυχική πίεση λόγω της ευθύνης διάσωσης και υποστήριξης του πληθυσμού κ.λπ. (Γεωργιάδου 2001; Fullerton et al. 2004; Mitani et al. 2006; Saijo et al. 2008).

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

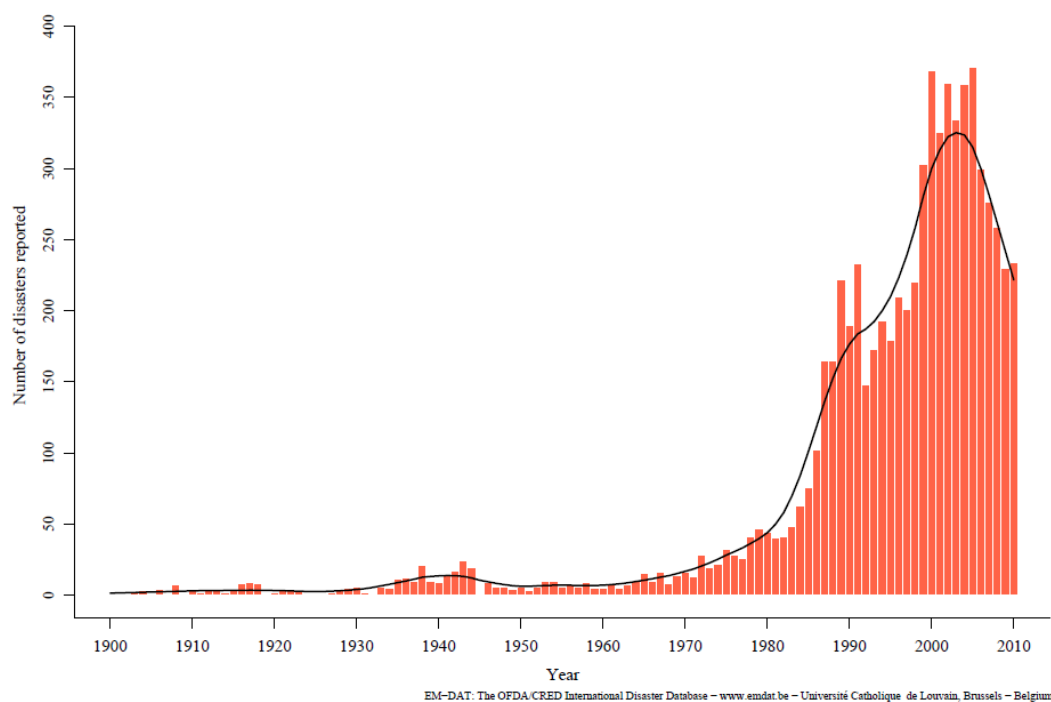
Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί σοβαρά ατυχήματα από τις αρχές του 20ου αιώνα. Η μελέτη των ατυχημάτων αυτών έχει ιδιαίτερη σημασία για την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τις πηγές κινδύνου, τον τρόπο εξέλιξης του ατυχήματος, την αποτελεσματικότητα και τα αδύναμα σημεία των συστημάτων ασφαλείας, καθώς και τις επιπτώσεις του ατυχήματος στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Στο σημείο αυτό θα ήταν σκόπιμο να αναφέρουμε ότι στις χώρες την Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) αλλά και διεθνώς, η νομοθεσία για τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης επιβάλλει την προετοιμασία και δημοσιοποίηση επίσημων αναφορών για κάθε ατύχημα, με στόχο τη διάδοση πληροφοριών σε νομικό και επιστημονικό επίπεδο σχετικά με τις αιτίες του ατυχήματος, την αντιμετώπισή του, την πρόληψη μελλοντικών παρόμοιων καταστάσεων κ.λπ.

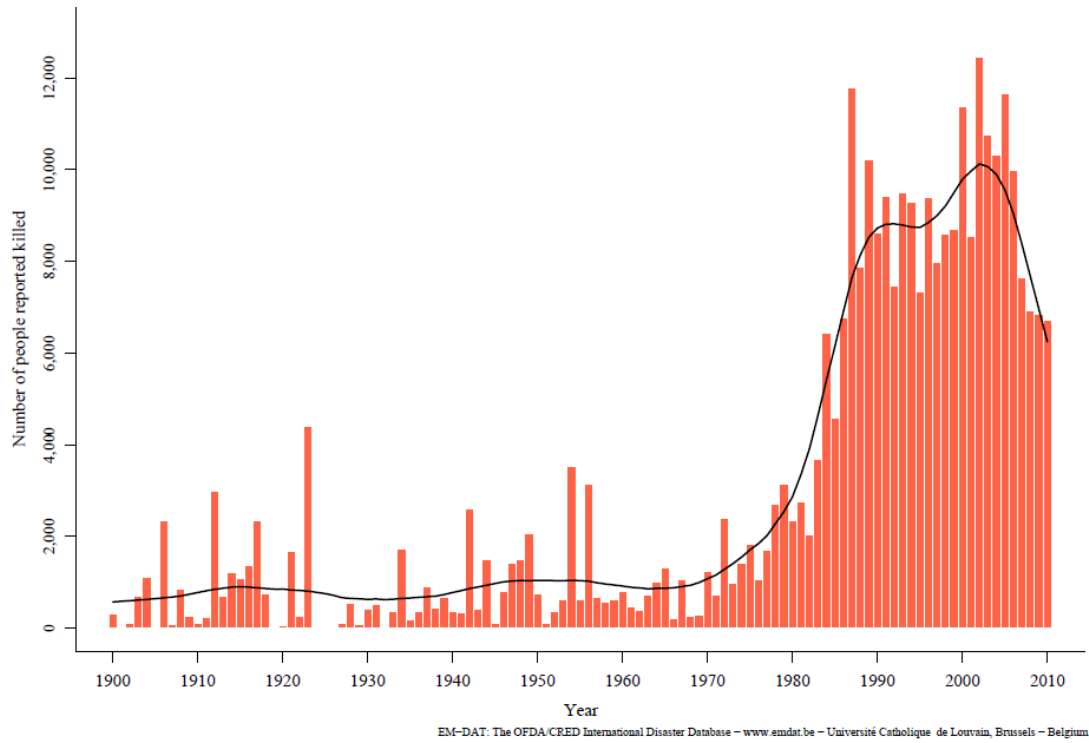
Ενδεικτικά αναφέρουμε ορισμένες *βάσεις δεδομένων ατυχημάτων* που έχουν αναπτυχθεί από διεθνείς οργανισμούς ή αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία:

- ✓ η βάση δεδομένων MARS (European Commission's Major Accident Reporting System), η οποία αφορά στα δεδομένα ατυχημάτων που συλλέγονται από τα κράτη μέλη της ΕΕ στο πλαίσιο εφαρμογής της οδηγίας Seveso (για τη σχετική νομοθεσία βλ. σε επόμενη παράγραφο)
- ✓ εθνικές βάσεις δεδομένων σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες (π.χ. ZEMA στη Γερμανία, ARIA στη Γαλλία, AEA Technology's MHIDAS database και Loss Prevention Bulletin του IChemE στο Ηνωμένο Βασίλειο και TNO's FACTS database στην Ολλανδία), στις ΗΠΑ (National Response Center και EPA-ERNS Database για τα ατυχήματα με επιπτώσεις στο περιβάλλον), την Αυστραλία (EMA Disasters database), τον Καναδά (Canadian Disasters Database) κ.ά.
- ✓ η βάση δεδομένων EM-DAT (The International Disasters Database) που δημιουργήθηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και τη βελγική κυβέρνηση και αφορά φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές
- ✓ η βάση δεδομένων για τα πυρηνικά ατυχήματα από τη Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency - IAEA)
- ✓ η βάση δεδομένων της ITOPF (the International Tanker Owners Pollution Federation Limited) για τα ατυχήματα που αφορούν μεταφορά επικίνδυνων ουσιών στη θάλασσα.

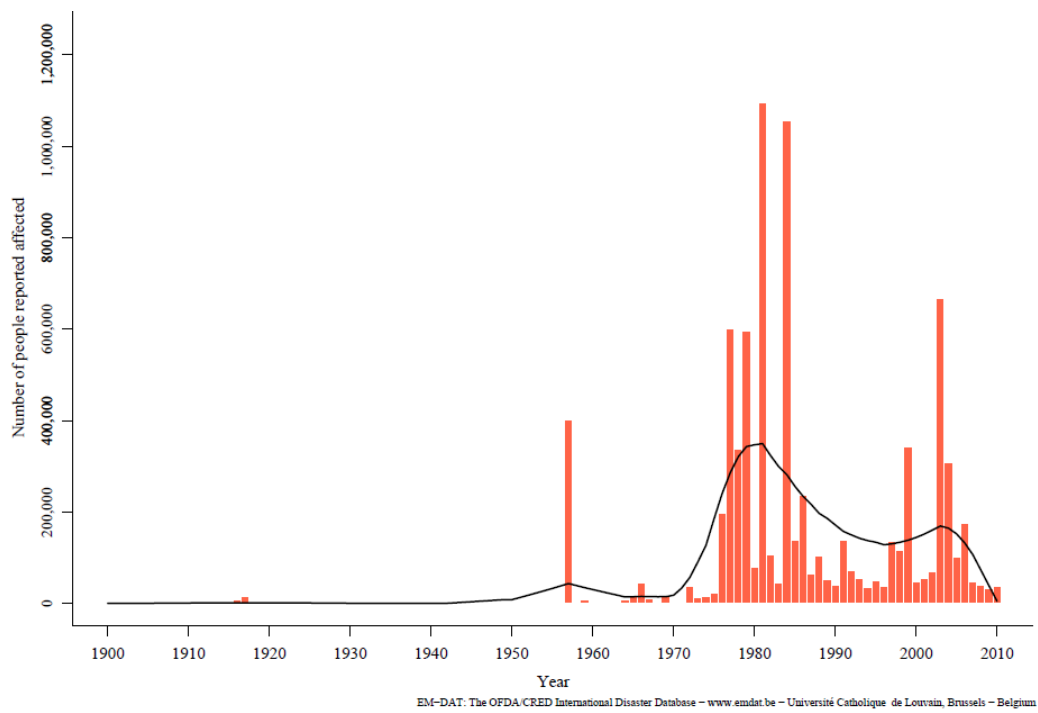
Ενδεικτικά, στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τα τεχνολογικά ατυχήματα που έχουν καταγραφεί παγκοσμίως, σύμφωνα με στοιχεία της βάσης δεδομένων EM-DAT (Πηγή: <http://www.emdat.be/technological-disasters-trends>).



Σχήμα 1.3.1: Τεχνολογικές καταστροφές (περίοδος 1900 – 2010) που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.



Σχήμα 1.3.2: Θάνατοι ως αποτέλεσμα τεχνολογικών καταστροφών που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.



Σχήμα 1.3.3: Αριθμός ατόμων που επηρεάστηκαν από τεχνολογικές καταστροφές που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων EM-DAT.

Πληροφορίες για ορισμένες από τις βάσεις δεδομένων ατυχημάτων που έχουν αναπτυχθεί καθώς και για επιστημονικές αναλύσεις σχετικά με ατυχήματα που έχουν συμβεί στο παρελθόν και τα διδάγματα που προέκυψαν από την ανάλυση τους υπάρχουν στο διαδίκτυο και στη βιβλιογραφία (π.χ. (Carol et al. 2002; Κουρνιαώτης 2001; Ferner 1993; Hu and Raymond 2004; Khan and Abbasi 1999; Kirchsteiger 1999; Kirchsteiger et al. 1998; Kletz 2001; Kletz 2006; Lees 1996; Mannan 2005; Nivolianitou et al. 2006)).

Ωστόσο, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στις βάσεις δεδομένων για σοβαρά τεχνολογικά ατυχήματα και στις έρευνες που έχουν δημοσιευθεί, συχνά παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις ως προς τα ακριβή στοιχεία ενός ατυχήματος (ημερομηνία, εμπλεκόμενες ουσίες, αριθμός θανάτων ή τραυματισμών κ.λπ.). Επιπλέον, διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή περιστατικών σε κάθε βάση, όπως επίσης και η επίδραση της βελτίωσης της καταγραφής, είναι παράγοντες που συμβάλλουν στο να είναι δύσκολο να γίνουν ποσοτικές εκτιμήσεις για τις «τάσεις» των τεχνολογικών ατυχημάτων (Kirchsteiger 1999).

Με την επιφύλαξη των παραπάνω, θεωρούμε σκόπιμη μια ενδεικτική παρουσίαση στις επόμενες παραγράφους στοιχείων από στατιστικές αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί. Επιπλέον, αναφερόμαστε σε ορισμένα σοβαρά ατυχήματα που έχουν συμβεί σε διάφορες χώρες και θεωρήθηκαν σημαντικά λόγω της έκτασης των συνεπειών τους σε ανθρώπινες ζωές, στο περιβάλλον και σε υλικές ζημιές, καθώς και σε ατυχήματα που έχουν καταγραφεί στην Ελλάδα (ΕΛΙΝΥΑΕ 1999; Kirchsteiger et al. 1998; Lees 1996; Mannan 2005; Χρήστου 1993).

Στον Πίνακα Π.1 του Παραρτήματος περιλαμβάνεται ένας πιο εκτενής κατάλογος ατυχημάτων, όπου γίνεται αναφορά στην τοποθεσία, στο είδος του ατυχήματος, στον αριθμό των θανάτων και των τραυματιών, καθώς και στον αριθμό των ατόμων που χρειάστηκε να απομακρυνθούν από την επικίνδυνη περιοχή. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι και ο πίνακας του παραρτήματος δεν είναι εξαντλητικός.

1.3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

Η μελέτη του Κουρνιαώτη (Κουρνιαώτης 2001) αφορά 315 ατυχήματα σε 43 χώρες (με έμφαση στις περιοχές της Ευρώπης και της Β.Αμερικής). Τα ατυχήματα έχουν συλλεγεί από διάφορες βάσεις δεδομένων και τη βιβλιογραφία και αφορούν στην περίοδο 1940-2000.

Ορισμένα συμπεράσματα από τη συγκεκριμένη μελέτη είναι τα ακόλουθα.

- *«Η σχετική συχνότητα καταγραφής των ατυχημάτων αυξάνεται με την αύξηση του ΑΕΠ της χώρας.*
- *Τα ατυχήματα συμβαίνουν συχνότερα την τελευταία εργάσιμη ημέρα της εβδομάδας και τις ώρες πριν την αλλαγή βάρδιας.*
- *Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η συχνότητα ατυχημάτων σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης φυτοφαρμάκων και σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αέριου.*

- Οι χημικές ουσίες που λαμβάνουν μέρος σε ατυχήματα είναι εύφλεκτες, εκρηκτικές, τοξικές, διαβρωτικές. Η πιο επικίνδυνη ομάδα ουσιών είναι αυτή των εύφλεκτων/εκρηκτικών ουσιών στην οποία κατατάσσονται μια σειρά από συνηθισμένα βιομηχανικά χημικά, όπως είναι το υγραέριο, το φυσικό αέριο και το προπυλένιο.
- Όσον αφορά στις προστατευτικές δράσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση των ατυχημάτων, η συχνότερη δράση είναι η διακοπή της κυκλοφορίας. Η εκκένωση του πληθυσμού είναι αρκετά συχνή δράση (περισσότερο στις αναπτυσσόμενες χώρες), ενώ μικρότερη συχνότητα παρουσιάζει η δράση της προστασίας του πληθυσμού στα σπίτια (με αντίστοιχες τάσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες).
- Τα βιομηχανικά ατυχήματα έχουν μεγαλύτερες συνέπειες ως προς την απώλεια ανθρωπίνων ζωών, σε σχέση με άλλες κατηγορίες τεχνολογικών και φυσικών καταστροφών.
- Οι εκρηκτικές ουσίες οδηγούν σε ατυχήματα με μεγαλύτερη ένταση επιπτώσεων σε μικρότερο γεωγραφικά χώρο, ενώ οι τοξικές ουσίες σε ατυχήματα με μικρότερη ένταση επιπτώσεων, οι οποίες όμως παρατηρούνται σε ευρύτερο γεωγραφικά χώρο.
- Τα αλυσιδωτά ατυχήματα τείνουν να διαρκούν περισσότερο από άλλα είδη ατυχημάτων και να οδηγούν σε πιο σοβαρές συνέπειες».

Θεωρούμε χρήσιμο, επίσης, να αναφερθούμε στην έρευνα των Νιβολιανίτου κ.ά. (Nivolianitou et al. 2006) που αφορά στη στατιστική ανάλυση μεγάλων ατυχημάτων της πετροχημικής βιομηχανίας της ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων MARS για τη χρονική περίοδο 1985-2002. Ορισμένα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι τα ακόλουθα:

- «40% των ατυχημάτων οφείλονταν αποκλειστικά (19%) ή εν μέρει (21%) σε ανθρώπινο λάθος.
- Το 44% των ατυχημάτων είχε ως αιτία την αστοχία εξοπλισμού.
- Τα φυσικά φαινόμενα όπως οι πλημμύρες ή οι καταιγίδες και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (χαμηλή θερμοκρασία ή υγρασία) ήταν η αιτία για το 7% των ατυχημάτων (είτε αποκλειστικά για το 3% των περιπτώσεων ή σε συνδυασμό με αστοχία εξοπλισμού για το 4%).
- Όσον αφορά στα μέτρα αντιμετώπισης που ελήφθησαν, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η εσωτερική πυροσβεστική υπηρεσία εκλήθη να αντιμετωπίσει το ατύχημα (89%). Επιπλέον, στο 42% των περιπτώσεων συνέδραμαν δυνάμεις αντιμετώπισης από εξωτερικές υπηρεσίες, στο 10% των περιπτώσεων πραγματοποιήθηκε εκκένωση του πληθυσμού και προστασία σε κτήρια (sheltering) στο 6% των περιπτώσεων.
- Στο 6% των περιπτώσεων πραγματοποιήθηκε απορρύπανση του περιβάλλοντος».

1.3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

1.3.3.1 Feyzin, Γαλλία 1966

Το ατύχημα συνέβη στα διυλιστήρια της πόλης (ΕΛΙΝΥΑΕ 1999; CCPS 1994). Επρόκειτο να πραγματοποιηθεί λήψη δείγματος προπανίου από μια δεξαμενή. Η αρχική αιτία του συμβάντος ήταν λάθος ενέργεια του χειριστή κατά το άνοιγμα και κλείσιμο βαλβίδων της δεξαμενής, που είχε σαν αποτέλεσμα να σχηματιστεί στρώμα πάγου στην έξοδο μιας εκ των βαλβίδων και στη συνέχεια εκτόνωση προπανίου μεγάλης πίεσης που χτύπησε το χειριστή. Ο τραυματισμός και το γεγονός ότι δεν ήταν επαρκής ο φωτισμός και δεν υπήρχε το κατάλληλο κλειδί, δεν επέτρεψαν στο χειριστή να κλείσει τη βάνα και να μη συνεχιστεί η διαρροή. Το νέφος των ατμών προπανίου που δημιουργήθηκε επεκτάθηκε σε μια αρκετά μεγάλη απόσταση από το σημείο εκροής. Στη συνέχεια σημειώθηκε ανάφλεξη λόγω σπινθήρα έναυσης από τη λειτουργία αυτοκινήτου σε γειτονικό δρόμο. Η δεξαμενή περιβλήθηκε με φλόγες οπότε σημειώθηκε έκρηξη και ακολούθησε το φαινόμενο BLEVE. Τρεις ακόμη σφαιρικές δεξαμενές ανετράπησαν εξαιτίας καταστροφής των στοιχείων έδρασης και υποστήριξής τους, που δεν προστατεύονταν από πυρίμαχα υλικά, χωρίς όμως να προκληθεί έκρηξη. Επίσης, η φωτιά επεκτάθηκε και σε δεξαμενές πετρελαίου.

Χρειάστηκε να περάσουν 48 ώρες για να τεθεί υπό έλεγχο η κατάσταση. Στην εξέλιξη του συμβάντος συνεισέφερε το ότι δεν σήμανε συναγερμός αμέσως μετά την εκροή, η καθυστέρηση άφιξης των πυροσβεστών, το ότι δεν διακόπηκε η κυκλοφορία στο γειτονικό δρόμο, η ανεπάρκεια στο σύστημα ύδρευσης κ.ά. Οι συνέπειες ήταν σοβαρές καθώς σκοτώθηκαν 18 άνθρωποι, 81 τραυματίστηκαν, ενώ προκλήθηκαν σοβαρές υλικές ζημιές (CCPS 1994).

1.3.3.2 Flixborough, Ηνωμένο Βασίλειο 1974

Το ατύχημα συνέβη στη χημική εγκατάσταση της Nygro Ltd. Η ανάφλεξη ενός νέφους που εκτιμάται ότι περιείχε 30 τόνους καυσίμου (κυρίως κυκλοεξάνιο) και αέρα, οδήγησε σε μια ισχυρότατη έκρηξη που προκάλεσε την καταστροφή της εγκατάστασης και των κτηρίων της, το θάνατο 28 εργαζομένων, ενώ 104 άνθρωποι τραυματίστηκαν και περίπου 3000 απομακρύνθηκαν από την περιοχή μετά το ατύχημα. Σοβαρές ζημιές προκλήθηκαν και σε γειτονικά σπίτια, ενώ τζάμια παραθύρων έσπασαν ακόμη και 15 Km μακριά.

Η χημική αντίδραση ήταν ατελής και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνταν αντιδραστήρες σε σειρά. όπου ο κάθε ένας υπερχειλίζει στον επόμενο μέσω ενός μικρού αγωγού σύνδεσης. Υπήρχε, επίσης, ένα μεγάλο ρεύμα ανακύκλωσης με το οποίο η εκροή από τη σειρά των αντιδραστήρων επέστρεφε ως εισροή. Σύμφωνα με τις αναφορές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία σχετικά με το ατύχημα, υπήρχε κάποιο σφάλμα (ρωγμή) σε έναν από τους αντιδραστήρες και είχε αποφασιστεί η προσωρινή του αντικατάσταση με ένα αγωγό "by pass". Ο αγωγός αυτός κατασκευάστηκε σχετικά σύντομα και η έρευνα σχετικά με το ατύχημα επικεντρώθηκε στη πιθανή αστοχία του. Ο αγωγός είχε λειτουργήσει επιτυχώς 2 μήνες πριν το ατύχημα. Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για

το κρίσιμο γεγονός που προκάλεσε την αστοχία του αγωγού (Kirchsteiger et al. 1998; Venart 2007).

Μετά από το ατύχημα αναγνωρίστηκε η ανάγκη για έλεγχο των εγκαταστάσεων από τις δημόσιες αρχές, η ανάγκη σχεδιασμού της χωροθέτησής τους, η ανάγκη τήρησης των κανόνων, προτύπων και προδιαγραφών ασφάλειας για δοχεία πίεσης κ.λπ. Στη σοβαρότητα του συγκεκριμένου ατυχήματος επέδρασαν οι μεγάλες ποσότητες επικίνδυνης ουσίας που αποθηκευόταν και χρησιμοποιούταν. Επιπλέον, ο αγωγός “by pass”, τέθηκε σε λειτουργία χωρίς να έχουν επαληθευτεί οι αιτίες πρόκλησης του σφάλματος στον αρχικό αντιδραστήρα.

1.3.3.3 Seveso, Ιταλία 1976

Συνέβη στην εγκατάσταση φαρμάκων της Icmesa Chemical Company στην πόλη Seveso της Β. Ιταλίας (Χρήστου 1993). Το ατύχημα προήλθε από την αστοχία μιας βαλβίδας που προκάλεσε τη διαφυγή στην ατμόσφαιρα μεγάλης ποσότητας της εξαιρετικά τοξικής ουσίας TCDD (2,3,7,8-tetrachlorodibenzoparadioxin). Το τοξικό νέφος που δημιουργήθηκε στη συνέχεια λόγω ισχυρής βροχής επικάθησε στο χώμα. Πάνω από 600 άνθρωποι πήραν μέρος στην εκκένωση της περιοχής και περίπου 2000 έλαβαν ειδική ιατρική φροντίδα λόγω έκθεσης στη διοξίνη (European Commission 2011). Η επιχείρηση αποκατάστασης της περιοχής αποδείχτηκε εξαιρετικά δύσκολη λόγω του ότι η TCDD είναι αδιάλυτη στο νερό. Τελικά οι αρχές αναγκάστηκαν να καταφύγουν στη λύση των βιολογικών μέτρων για την αποκατάσταση της περιοχής.

Αν και κανείς δεν έχασε τη ζωή του άμεσα, το ατύχημα αυτό έδωσε την αφορμή για συνειδητοποίηση των κινδύνων από τοξικές ουσίες. Μεταξύ των συνεπειών του ατυχήματος αναφέρονται η εκδήλωση της ασθένειας του δέρματος «χλωρακμής» (περίπου 250 άνθρωποι, στην πλειοψηφία τους παιδιά), εκδήλωση δερματίτιδας εξ επαφής από χημικές ουσίες (447 άνθρωποι), εγκαύματα από καυστική σόδα (περίπου 450 άνθρωποι), καρδιακά και αναπνευστικά προβλήματα (Bertazzi et al. 1998; Kletz 2001; Mocarelli 2001; Ramondetta and Repossi 1998).

Έχουν, επίσης, πραγματοποιηθεί μελέτες για τον εντοπισμό των μακροχρόνιων συνεπειών από την έκθεση στη διοξίνη. Για παράδειγμα αναφέρεται αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης κάποιων μορφών καρκίνου (soft tissue sarcoma, hepatobiliary tract, certain hematologic neoplasms) στον πληθυσμό που κατοικούσε γύρω από την περιοχή του ατυχήματος (Pesatori et al. 2008; Ramondetta and Repossi 1998).

Το ατύχημα αυτό, όπως και το ατύχημα στην πόλη Flixborough, αφύπνισε σημαντικά την κοινή γνώμη και τις αρχές. Ανέδειξε ζητήματα σχετικά με την ανάγκη ελέγχου των εγκαταστάσεων από τις αρχές, χωροθέτησης των εγκαταστάσεων, ζητήματα ασφάλειας σχετικά με τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις και γενικότερα την ανάγκη για τήρηση των αρχών της εγγενούς ασφάλειας. Έδωσε αφορμή για τη συνειδητοποίηση των κινδύνων από ατυχήματα τέτοιου είδους και ανέδειξε την ανάγκη για αναβάθμιση του τομέα της ασφάλειας των εγκαταστάσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την

πρόληψη και αντιμετώπιση των ατυχημάτων μεγάλης έκτασης (Οδηγία Seveso) πήρε το όνομα της πόλης στην οποία συνέβη το συγκεκριμένο ατύχημα.

1.3.3.4 Three Mile Island, ΗΠΑ 1978

Συνέβη στη μονάδα 2 του αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος ισχύος του πυρηνικού σταθμού του Three Mile Island (Pennsylvania). Το ατύχημα ξεκίνησε από τη διακοπή λειτουργίας των αντλιών τροφοδοσίας του δευτερεύοντος κυκλώματος ψύξης με συνέπεια την υπερθέρμανσή του και την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης (Χρήστου 1993). Αυτόματα μια βαλβίδα άνοιξε ώστε να εκτονωθεί η αυξημένη πίεση και συγχρόνως η λειτουργία του αντιδραστήρα διακόπηκε. Οι βοηθητικές αντλίες του πρωτεύοντος κυκλώματος είχαν μείνει κλειστές μετά τη συντήρηση που είχε γίνει, με αποτέλεσμα να μην τροφοδοτηθεί με νερό το πρωτεύον κύκλωμα ψύξης και να συμβεί μερική αποκάλυψη του πυρήνα από το νερό ψύξης και στη συνέχεια υπερθέρμανση, μερική καταστροφή και τήξη των στοιχείων σχάσιμου. Τελικά η κατάσταση ετέθη υπό έλεγχο λόγω της ύπαρξης του ισχυρού δοχείου πίεσης και του κατάλληλου περιβλήματος.

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία δεν υπήρξαν σοβαρές συνέπειες οξείας έκθεσης από τη ραδιενέργεια (Casavant 2003; Kletz 2001), ωστόσο το ατύχημα είχε σοβαρότατη και έντονη απήχηση στην κοινή γνώμη και αποτέλεσε την αφορμή για αλλαγή της φιλοσοφίας ασφάλειας των εγκαταστάσεων (έμφαση στην εγγενή ασφάλεια, ανάγκη ενημέρωσης και εκπαίδευσης του κοινού για τους κινδύνους κ.ά.). Σύμφωνα με τους (Behling and Hildebrand 1986), συμπτώματα στους ανθρώπους γύρω από την εγκατάσταση που καταγράφηκαν αμέσως μετά το ατύχημα ήταν «μεταλλική» γεύση και οσμή, διαταραχή του εμμήνου κύκλου των γυναικών, κάψιμο στα μάτια, ερεθισμός του αναπνευστικού, προβλήματα στο δέρμα, ναυτία-εμετός, διάρροια και αιμορραγία του πεπτικού, καρδιακή δυσλειτουργία.

Μετά το ατύχημα πραγματοποιήθηκαν μακροχρόνιες επιδημιολογικές μελέτες στον πληθυσμό γύρω από την εγκατάσταση. Σύμφωνα με τους (Behling and Hildebrand 1986) οι μελέτες δεν έδειξαν αυξημένη πιθανότητα νοσηρότητας ή θνησιμότητας από καρκίνο. Ωστόσο, όπως αναφέρεται από τον (Dunn 2002), οι αναφορές στη βιβλιογραφία είναι αντιφατικές. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Wing et al. 1997) που βασίστηκε σε αρχεία ασθενών που νοσηλεύθηκαν για καρκίνο για την περίοδο 1975 – 1985, προκύπτει αυξημένη πιθανότητα καρκίνου λόγω λήψης δόσης ραδιενέργειας στην περιοχή γύρω από το ατύχημα. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη επίπτωση καταγράφηκε για λευχαιμία, μεσαία πιθανότητα για καρκίνο του πνεύμονα και μικρότερη για άλλου είδους καρκίνο. Απ' την άλλη, ο (Field 2005) αμφισβητεί τα δεδομένα λήψης δόσης ραδιενέργειας λόγω του ατυχήματος στις μελέτες που αναδεικνύουν αυξημένη επίπτωση καρκίνου. Αναφέρει ότι θα έπρεπε στις μελέτες να περιληφθεί η συνολική δόση λαμβάνοντας υπόψη την έκθεση σε ραδόνιο στην περιοχή.

Σύμφωνα με τους (Hatch et al. 1991) η αύξηση των καρκίνων στην περιοχή μπορεί να σχετίζεται με το άγχος μετά το ατύχημα (post traumatic accident stress). Ωστόσο,

η μελέτη τους είχε έλλειψη στοιχείων σχετικά με το ατομικό στρες. Επιπλέον, επισημαίνουν ότι η αύξηση των καρκίνων μπορεί να οφείλεται σε βελτίωση των μεθόδων καταγραφής.

1.3.3.5 Mexico City, Μεξικό 1984

Το ατύχημα προκλήθηκε από μεγάλη πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στις εγκαταστάσεις υγροποιημένου αερίου (LPG) της πόλης και τις εκρήξεις που ακολούθησαν (Γεωργιάδου 2001; Lees 1996; Χρήστου 1993). Χαρακτηριστικό ήταν το φαινόμενο domino που παρατηρήθηκε, καθώς και η πολύ μικρή διάρκεια εντός της οποίας εξελίχθηκε και ολοκληρώθηκε (περίπου 10 λεπτά). Το γεγονός της μικρής διάρκειας μέσα στην οποία εξελίχθηκε το ατύχημα, απαγόρευσε στην πράξη την εφαρμογή οποιασδήποτε προστατευτικής ενέργειας και ανάγκασε τις αρχές να περιορισθούν μόνο σε μέτρα περίθαλψης των πληγέντων.

Οι συνέπειες ήταν πολύ σοβαρές καθώς εκτιμάται ότι πέθαναν 650 άνθρωποι και περισσότεροι από 6400 τραυματίστηκαν (Abdolhamidzadeh et al. 2011). Μετά το ατύχημα αναγνωρίστηκε η σημασία των «πολλαπλασιαστικών αποτελεσμάτων» (domino effects) και δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη μελέτη τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην οδηγία Seveso II υπάρχει ιδιαίτερη αναφορά στο αλυσιδωτό ατύχημα («φαινόμενο domino»), την περίπτωση δηλ. όπου από κάποια αστοχία προκαλούνται βλάβες και σε γειτονικά συστήματα.

1.3.3.6 Bhopal, Ινδία 1984

Συνέβη σε εργοστάσιο παραγωγής παρασιτοκτόνων της Union Carbide (Γεωργιάδου 2001; Χρήστου 1993). Ένα από τα μεγαλύτερα ατυχήματα στη χημική βιομηχανία, που προήλθε από διαφυγή μεγάλης ποσότητας μεθυλικού ισοκυανίου (methyl isocyanate) στην ατμόσφαιρα, ενός πολύ τοξικού αερίου. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ως το «χειρότερο ατύχημα μεγάλης έκτασης» που έχει συμβεί διεθνώς. Η πιο πιθανή αρχική αιτία πρόκλησης του ατυχήματος ήταν η εισαγωγή νερού στη δεξαμενή του μεθυλικού ισοκυανίου. Για τον τρόπο με τον οποίο έγινε η εισαγωγή νερού έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες στη βιβλιογραφία.

Μερικές εκατοντάδες άτομα πέθαναν την ίδια μέρα και πολλοί ακόμη τις επόμενες μέρες. Οι βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν διαφορετικό αριθμό ατόμων που πέθαναν ή αντιμετώπισαν προβλήματα. Τέσσερις μήνες μετά το ατύχημα η κυβέρνηση της Ινδίας ανέφερε ότι είχαν πεθάνει 1430. Το 1991 η κυβέρνηση ανέφερε ότι οι νεκροί έχουν ξεπεράσει τους 3800 και περίπου 11000 αντιμετώπισαν και αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα όπως αναπνευστικά, δηλητηρίαση, προβλήματα ανικανότητας, όρασης κ.ά. (Γεωργιάδου 2001). Άλλες πηγές αναφέρουν ότι 20.000 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και πάνω από 120.000 αντιμετώπισαν και αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα (βλ. "What happened in Bhopal?", <http://bhopal.org/>). Μεταξύ των συνεπειών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι ασθένειες του γαστρεντερικού, προβλήματα στην αναπαραγωγή, γενετικές ανωμαλίες, αναπνευστικά προβλήματα, νευρολογικά και ψυχολογικά

προβλήματα, προβλήματα στα μάτια (Acquilla et al. 2007; Broughton 2005).

Το ατύχημα αποτέλεσε αφορμή για τη συνειδητοποίηση των κινδύνων που προέρχονται από παραγωγικές διαδικασίες κατά τις οποίες αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται επικίνδυνες ουσίες. Τα συμπεράσματα από το ατύχημα αυτό, συνέβαλαν στην τροποποίηση της οδηγίας Seveso το 1987 και 1988 (European Commission 2011).

Αναφορικά με τυχόν προστατευτικές ενέργειες για τον πληθυσμό, πρέπει να σημειωθεί ότι υπήρχε χρόνος προειδοποίησης ακόμη και πριν τη διαφυγή του αερίου και η εξέλιξη του ατυχήματος επέτρεπε χρονικά την ανάληψη σημαντικών ενεργειών για περιορισμό των συνεπειών, όπως π.χ. η εκκένωση πληθυσμού. Το ατύχημα της Bhopal, μπορεί να θεωρηθεί αποδεικτικό της απαίτησης για βελτιστοποίηση του Σχεδιασμού Έκτακτης Ανάγκης. Όπως είναι γνωστό, για το συγκεκριμένο ατύχημα κανένα προστατευτικό μέτρο δεν ελήφθη και οι κάτοικοι «αφέθηκαν να προστατευθούν μόνοι τους». Αυτό είχε ως επακόλουθο οι περισσότεροι να κινηθούν προς τα νοσοκομεία της πόλης, τα οποία ατυχώς βρισκόταν προς την κατεύθυνση που φυσούσε ο άνεμος, με αποτέλεσμα το νέφος να βρίσκεται διαρκώς πάνω από τους κατοίκους και να προκαλέσει τις τραγικές συνέπειες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Γενικότερα, το ατύχημα ανέδειξε την ανάγκη ελέγχου των εγκαταστάσεων, την ανάγκη για ενημέρωση και εκπαίδευση του πληθυσμού, το ζήτημα της χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν στην ασφάλεια περικοπές κόστους στην παραγωγική διαδικασία (Γεωργιάδου 2001; Acquilla et al. 2007; Joseph et al. 2007; Χρήστου 1993).

Αξίζει να σημειώσουμε ότι στο διάστημα μετά το ατύχημα δημιουργήθηκαν αρκετές οργανώσεις με στόχο την υποστήριξη των πληγέντων και τη διάδοση πληροφοριών σχετικά με το ατύχημα (π.χ. Bhopal Gas Peedit Mahila Udyog Sangathan, International Campaign for Justice in Bhopal).

1.3.3.7 Chernobyl, Ουκρανία 1986

Το ατύχημα συνέβη στον πυρηνοληλεκτρικό σταθμό του Chernobyl. Σύμφωνα με μελέτες που ακολούθησαν, το ατύχημα προκλήθηκε από λανθασμένες ενέργειες χειριστών που είχαν σαν αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του αντιδραστήρα, έκρηξη και διαφυγή ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα (Χρήστου 1993). Οι συνέπειες που σχετίζονται με το ατύχημα αυτό αφορούν σε υλικές και οικονομικές επιπτώσεις (π.χ. καταστροφή καλλιεργειών και αγροτικών προϊόντων) και σε επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια. Πρέπει να επισημάνουμε ότι για το συγκεκριμένο ατύχημα, συγκριτικά και με άλλα πυρηνικά συμβάντα, έχει πραγματοποιηθεί πλήθος μελετών για τους εργαζόμενους έκτακτης ανάγκης και τον πληθυσμό που ενδεχομένως εκτέθηκε στη ραδιενέργεια και έχει δοθεί μεγάλη έμφαση από τους διεθνείς οργανισμούς.

Οι αναφορές διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό των θανάτων που σχετίζονται με το ατύχημα. Σύμφωνα με τον Kletz (Kletz 2001) καταγράφηκαν 28 θάνατοι εντός λίγων μηνών και άλλοι 17 δέκα χρόνια αργότερα. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, 28 εργαζόμενοι έκτακτης ανάγκης πέθαναν εντός λίγων ημερών και άλλοι 19 πέθαναν την

περίοδο έως το 2004 (χωρίς απαραίτητα ο θάνατος τους να σχετίζεται με την έκθεση στη ραδιενέργεια). Εκτιμάται επίσης ότι περίπου 116 και 100 αντίστοιχα εργαζόμενοι έκτακτης ανάγκης που εκτέθηκαν σε δόσεις χαμηλότερες αυτών του ARS (Acute Radiation Syndrome) πέθαναν λόγω καρκίνων και προβλημάτων στο κυκλοφορικό σύστημα (Bennett et al. 2006).

Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν αναφέρουν συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε ραδιενέργεια από το συγκεκριμένο ατύχημα και αύξηση του καρκίνου του θυρεοειδούς, ιδιαίτερα σε παιδιά (Bennett et al. 2006; Ivanov et al. 2007). Επίσης, αναφέρονται δεδομένα για άλλες επιπτώσεις στο θυρεοειδή (Ron et al. 1995; Vykhovanets et al. 1997). Πραγματοποιήθηκαν μελέτες για λευχαιμία σε παιδιά και εργαζόμενους αποκατάστασης της ρύπανσης (Ivanov et al. 1998; Petridou et al. 1996) χωρίς να προκύπτει συσχέτιση με την έκθεση σε ραδιενέργεια στατιστικά σημαντική. Αναφέρεται, ωστόσο, ότι οι μελέτες αυτές έχουν μεθοδολογικά μειονεκτήματα ενώ είναι νωρίς ακόμη για να μπορέσει κανείς να εκτιμήσει με ασφάλεια το συγκεκριμένο ζήτημα (Cardis 2006). Άλλες επιπτώσεις στην υγεία που καταγράφηκαν αφορούν ψυχολογικές επιπτώσεις, καρδιακιά προβλήματα και προβλήματα στα μάτια (καταρράκτης) (Bennett et al. 2006).

1.3.3.8 Basel, Ελβετία 1986

Συνέβη στις εγκαταστάσεις της Sandoz λόγω πυρκαγιάς πολύ μεγάλης ποσότητας (περίπου 1000 τ.) χημικών προϊόντων. Στην προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς περίπου 10 έως 30 τόνοι χημικών (υδράργυρος, οργανοφωσφορικές ενώσεις κ.ά.) έπεσαν στον ποταμό Ρήνο, δημιουργώντας τεράστια οικολογική καταστροφή (π.χ. πάνω από μισό εκ. ψάρια πέθαναν) (European Commission 2011; Χρήστου 1993). Έχει αναφερθεί ότι βρέθηκαν νεκρά χέλια ακόμη και 200 χλμ μακριά, ενώ η ρύπανση επεκτάθηκε και σε μεγάλο τμήμα του εδάφους γύρω από το ατύχημα λόγω της χρήσης πυροσβεστικού υλικού για την κατάσβεση της φωτιάς (Vince 2008). Γι' αυτό το λόγο, το ατύχημα της Βασιλείας χαρακτηρίζεται σαν ένα μεγάλο περιβαλλοντικό ατύχημα και επιβεβαίωσε την ανάγκη για ανάπτυξη αποδοτικών μέτρων έκτακτου ανάγκης για αντιμετώπιση του κινδύνου και για τους πληθυσμούς, αλλά και για τον περιβαλλοντικό κίνδυνο μιας οικολογικής καταστροφής. Τα συμπεράσματα από το ατύχημα αυτό, συνέβαλαν στην τροποποίηση της οδηγίας Seveso το 1987 και το 1988 (European Commission 2011).

1.3.3.9 Nantes, Γαλλία 1987

Το ατύχημα οφειλόταν σε πυρκαγιά που ξεκίνησε από χλωριούχα και αζωτούχα λιπάσματα, προκάλεσε την αστοχία ενός γειτονικού σιλό που περιείχε 850 τόνους νιτρικής αμμωνίας και οδήγησε στη συνέχεια στη δημιουργία ενός τοξικού νέφους, μήκους 15 χλμ. και πλάτους 5 χλμ το οποίο περιείχε επικίνδυνες ουσίες (Χρήστου 1993). Το νέφος βρισκόταν σε ύψος 250 χλμ και κινούταν με ταχύτητα 7 χλμ/ώρα. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε εκκένωση χιλιάδων ατόμων αρχικά, ενώ το σχέδιο προέβλεπε και την

απομάκρυνση πολλών ακόμη αν αυτό κρίνονταν αναγκαίο. Ευτυχώς η διεύθυνση του ανέμου γρήγορα άλλαξε, ωθώντας το επικίνδυνο νέφος προς τη θάλασσα. Η βάση δεδομένων του ΟΗΕ (UNEP 2011) αναφέρει ως επιπτώσεις του ατυχήματος 24 τραυματίες και 25.000 άτομα που πήραν μέρος σε εκκένωση.

Το ατύχημα αυτό ήταν πιθανότατα το πρώτο στο οποίο ελήφθησαν σοβαρά μέτρα προστασίας για τον πληθυσμό εκτός της εγκατάστασης, γεγονός στο οποίο συντέλεσε και η ύπαρξη της οδηγίας Seveso, που παρείχε ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης. Από την εφαρμογή του σχεδίου σε πραγματική κατάσταση, εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούσαν στις δυσκολίες και την ταχύτητα κινητοποίησης των αρχών, την ανάλυση και εκτίμηση της σπουδαιότητας της κατάστασης, ακόμη και έλλειψη καλής πληροφόρησης αναφορικά με την ίδια την εγκατάσταση.

1.3.3.10 Piper Alpha, Β.Θάλασσα 1988

Μια αλληλουχία λαθών οδήγησε στην ανάφλεξη της πλατφόρμας πετρελαίου Piper Alpha. Το ατύχημα αυτό αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυνητικών συνεπειών της ανεπαρκούς συντήρησης.

Την ημέρα της καταστροφής, το συνεργείο συντήρησης της ημερήσιας βάρδιας εργαζόταν στις αντλίες συμπυκνωμάτων παραγωγής πεπιεσμένου αερίου. Μία από τις αντλίες αφαιρέθηκε στο πλαίσιο της προγραμματισμένης συντήρησης και ο σωλήνας συμπυκνωμάτων σφραγίστηκε προσωρινά με έναν επίπεδο μεταλλικό δίσκο. Δεδομένου ότι οι εργασίες δεν μπορούσαν να ολοκληρωθούν πριν από την επόμενη αλλαγή βάρδιας, ο μεταλλικός δίσκος παρέμεινε στη θέση του μετά το τέλος της ημερήσιας βάρδιας. Οι εργαζόμενοι της επόμενης βάρδιας δεν το γνώριζαν αυτό. Αργότερα το απόγευμα, όταν η άλλη αντλία συμπυκνωμάτων σταμάτησε να λειτουργεί, τέθηκε σε λειτουργία η αντλία υπό συντήρηση. Βρέθηκε ένα σχετικό έγγραφο άδειας προς εργασία, όμως δεν βρέθηκε κανένα έγγραφο που να αναφέρει ότι η αντλία δεν έπρεπε να τεθεί σε λειτουργία. Η αντλία δεν λειτούργησε με αποτέλεσμα να σημειωθεί διαρροή αερίου υψηλής πίεσης, το οποίο στη συνέχεια αναφλέχθηκε. Το ατύχημα είχε σαν αποτέλεσμα το θάνατο 167 εργαζομένων (European Agency for Safety and Health at Work 2011).

Το σημαντικότερο δίδαγμα είναι ότι η ποιότητα της διαχείρισης της ασφάλειας είναι κρίσιμης σημασίας και ότι πρέπει να τηρείται ένα σύστημα άδειας προς εργασία με τρόπο που να διασφαλίζει την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ όλων των μερών που επηρεάζονται από οποιαδήποτε διαδικασία συντήρησης. Ο χώρος στον οποίο εκτελούνται εργασίες συντήρησης πρέπει να είναι κατάλληλα οριοθετημένος και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην εκπαίδευση όλων των εμπλεκομένων σε θέματα ασφάλειας.

1.3.3.11 Pesadena, Τέξας 1989

Το ατύχημα συνέβη σε εγκατάσταση πολυαιθυλενίου της εταιρείας Phillips 66, στο Τέξας όπου πάνω από 85.200 λίμπρες εύφλεκτου υλικού απελευθερώθηκαν στιγμιαία στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια ακολούθησε ανάφλεξη και έκρηξη του νέφους που

σχηματίστηκε. Το ατύχημα είχε σαν αποτέλεσμα το θάνατο 23 ανθρώπων και τον τραυματισμό 314 (Αργυρόπουλος 2006; Lees 1996).

Η αρχική έκρηξη καταγράφηκε ως σεισμός 3-4 ρίχτερ ενώ σύμφωνα με την τεχνική αναφορά της OSHA, υπολογίστηκε ως έκρηξη 2,4 τόνων ισοδύναμου TNT. Σύμφωνα με τεχνική έκθεση της FEMA, το ατύχημα οφείλεται σε βλάβη στη γραμμή παραγωγής ή σε βαλβίδα που μετέφερε αιθυλένιο ή βουτάνιο υψηλής πίεσης (Αργυρόπουλος 2006).

1.3.3.12 Enschede, Ολλανδία 2000

Το ατύχημα συνέβη σε εγκατάσταση αποθήκευσης και κατασκευής πυροτεχνημάτων στην πόλη Enschede της Ολλανδίας και είχε σαν αποτέλεσμα το θάνατο 22 ανθρώπων και τον τραυματισμό 944. Οι 4 από τους ανθρώπους που πέθαναν ήταν πυροσβέστες, καθώς το ατύχημα συνέβη μετά από σειρά εκρήξεων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια υλοποίησης σχεδίου έκτακτης ανάγκης (η αρχική αιτία για την οποία είχε σημάνει συναγερμός ήταν η ανίχνευση καπνού σε αποθήκη) (Bjornhagen et al. 2006).

Το ατύχημα προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε μεγάλη απόσταση γύρω από το σημείο της έκρηξης σε μια περιοχή όπου περιλάμβανε κατοικίες, όπως επίσης και εγκατάσταση ζυθοποιίας που περιείχε μεγάλο σύστημα αποθήκευσης αμμωνίας για χρήση ως ψυκτικό μέσο. Στο πλαίσιο της διερεύνησης του ατυχήματος εξετάστηκαν ζητήματα που αφορούσαν στις ποσότητες των εκρηκτικών που επιτρέπονταν να υπάρχουν στην εγκατάσταση, στις αποστάσεις ασφαλείας, στην ταξινόμηση και επισήμανση των εκρηκτικών κ.λπ., με σκοπό την αναθεώρηση της νομοθεσίας (Wood and Duffield 2001).

Το συγκεκριμένο ατύχημα αποτέλεσε αφορμή μαζί με άλλα ατυχήματα για την τροποποίηση της οδηγίας Seveso II το 2003 (κυρίως για ζητήματα χρήσεων γης και χρήσης εκρηκτικών) (European Commission 2011).

1.3.3.13 Toulouse, Γαλλία 2001

Ένα από τα σοβαρότερα ατυχήματα μεγάλης έκτασης της τελευταίας δεκαετίας είναι αυτό που συνέβη στην εγκατάσταση λιπασμάτων στην Τουλούζη της Γαλλίας το 2001. Σε αποθήκη που βρίσκονταν μεταξύ των τμημάτων παραγωγής και των τμημάτων συσκευασίας νιτρικού αμμωνίου σημειώθηκε ισχυρή έκρηξη. Η έκρηξη δημιούργησε έναν κρατήρα της τάξης των 65μ × 54μ σε διάμετρο και 7μ βάθος. Σύμφωνα με την έρευνα του INERIS, η ισχύς της έκρηξης ισοδυναμούσε με 20–40 τόνους TNT και προκάλεσε σεισμικό κύμα της τάξης των 3,4 Richter. Το ωστικό κύμα είχε σαν αποτέλεσμα να σπάσουν τζάμια σε απόσταση 3 χλμ. Τριάντα άνθρωποι σκοτώθηκαν (22 εργαζόμενοι και 8 από το γενικό πληθυσμό) ενώ τραυματίστηκαν γύρω στους 2240. Επιπλέον, 5079 άνθρωποι χρειάστηκε να λάβουν ειδική ψυχολογική υποστήριξη μετά το ατύχημα. Μεγάλο ήταν και το κόστος από τις υλικές ζημιές που προκλήθηκαν (Dechy et al. 2004).

Τα διδάγματα από το ατύχημα επικεντρώθηκαν στο ρόλο της «μόλυνσης» του νιτρικού αμμωνίου κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης (χημική ασυμβατότητα ουσιών), καθώς και στην ανάγκη εμπλοκής τους συνόλου των εργαζομένων και ιδιαίτερα των υπεργολάβων

στις διαδικασίες ασφάλειας. Στην εγκατάσταση εργάζονταν 25 επιχειρήσεις υπερβολαβίας ενώ στην αποθήκη στην οποία συνέβη το ατύχημα εμπλέκονταν 3 διαφορετικές εταιρείες εργολάβων. Η φόρτωση – εκφόρτωση, μετακίνηση του νιτρικού αμμωνίου πραγματοποιήθηκε από αυτές ενώ η συντήρηση της αποθήκης πραγματοποιήθηκε από διαφορετικό υπερβολάβο. Το ζήτημα αυτό θεωρείται ως καθοριστικός παράγοντας που επέδρασε στο να συμβεί το ατύχημα (Dechy et al. 2004).

Το συγκεκριμένο ατύχημα αποτέλεσε αφορμή μαζί με άλλα ατυχήματα για την τροποποίηση της οδηγίας Seveso II το 2003 (κυρίως για ζητήματα χρήσεων γης και εργασίες εργολάβων) και ειδικότερα για την τροποποίηση της σχετικής νομοθεσίας στη Γαλλία (European Commission 2011).

1.3.3.14 Bancefield, Ηνωμένο Βασίλειο 2005

Το ατύχημα συνέβη σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων στο Bancefield της Αγγλίας (Αργυρόπουλος 2006). Μαρτυρίες ανθρώπων και αναφορές από τα ΜΜΕ ανέφεραν μια μεγάλη έκρηξη και στη συνέχεια ένα αριθμό μικρότερων.

Η πρώτη των μικρότερων σε ένταση εκρήξεων έγινε μερικά λεπτά μετά την κύρια έκρηξη και πιθανότατα όλα συνέβησαν μέσα σε μισή ώρα. Η δύναμη των εκρήξεων ήταν τόσο μεγάλη που είχε ως άμεσο αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης πυρκαγιάς (Markatos et al. 2009).

Κατά τη διάρκεια του ατυχήματος τραυματίστηκαν 43 άνθρωποι. Σημαντικές ζημιές προκλήθηκαν σε εμπορικές εγκαταστάσεις και κατοικίες της περιοχής, ενώ ταυτόχρονα μεγάλο μέρος της περιοχής γύρω από την εγκατάσταση εκκενώθηκε.

Το σημαντικότερο πρόβλημα αφορά στις επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν σχετικές έρευνες για την προσομοίωση της διασποράς των τοξικών ρύπων (Markatos et al. 2009).

1.3.3.15 Texas, ΗΠΑ 2005

Το ατύχημα συνέβη σε διυλιστήριο της BP στο Τέξας των ΗΠΑ. Η ισχυρή έκρηξη που προκλήθηκε είχε σαν αποτέλεσμα 15 νεκρούς και 170 τραυματίες (Σκλαβούνος 2006). Πρόκειται για το μεγαλύτερο και πιο σύνθετο διυλιστήριο της BP στον κόσμο και ένα από τα μεγαλύτερα των ΗΠΑ, με 30 μονάδες (Μουκριώτη 2005).

Η έκρηξη συνέβη σε μονάδα ισομερισμού για την παραγωγή οκτανίου και βενζινών, ενώ το ισχυρό κρουστικό κύμα που δημιουργήθηκε ισοπέδωσε κτήρια και κατέστρεψε ολόκληρα τμήματα της εγκατάστασης. Η έκρηξη συνοδεύτηκε από πυρκαγιά σε αποστακτικές στήλες και γειτονικές δεξαμενές που χτυπήθηκαν από το κρουστικό κύμα, με αποτέλεσμα την κλιμάκωση των ζημιών. Παρόμοια περιστατικά με εκρήξεις στην εγκατάσταση είχαν προηγηθεί άλλες δύο φορές στο ίδιο έτος, χωρίς όμως απ' ό,τι φαίνεται εκ του αποτελέσματος να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση του προβλήματος (Σκλαβούνος 2006).

Μεταξύ των αιτιών και κρίσιμων παραγόντων που αναγνωρίστηκαν για το συγκεκριμένο ατύχημα ήταν (Broadribb 2006; Μουκρινιώτη 2005):

- «Η ανάγκη ουσιαστικής προληπτικής συντήρησης του εξοπλισμού (σε προηγούμενη επιθεώρηση είχε προκύψει πρόβλημα σε κάποιο σημείο το οποίο δε διορθώθηκε).
- Η χρήση του συστήματος *blow down* με έξοδο αερίων στην ατμόσφαιρα, για προστασία της μονάδας από υπερπίεση που επιδείνωσε την εξέλιξη του ατυχήματος. Η καμινάδα *blow down* εγκαταστάθηκε το 1953 για μία γραμμή ασφαλιστικών. Λειτουργούσε σε περιπτώσεις υπερπίεσης της στήλης διαχωρισμού για παραλαβή των εκτονούμενων θερμών υγρών και αερίων. Στην πορεία προστέθηκαν άλλες δύο, ενώ μειώθηκε το *set point* ορισμένων ασφαλιστικών, από 70psi σε 40 psi, λόγω διάβρωσης της στήλης διαχωρισμού. Δεν φαίνεται να μελετήθηκε η επίπτωση των αλλαγών στην επάρκεια της καμινάδας. Υπήρξαν ευκαιρίες κατάρτησης και σύνδεσης της μονάδας με τον πυρσό, αλλά αυτό δεν πραγματοποιήθηκε. Υποεκτιμήθηκε η πιθανότητα να δεχθεί η καμινάδα την πολύ μεγάλη παροχή που δέχθηκε κατά το συμβάν. Μετά το ατύχημα, η εταιρεία αποφάσισε να σταματήσει τη χρήση τέτοιων καμινάδων για διοχέτευση εύφλεκτων αερίων, βαρύτερων του αέρα, στην ατμόσφαιρα.
- Υπήρχαν *trailers* εργολάβων κοντά στη διαδρομή. Τα περισσότερα θύματα ήταν άνθρωποι εντός των προσωρινών αυτών γραφείων. Υποεκτίμηση κινδύνων οδήγησε σε πάγια θέση πολλών *trailers* κοντά στην καμινάδα *blow down* (σε 45μ). Μετά το ατύχημα αποφασίστηκε να απαγορευθεί η παραμονή εργαζομένων σε *trailers* εντός 150μ από καμινάδες *blow down* και να παρειαρίζεται στο χώρο των μονάδων λειτουργίας μόνο το ελάχιστο απαιτούμενο προσωπικό.
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι δεν εφαρμόζε όλο το προσωπικό την ίδια διαδικασία «ξεκινήματος μετά από *turnaround*». Δεν εφαρμόσαν όλα τα στάδια της διαδικασίας, με υπογραφή στην ολοκλήρωση κάθε σταδίου, ή τα εφαρμόσαν διαφοροποιημένα. Οι εργολάβοι στο πιο κοντινό *trailer* πραγματοποιούσαν σύσκεψη για τη συντήρηση άλλης μονάδας. Δεν είχαν ενημερωθεί ότι η μονάδα ισομερισμού ξεκινούσε.
- Αδυναμίες στο πλαίσιο εφαρμογής του εσωτερικού σχεδίου έκτακτης ανάγκης (δεν ειδοποιήθηκαν έγκαιρα οι εργαζόμενοι, δεν ενεργοποιήθηκε ο συναγερμός για να πραγματοποιηθεί εκκένωση) κ.ά.»

1.3.3.16 Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης στην Ελλάδα

1.3.3.16.1 Εισαγωγή

Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά κάποια σοβαρά τεχνολογικά ατυχήματα που έχουν συμβεί στη χώρα μας (Γεωργιάδου 2001; ΓΓΠΠ 2011). Τα στοιχεία αφορούν είτε ατυχήματα με σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον, είτε σοβαρά συμβάντα σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες και συνεπώς θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ατυχήματα μεγάλης έκτασης:

- ✓ **1/10/1979:** Στο λιμένα της Σούδας Χανίων έκρηξη στο πλοίο «Πανορμίτης» με αποτέλεσμα 7 νεκρούς και 140 τραυματίες.

- ✓ **24/2/1986:** Πυρκαγιά στις εγκαταστάσεις της Jet Oil της Θεσσαλονίκης. Η φωτιά έκαψε 7 ημέρες και προκάλεσε σημαντικές επιπτώσεις στους πυροσβέστες, τις εγκαταστάσεις, τις γεωργικές καλλιέργειες και το περιβάλλον (βλ. αναλυτικά στη συνέχεια).
- ✓ **6/7/1989:** Πυρκαγιά στον προβλήτα φορτοεκφόρτωσης υγρών καυσίμων των ΕΛΔΑ στον Ασπρόπυργο, από σπινθήρες ηλεκτροσυγκόλλησης (στην πλήρη ανάπτυξη της η πυρκαγιά κάλυπτε έκταση 500 m² με επίκεντρο το αντλιοστάσιο και τους κεντρικούς αγωγούς του προβλήτα).
- ✓ **16/1/1992:** Πυρκαγιά σε μονάδα φυτοφαρμάκων στα Λιπάσματα Δραπετσώνας που προκλήθηκε από υπερθέρμανση σιδηρών βαρελιών και είχε σαν αποτέλεσμα τη διαρροή οργανοφωσφορικών ενώσεων.
- ✓ **1/9/1992:** Ανάφλεξη και πυρκαγιά στις εγκαταστάσεις της ΠΕΤΡΟΛΑ, σε μονάδα διύλισης αργού πετρελαίου που είχε σαν αποτέλεσμα 14 νεκρούς και 24 τραυματίες (βλ. αναλυτικά στη συνέχεια).
- ✓ **23/11/1998:** Έκρηξη σε φορτηγίδα από διαρροή καυσίμων κατά την εκφόρτωση πετρελαιοειδών στις εγκαταστάσεις τις ΕΚΟ στο λιμάνι της Θεσσαλονίκης με αποτέλεσμα 4 νεκρούς.
- ✓ **30/4/1999:** Ατύχημα στην Εθνική Οδό, όταν βυτιοφόρο που μετέφερε προπάνιο τυλίχτηκε στις φλόγες λόγω σύγκρουσης με Ι.Χ. και στη συνέχεια εξερράγη (φαινόμενο BLEVE). Το αποτέλεσμα ήταν 5 άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους, 14 να τραυματιστούν, ενώ μεγάλες ήταν οι ζημιές σε πολλά γειτονικά σπίτια στα Καμένα Βούρλα (βλ. αναλυτικά στη συνέχεια).
- ✓ **26/7/2006:** Ατύχημα στην εταιρεία ΧΥΜΑ στο Λαύριο, πυρκαγιά σε δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαιοειδών προϊόντων. Πιθανή ρύπανση περιβάλλοντος και επιπτώσεις στην υγεία που δεν πιστοποιήθηκαν. Υπήρχε κίνδυνος λόγω γειτνίασης με άλλες εγκαταστάσεις και τη ΔΕΗ (βλ. αναλυτικά στη συνέχεια).
- ✓ **28/11/2005:** Πέντε εργαζόμενοι της ομάδας συντήρησης εργολαβικής εταιρείας συμβαλλόμενης με την Ελληνικά Πετρέλαια τραυματίστηκαν κατά τη διάρκεια προετοιμασίας εργασιών επισκευής αγωγού αργού, στις εγκαταστάσεις της εταιρείας στην Πάχη Μεγάρων, όταν σημειώθηκε μικρής έκτασης ανάφλεξη αερίων.
- ✓ **12/6/2009:** Διαρροή αμμωνίας σε βιομηχανική εγκατάσταση στην περιοχή του Ρέντη.
- ✓ **30/3/2010:** πυρκαγιά σε βυτιοφόρο που μετέφερε προπάνιο στην επαρχιακή οδό Γαλαξιδίου – Ιτέας με έναν νεκρό.

1.3.3.16.2 Jet Oil, Θεσσαλονίκη 1986

Το ατύχημα συνέβη στον πετρελαϊκό σταθμό της Jet Oil στην περιοχή του Καλοχωρίου στη Θεσσαλονίκη. Θεωρείται από τα σοβαρότερα ατυχήματα μεγάλης έκτασης στην Ελλάδα όσον αφορά στις ποσότητες χημικών και τη χρονική διάρκεια του ατυχήματος (Ziomas et al. 1994). Εκδηλώθηκε πυρκαγιά στις εγκαταστάσεις του σταθμού όπου αποθηκευόταν 65.000 τόνοι μαζούτ και 100 τόνοι νάφθας. Η πυρκαγιά προκλήθηκε από

οξυγονοκόλληση στους αγωγούς μεταφοράς υγρών καυσίμων σε μία από τις δεξαμενές. Η επικινδυνότητα ήταν μεγάλη, δεδομένου ότι σε κοντινή απόσταση από τις φλεγόμενες εγκαταστάσεις υπήρχε τερματικός σταθμός των Ελληνικών Διυλιστηρίων, δεξαμενή αποθήκευσης αμμωνίας καθώς και άλλες χημικές βιομηχανίες (Γεωργιάδου 2001; Αργυρόπουλος 2006).

Στις επιχειρήσεις κατάσβεσης εκτός από τους 750 πυροσβέστες από την Ελλάδα, έλαβαν μέρος και πυροσβέστες από τη Γιουγκοσλαβία. Σύμφωνα με περιγραφή του ατύχηματος από την Πυροσβεστική, η πυρκαγιά της δεξαμενής όπου ξεκίνησε το ατύχημα οδήγησε σε έκρηξη και στη συνέχεια σε εξάπλωση της πυρκαγιάς και σε άλλες δεξαμενές. Αντίστοιχα φαινόμενα έλαβαν μέρος και τις επόμενες ημέρες (έκρηξη – επέκταση φωτιάς). Η φωτιά σβήστηκε μετά από 7 ημέρες, προκάλεσε τεράστιες ζημιές στις εγκαταστάσεις, ενώ σημαντικές ήταν οι συνέπειες κυρίως στη γεωργία από τη διασπορά τοξικών ρυπαντών. Τραυματίστηκαν 11 πυροσβέστες και άλλοι 13 παρουσίασαν αναπνευστικά προβλήματα και νοσηλεύτηκαν. Πολύ σοβαρές ήταν επίσης οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το ατύχημα επιτάχυνε το σχεδιασμό μέτρων για τον περιορισμό και τη διαχείριση του κινδύνου στην Ελλάδα (Γεωργιάδου 2001; Αργυρόπουλος 2006).

1.3.3.16.3 Πετρόλα, Ελευσίνα 1992

Η Πετρόλα (σήμερα ΕΛΠΕ ΒΕΕ) έχει εγκαταστάσεις διύλισης αργού πετρελαίου, καθώς και αποθήκευσης και εμπορίας πετρελαιοειδών στην περιοχή της Ελευσίνας. Το ατύχημα συνέβη από διαρροή μεγάλων ποσοτήτων μίγματος υγραερίων και ελαφριάς νάφθας. Το μίγμα διασκορπίστηκε ταχύτατα σε μεγάλη έκταση και ακολούθησε ανάφλεξη και έκρηξη. Τα τζάμια του κτηρίου του προσωπικού των τεχνικών υπηρεσιών έσπασαν. Από τη φλόγα ένας εργαζόμενος απανθρακώθηκε και από το ωστικό κύμα αερίων πολύ υψηλής θερμοκρασίας 13 εργαζόμενοι υπέστησαν εγκαύματα σχεδόν καθολικά και βρήκαν το θάνατο, ενώ 24 άλλοι υπέστησαν εγκαύματα μικρότερης έκτασης (Γεωργιάδου 2001; Αργυρόπουλος 2006). Το συγκεκριμένο ατύχημα είναι το σοβαρότερο που έχει συμβεί στην Ελλάδα από την άποψη του αριθμού των θυμάτων και ένα από τα σοβαρότερα στην Ε.Ε. μετά την εφαρμογή της οδηγίας Seveso (Κουρνιώτης 2001).

Το ατύχημα εκδηλώθηκε κατά τη διάρκεια επανεκκίνησης μονάδας της οποίας η λειτουργία είχε διακοπεί για προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης (Κουρνιώτης 2001). Ερωτήματα δημιουργήθηκαν στη συνέχεια για το κατά πόσο είχε γίνει σωστά η μέτρηση του πάχους του συγκεκριμένου σωλήνα κατά τη διαδικασία συντήρησης, δεδομένου ότι στη μελέτη επικινδυνότητας της εγκατάστασης αναφέρονταν ως πιθανά σημεία διαρροών εύφλεκτων ουσιών τα σημεία διάβρωσης των αγωγών μεταφοράς προϊόντων (ΕΛΙΝΥΑΕ 1999). Παράλληλα, είναι γεγονός ότι οι αντιδράσεις του προσωπικού των γραφείων των τεχνικών υπηρεσιών και η θέση των γραφείων συνέβαλαν στη διαμόρφωση του αριθμού των θυμάτων (εξαιτίας του βουητού εκροής και του κρότου διάρρηξης του σωλήνα, οι εργαζόμενοι στα γραφεία έτρεξαν από τους ορόφους προς την έξοδο του ισογείου, όπου μερικοί υπέστησαν εγκαύματα από το ωστικό κύμα των θερμών αερίων).

1.3.3.16.4 Έκρηξη βυτιοφόρου, Καμένα Βούρλα 1999

Στην Εθνική οδό στο ύψος των Καμένων Βούρλων, άνδρες της Τροχαίας σταμάτησαν βυτιοφόρο που μετέφερε προπάνιο υπό πίεση. Ο οδηγός είχε παραβιάσει τα περιοριστικά μέτρα κυκλοφορίας που ισχύουν για τα μεγάλα οχήματα τις ημέρες της εξόδου. Την ώρα που οι τροχονόμοι έκαναν έλεγχο στα χαρτιά του, ένα μικρό φορτηγό με μεγάλη ταχύτητα έπεσε πάνω στο βυτιοφόρο με αποτέλεσμα το δεύτερο να τυλιχτεί στις φλόγες. Μετά από λίγη ώρα έφτασε το πρώτο όχημα της Πυροσβεστικής που άρχισε τη ρίψη νερού, είχε όμως περάσει το κρίσιμο διάστημα για τη δημιουργία των συνθηκών που θα οδηγούσαν στην ισχυρή έκρηξη (φαινόμενο BLEVE).

Το αποτέλεσμα ήταν οι τρεις πυροσβέστες και το όχημά τους να τιναχθούν σε απόσταση 150 μέτρων με αποτέλεσμα το θάνατό τους (Γεωργιάδου 2010; Abbasi and Abbasi 2007). Ο οδηγός του βυτιοφόρου, αν και είχε απομακρυνθεί σε απόσταση τουλάχιστον 200 μέτρων, σκοτώθηκε από χτύπημα λαμαρίνας στο κεφάλι. Δεκατέσσερις ακόμη άνθρωποι τραυματίστηκαν από το ωστικό κύμα αλλά και από θραύσματα αυτοκινήτων (Γεωργιάδου 2001).

1.3.3.16.5 Πυρκαγιά στις εγκαταστάσεις της ΧΥΜΑ ΑΕ, Λαύριο 2006

Στις 26 Ιουλίου 2006, προκλήθηκε μεγάλη πυρκαγιά στην εταιρεία ΧΥΜΑ ΑΕ, εγκατάσταση αποθήκευσης και διακίνησης χημικών υλών στο Λαύριο (Σακκαλής 2007). Η πυρκαγιά διήρκεσε αρκετές ώρες.

Η εγκατάσταση συνορεύει ανατολικά με τη θάλασσα και ένα μέρος του νέφους της πυρκαγιάς κατευθύνθηκε προς τον κόλπο του Θορικού. Ζητήθηκε από τους κατοίκους να παραμείνουν στα σπίτια τους με κλειστές πόρτες και παράθυρα. Η Πυροσβεστική Υπηρεσία Λαυρίου εφάρμοσε το σχέδιο επέμβασης που είχε συντάξει για την εγκατάσταση της ΧΥΜΑ ΑΕ. Την Π.Υ. Λαυρίου συνέδραμαν Πυροσβεστικές Υπηρεσίες της Αττικής και άλλων πόλεων, καθώς επίσης και η 1^η Ειδική Μονάδα Αντιμετώπισης Καταστροφών (ΕΜΑΚ), με προσωπικό, Πυροσβεστικά οχήματα, εξοπλισμό, αφρό κ.λπ.. Δημόσιοι Φορείς και Υπηρεσίες καθώς και μεγάλες εταιρείες συνέβαλαν στην αντιμετώπιση του ατυχήματος.

Οι Πυροσβέστες έκαναν ψύξη των δεξαμενών με νερό και καταπολέμησαν την πυρκαγιά με χρήση αφρού. Χαρακτηριστικό της πυρκαγιάς ήταν η χρήση πυροσβεστικών αεροσκαφών, ελικοπτέρων και πυροσβεστικών πλοιαρίων για να ψύξουν τις φλεγόμενες δεξαμενές. Η Ελληνική Αστυνομία απέκλεισε τους δρόμους που οδηγούσαν στην εγκατάσταση. Δύο γειτονικές εγκαταστάσεις εκκενώθηκαν για προληπτικούς λόγους. Δεν αναφέρθηκαν θύματα. Περίπου 2.000 – 2.400 τόνοι χημικών κάηκαν, 36 από 45 δεξαμενές καταστράφηκαν εντελώς και 4 από 9 καταστράφηκαν εν μέρει. Η ΧΥΜΑ ΑΕ ήταν εγκατάσταση SEVESO II κάτω ορίου. Η Πυροσβεστική Υπηρεσία Λαυρίου συνέταξε Αναφορά Μεγάλου Βιομηχανικού Ατυχήματος. Το Υπουργείο ΠΕΧΩΔΕ ανέφερε το συμβάν ως Μεγάλο Ατύχημα στο Σύστημα Αναφοράς Μεγάλων Ατυχημάτων (MARS) της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

1.4 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

1.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την πρόληψη και αντιμετώπιση των ατυχημάτων μεγάλης έκτασης εφαρμόζονται μια σειρά κανονισμοί ανάλογα με το είδος των εγκαταστάσεων και των κινδύνων. Υπάρχουν διεθνείς κανονισμοί και ευρωπαϊκοί που έχουν υιοθετηθεί και σε συγκεκριμένους κανονισμούς ανά χώρα. Οι κανονισμοί αυτοί αφορούν σε θέματα όπως ενδεικτικά:

- εκτίμηση επικινδυνότητας, παρακολούθηση θεμάτων υγείας και ασφάλειας εργαζομένων και ασφάλειας της εγκατάστασης
- λήψη τεχνικών μέτρων πρόληψης (κατασκευαστικές προβλέψεις, συστήματα ασφαλείας κ.λπ.)
- ζητήματα σχεδιασμού χρήσεων γης
- διαδικασίες ασφάλειας (κανονική λειτουργία, προληπτική και έκτακτη συντήρηση)
- εκπαίδευση προσωπικού, μέσα ατομικής προστασίας
- οργάνωση εργασίας
- σχεδιασμός και αντιμετώπιση εκτάκτων καταστάσεων
- μέτρα αποκατάστασης μετά από ατύχημα, κ.ά.

Για «την πρόληψη των σοβαρών βιομηχανικών ατυχημάτων» έχει ψηφιστεί από το 1993 από τη Διεθνή Οργάνωση Εργασίας (ILO: International Labor Organization) η «174 Διεθνής Σύμβαση Εργασίας».

Για τις σταθερές εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες στις χώρες της Ε.Ε. ισχύει η οδηγία Seveso (Pey et al. 2009; Wettig et al. 1999; Wood 2009). Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης οδηγίας στα κράτη-μέλη της Ε.Ε. υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων (HSE 1999a; HSE 1999b; Mitchison and Papadakis 1999).

Αντίστοιχοι κανονισμοί για τις εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες εφαρμόζονται και σε χώρες εκτός Ε.Ε. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ εφαρμόζονται οι κανονισμοί OSHA 29 CFR Part 1910.119 “Process safety management of highly hazardous chemicals” (Musselman 1989; Walter 1998).

Για τα ατυχήματα με επικίνδυνες ουσίες που μπορεί να συμβούν κατά τη μεταφορά αυτών (π.χ. οδική μεταφορά, θαλάσσια, σιδηροδρομική, εναέρια μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, μεταφορά καυσίμων μέσω αγωγών) εφαρμόζονται διαφορετικοί κανονισμοί παρόλο που μια σειρά δράσεων κυρίως όσον αφορά στην αντιμετώπιση ατυχημάτων έχουν κοινά χαρακτηριστικά.

Ο ευρωπαϊκός κώδικας που διέπει τις οδικές μεταφορές είναι η «Ευρωπαϊκή Συμφωνία για τη Διεθνή Οδική Μεταφορά Επικινδύνων Εμπορευμάτων ADR» και οι αναθεωρήσεις της. Η συμφωνία είναι γνωστή με τη διεθνή ονομασία της, ADR, από τα αρχικά των

γαλλικών λέξεων «Accord Dangereux Routier». Από το 1999 η συμφωνία ισχύει και για τις εθνικές μεταφορές στην Ελλάδα. Για την αναθεώρηση της συμφωνίας, κάθε δύο χρόνια εξετάζονται οι εξελίξεις στην τεχνολογία της μεταφοράς επικινδύνων εμπορευμάτων (οχήματα, εξοπλισμός, επικίνδυνες ύλες και ουσίες, συσκευασία, προστασία περιβάλλοντος και εργαζομένων) και γίνονται οι ανάλογες τροποποιήσεις. Παρόμοια είναι και η συμφωνία RID για τις σιδηροδρομικές μεταφορές (ΕΛΙΝΥΑΕ 2007).

Όσον αφορά τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, ΔΟΑΕ) έχει εκδώσει μια σειρά κανονισμών για την πρόληψη ατυχημάτων και τις διαδικασίες αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, βλ. για παράδειγμα (ΙΑΕΑ 1996; ΙΑΕΑ 1997; ΙΑΕΑ 2002a; ΙΑΕΑ 2002b; ΙΑΕΑ 2008; Malcom 1996; Pauwels et al. 1999). Για την Ελλάδα αρμόδιος φορέας για θέματα ακτινοπροστασίας και πυρηνικής ασφάλειας είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Κύριο μέλημά της είναι η προστασία του πληθυσμού, των εργαζομένων και του περιβάλλοντος από τις ιοντίζουσες και τις τεχνητά παραγόμενες μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Δεδομένου ότι το είδος των ατυχημάτων και οι προβλέψεις για το σχεδιασμό αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων στις οποίες επικεντρώνει η διδακτορική διατριβή σχετίζονται με το πεδίο εφαρμογής της οδηγίας Seveso, για τις προβλέψεις της οδηγίας αυτής θα γίνει συνοπτική αναφορά στις παραγράφους που ακολουθούν.

1.4.2 ΟΔΗΓΙΑ SEVESO

1.4.2.1 Γενικά

Το 1982 ψηφίστηκε η ευρωπαϊκή οδηγία 82/501/Ε.Ο.Κ., γνωστή και ως *οδηγία Σεβέζο (Seveso)*, η οποία ονομάστηκε έτσι με αφορμή το ατύχημα στην ομώνυμη πόλη της Ιταλίας το 1976. Η οδηγία αυτή τροποποιήθηκε δυο φορές (οδηγίες 87/216/Ε.Ο.Κ. και 88/610/Ε.Ο.Κ.) και το 1996 αντικαταστάθηκε από την οδηγία 96/82/Ε.Κ. γνωστή και ως οδηγία Seveso II. Η Ελλάδα εναρμόνισε το εθνικό της δίκαιο με τις προαναφερόμενες οδηγίες με τις Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις (ΚΥΑ) 18187/272/1988, 77119/4607/1993 και 5697/590/2000.

Κατόπιν των βιομηχανικών ατυχημάτων που σημειώθηκαν στην Baia Mare της Ρουμανίας τον Ιανουάριο του 2000 (απόρριψη κυανίου στον Tisza), στην Enschede στην Ολλανδία το Μάιο του 2000 (έκρηξη σε αποθήκη πυροτεχνημάτων) και στην Toulouse της Γαλλίας το Σεπτέμβριο του 2001 (έκρηξη σε εργοστάσιο λιπασμάτων), το Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο εξέδωσαν την οδηγία 2003/105/ΕΚ που τροποποιεί την οδηγία «Seveso II» με στόχο, ιδίως:

- να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής της οδηγίας «Seveso II»
- να βελτιωθεί ο ορισμός των πυροτεχνικών προϊόντων και των εκρηκτικών προϊόντων

- να συμπεριληφθούν τα υλικά που απορρίπτονται κατά τη διαδικασία της παραγωγής ή επιστρέφονται στον κατασκευαστή (υλικά «off-specs» - εκτός προδιαγραφών) στις κατηγορίες του νιτρικού αμμωνίου και των λιπασμάτων με βάση το νιτρικό αμμώνιο που καλύπτονται από την οδηγία «Seveso II».

Η εναρμόνιση της χώρας μας με την οδηγία αυτή, έγινε με τις ΚΥΑ 12044/613 (ΦΕΚ 376/Β/19.3.2007 και ΦΕΚ 2259/Β/27.11.2007):

- *ΚΥΑ 12044/613 (ΦΕΚ 376/Β/19.3.2007): Καθορισμός μέτρων και όρων για την αντιμετώπιση κινδύνων από ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε εγκαταστάσεις ή μονάδες, λόγω της ύπαρξης επικίνδυνων ουσιών, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2003/105/ΕΚ «για τροποποίηση της οδηγίας 96/82/ΕΚ του Συμβουλίου για την αντιμετώπιση των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων σχετιζόμενων με επικίνδυνες ουσίες» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2003. Αντικατάσταση της υπ' αριθμ. 5697/590/2000 κοινής υπουργικής απόφασης (Β' 405/29.3.2000)*
- *ΚΥΑ 12044/613 (ΦΕΚ 2259/Β/27.11.2007): Διόρθωση σφαλμάτων στην υπ' αριθμ. 12044/613/19.3.2007 ΚΥΑ.*

Στη συνέχεια αναφέρονται βασικές προβλέψεις της νομοθεσίας, σύμφωνα με τις παραπάνω αποφάσεις. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ήδη έχει ξεκινήσει διαδικασία αναθεώρησης της οδηγίας Seveso. Η ανάγκη αναθεώρησης της οδηγίας οφείλεται κυρίως στην ανάγκη ευθυγράμμισης του Παρατήματος με τις επικίνδυνες ουσίες με τον κανονισμό CPL και λόγω της κατάργησης των οδηγιών 67/548/ΕΟΚ και 199/45/ΕΚ στις οποίες παραπέμπει η οδηγία Seveso II (Μουζάκης 2011).

1.4.2.2 Εγκαταστάσεις που υπάγονται στις προβλέψεις της νομοθεσίας

1.4.2.2.1 Γενικά

Η εφαρμογή της νομοθεσίας αφορά τόσο σε νέες όσο και σε υφιστάμενες βιομηχανικές δραστηριότητες που είναι δυνατό να περικλείουν κινδύνους ατυχημάτων μεγάλης έκτασης, με σημαντικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Εξαιρούνται ορισμένες εγκαταστάσεις ή δραστηριότητες, όπως π.χ. οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, η μεταφορά επικίνδυνων ουσιών μέσω αγωγών κ.ά.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στις προβλέψεις της συγκεκριμένης νομοθεσίας για τις εγκαταστάσεις που εμπίπτουν σε αυτή. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξαίρεση ορισμένων δραστηριοτήτων από τη συγκεκριμένη νομοθεσία δεν συνεπάγεται την απουσία κινδύνου πρόκλησης ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης. Η λήψη μέτρων πρόληψης των κινδύνων στην πηγή τους και η ετοιμότητα αντιμετώπισης μιας έκτακτης κατάστασης με την αξιοποίηση των κανονισμών ασφαλείας και της διεθνούς πρακτικής, είναι απαραίτητη για κάθε δραστηριότητα η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο ατύχημα.

Η οδηγία Seveso εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν επικίνδυνες ουσίες (υπό μορφή πρώτης ύλης, προϊόντων, παραπροϊόντων, καταλοίπων ή ενδιάμεσων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που αναμένεται να προκύψουν σε περίπτωση ατυχήματος), σε ποσότητες ίσες ή ανώτερες από ορισμένες οριακές τιμές που αναφέρονται στους σχετικούς πίνακες του Παραρτήματος.

Στον πρώτο πίνακα αναφέρονται συγκεκριμένες (κατονομαζόμενες) ουσίες, ενώ στο δεύτερο κατηγορίες ουσιών με βάση την ταξινόμηση των χημικών ουσιών σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. Και στους δύο πίνακες υπάρχουν δυο κατηγορίες οριακών ποσοτήτων (στήλες 2 και 3).

Ο «ασκών την εκμετάλλευση», στην περίπτωση που στην εγκατάσταση υπάρχουν επικίνδυνες ουσίες που αναφέρονται σε κάποιον από τους δύο πίνακες, υποχρεούται να υποβάλλει στην αδειοδοτούσα αρχή (οι Διευθύνσεις Ανάπτυξης των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων και οι αντίστοιχες κατά περίπτωση Υπηρεσίες του Υπουργείου Ανάπτυξης), μέσα σε συγκεκριμένες προθεσμίες την κοινοποίηση και ανάλογα με τις υπάρχουσες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών την πολιτική πρόληψης μεγάλων ατυχημάτων (υπέρβαση ορίων στήλης 2) ή τη μελέτη ασφάλειας (υπέρβαση ορίων στήλης 3). Ως «ασκών την εκμετάλλευση», ορίζεται κάθε φυσικό ή νομικό πρόσωπο που εκμεταλλεύεται ή κατέχει την εγκατάσταση ή τη μονάδα, ή, είναι κατά νόμο, υπεύθυνο για τη διαχείριση και λειτουργία της εγκατάστασης.

Η αδειοδοτούσα αρχή είναι δυνατόν να επιβάλλει τις κυρώσεις που προβλέπονται στη σχετική νομοθεσία για παραβίαση των όρων ή περιορισμών που τίθενται στις άδειες εγκατάστασης και λειτουργίας μιας εγκατάστασης, μονάδας, αποθήκης ή τμήματος τους, εάν ο «ασκών την εκμετάλλευση» δεν έχει υποβάλει εμπρόθεσμα την κοινοποίηση, τη μελέτη ασφαλείας ή άλλα στοιχεία και πληροφορίες που απαιτούνται.

Σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος, ο εργοδότης υποχρεούται στην παροχή πληροφοριών στην αδειοδοτούσα αρχή.

1.4.2.2.2 Εγκαταστάσεις που υπάγονται στην οδηγία στην Ελλάδα

Οι εγκαταστάσεις (βιομηχανίες και αποθηκευτικές μονάδες) που υπάγονται στην οδηγία Seveso έχουν επισημανθεί και χαρτογραφηθεί στην Ελληνική επικράτεια από την υπηρεσία του Εθνικού Δικτύου Πληροφοριών Περιβάλλοντος (ΕΔΠΠ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος. Σύμφωνα με στοιχεία της υπηρεσίας (Ιούλιος 2011) ο αριθμός των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που υπάγονται στην οδηγία (άνω ή κάτω όριο) ανέρχεται στις 198. Οι εγκαταστάσεις αυτές δραστηριοποιούνται κυρίως στην παραγωγή και αποθήκευση καυσίμων (βενζίνες, πετρέλαια, υγραέρια), καθώς και στην παραγωγή αγροχημικών προϊόντων (φυτοφάρμακα, λιπάσματα). Στο Παράρτημα περιλαμβάνεται χάρτης όπου φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των εγκαταστάσεων αυτών.

1.4.2.2.3 Κοινοποίηση

Η κοινοποίηση υποβάλλεται στην αδειοδοτούσα αρχή η οποία την αποστέλλει εντός ενός μήνα προς ενημέρωσή τους στα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος, Υγείας, Εργασίας, στη Γεν. Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, στην Τοπική πυροσβεστική Υπηρεσία και στο Γενικό Χημείο του Κράτους, καθώς και στο Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης (στην περίπτωση που οι επικίνδυνες ουσίες χαρακτηρίζονται ως φυτοπροστατευτικά προϊόντα).

Η κοινοποίηση περιέχει στοιχεία που αφορούν την εγκατάσταση, τη δραστηριότητα, τις επικίνδυνες ουσίες, το άμεσο περιβάλλον της εγκατάστασης και εκτίμηση της πιθανότητας πρόκλησης ατυχήματος μεγάλης έκτασης, λόγω της θέσης της εγκατάστασης και της εγγύτητάς της με άλλες επικίνδυνες εγκαταστάσεις (φαινόμενο ντόμινο).

1.4.2.2.4 Πολιτική πρόληψης μεγάλων ατυχημάτων

Η Πολιτική Πρόληψης Μεγάλων Ατυχημάτων (ΠΠΜΑ) θα πρέπει να περιλαμβάνει τους γενικούς στόχους και αρχές δράσης που καθορίζει ο «ασκών την εκμετάλλευση» για τον έλεγχο των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων. Η έκθεση αυτή υποβάλλεται μαζί με την κοινοποίηση ή κάποια τροποποίησή της και σε κάθε περίπτωση κάθε 5 χρόνια.

1.4.2.2.5 Μελέτη ασφάλειας

Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση υπέρβασης των ορίων της στήλης 3 (βλ. σχετικούς πίνακες του Παραρτήματος), η επιχείρηση θα πρέπει να υποβάλλει Μελέτη Ασφάλειας (ΜΑ) στην αδειοδοτούσα αρχή. Μέσω της ΜΑ θα πρέπει να καταδεικνύεται ότι:

- ✓ Εφαρμόζεται μια ΠΠΜΑ και ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας προς υλοποίησή της.
- ✓ Έχουν επισημανθεί οι κίνδυνοι μεγάλου ατυχήματος και έχουν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα για την πρόληψη και τον περιορισμό των συνεπειών τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- ✓ Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση των εγκαταστάσεων, των χώρων αποθήκευσης του εξοπλισμού και της υποδομής που συνδέονται με τη λειτουργία της, οι οποίες έχουν σχέση με τους κινδύνους μεγάλου ατυχήματος εντός της εγκατάστασης, παρέχουν επαρκή αξιοπιστία και ασφάλεια.
- ✓ Υπάρχουν εσωτερικά σχέδια έκτακτης ανάγκης και παρέχονται τα στοιχεία που επιτρέπουν την εκπόνηση του εξωτερικού σχεδίου, ώστε να λαμβάνονται αναγκαία μέτρα σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος.
- ✓ Έχει εξασφαλισθεί επαρκής πληροφόρηση των αρμοδίων αρχών, ώστε να μπορούν να αποφασίζουν για την εγκατάσταση των δραστηριοτήτων ή για διευθετήσεις γύρω από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις.
- ✓ Σε περίπτωση εγγύτητας της εγκατάστασης με άλλες επικίνδυνες εγκαταστάσεις (φαινόμενο ντόμινο) έχει συνεκτιμηθεί δεόντως η φύση και η έκταση ενός συνολικού κινδύνου ατυχήματος μεγάλης έκτασης.

Μετά την υποβολή της ΜΑ, ακολουθεί η διαδικασία αξιολόγησής της. Σε αυτήν εμπλέκονται τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος, Υγείας, Αγροτικής Ανάπτυξης (σε

περίπτωση εγκαταστάσεων στις οποίες υπάρχουν επικίνδυνες ουσίες που χαρακτηρίζονται ως φυτοπροστατευτικά προϊόντα ή/και λιπάσματα), η Τοπική Πυροσβεστική Υπηρεσία, το Υπουργείο Εργασίας, το Γενικό Χημείο του Κράτους και η Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας.

Η καταχώρηση της ΜΑ γίνεται από την αδειοδοτούσα αρχή με βάση τις απαιτούμενες γνωμοδοτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων και γνωστοποιείται εγγράφως στον «ασκούντα την εκμετάλλευση», με κοινοποίηση στις αρμόδιες αρχές.

Η καταχώρηση της ΜΑ δεν συνιστά έγκριση του περιεχομένου της, δεδομένου ότι τα στοιχεία της μελέτης αυτής τελούν υπό διαρκή έλεγχο, συμπλήρωση και βελτίωση. Η ΜΑ επανεξετάζεται περιοδικά και εν ανάγκη ενημερώνεται:

- ✓ τουλάχιστον κάθε πέντε (5) χρόνια
- ✓ οποτεδήποτε με πρωτοβουλία του «ασκούντος την εκμετάλλευση» ή μετά από αίτημα της αδειοδοτούσας αρχής, όταν το δικαιολογούν νέα δεδομένα, ή προκειμένου να ληφθούν υπόψη νέες τεχνικές γνώσεις σχετικά με την ασφάλεια, οι οποίες προέρχονται π.χ. από την ανάλυση ατυχημάτων ή κατά το δυνατό «παρ' ολίγον ατυχημάτων» και την εξέλιξη των γνώσεων σχετικά με την εκτίμηση κινδύνων
- ✓ σε περίπτωση μετατροπής (εγκατάστασης, μονάδας ή χώρου αποθήκευσης).

1.4.2.2.6 Σύστημα διαχείρισης ασφάλειας

Το διαχειριστικό σύστημα ασφάλειας θα πρέπει να ενσωματώνει το τμήμα του γενικού διαχειριστικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει την οργανωτική δομή, τις αρμοδιότητες, τις πρακτικές, τις διαδικασίες, τις διεργασίες και τους πόρους για τον καθορισμό και την εφαρμογή της ΠΠΜΑ.

Στα πλαίσια του διαχειριστικού συστήματος ασφάλειας θα πρέπει να θίγονται τα ακόλουθα θέματα:

- ✓ οργάνωση και προσωπικό (ρόλοι και αρμοδιότητες, εκπαιδευτικές ανάγκες, σύμπραξη εργαζομένων και ενδεχομένως των υπεργολάβων κ.λπ.)
- ✓ προσδιορισμός και αξιολόγηση κινδύνων μεγάλου ατυχήματος
- ✓ έλεγχος λειτουργίας (οδηγίες ασφαλούς λειτουργίας, συντήρηση, προσωρινές διακοπές λειτουργίας κ.λπ.)
- ✓ διαχείριση αλλαγών
- ✓ σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης
- ✓ παρακολούθηση επιδόσεων
- ✓ έλεγχος και επανεξέταση (θέσπιση και εφαρμογή διαδικασιών για αξιολόγηση της τήρησης των στόχων της ΠΠΜΑ).

1.4.2.2.7 Εσωτερικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης

Η αδειοδοτούσα αρχή πρέπει να μεριμνά, ώστε για όλες τις εγκαταστάσεις οι οποίες υποχρεούνται να υποβάλλουν ΜΑ:

- ✓ Ο ασκών την εκμετάλλευση, σε συνεργασία με το προσωπικό της εγκατάστασης, να καταρτίζει εσωτερικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης, το οποίο θα συνυποβάλλεται στην αδειοδοτούσα αρχή με τη ΜΑ και θα αναφέρεται στα μέτρα που λαμβάνονται μέσα στο χώρο της εγκατάστασης.
- ✓ Τα εσωτερικά σχέδια έκτακτης ανάγκης να επανεξετάζονται, να δοκιμάζονται και ενδεχομένως να αναθεωρούνται και να εκσυγχρονίζονται κάθε τρία (3) χρόνια και σε κάθε περίπτωση οποτεδήποτε συμβεί σημαντική αλλαγή στη λειτουργία της εγκατάστασης. Η επανεξέταση αυτή πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις μετατροπές στις σχετικές εγκαταστάσεις, τις οικείες υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τις νέες τεχνικές γνώσεις και τις γνώσεις όσον αφορά στην αντιμετώπιση μεγάλων ατυχημάτων.
- ✓ Τα εσωτερικά σχέδια έκτακτης ανάγκης να εφαρμόζονται χωρίς καθυστέρηση από τον «ασκούντα την εκμετάλλευση» και τις εμπλεκόμενες σε αυτά αρμόδιες αρχές, σε περίπτωση: μεγάλου ατυχήματος, ανεξέλεγκτου συμβάντος τέτοιου, ώστε ευλόγως να αναμένεται ότι θα καταλήξει σε μεγάλο ατύχημα.

Η Τοπική Πυροσβεστική Υπηρεσία πρέπει να μεριμνά για την πραγματοποίηση ασκήσεων ετοιμότητας σε συνεργασία με τον ασκούντα την εκμετάλλευση, για την εφαρμογή και εκπαίδευση στα εσωτερικά σχέδια έκτακτης ανάγκης.

1.4.2.2.8 Εξωτερικά σχέδια αντιμετώπισης τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης

Σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος είναι πιθανό οι επιπτώσεις να επεκταθούν και εκτός των ορίων μιας εγκατάστασης και να επηρεάσουν την ευρύτερη περιοχή. Για την προστασία του πληθυσμού (εργαζόμενοι άλλων επιχειρήσεων, κάτοικοι) είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης που να αφορά την ευρύτερη περιοχή και η ετοιμότητα για την εφαρμογή του.

Σύμφωνα με τη νομοθεσία, ο «ασκών την εκμετάλλευση» υποχρεούται να παρέχει στην Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης¹ τις αναγκαίες πληροφορίες, ώστε αυτή να διευκολυνθεί στην κατάρτιση του εξωτερικού Σχεδίου Αντιμετώπισης Τεχνολογικού Ατυχήματος Μεγάλης Έκτασης (ΣΑΤΑΜΕ).

¹ Μετά την αλλαγή του θεσμικού πλαισίου για την αυτοδιοίκηση (Καλλικράτης, αρ. 283, Ν. 3852/2010), οι

Η Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης, στο πλαίσιο εφαρμογής του Γενικού Σχεδίου Πολιτικής Προστασίας «ΞΕΝΟΚΡΑΤΗΣ», πρέπει να μεριμνά:

- ✓ Για την κατάρτιση εξωτερικού ΣΑΤΑΜΕ, σύμφωνα με την καταχωρημένη ΜΑ, συνεκτιμώντας και το ενδεχόμενο των πολλαπλασιαστικών φαινομένων (φαινόμενο ντόμινο). Το ΣΑΤΑΜΕ καταρτίζεται σε συνεργασία με τις Υπηρεσίες της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης και αν κρίνεται σκόπιμο και της Περιφέρειας, με άλλα κατά περίπτωση αρμόδια Υπουργεία, οργανισμούς και φορείς καθώς και με εκπρόσωπο της τοπικής Πυροσβεστικής Υπηρεσίας και αφού προηγηθεί διαβούλευση με το προσωπικό που εργάζεται μέσα στη μονάδα, συμπεριλαμβανομένου του σχετικού εργαζόμενου προσωπικού υπερβολαβίας. Για την κατάρτιση ή επικαιροποίηση του ΣΑΤΑΜΕ, η ως άνω Υπηρεσία πρέπει να το δημοσιοποιεί με κάθε πρόσφορο μέσο προκειμένου το κοινό (δηλ. ο πληθυσμός που κατοικεί στην περιοχή) να διατυπώσει τη γνώμη του.
- ✓ Για τη διενέργεια ασκήσεων ετοιμότητας σε συνεργασία με τον «ασκούντα την εκμετάλλευση» και τους συναρμόδιους φορείς, για την εφαρμογή και την εκπαίδευση στο εξωτερικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης.
- ✓ Για την εφαρμογή του σχεδίου έκτακτης ανάγκης χωρίς καθυστέρηση, από τον «ασκούντα την εκμετάλλευση» και τις εμπλεκόμενες σε αυτά αρμόδιες αρχές, σε περίπτωση: μεγάλου ατυχήματος ή ανεξέλεγκτου συμβάντος τέτοιου, ώστε ευλόγως να αναμένεται ότι θα καταλήξει σε μεγάλο ατύχημα.
- ✓ Για την υποβολή του εξωτερικού ΣΑΤΑΜΕ στη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας προς έγκριση, επανεξέταση, δοκιμή και ενδεχομένως αναθεώρηση και εκσυγχρονισμό κάθε τρία χρόνια και, σε κάθε περίπτωση, οποτεδήποτε συμβεί σημαντική αλλαγή στη λειτουργία της εγκατάστασης ή όπως ορίζουν οι σχετικές οδηγίες της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας. Η επανεξέταση αυτή λαμβάνει υπόψη τις μετατροπές στη σχετική εγκατάσταση, στις οικείες υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τις νέες τεχνικές γνώσεις και τις γνώσεις όσον αφορά στην αντιμετώπιση μεγάλων ατυχημάτων.

1.4.2.2.9 Επιθεωρήσεις – έλεγχοι

Η αδειοδοτούσα αρχή υποχρεούται να οργανώνει, σε συνεργασία με τις συναρμόδιες αρχές, σύστημα επιθεωρήσεων ή άλλων μέτρων ελέγχου ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης. Αυτές οι επιθεωρήσεις ή μέτρα ελέγχου δεν εξαρτώνται από την παραλαβή της ΜΑ ή άλλων υποβαλλόμενων στοιχείων και πρέπει να σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε να επιτρέπουν την οργανωμένη και συστηματική εξέταση των τεχνικών, οργανωτικών και διαχειριστικών συστημάτων της εγκατάστασης.

Η αδειοδοτούσα αρχή πρέπει να καταρτίζει πρόγραμμα επιθεωρήσεων που να προβλέπει τουλάχιστον μια επιτόπια επίσκεψη μια φορά το χρόνο για κάθε εγκατάσταση που πρέπει να υποβάλλει ΜΑ (εκτός και αν έχει καθορίσει πρόγραμμα επιθεωρήσεων κατόπιν συστηματικής εκτίμησης κινδύνου μεγάλου ατυχήματος στην εγκατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη την επικινδυνότητά της, πληροφορίες από προηγούμενους ελέγχους κ.λπ.).

Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα των επιθεωρήσεων σύμφωνα με τη νομοθεσία, πρέπει να κοινοποιούνται και στο προσωπικό της εγκατάστασης.

1.4.2.2.10 Πολλαπλασιαστικά αποτελέσματα (φαινόμενο ντόμινο)

Η αδειοδοτούσα αρχή, βασιζόμενη στις πληροφορίες που παρέχει ο «ασκών την εκμετάλλευση», πρέπει να καθορίζει τις εγκαταστάσεις ή ομάδες εγκαταστάσεων όπου η πιθανότητα και η δυνατότητα ή οι συνέπειες μεγάλου ατυχήματος μπορεί να αυξάνονται λόγω της θέσης και της εγγύτητάς τους, των ειδών και των ποσοτήτων επικίνδυνων ουσιών που διαθέτουν.

Η αδειοδοτούσα αρχή υποχρεούται να μεριμνά ώστε γι' αυτές τις εγκαταστάσεις να ανταλλάσσονται κατάλληλα σχετικές πληροφορίες που τους επιτρέπουν να συνεκτιμούν τη φύση και έκταση του συνολικού κινδύνου μεγάλου ατυχήματος. Σε συνεργασία με τις κατά περίπτωση αρμόδιες νομαρχιακές υπηρεσίες πρέπει να παρέχονται σχετικές πληροφορίες στις αρμόδιες αρχές κατά την εκπόνηση των εξωτερικών σχεδίων έκτακτης ανάγκης και να ενημερώνεται ο πληθυσμός που κατοικεί στην ευρύτερη περιοχή.

1.4.2.2.11 Σχεδιασμός χρήσεων γης

Οι αρμόδιες αρχές σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις για το χωροταξικό, περιβαλλοντικό και πολεοδομικό σχεδιασμό, πρέπει να μεριμνούν ώστε οι στόχοι της πρόληψης μεγάλων ατυχημάτων και του περιορισμού των συνεπειών τους να λαμβάνονται υπόψη κατά την κατάρτιση των σχεδίων χρήσεων γης, μέσα από τις κείμενες διαδικασίες σχεδιασμού του χώρου και κατά τη διαδικασία έγκρισης περιβαλλοντικών όρων σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις. Για την υλοποίηση των στόχων πρέπει να ελέγχεται η ίδρυση νέων εγκαταστάσεων, οι μετατροπές στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, τα νέα έργα και οι γενικότερες δραστηριότητες που λόγω της θέσης και της γειτνιάσής τους με αυτές ενδέχεται να αυξήσουν τον κίνδυνο μεγάλου ατυχήματος ή να επιδεινώσουν τις συνέπειές του.

Ειδικότερα, οι αρμόδιες για το σχεδιασμό του χώρου αρχές, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ανάγκη να διατηρούνται μακροπρόθεσμα οι κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ των μονάδων που υπάγονται στη σχετική νομοθεσία για τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης και των ζωνών κατοικίας, των κτηρίων και των ζωνών δημόσιας χρήσης, του κύριου οδικού δικτύου μεταφορών, στο μέτρο του δυνατού, των χώρων αναψυχής και των ζωνών που παρουσιάζουν ιδιαίτερο φυσικό ενδιαφέρον ή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες. Αντίστοιχα, στην περίπτωση υφιστάμενων μονάδων, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ανάγκη για συμπληρωματικά τεχνικά μέσα, ώστε να μην αυξάνονται οι κίνδυνοι για τον πληθυσμό.

1.4.2.2.12 Ενημέρωση και συμμετοχή των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής

Ιδιαίτερη σημασία έχει το ζήτημα της πληροφόρησης του πληθυσμού σε περιοχές όπου βρίσκονται εγκαταστάσεις που μπορεί να προκαλέσουν ατύχημα μεγάλης έκτασης. Η Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης και το Νομαρχιακό Συμβούλιο

έχουν υποχρέωση να πληροφορούν με συγκεκριμένες διαδικασίες τον πληθυσμό για την επικινδυνότητα των εγκαταστάσεων που λειτουργούν στην περιοχή, για τα κατάλληλα μέτρα ασφάλειας που έχουν ληφθεί και τη στάση που θα πρέπει να τηρείται σε περίπτωση ατυχήματος, για τη διενέργεια ασκήσεων ετοιμότητας του πληθυσμού, σε συνεργασία με την Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της Νομαρχιακής αυτοδιοίκησης και τον(τους) οικείο(ους) δήμο(ους) του(των) οποίου(ων) οι κάτοικοι είναι δυνατόν να προσβληθούν από ατύχημα μεγάλης έκτασης κ.λπ.

Επίσης, η αδειοδοτούσα αρχή πρέπει να μεριμνά ώστε το κοινό (δηλ. ο πληθυσμός στην ευρύτερη περιοχή) να μπορεί να δίνει τη γνώμη του στο σχεδιασμό για νέες εγκαταστάσεις που αναφέρονται που υποχρεούνται να εκπονήσουν ΜΑ, στη μετατροπή υφιστάμενων εγκαταστάσεων και στη διαρρύθμιση των χώρων γύρω από αυτές.

2

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια της *επικινδυνότητας* αποτελεί μια σύνθεση των εννοιών της ανεπιθύμητης συνέπειας και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την πραγματοποίηση αυτής (Παπάζογλου 1999a).

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι όροι κίνδυνος ή πηγή κινδύνου (hazard) και επικινδυνότητα (risk) συχνά χρησιμοποιούνται σαν συνώνυμοι. Σε νομοθετικό επίπεδο, στο αρθ.3 της οδηγίας Seveso II καθώς και στην ελληνική νομοθεσία, ορίζονται ως:

- ✓ «κίνδυνος (hazard)»: η εγγενής ιδιότητα μιας επικίνδυνης ουσίας ή φυσικής κατάστασης που ενδέχεται να βλάψει την ανθρώπινη υγεία ή/και το περιβάλλον
- ✓ «επικινδυνότητα (risk)»: η πιθανότητα μιας συγκεκριμένης επίπτωσης εντός δεδομένης χρονικής περιόδου ή υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Τα μεγάλα ατυχήματα σε χημικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής αλλά και σε διαστημικά προγράμματα έδειξαν ότι υπάρχει ανάγκη για έναν συστηματικό καθορισμό και στάθμιση των κινδύνων που συνεπάγεται η υιοθέτηση πολύπλοκων τεχνολογικών συστημάτων γενικότερα και η εγκατάσταση και λειτουργία βιομηχανικών εγκαταστάσεων ειδικότερα. Αποτέλεσμα της ανάγκης αυτής ήταν η ανάπτυξη μιας πληθώρας μεθοδολογιών που στοχεύουν στον προσδιορισμό των κύριων συνιστωσών του κινδύνου αυτού, στην ανάπτυξη δεικτών για την άμεση ή έμμεση μέτρηση και στη δημιουργία ενός πλαισίου για τη στήριξη αποφάσεων που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων αυτών (Παπάζογλου 1999b).

Η ανάλυση-εκτίμηση της επικινδυνότητας πρέπει γενικά να περιλαμβάνει (Ανεζίρη 1999a; Kirchsteiger et al. 1998; Παπάζογλου 1999a):

- ✓ την αναγνώριση των πηγών κινδύνου (hazard identification)
- ✓ την ανάπτυξη πιθανών σεναρίων ατυχημάτων (ακολουθίες ατυχημάτων)
- ✓ την εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία και ασφάλεια των ανθρώπων, στο περιβάλλον, καθώς και τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις από ένα ατύχημα μεγάλης έκτασης.

Για την αναγνώριση των πηγών κινδύνου υπάρχουν αρκετές τεχνικές όπως η Ανάλυση Κινδύνου & Λειτουργικότητας (HAZOP), η Μέθοδος Αστοχίας & Συνέπειας (FMEA), οι Λίστες Ελέγχου (Check -lists), οι δείκτες κινδύνου (risk indices) όπως οι δείκτες Dow and Mond, η τεχνική DYLAM (Dynamic Logical Analytical Methodology) κ.ά. Σε αυτή τη φάση της ανάλυσης, είναι χρήσιμη η μελέτη ατυχημάτων που έχουν συμβεί στο παρελθόν σε συναφείς εγκαταστάσεις από βάσεις δεδομένων και βιβλιογραφικές πηγές.

Η ανάπτυξη πιθανών σεναρίων ατυχημάτων (ακολουθίες ατυχημάτων) μπορεί να βασίζεται σε ιστορικά ατυχημάτων (π.χ. accident databases) ή/και σε συστηματική ανάλυση που στοχεύει στο να παρουσιάσει την εξάρτηση ενός ανεπιθύμητου γεγονότος από μικρότερα, πιο βασικά γεγονότα. Οι πιο γνωστές τεχνικές είναι: τα Δένδρα Σφαλμάτων (Fault Tree analysis), τα Δένδρα Γεγονότων (Event Tree analysis), η μέθοδος των Λογικών Διαγραμμάτων (Master logic diagrams), η μέθοδος ανάλυσης ανθρώπινου σφάλματος (Human error analysis) κ.ά.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον μοντελοποιούνται τα φυσικά φαινόμενα που ακολουθούν την έκλυση μιας επικίνδυνης ουσίας (εκροή, εξάτμιση, διασπορά, φωτιά, έκρηξη, επιπτώσεις στην υγεία από έκθεση σε τοξικές ουσίες, από θερμική ακτινοβολία και ωστικό κύμα). Αν και στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος μοντέλων, οι αβεβαιότητες και οι δυσκολίες που σχετίζονται με την εκτίμηση των επιπτώσεων είναι αρκετές και οφείλονται από τη μια στο ότι στηρίζονται σε πλήθος παραδοχών, καθώς δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν πλήρως τα φαινόμενα (π.χ. καιρικές συνθήκες) και από την άλλη, στην έλλειψη πληροφορίας για κάθε βήμα της ανάλυσης.

Μια βασική δυσκολία που αντιμετωπίζει ο αναλυτής είναι η ύπαρξη μιας ποικιλίας προσεγγίσεων και μεθοδολογιών όσον αφορά στην εκτίμηση της επικινδυνότητας (ποιοτική ή ποσοτική προσέγγιση, μεγάλος αριθμός μοντέλων εκτίμησης επιπτώσεων, ύπαρξη πολλών πηγών αβεβαιότητας κ.ά.) (Γεωργιάδου 2001). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διαφοροποίηση ως προς τη μεθοδολογία εκτίμησης στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Γεωργιάδου 2003).

Επιπλέον, για την εκτίμηση των επιπτώσεων στον άνθρωπο από τα φαινόμενα που ακολουθούν μετά από έκλυση επικίνδυνης ουσίας υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες που βασίζονται σε οριακές τιμές έκθεσης, ωστόσο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία των ανθρώπων πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τη διάρκεια της έκθεσης και όχι μόνο την ένταση του φαινομένου. Μια συνοπτική αναφορά σε οριακές τιμές έκθεσης γίνεται στην ενότητα 2.3.

Η πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας, είναι αυτή που στοχεύει στην ποσοτικοποίηση του επιπέδου κινδύνου που χαρακτηρίζει μια εγκατάσταση. Γενικά ο οποιοσδήποτε προσδιορισμός του κινδύνου πρέπει να προσδιορίζει τις δύο κύριες συνιστώσες του, δηλαδή τη συνέπεια (σοβαρότητα) και την αβεβαιότητα (πιθανότητα) (Παπάζογλου 1999a).

Η μεθοδολογία του *Ποσοτικού Καθορισμού Επικινδυνότητας (ΠΚΕ)* ή της *Ποσοτικής Εκτίμησης Επικινδυνότητας* (QRA: Quantitative Risk Assessment) αποτελεί μια συμπαγή και

σαφώς καθορισμένη τεχνική για ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας, σε αντίθεση με εναλλακτικές μεθόδους (π.χ. FMEA) που περιορίζονται στην ποιοτική εκτίμηση. Πιο αναλυτικά (Χρήστου 1993):

- ✓ αναλύει πλήρως το εξεταζόμενο σύστημα
- ✓ χρησιμοποιεί επαγωγικές διαδικασίες για καθορισμό των πιθανών πηγών κινδύνου και την εξέλιξη του ατυχήματος (εξασφαλίζεται έτσι η πληρότητα στον καθορισμό των αφορμών ατυχήματος)
- ✓ είναι ολοκληρωμένη τεχνική με την έννοια ότι δεν περιορίζεται σε κάποιες υποπεριπτώσεις ή στην εκτίμηση κάποιων μόνο συνεπειών, αλλά ξεκινά από τον καθορισμό των αφορμών ατυχήματος και καταλήγει στον τελικό προσδιορισμό της επικινδυνότητας
- ✓ λαμβάνει υπόψη της τη στοχαστική φύση του κινδύνου
- ✓ παρέχει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης ποσοτικοποίησης των αβεβαιοτήτων
- ✓ παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των πηγών κινδύνου με ποσοτικά κριτήρια.

Εξαιτίας όλων των παραπάνω, ο ΠΚΕ αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο για:

- ✓ εντοπισμό τυχόν σχεδιαστικών και λειτουργικών αδυναμιών
- ✓ αξιολόγηση σημαντικών συμβάντων
- ✓ παροχή πληροφοριών σχετικών με την ασφάλεια, χρήσιμων στους τομείς του τεχνικού σχεδιασμού και της ποιοτικής πιστοποίησης
- ✓ ορισμό προτεραιοτήτων και κατευθύνσεων της έρευνας σε θέματα ασφάλειας
- ✓ εκπαίδευση των χειριστών.

Στην ενότητα 2.2 που ακολουθεί γίνεται συνοπτική παρουσίαση των βασικών αρχών μιας τέτοιας μεθοδολογίας, όπως έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί από το Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων & Βιομηχανικής Ασφάλειας (ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ») (Ανεζίρη 1999b; Νιβολιανίτου 1999; Παπαζογλου et al. 1992; Παπάζογλου 1999a).

2.2 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

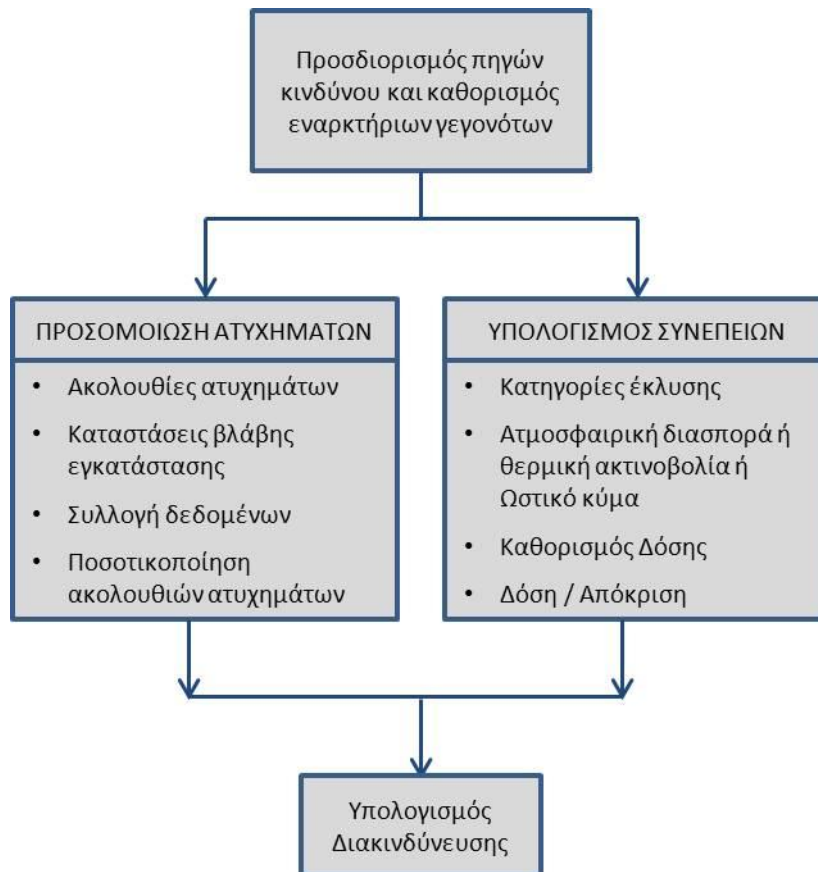
Η μεθοδολογία ποσοτικής εκτίμησης της επικινδυνότητας απαντά με συστηματικό τρόπο στα εξής ερωτήματα: Τι μπορεί να πάει στραβά; Πόσο συχνά αυτό μπορεί να συμβεί; Ποιες είναι οι συνέπειες; Πόσο πιθανές είναι αυτές οι συνέπειες;

Για βιομηχανίες που διαχειρίζονται τοξικές ή εύφλεκτες ουσίες διακρίνεται σε τέσσερις κύριες φάσεις :

- προσδιορισμός των πηγών κινδύνου και των δυνατών καταστάσεων βλάβης της εγκατάστασης
- υπολογισμός συχνότητας καταστάσεων βλάβης
- προσδιορισμός των συνεπειών των εκλύσεων τοξικών ή εύφλεκτων ουσιών

- υπολογισμός διακινδύνευσης.

Η αλληλουχία των φάσεων αυτών δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Ανεζίρη 1999α; Παπάζογλου 1999α). Ο προσδιορισμός των πηγών κινδύνου και των καταστάσεων βλάβης της εγκατάστασης προηγείται. Στη συνέχεια μπορεί κανείς να προχωρήσει είτε πρώτα στον προσδιορισμό των συχνοτήτων των καταστάσεων βλάβης και στη συνέχεια των συνεπειών τους, είτε αντίστροφα. Για τον προσδιορισμό, ωστόσο, των διαφόρων μέτρων επικινδυνότητας είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση και των δύο ενδιάμεσων φάσεων.



Σχήμα 2.2.1: Γενικές φάσεις εκτίμησης επικινδυνότητας σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.

2.2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΗΓΩΝ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΒΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.2.2.1 Προσδιορισμός Πηγών Κινδύνου

Η πρώτη κύρια φάση μιας ανάλυσης ασφάλειας της εγκατάστασης συνίσταται στον προσδιορισμό και καθορισμό όλων των πηγών κινδύνου, δηλαδή τα μέρη της εγκατάστασης που είναι επικίνδυνα, τις ουσίες που δύνανται να εκλυθούν, τα αρχικά γεγονότα (ή αφορμές) που είναι δυνατόν να προκαλέσουν ατυχήματα, την απόκριση της εγκατάστασης στα γεγονότα αυτά και τον προσδιορισμό των καταστάσεων βλάβης στις οποίες τα γεγονότα αυτά δύνανται να οδηγήσουν την εγκατάσταση.

Μία αναφορά ασφαλείας πρέπει απαραίτητα να περιέχει τα αποτελέσματα της φάσης αυτής, ανεξάρτητα από το αν έχει ή όχι γίνει ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας. Η φάση αυτή της ανάλυσης διακρίνεται στα ακόλουθα επί μέρους βήματα ή δράσεις.

2.2.2.1.1 Κατανόηση Λειτουργίας Εγκατάστασης και Συλλογή Πληροφοριών

Η δράση αυτή συνίσταται στη συγκέντρωση όλων των απαραίτητων πληροφοριών για την εγκατάσταση, καθώς και για τον περιβάλλοντα αυτήν χώρο, τις μετεωρολογικές συνθήκες κ.λπ., καθώς και την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας της.

Η κατανόηση της λειτουργίας της εγκατάστασης είναι ίσως το πλέον σημαντικό βήμα στην ανάλυση ασφάλειας. Επειδή δε η πλέον πλήρης γνώση της εγκατάστασης και της λειτουργίας της βρίσκεται στην ίδια την επιχείρηση και το προσωπικό της, θεωρείται σχεδόν αδύνατη μία σωστή και πλήρης ανάλυση ασφαλείας μιας εγκατάστασης χωρίς την ενεργό συμμετοχή του προσωπικού της (Μηχανικοί, χειριστές κ.λπ.).

2.2.2.1.2 Προσδιορισμός Σημείων Δυνατών Εκλύσεων

Στόχος της δράσης αυτής είναι ο προσδιορισμός όλων των τμημάτων της εγκατάστασης που αποτελούν κρίσιμες περιοχές από άποψη ασφάλειας. Κύριο χαρακτηριστικό της κρισιμότητας είναι συνήθως η ύπαρξη σημαντικών ποσοτήτων επικίνδυνων ουσιών (σύμφωνα με την Οδηγία Seveso), οι οποίες αν εκλυθούν στο περιβάλλον δύνανται να προκαλέσουν τις ανεπιθύμητες συνέπειες. Τονίζεται ότι ο προσδιορισμός αυτός στην αρχή είναι προκαταρκτικός και καθορίζει περιοχές για περαιτέρω λεπτομερή ανάλυση.

Στον καθορισμό των περιοχών αυτών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τρόπο περιληπτικό, προσεγγιστικό, αλλά οπωσδήποτε συντηρητικό, οι δυνατές συνέπειες της έκλυσης της προσδιοριζόμενης ουσίας. Στην εκτίμηση αυτή θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται πιθανές δευτερογενείς επιπτώσεις που είναι δυνατόν να δημιουργηθούν (π.χ. τοξικότητα, θερμική ακτινοβολία) και άρα οι ποσότητες που θα αποτελέσουν όριο για το χαρακτηρισμό ενός τμήματος της εγκατάστασης ως κρίσιμη περιοχή μπορεί να είναι διαφορετικός από τις ποσότητες που αναφέρονται στη νομοθεσία. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να εξεταστούν τμήματα και ουσίες που σε πιθανή έκτακτη κατάσταση μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες που δύνανται να προκαλέσουν την έκλυση ουσιών σε άλλα σημεία της εγκατάστασης.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για τον προσδιορισμό των κρίσιμων περιοχών εξαρτάται από την έκταση και το βαθμό πολυπλοκότητας της εγκατάστασης και το επίπεδο των συνεπαγόμενων κινδύνων.

2.2.2.1.3 Προσδιορισμός Φάσεων Λειτουργίας που ενδιαφέρουν

Η προσπάθεια προσδιορισμού των κρίσιμων περιοχών της εγκατάστασης πρέπει να περιλαμβάνει και όλες τις φάσεις λειτουργίας της εγκατάστασης. Αυτό γιατί μπορεί να δημιουργούνται επικίνδυνες καταστάσεις μόνο σε ορισμένες φάσεις της λειτουργίας οι

οποίες συνεπάγονται διαφορετικές ποσότητες επικίνδυνων ουσιών και διαφορετικές διαδικασίες και συνθήκες διαχείρισής τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι φάσεις φόρτωσης, αποθήκευσης και εκφόρτωσης επικίνδυνων ουσιών, καθώς και οι φάσεις εκκίνησης, κανονικής λειτουργίας και σταματήματος διαφόρων διεργασιών.

2.2.2.1.4 Καθορισμός Αφορμών Ατυχημάτων (Εναρκτήρια Γεγονότα)

Το βήμα αυτό αποσκοπεί στον προσδιορισμό όλων των γεγονότων που μπορούν να προκαλέσουν κάποια διαταραχή στη λειτουργία της εγκατάστασης, η οποία αν δεν ελεγχθεί από τις υπάρχουσες λειτουργίες και συστήματα ασφαλείας, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες με τελικό αποτέλεσμα την έκλυση της επικίνδυνης ουσίας στο περιβάλλον.

Τα εναρκτήρια γεγονότα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- ✓ Εσωτερικά Εναρκτήρια Γεγονότα (Εσωτερική Λειτουργία): Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της εγκατάστασης σαν αποτέλεσμα κάποιας βλάβης, αστοχίας εξαρτήματος ή ανθρώπινου σφάλματος.
- ✓ Εξωτερικά Εναρκτήρια Γεγονότα: Περιλαμβάνουν γεγονότα που προέρχονται από παράγοντες εξωτερικούς της εγκατάστασης όπως, άλλες γειτονικές εγκαταστάσεις, μεταφορές, φυσικά φαινόμενα κ.λπ.
- ✓ Θέματα Φυσικής Προστασίας: Περιλαμβάνουν θέματα εξωτερικών ανθρώπινων επεμβάσεων, δολιοφθοράς κ.λπ.

Οι μεθοδολογίες προσδιορισμού των εναρκτήριων γεγονότων μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

- ✓ Επισκόπηση Προηγούμενης Εμπειρίας: Η ιστορική γνώση για τη συμπεριφορά της εγκατάστασης στο παρελθόν, καθώς και της γενικής γνώσης που υπάρχει για παρόμοιες εγκαταστάσεις σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο, αποτελεί σημαντικότερη πηγή πληροφοριών σχετικά με τα δυνατά εναρκτήρια γεγονότα. Όπως όλες οι πλευρές που αφορούν στη λειτουργία της εγκατάστασης, η κύρια πηγή θα πρέπει να είναι η συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία της εγκατάστασης.
- ✓ Χρήση Συστηματικών Αναλυτικών Μεθόδων: Οι μέθοδοι αυτές ακολουθούν μία συστηματική ανάλυση της εγκατάστασης βασισμένες κυρίως στα ερωτήματα «Τι θα συμβεί αν» ή «Πώς είναι δυνατό να συμβεί το εξής» και καταλήγουν είτε επαγωγικά (π.χ. HAZOP) είτε απαγωγικά (π.χ. Master Logic Diagrams) σε ένα κατάλογο πιθανών εναρκτήριων γεγονότων.

2.2.2.1.5 Λειτουργίες Ασφάλειας

Η δράση αυτή αποσκοπεί στον προσδιορισμό όλων των μέτρων, λειτουργιών και πρακτικών που συνεπάγεται ο σχεδιασμός και η λειτουργία της εγκατάστασης και αποσκοπούν αφενός στην πρόληψη και αφετέρου στην καταστολή των εναρκτήριων γεγονότων, ώστε αυτά να μην οδηγήσουν σε κατάσταση βλάβης που συνεπάγεται έκλυση επικίνδυνης ουσίας. Οι λειτουργίες ασφαλείας περιλαμβάνουν μέτρα που αποσκοπούν:

- ✓ στην πρόληψη δημιουργίας κατάσταση βλάβης στην εγκατάσταση, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην έκλυση επικίνδυνων ουσιών
- ✓ στην καταστολή των δυνατών συνεπειών στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον αν εκλυθεί επικίνδυνη ουσία
- ✓ στην προστασία της δημόσιας υγείας, του περιβάλλοντος και των εγκαταστάσεων γενικότερα.

Οι λειτουργίες ασφαλείας εξαρτώνται από το είδος της εγκατάστασης και τη φύση της επικίνδυνης ουσίας και δεν μπορούν να προσδιοριστούν γενικά. Ενδεικτικά αναφέρονται μια σειρά από λειτουργίες ασφαλείας που εξυπηρετούν το γενικότερο σκοπό ασφάλειας «Αποφυγή απώλειας Περιβλήματος» (Loss of Containment):

- ✓ αποφυγή διάβρωσης περιβλήματος
- ✓ αποφυγή δημιουργίας εσωτερικής υπερπίεσης
- ✓ αποφυγή δημιουργίας υψηλών θερμοκρασιών
- ✓ αποφυγή δημιουργίας υποπίεσης
- ✓ αποφυγή ταλαντώσεων
- ✓ αποφυγή υπερβολικών εξωτερικών Φορτίσεων
- ✓ αποφυγή παράκαμψης περιβλήματος (μη ενδεδειγμένο άνοιγμα του περιβλήματος λόγω ανθρωπίνου σφάλματος).

2.2.2.1.6 Συστήματα Ασφαλείας

Κάθε μια από τις προσδιορισθείσες λειτουργίες ασφαλείας μπορεί να εξυπηρετείται από ένα ή περισσότερα συστήματα ασφαλείας ή διαδικασίες και πρακτικές. Τα συστήματα που εξυπηρετούν άμεσα τις λειτουργίες ασφάλειας (όπως π.χ. το σύστημα ψύξης ουσίας υγροποιημένης υπό ψύξη) καλούνται συστήματα ασφαλείας πρώτης γραμμής.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα συστήματα πρώτης γραμμής απαιτούν για τη σωστή λειτουργία τους την παροχή ορισμένων βασικών υπηρεσιών υποστήριξης, όπως π.χ. ηλεκτρική ενέργεια, πεπιεσμένο αέρα, λίπανση, κλιματισμό κ.λπ. Είναι πολύ σημαντικό μαζί με τα συστήματα πρώτης γραμμής να προσδιοριστούν και τα συστήματα παροχής όλων των βασικών λειτουργιών υποστήριξης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την επιτυχή λειτουργία των συστημάτων πρώτης γραμμής.

2.2.2.1.7 Λειτουργικές Απαιτήσεις Συστημάτων

Στο βήμα αυτό προσδιορίζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις των διαφόρων συστημάτων πρώτης γραμμής, καθώς και των συστημάτων υποστήριξης. Καθορίζονται δηλαδή τα κριτήρια επιτυχίας και κατά συνέπεια ο βαθμός εφεδρείας που χαρακτηρίζει τα διάφορα συστήματα.

Ο καθορισμός των απαιτήσεων αυτών πρέπει να γίνεται για κάθε εναρκτήριο γεγονός και λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία ή μη άλλων συστημάτων ασφαλείας. Για το λόγο αυτό ενδείκνυται η δημιουργία ενός καταλόγου των ιδιαιτέρων συνθηκών και απαιτήσεων που δημιουργεί η αστοχία κάθε συστήματος στα υπόλοιπα συστήματα ασφαλείας.

2.2.2.1.8 Ομαδοποίηση και Τελική Επιλογή Εναρκτήριων Γεγονότων

Η τελευταία δράση της φάσης Προσδιορισμού Πηγών Κινδύνου, περιλαμβάνει την ομαδοποίηση των εναρκτήριων γεγονότων σε ομάδες που απαιτούν και προκαλούν ταυτόσημη απόκριση από την εγκατάσταση. Ταυτόσημη απόκριση σημαίνει ότι για την αποφυγή του ατυχήματος στο οποίο μπορεί να καταλήξει ένα εναρκτήριο γεγονός απαιτούνται οι ίδιες λειτουργίες ασφαλείας, με τις ίδιες λειτουργικές απαιτήσεις για τα εμπλεκόμενα συστήματα.

2.2.2.2 Προσδιορισμός Ακολουθιών Ατυχημάτων

Στο βήμα αυτό καθορίζονται συγκεκριμένες ακολουθίες ατυχημάτων που αποτελούνται από ένα εναρκτήριο γεγονός, συγκεκριμένες επιτυχίες ή αστοχίες συστημάτων και τη χρονική αλληλουχία τους, καθώς και ανθρώπινες ενέργειες. Οι ακολουθίες ατυχημάτων καθορίζονται με τη βοήθεια μοντέλων όπως είναι τα Δένδρα Γεγονότων (Event Trees).

Μια ακολουθία ατυχήματος συνιστά μια αλληλουχία γεγονότων που καταλήγει σε μια κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης (βλ. παρακάτω), που με τη σειρά της συνεπάγεται έκλυση της επικίνδυνης ουσίας στο περιβάλλον. Οι αστοχίες των συστημάτων προσομοιάζονται, με τη βοήθεια συστηματικών προτύπων (π.χ. τα Δένδρα Σφαλμάτων - Fault Trees), σαν συνδυασμοί αστοχιών βασικών εξαρτημάτων και ανθρωπίνων σφαλμάτων. Η προσομοίωση αυτή επιτρέπει αφενός τον προσδιορισμό των βασικών αιτιών των αστοχιών των συστημάτων, καθώς και τον υπολογισμό της συχνότητας αστοχίας των συστημάτων και στη συνέχεια των ακολουθιών ατυχημάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των μεθόδων των Δένδρων Γεγονότων και Δένδρων Σφαλμάτων. Περισσότερες πληροφορίες για τις μεθόδους αυτές αλλά και γενικότερα για τις μεθόδους προσδιορισμού των ακολουθιών ατυχημάτων, υπάρχουν στη σχετική βιβλιογραφία.

2.2.2.2.1 Δένδρα Σφαλμάτων (Fault trees)

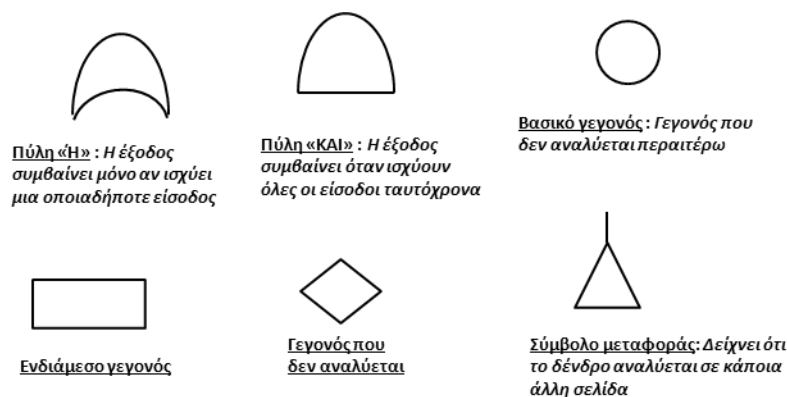
Τα Δένδρα Σφαλμάτων αποτελούν μια γραφική απεικόνιση των δυνατών τρόπων με τους οποίους μπορεί να συμβεί έναν «γεγονός κορυφής». Η τεχνική ακολουθεί επαγωγική λογική ξεκινώντας από το γεγονός κορυφής και αναλύοντας τις αιτίες που μπορούν να το προκαλέσουν. Οι αιτίες συνδέονται με το γεγονός κορυφής με λογικούς τελεστές από τους οποίους οι πιο σημαντικές πύλες είναι οι «Η΄» (OR) και «ΚΑΙ» (AND). Στην πύλη «ΚΑΙ» όλες οι εισόδους πρέπει να συμβούν για να συμβεί η έξοδος, ενώ στη λογική πύλη «Η΄» μόνο μια από τις εισόδους αρκεί για να συμβεί. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα δένδρα σφαλμάτων.

Χρησιμοποιώντας τις λογικές πύλες η μέθοδος αυτή αποσυνθέτει το γεγονός κορυφής σε όλο και πιο απλά γεγονότα, μέχρι να επιτευχθεί ένα επίπεδο γεγονότων για το οποίο υπάρχουν ποσοτικά δεδομένα. Το Δένδρο Σφαλμάτων είναι μια ποσοτική μέθοδος εκτίμησης κινδύνου, αλλά παρέχει και σημαντικές πληροφορίες ποιοτικού χαρακτήρα σε σχέση με τον τρόπο αστοχίας πολύπλοκου συστήματος.

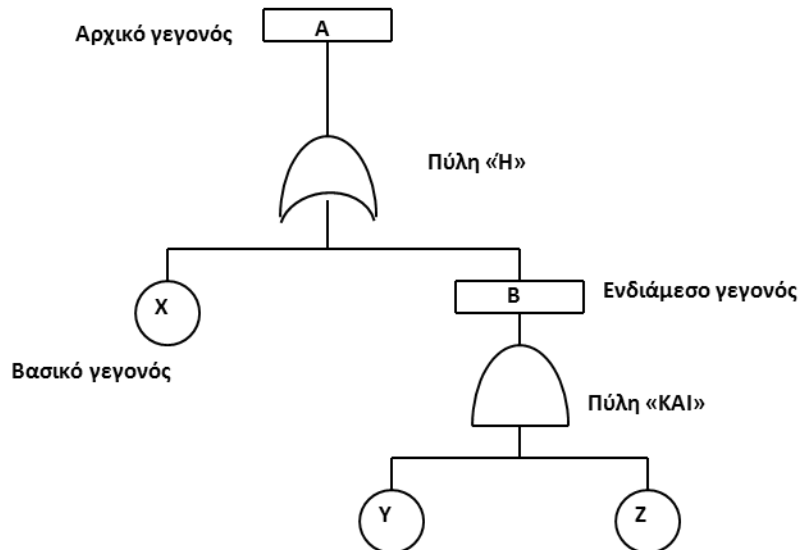
Η διαφορά ενός Κύριου Λογικού Διαγράμματος και ενός Δένδρου Σφαλμάτων είναι ότι στο δεύτερο όλοι οι συνδυασμοί των στοιχείων του Δένδρου καταλήγουν σε ένα και μοναδικό «γεγονός κορυφής» (δηλαδή όλες οι ομάδες τομής είναι ισοδύναμες όσον αφορά στις συνέπειες). Αντιθέτως, στο Κύριο Λογικό Διάγραμμα οι λογικοί συνδυασμοί είναι περισσότερο ποιοτικής φύσης και είναι ενδεχόμενο να μην οδηγούν στο ίδιο «γεγονός κορυφής» (για παράδειγμα «απώλειες περιβλήματος» διαφορετικής διάρκειας).

Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας είναι η κατασκευή του Δένδρου Σφαλμάτων η οποία βασίζεται στην επιλογή ενός ανεπιθύμητου γεγονότος που πρόκειται να αναλυθεί και στην ανίχνευση των αιτιών που μπορούν να το προκαλέσουν, μαζί με τη λογική τους συσχέτιση. Ο αναλυτής κάνει ερωτήσεις όπως «Πως μπορεί να συμβεί αυτό το γεγονός» ή «Ποιες είναι οι αιτίες αυτού του γεγονότος»; Η διαδικασία ξεκινά από το «γεγονός κορυφής» μέχρι να προσδιορισθούν οι αιτίες για τις οποίες υπάρχουν ποσοτικές πληροφορίες και δεν αναλύονται περαιτέρω. Αυτές οι αιτίες ονομάζονται «βασικά γεγονότα».

Η ποιοτική εξέταση της δομής ενός Δένδρου Σφαλμάτων δίνει σημαντικές πληροφορίες για τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας ενός συστήματος, τη λογική δομή του και μπορεί να φανερώσει τυχόν αδυναμίες στη φάση σχεδιασμού. Προσδιορίζονται όλοι οι ικανοί και αναγκαίοι συνδυασμοί που οδηγούν στο γεγονός κορυφής. Η διαδικασία που οδηγεί στον προσδιορισμό αυτών των συνδυασμών γεγονότων ονομάζεται Ανάλυση των Θεμελιωδών Ομάδων Διαχωρισμού (Minimal Cut Set Analysis). Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται οι συνδυασμοί με ένα, δύο, τρία και περισσότερα γεγονότα που οδηγούν στο γεγονός κορυφής (ο προσδιορισμός τους βασίζεται στην Άλγεβρα του Boole). Το επόμενο βήμα μετά τον εντοπισμό των Θεμελιωδών Ομάδων Διαχωρισμού είναι η ποσοτικοποίηση του γεγονότος κορυφής (πιθανότητα ανεπιθύμητου γεγονότος). Σε πολύπλοκα συστήματα με δεκάδες βασικά γεγονότα, για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται κώδικες σε Η/Υ.



Σχήμα 2.2.2: Βασικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα Δένδρα Σφαλμάτων.



Σχήμα 2.2.3: Τυπικό παράδειγμα Δένδρου Σφαλμάτων.

2.2.2.2.2 Δένδρα Γεγονότων (Event Trees)

Η ανάλυση με τη Μέθοδο του Δένδρου Γεγονότων καθορίζει την απόκριση της εγκατάστασης σε κάθε εναρκτήριο γεγονός. Το δέντρο αποτελείται από κόμβους και κλάδους και έχει τόσους κόμβους όσα τα συστήματα που συμμετέχουν στην απόκριση της εγκατάστασης στη συγκεκριμένη φάση. Κάθε κόμβος διακλαδίζεται σε τόσους κλάδους όσες και οι δυνατές καταστάσεις του συστήματος που αντιστοιχούν στον κόμβο. Έτσι δημιουργούνται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί καταστάσεων των συστημάτων σαν μονοπάτια (paths) ή κλάδους (branches) του δέντρου. Μετά την ανάπτυξη του δένδρου καθορίζεται για κάθε «μονοπάτι» αν το εναρκτήριο γεγονός συνδυασμένο με τη συγκεκριμένη ακολουθία καταστάσεων των συστημάτων οδηγεί σε επιτυχή απόκριση της εγκατάστασης ή σε ατύχημα. Τα «μονοπάτια» που οδηγούν σε ατύχημα ονομάζονται «ακολουθίες γεγονότων».

Η πιθανότητα ενός κλάδου του δένδρου γεγονότων, υπολογίζεται από τη συχνότητα του εναρκτήριου γεγονότος, καθώς και από τις επιμέρους πιθανότητες των καταστάσεων των συστημάτων που συμμετέχουν στην ακολουθία.

2.2.2.3 Ορισμός Καταστάσεων Βλάβης της Εγκατάστασης

Μια κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης μονοσήμαντα καθορίζει όλες τις παραμέτρους που προσδιορίζουν τις συνθήκες έκλυσης της επικίνδυνης ουσίας και εξαρτώνται από την εγκατάσταση (π.χ. ρήξη δεξαμενής ορισμένης διαμέτρου στην οποία αποθηκεύεται εύφλεκτη ουσία).

Ακολουθίες ατυχημάτων που καταλήγουν ή δημιουργούν τις ίδιες συνθήκες έκλυσης επικίνδυνης ουσίας ομαδοποιούνται σε ομάδες, καθεμιά από τις οποίες συνιστά και μια κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης.

2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΒΛΑΒΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.2.3.1 Συλλογή Δεδομένων & Προσδιορισμός Παραμέτρων

Η ποσοτικοποίηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα βήματα, απαιτεί τον προσδιορισμό των τιμών των διαφόρων παραμέτρων της. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τις συχνότητες των αρχικών γεγονότων, τις πιθανότητες μη - διαθεσιμότητας διαφόρων εξαρτημάτων και τις πιθανότητες διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών. Εάν υπάρχουν επαρκή δεδομένα από τη λειτουργία της εγκατάστασης (επαρκής χρόνος λειτουργίας και απαραίτητες πληροφορίες), τότε είναι δυνατόν να γίνει ειδική για την εγκατάσταση εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιούνται γενικές τιμές που αντιπροσωπεύουν τη γενικότερη (συνήθως παγκόσμια) εμπειρία από τη λειτουργία ομοειδών εγκαταστάσεων, συστημάτων, εξαρτημάτων.

2.2.3.2 Ποσοτικοποίηση των Ακολουθιών Ατυχημάτων και των καταστάσεων Βλάβης της Εγκατάστασης

Στο βήμα αυτό υπολογίζονται οι συχνότητες με τις οποίες αναμένονται οι διάφορες ακολουθίες ατυχημάτων που έχουν εκτιμηθεί. Για τον υπολογισμό της συχνότητας των ακολουθιών ατυχημάτων χρησιμοποιούνται οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω (συχνότητα εναρκτηρίων γεγονότων κ.λπ.). Οι ακολουθίες ατυχημάτων που πρόκειται να ποσοτικοποιηθούν επιλέγονται και υφίστανται κάποια μαθηματική επεξεργασία σύμφωνα με τους κανόνες της Άλγεβρας Boole για να πάρουν μια μορφή κατάλληλη για ποσοτικοποίηση. Μετά τον προσδιορισμό των καταστάσεων βλάβης της εγκατάστασης καθώς και της συχνότητάς τους, μπορεί κανείς να προχωρήσει στον καθορισμό των συνεπειών κάθε κατάστασης βλάβης (βλ. παρακάτω).

2.2.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΕΚΛΥΣΕΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Στη φάση αυτή υπολογίζονται οι επιπτώσεις από την έκλυση επικίνδυνης ουσίας. Τα διαδικαστικά βήματα για τις εύφλεκες και τις τοξικές ουσίες αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια.

2.2.4.1 Προσδιορισμός κατηγοριών έκλυσης για τοξικές ή εύφλεκες ουσίες

2.2.4.1.1 Τοξικές ουσίες

Μια κατηγορία έκλυσης τοξικής ουσίας συνίσταται στον προσδιορισμό όλων των φυσικών συνθηκών, φαινομένων και παραμέτρων για το μονοσήμαντο καθορισμό της συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας σε κάθε σημείο του χώρου γύρω από την εγκατάσταση.

Για τοξικές ουσίες που διασπείρονται στην ατμόσφαιρα, μια κατηγορία έκλυσης είναι ορισμένη όταν όλες οι συνθήκες που προσδιορίζουν την ατμοσφαιρική διασπορά είναι ορισμένες (ρυθμός εκροής, ρυθμός εξάτμισης εάν η ουσία εκλύεται σε υγρή μορφή, θερμοκρασία, ατμοσφαιρικές συνθήκες κ.λπ.).

2.2.4.1.2 Εύφλεκτες ουσίες

Μια κατηγορία έκλυσης εύφλεκτης ουσίας καθορίζει όλες τις αναγκαίες φυσικές συνθήκες, φαινόμενα και παραμέτρους για το μονοσήμαντο προσδιορισμό του επιπέδου της θερμικής ροής ή της υπερπίεσης που θα προκληθεί από την ανάφλεξη της εύφλεκτης ουσίας σε κάθε σημείο του χώρου γύρω απ' το σημείο διαφυγής, για κάθε χρονική στιγμή. Στην περίπτωση διασποράς πριν από την ανάφλεξη η κατηγορία έκλυσης περιλαμβάνει και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

2.2.4.1.3 Υπολογισμός ρυθμού εκροής

Όπως αναφέρθηκε, η κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης προσδιορίζει το είδος της εγκατάστασης, το σημείο και το είδος της αστοχίας, τον τύπο της επικίνδυνης ουσίας, τις συνθήκες αποθήκευσης και διαχείρισής της κ.λπ. Στις εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες (τοξικές, εύφλεκτες) συνήθως οι καταστάσεις βλάβης αφορούν σε ένα ρήγμα του περιβλήματος που περιέχει την ουσία (ο όρος «περίβλημα» αναφέρεται σε ένα σύστημα περιορισμού της ουσίας, π.χ. τοιχώματα δοχείων και σωληνώσεων).

Υπάρχουν τρία τυπικά τμήματα εγκατάστασης όπου δημιουργούνται ρήγματα: Δοχείο, Σωλήνας συνδεδεμένος με δοχείο, Σωλήνας συνδεδεμένος με αντλία. Μια εγκατάσταση μπορεί να περιέχει ουσία σαν υγρό, αέριο υπό πίεση, αέριο υγροποιημένο με πίεση, αέριο υγροποιημένο με ψύξη. Ο συνδυασμός του τμήματος της εγκατάστασης στο οποίο δημιουργείται ρήγμα με τη μορφή της ουσίας που περιέχει, δίνει μια πρώτη κατάταξη γενικών καταστάσεων βλάβης (π.χ. αστοχία σωλήνωσης συνδεδεμένης με δοχείο που περιέχει υγρό).

Με βάση την κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης που έχει προσδιορισθεί επιλέγεται κατάλληλο μοντέλο για τον υπολογισμό του ρυθμού εκροής (outflow) της επικίνδυνης ουσίας (π.χ. μοντέλο εκροής υγρού από σωλήνωση συνδεδεμένη με δοχείο). Η χρονική συμπεριφορά της έκλυσης καθορίζεται από το μέγεθος του ρήγματος και διακρίνεται σε συνεχή ή στιγμιαία. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα στη βιβλιογραφία τα οποία υπολογίζουν το ρυθμό εκροής της ουσίας (βλ. π.χ. (TNO 1997)).

Ενδεικτικά αναφέρουμε ένα τυπικό παράδειγμα μοντέλου εκροής, για εκροή υγρού από δοχείο που βασίζεται στην εξίσωση Bernoulli. Ο ρυθμός εκροής θα δίνεται από την εξίσωση:

$$m_L = C_d \cdot A \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p - p_a}{d} + 2 \cdot g \cdot H} \quad (2.1)$$

όπου

- m_L : ρυθμός εκροής υγρού (kg/s)
- C_d : συντελεστής εκροής (εξαρτάται από το είδος της οπής)
- A : επιφάνεια οπής (m²)
- d : πυκνότητα υγρού
- p : πίεση στη δεξαμενή (Pa)
- p_a : ατμοσφαιρική πίεση (Pa)
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)
- H : το ύψος του υγρού πάνω από την οπή (m).

2.2.4.1.4 Υπολογισμός ρυθμού εξάτμισης

Στην περίπτωση που η ουσία που εκλύεται είναι υγρή ή υγροποιημένη, επιλέγεται και εφαρμόζεται ένα κατάλληλο μοντέλο εξάτμισης (evaporation) για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του σχηματιζόμενου νέφους. Στη βιβλιογραφία μπορεί να βρει κανείς διάφορα είδη μοντέλων εξάτμισης τα οποία κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο της ουσίας. Έτσι τα μοντέλα μπορεί να υπολογίζουν:

- ✓ εξάτμιση πτητικών υγρών σε μια περιορισμένη σταθερών ή αυξανόμενων διαστάσεων λίμνη, επί διαφόρων ειδών εδαφών (ξηρό, υγρό, χαλίκι, μη-διαπερατό)
- ✓ στιγμιαία εξάτμιση για υγροποιημένα αέρια υπό πίεση που είναι αποτέλεσμα αδιαβατικής εκτόνωσης
- ✓ εξάτμιση μη-πτητικών υγρών που είναι αποτέλεσμα διάχυσης των ατμών.

2.2.4.2 Προσδιορισμός συνεπειών έκλυσης τοξικών ή εύφλεκτων ουσιών

Η έκλυση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα μπορεί να έχει συνέπειες που οφείλονται στη δυνατότητα εισπνοής τους απ' τον άνθρωπο. Αντίστοιχα, η χρήση εύφλεκτων ουσιών μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα με συνέπειες για τον άνθρωπο και τις εγκαταστάσεις λόγω έκλυσης τοξικών προϊόντων της καύσης και ειδικότερα λόγω της θερμικής ακτινοβολίας και του ωστικού κύματος σε περίπτωση πυρκαγιών ή/και εκρήξεων.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα που υπολογίζουν την ατμοσφαιρική διασπορά, τη θερμική ροή για διάφορες περιπτώσεις μετά την έκλυση εύφλεκτης ουσίας, ή την υπερπίεση στην περίπτωση που η έκλυση αυτή οδηγήσει σε έκρηξη. Παρακάτω γίνεται μια ενδεικτική αναφορά των περιπτώσεων που συναντώνται συνήθως και παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι έχει αναπτυχθεί πληθώρα μοντέλων προσδιορισμού της έντασης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε περίπτωση ατυχήματος μεγάλης έκτασης για τα οποία υπάρχει αναφορά στη βιβλιογραφία. Ορισμένα από αυτά είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο.

2.2.4.2.1 Διασπορά επικίνδυνης ουσίας (τοξικής ή/και εύφλεκτης)

Στην περίπτωση που το ατύχημα που εξετάζεται συνδέεται με έκλυση τοξικής ουσίας, για την εκτίμηση των επιπτώσεων πρέπει να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ουσίας για κάθε χρονική στιγμή σε κάθε σημείο του χώρου, που προκύπτει από τη συνολική έκλυση της ουσίας και τη διασπορά (dispersion) της στο περιβάλλον.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός μοντέλων διασποράς για τα οποία υπάρχουν πληροφορίες στη βιβλιογραφία και τα οποία διαφοροποιούνται με βάση την πολυπλοκότητα και το κόστος χρήσης τους. Υπάρχουν απλά μοντέλα ατμοσφαιρικής διάχυσης σε επίπεδο έδαφος, καθώς και πολύπλοκα μοντέλα ρευστομηχανικής που λαμβάνουν υπόψη απλές, σύνθετες μέχρι πολύπλοκες γεωμετρίες του εδάφους πάνω από το οποίο γίνεται η διασπορά. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες της εγκατάστασης που αναλύεται, καθώς και την επιθυμητή ακρίβεια των υπολογισμών.

Τα είδη των υπαρχόντων μοντέλων διασποράς διαφοροποιούνται με βάση τη θεώρηση επίπεδης ή πολύπλοκης γεωμετρίας εδάφους, καθώς και με βάση τον τύπο της ουσίας (εάν θα συμπεριφερθεί σαν αέριο βαρύτερο ή ελαφρύτερο του αέρα). Τα περισσότερα από τα μοντέλα διασποράς αερίων ελαφρύτερων του αέρα (ουδέτερης ή θετικής άνωσης), είναι βασισμένα στο μοντέλο διάχυσης κατά Gauss. Αέρια βαρύτερα του αέρα (αρνητικής άνωσης) μπορεί να προκύψουν στις ακόλουθες καταστάσεις αποθήκευσης αερίων: αέριο υγροποιημένο υπό πίεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αέριο υγροποιημένο υπό ψύξη, βαρύτερο αέριο σε δεξαμενή υπό πίεση.

Η προσομοίωση της διασποράς αερίων αρνητικής άνωσης παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες από τα αέρια ουδέτερης ή θετικής άνωσης. Τα φυσικά φαινόμενα είναι περισσότερο πολύπλοκα και η επίλυση των μοντέλων απαιτεί αριθμητικές μεθόδους και χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Box models, 3D models). Για την επίλυση προβλημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία εδάφους, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκα μοντέλα και υπολογιστικοί κώδικες.

Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου για την ποσοτικοποίηση του μοντέλου διασποράς περιλαμβάνουν:

- ✓ το ρυθμό εισόδου του αερίου στο πρότυπο διασποράς (συνεχής έκλυση) ή τη συνολική μάζα του αερίου (στιγμιαία έκλυση)
- ✓ φυσικές σταθερές, θερμοκρασία του αερίου, καθώς και άλλες τυχόν παραμέτρους που απαιτεί το μοντέλο
- ✓ μετεωρολογικές συνθήκες (ατμοσφαιρική θερμοκρασία, ατμοσφαιρική σταθερότητα, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου)
- ✓ τοπογραφία της περιοχής.

Ένα από τα πιο απλά μοντέλα διασποράς που χρησιμοποιούνται είναι το μοντέλο όπου η βασική παραδοχή στο μοντέλο είναι ότι συμβαίνει διάχυση κατά Gauss και στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα, το οποίο εφαρμόζεται για την περίπτωση αερίων ελαφρύτερων του αέρα. Για συνεχή έκλυση η συγκέντρωση σε ένα σημείο (x, y, z) γύρω από την πηγή έκλυσης, θα δίνεται από την εξίσωση:

$$c(x, y, z) = \frac{m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \left[\exp \left(-\frac{z-H}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{z+H}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (2.2)$$

όπου

x, y, z : απόσταση από την πηγή

$c(x, y, z)$: συγκέντρωση της ουσίας στο σημείο (x, y, z) (kg/m^3)

m : ρυθμός διαφυγής (kg/s)

u : ταχύτητα του ανέμου (m/s)

H : ύψος της πηγής από το έδαφος (m)

σ_y, σ_z : συντελεστές διασποράς (m), που εξαρτώνται από την απόσταση από την πηγή, την ατμοσφαιρική ευστάθεια και την τραχύτητα του εδάφους.

Για στιγμιαία έκλυση, η συγκέντρωση σε ένα σημείο του χώρου (x, y, z) γύρω από την πηγή έκλυσης και του χρόνου t , θα δίνεται από την εξίσωση:

$$c(x, y, z) = \frac{M}{2\pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left\{ -\frac{x-ut}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right\} \right] \left[\exp \left(-\frac{z-H}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{z+H}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (2.3)$$

όπου

M : ποσότητα της ουσίας που διέφυγε (kg)

t : χρόνος (s).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ορισμένες τοξικές ουσίες (π.χ. αμμωνία) ή εύφλεκτες (π.χ. υγραέριο, αν αυτό αν δεν αναφλεγεί αμέσως), όταν διαφεύγουν από το δοχείο που τις περικλείει συμπεριφέρονται ως προς την ατμοσφαιρική διασπορά τους σαν νέφος βαρύτερο του αέρα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση διακρίνει δύο φάσεις: τη φάση καθίζησης λόγω βαρύτητας, και τη φάση παθητικής διασποράς.

Στην πρώτη φάση η συγκέντρωση της τοξικής/εύφλεκτης ουσίας σε κάθε σημείο γύρω από την εστία διαφυγής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$c = \frac{\dot{m}_g}{2WHU} \quad (2.4)$$

όπου:

W : το ημιπλάτος του νέφους

H : το ύψος του κατά μήκος του κεντρικού άξονα

U : η ταχύτητα του ανέμου.

Για τον προσδιορισμό του σημείου μετάβασης από τη φάση καθίζησης σε αυτή της παθητικής διασποράς χρησιμοποιείται μια σχέση που πρότεινε ο Jagger (Νιβολιανίτου 1999):

$$\frac{dW}{dt} \leq 2.14 \frac{d\sigma_y}{dt} \quad (2.5)$$

ή

$$\rho g_a - \rho_a < 0.001 \text{Kg} / \text{m}^3 \quad (2.6)$$

Ειδικά για τη διασπορά αερίου νέφους υδροφθορίου HF έχουν αναπτυχθεί ειδικοί κώδικες οι οποίοι είναι σε θέση να λαμβάνουν υπόψη την ιδιαίτερη συμπεριφορά του. Συγκεκριμένα, το αέριο HF που διαφεύγει, διασπείρεται στην ατμόσφαιρα ακολουθώντας τους νόμους των βαρύτερων του αέρα αερίων (βλ. παραπάνω), μαζί με την επιπρόσθετη ιδιομορφία του να πολυμερίζεται και να συμπλοκοποιείται με την υγρασία του αέρα. Για τη φάση της παθητικής διασποράς χρησιμοποιούνται οι σχέσεις του Gauss, οι οποίες ισχύουν και για τη διασπορά νεφών ελαφρύτερων του αέρα.

Στην περίπτωση του υγραερίου, το αέριο νέφος που δημιουργείται καθώς διαχέεται στην ατμόσφαιρα μπορεί να συναντήσει μια πηγή ανάφλεξης οπότε μπορεί να συμβεί έκρηξη του αερίου ή ταχύτατη καύση (βλ. στη συνέχεια).

2.2.4.2.2 Έκρηξη αερίου νέφους

Η έκρηξη αερίου νέφους σε ελεύθερο χώρο (Unconfined Vapour Cloud Explosion, UVCE) είναι ένας από τους σοβαρότερους κινδύνους για τις βιομηχανίες επεξεργασίας και παραγωγής επικίνδυνων ουσιών. Το πρόβλημα με τις εκρήξεις του παραπάνω τύπου είναι όχι μόνο οι καταστρεπτικές επιπτώσεις τους, αλλά επίσης το γεγονός ότι η ανάφλεξη

μπορεί να συμβεί σε κάποια απόσταση από την πηγή έκλυσης, με αποτέλεσμα να απειλήσει αρκετά εκτενέστερη περιοχή. Οι επιπτώσεις από μια τέτοια έκρηξη μπορεί να είναι ποικίλων μορφών: σπάσιμο τζαμιών, καταστροφή κτηρίων, βλάβη σε ανθρώπους (π.χ. σπάσιμο τυμπάνων αυτιών, πνευμονική αιμορραγία κ.ά.). Στη συνέχεια μας εξετάζεται η θανατηφόρος βλάβη σε ανθρώπους.

Οι σχέσεις που στη διεθνή βιβλιογραφία περιγράφουν το φαινόμενο της έκρηξης είναι οι παρακάτω (Νιβολιανίτου 1999; TNO 1997):

$$L_o = \left[\frac{840m \ z + 1}{MB} \right]^{0.333} \quad (2.7)$$

$$\Delta P = \frac{-\varphi L_o}{x} \quad (2.8)$$

$$T = \left(0.456 \frac{333 - UF}{UF} + \frac{3}{7} \varphi \ln A \ L_o C_o^{-1} \right) \quad (2.9)$$

$$A = \frac{1 + 7x / 3\varphi x_o}{1 + 1.064 / \varphi} \quad (2.10)$$

όπου

- L_o : μήκος της έκρηξης
- ΔP : υπερπίεση
- T : διάρκεια έκρηξης
- MB : μοριακό βάρος της ουσίας
- m : η μάζα της ουσίας που συμμετέχει στην καύση
- z : η απαιτούμενη αναλογία αέρα για καύση
- φ : συντελεστής αντιδραστικότητας
- UF : ταχύτητα καύσης (m/s)
- c_o : η ταχύτητα του ήχου (333 m/s)
- x : η απόσταση από το «κέντρο βάρους» του νέφους.

Το τμήμα του αερίου νέφους που συμμετέχει στο παραπάνω φαινόμενο, είναι αυτό για το οποίο η πυκνότητα του αερίου βρίσκεται μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας (UFL, LFL).

2.2.4.2.3 Ταχεία καύση (Flash fire)

Η καθυστερημένη ανάφλεξη του αερίου νέφους που εκλύεται, π.χ. λόγω μηχανικής αστοχίας δεξαμενής υγραερίου, είναι δυνατόν να μην οδηγήσει σε ένα τόσο βίαιο φαινόμενο όσο αυτό της έκρηξης, αλλά σε ταχεία καύση ή κατάκαυση αερίου νέφους (flash fire). Στην περίπτωση αυτή, οι επιπτώσεις είναι μικρότερες από αυτές της έκρηξης και χωρικά περιορίζονται στην περιοχή που ιχνοθετείται από το τμήμα του νέφους που αναφλέγεται. Όπως και στην περίπτωση της έκρηξης, το τμήμα του αερίου νέφους που αναφλέγεται είναι αυτό για το οποίο η πυκνότητα του αερίου βρίσκεται μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου ορίου αναφλεξιμότητας (UFL, LFL).

Για τον υπολογισμό της θερμικής ροής από την κατάκαυση αερίου νέφους, η πρώτη ενέργεια που απαιτείται είναι ο υπολογισμός της διασποράς του εύφλεκτου μείγματος αερίου και αέρα. Οι πιο συνήθεις περιπτώσεις διαφυγής υγροποιημένων φυσικών ή πετρελαϊκών αερίων συνεπάγονται τη διασπορά αερίων βαρύτερων του αέρα και άρα απαιτείται η χρήση κατάλληλου μοντέλου διασποράς. Οι ιδιότητες της διασπειρόμενης ουσίας προσδιορίζουν το άνω και κάτω όριο αναφλεξιμότητας. Η περιοχή του χώρου που καταλαμβάνει το τμήμα του νέφους με συγκεντρώσεις μεταξύ του άνω και του κάτω ορίου αναφλεξιμότητας, καθορίζεται από το μοντέλο διασποράς. Εάν στη περιοχή βρεθεί μια πηγή ανάφλεξης, τότε το νέφος αναφλέγεται και το αποτέλεσμα είναι είτε κατάκαυση είτε έκρηξη.

Το TNO (Yellow Book) προτείνει ότι ανάφλεξη εύφλεκτου μείγματος οδηγεί σε κατάκαυση με πιθανότητα 2/3 και σε έκρηξη με πιθανότητα 1/3 (TNO 1997). Το βασικό ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του γεωμετρικού σχήματος της προκαλούμενης φλόγας και η επιφανειακή θερμική ισχύς, ώστε να υπολογιστεί η *θερμική ροή* σε μια απόσταση, με προσέγγιση ανάλογη αυτής που γίνεται για το φαινόμενο BLEVE (βλ. στη συνέχεια).

2.2.4.2.4 Φωτιά λίμνης (POOL FIRE)

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου, υπολογίζουν τη θερμική ροή σε μια απόσταση από τη φωτιά λίμνης και διακρίνονται σε σημειακά και επιφανειακά μοντέλα. Το σύστημα προσομοιάζεται με κύλινδρο κατάλληλων διαστάσεων. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν είναι: ο ρυθμός καύσης της ουσίας, το μέγεθος της λίμνης, το ύψος της φλόγας, κάμψη και μετατόπιση φλόγας (σε ορισμένα), η εκπεμπόμενη θερμική ισχύς από την επιφάνεια της φλόγας, συντελεστής θέασης (view factor), συντελεστής ατμοσφαιρικής μεταφοράς, θερμική ροή στο σημείο υποδοχής.

Το φαινόμενο της φωτιάς λίμνης έχει περιγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία με τις παρακάτω σχέσεις (Νιβολιανίτου 1999). Καταρχάς η υπόθεση που γίνεται είναι αυτή του μοντέλου σημειακής πηγής.

i) Για υγρά με σημείο βρασμού πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση η ταχύτητα εξάτμισης δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{m} = \frac{Hc}{H_{vap} + c_p (T_B - T_A)} 10^{-3} \quad (2.11)$$

ενώ αν αυτό είναι κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα εξάτμισης δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{m}'' = \frac{H_c}{H_{vap}} 10^{-3} \quad (2.12)$$

ii) Το ύψος της φλόγας σε περίπτωση άπνοιας δίνεται από την εξίσωση:

$$L = 84r \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a \sqrt{2gr}} \right)^{0.61} \quad (2.13)$$

Όταν η ταχύτητα ανέμου δεν είναι μηδενική το ύψος φλόγας δίνεται από την εξίσωση :

$$L = 55D \left[\frac{\dot{m}''}{p_0 \sqrt{gD}} \right]^{0.67} \cdot U_*^{0.21} \quad (2.14)$$

$$U_* = \frac{U}{U_c} \quad (2.15)$$

$$U_c = \left[\frac{\dot{m}'' g D}{p_0} \right]^{1/3} \quad (2.16)$$

αν $U < U_c$ τότε $U_* = 1$

iii) Η παραγόμενη θερμική ακτινοβολία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = \frac{\pi r^2 + 2\pi r L \dot{m}'' n H_c}{72 \dot{m}''^{0.61} + 1} \quad (2.17)$$

iv) Η θερμική ακτινοβολία σε κάποια απόσταση x από την πηγή της φωτιάς είναι για την περίπτωση της φωτιάς λίμνης:

$$q = Q \cdot V_f \quad (2.18)$$

V) Τέλος, ο χρόνος καύσης δίνεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{M}{\dot{m}'' \times A_p} \quad (2.19)$$

όπου

\dot{m}'' : ρυθμός καύσης μάζας ανά μονάδα επιφάνειας (Kg/m²s)

H_c : θερμότητα καύσης ανά μονάδα μάζας (J/Kg)

H_{vap} : θερμότητα εξάτμισης στο σημείο βρασμού (J/Kg)

C_p : ειδική θερμότητα (J/Kg.K)

r : ακτίνα λίμνης (m)

D : διάμετρος λίμνης (m)

ρ_a : πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα (Kg/m³)

T_A : θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

T_B : σημείο βρασμού (K)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)

Q : συνολικά απελευθερωνόμενη θερμική ισχύς (W)

q : θερμική ροή (W/m²)

M : συνολική μάζα (Kg)

A_p : επιφάνεια δεξαμενής (m²)

V_F : οπτικός παράγοντας (view factor)

U : ταχύτητα ανέμου (m/sec).

2.2.4.2.5 Φωτιά πυρσού (Jet fire)

Η περίπτωση αυτή περιγράφει την έξοδο ενός αερίου υπό πίεση από ένα δοχείο με αποτέλεσμα τη δημιουργία «θυσάνου», ο οποίος αν αναφλεγεί στη έξοδο δημιουργεί τη λεγόμενη φωτιά πυρσού.

Από άποψη μαθηματικής μοντελοποίησης, όπως και στην περίπτωση της φωτιάς λίμνης, ο πυρσός προσομοιάζεται με κύλινδρο κατάλληλων διαστάσεων. Σημαντικά στοιχεία

εισόδου στο μοντέλο είναι ο τύπος της ουσίας και οι συνθήκες αποθήκευσης, η διάμετρος του ρήγματος, οι φυσικές σταθερές της ουσίας. Οι παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν είναι: ο ρυθμός καύσης της ουσίας, το ύψος της φλόγας, η κάμψη και μετατόπιση φλόγας, η εκπεμπόμενη θερμική ισχύς από την επιφάνεια της φλόγας, ο συντελεστής θέρμανσης, ο συντελεστής ατμοσφαιρικής διάδοσης ακτινοβολίας.

2.2.4.2.6 Φαινόμενο BLEVE

Για να συμβεί το φαινόμενο BLEVE η φωτιά πρέπει να διαρκέσει για περισσότερο από 1/2 ώρα ώστε με την υπερθέρμανση να προκληθεί εξασθένηση του μεταλλικού κελύφους της δεξαμενής με ταυτόχρονη άνοδο της πίεσης του υγραερίου. Αποτέλεσμα της συνδυασμένης αυτής αύξησης των τάσεων και της μείωσης της αντοχής της δεξαμενής είναι η αστοχία της και η δημιουργία ρήγματος στο κέλυφος. Μόλις συμβεί αυτό, το υγραέριο απελευθερώνεται βίαια στο περιβάλλον, αναφλέγεται και δημιουργεί μια μεγάλη πύρινη σφαίρα (Fireball), η ακτινοβολία της οποίας φτάνει σε σημαντικές αποστάσεις. Το μέγεθος των επιπτώσεων εξαρτάται από τη μάζα του υγραερίου που εμπλέκεται στο φαινόμενο. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εμπειρικές σχέσεις που υπολογίζουν το μέγεθος, τη διάρκεια και τη θερμική ακτινοβολία της πύρινης σφαίρας που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση.

Οι επικρατέστερες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία είναι αυτές της επιφανειακής πηγής και της σημειακής πηγής. Ενδεικτικά, οι σχέσεις σύμφωνα με την προσέγγιση της σημειακής πηγής, είναι:

$$Q = \frac{FMH\tau_\alpha}{4\pi L^2 t_d} \quad (2.20)$$

$$F = 0.27P^{0.32} \quad (2.21)$$

$$L = \sqrt{(D/2)^2 + x^2 + y^2} \quad (2.22)$$

$$D = 6.48M^{0.325} \quad (2.23)$$

$$t_d = 0.852M^{0.26} \quad (2.24)$$

όπου

- Q : θερμική ακτινοβολία (W/m^2)
- τ_α : ατμοσφαιρικός συντελεστής μετάδοσης $\cong 0.7$
- M : μάζα πύρινης σφαίρας (Kg)
- H : ενέργεια καύσης (J/Kg)
- F : ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

- P : η πίεση στη δεξαμενή (Μρα)
- t_d : χρονική διάρκεια BLEVE (s)
- D : διάμετρος BLEVE (m)
- L : απόσταση (m)
- x, y : συντεταγμένες σημείου σε επίπεδο κάθετο στη σφαίρα.

Οι εξισώσεις (2.23) και (2.24) έχουν προκύψει ως μέσοι όροι διαφόρων τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για το φαινόμενο BLEVE (TNO 1997).

2.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

Η ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας που παρουσιάζει μια εγκατάσταση επιτυγχάνεται με το συνδυασμό των αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν στις τρεις πρώτες κύριες φάσεις της μεθοδολογίας. Συνήθως υπολογίζονται δύο ποσοτικοί δείκτες επικινδυνότητας, η ατομική διακινδύνευση και η συλλογική διακινδύνευση.

2.2.5.1 Ατομική διακινδύνευση

«Ατομική διακινδύνευση θανάτου σε ορισμένη θέση (individual risk)», ορίζεται ως η συχνότητα (πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου) ότι ένα άτομο σε μια συγκεκριμένη θέση (x, y) σε σχέση με την εγκατάσταση, θα πεθάνει σαν αποτέλεσμα ενός ατυχήματος στην εγκατάσταση.

Η ατομική διακινδύνευση $R(x, y)$ σε ένα σημείο (x, y) της εγκατάστασης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R(x, y) = \sum_{r=1}^R P_r(x, y) \sum_{k=1}^K P_{kr} \sum_{i=1}^I f_i P_{ik} \quad (2.25)$$

όπου

- i : δείκτης εναρκτήριων γεγονότων, $i = 1, 2, \dots, I$
- k : δείκτης των καταστάσεων βλάβης της εγκατάστασης, $k = 1, 2, \dots, K$
- r : δείκτης των κατηγοριών έκλυσης $r = 1, 2, \dots, R$
- f_j : είναι η συχνότητα του $i^{\text{οστού}}$ αρχικού γεγονότος
- p_{jk} : η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι το $i^{\text{οστό}}$ αρχικό γεγονός θα δημιουργήσει ακολουθίες ατυχημάτων που θα καταλήξουν στην $k^{\text{στη}}$ κατάσταση βλάβης της εγκατάστασης

p_{kr} : είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα ότι η $k^{\text{στη}}$ βλάβη εγκατάστασης θα καταλήξει στην $r^{\text{στη}}$ κατηγορία έκλυσης

$p_r(x, y)$: η υπό συνθήκη πιθανότητα θανάτου ατόμου στο σημείο (x, y) της εγκατάστασης, υπό τον όρο ότι έλαβε χώρα η κατηγορία έκλυσης r .

Η πιθανότητα θανάτου υπολογίζεται με βάση τον καθορισμό της δόσης επικίνδυνης ουσίας και μέσω μοντέλων δόσης απόκρισης. Τα βασικά βήματα περιγράφονται στη συνέχεια.

2.2.5.1.1 Καθορισμός Δόσης

Ο σκοπός του βήματος αυτού είναι η εκτίμηση των συνεπειών στην υγεία του πληθυσμού λόγω διασποράς μιας τοξικής ουσίας, θερμικής ακτινοβολίας ή ωστικού κύματος μιας πυρκαγιάς ή μιας έκρηξης. Για τοξικές ουσίες η εκτίμηση γίνεται αφ' ενός από τις συγκεντρώσεις των τοξικών ουσιών και από το βαθμό έκθεσης ενός ατόμου στις συγκεντρώσεις αυτές. Για ουσίες που με την ανάφλεξη και την καύση τους προκαλούν υψηλά επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας, οι συνέπειες εκτιμώνται από τις προκαλούμενες θερμικές ροές, ενώ για την περίπτωση των εκρήξεων από το ύψος των υπερπίεσεων και τη διάρκειά τους.

Οι επιπτώσεις στην υγεία υπολογίζονται με βάση τη δόση της αρνητικής επίδρασης που δέχεται ένα άτομο αν παραμείνει εκτεθειμένο στην αρνητική αυτή επίδραση για χρονικό διάστημα (T) .

Η δόση υπολογίζεται από ένα ολοκλήρωμα του τύπου

$$d(x, y) = \int_0^T f[q(x, y, t)] dt \quad (2.26)$$

Όπου $q(x, y, t)$ είναι η ένταση της επίδρασης του φαινομένου (συγκέντρωση, θερμική ροή, υπερπίεση) στο σημείο (x, y) κατά τη χρονική στιγμή t . Η συνάρτηση f εξαρτάται από τη φύση του φαινομένου και την ιδιαίτερη ουσία που προκαλεί το φαινόμενο.

Για μια τοξική ουσία, η συνάρτηση δόσης έχει τη μορφή:

$$d(x, y) = \int_0^T C^N(x, y, t) dt \quad (2.27)$$

όπου $C(x, y, t)$ είναι η συγκέντρωση της ουσίας και η παράμετρος N εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ουσία.

Για *θερμική ακτινοβολία*, η συνάρτηση δόσης έχει τη μορφή (TNO 1992):

$$d_{x,y} = T \times q(r)^{4/3} \times 10^4, \quad r = x^2 + y^2^{1/2} \quad (2.28)$$

όπου $q(r)$ είναι η θερμική ροή [W/m²] σε απόσταση r από το κέντρο της φωτιάς και T η διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία.

Για *υπερπίεση*, η συνάρτηση δόσης έχει τη μορφή:

$$d_{x,y} = \left(\frac{40000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{I_s} \right)^{11.3} \quad (2.29)$$

όπου P_s είναι η υπερπίεση και I_s είναι η ορμή του ωστικού κύματος και αφορά καταστροφές κτηρίων που συμπαρασύρουν ανθρώπους στην πτώση τους.

2.2.5.1.2 Καθορισμός Πιθανότητας Θανάτου

Η πιθανότητα θανάτου ενός ατόμου καθορίζεται από μοντέλα «Δόσης-απόκρισης» και από την προσδιορισμένη «δόση» της έντασης του φαινομένου που δέχτηκε το άτομο.

Ένα μοντέλο «δόσης-απόκρισης» δίνει την *πιθανότητα να πεθάνει ένα άτομο έπειτα από έκθεση σε ένα ακραίο φαινόμενο* και συνήθως έχει την μορφή της συνάρτησης «Probit». Το μοντέλο «Probit» προκύπτει από στατιστική ανάλυση των συνεπειών παρατηρηθέντων ατυχημάτων ή πειραμάτων (με πειραματόζωα) και μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Γίνεται η παραδοχή ότι κάθε άτομο (σε ένα πληθυσμό) χαρακτηρίζεται από μία διαφορετική «αντοχή» στην έκθεση σ' ένα ακραίο φαινόμενο (και σε συγκεκριμένη δόση). Επιπρόσθετα, γίνεται η παραδοχή ότι οι αντοχές (A) των ατόμων ενός πληθυσμού παρουσιάζουν μία μεταβλητότητα που περιγράφεται από την «κανονική κατανομή» με μέση τιμή ίση με πέντε και τυπική απόκλιση ίση με τη μονάδα $N(5,1)$. Τέλος, γίνεται η παραδοχή ότι μία «δόση» δημιουργεί στον οργανισμό κάθε ατόμου μία «τάση» P_0 η οποία είναι συνάρτηση της δόσης και της συγκεκριμένης ουσίας. Συγκεκριμένα (Lees 1996):

$$P_0 = \text{Probit} = A + B \ln d \quad (2.30)$$

όπου οι παράμετροι A, B εξαρτώνται από την ουσία.

Το μοντέλο «Probit» υποθέτει στη συνέχεια ότι το άτομο πεθαίνει εάν η προκαλούμενη «τάση» P_0 υπερβαίνει την αντοχή A του ατόμου.

Κατά συνέπεια, η πιθανότητα να πεθάνει ένα άτομο, P_d , σαν αποτέλεσμα δόσης (d), δίνεται από τη σχέση:

$$P_d = P_r \quad A \leq P_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_0} \exp\left[-\frac{A-5^2}{2}\right] dA \quad (2.31)$$

ή

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_0-5} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx \quad (2.32)$$

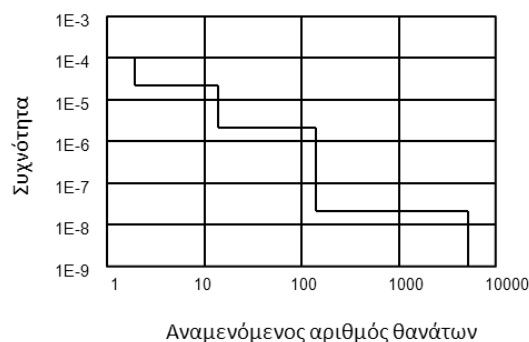
Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (2.32), υποδηλώνει ότι αν ένα πλήθος ατόμων N_0 εκτεθεί σε δόση (d) ο μέσος αριθμός θανάτων (προσδοκητή τιμή) είναι ίσος με :

$$N_c = N_o \cdot P_d \quad (2.33)$$

Σημειώνεται, επίσης, ότι συγκεκριμένος τύπος κατανομής (Κανονική) είναι μία απλή σύμβαση και τα πειραματικά δεδομένα θα μπορούσαν να συσχετιστούν με τα επίπεδα έντασης $q(x, y, t)$ μέσω οποιασδήποτε κατανομής της αντοχής A . Σε κάθε περίπτωση, θα άλλαζε η μορφή των μεταβλητών A, B και η συνάρτηση δόσης.

2.2.5.2 Συλλογική διακινδύνευση

Η «Συλλογική διακινδύνευση θανάτου για ορισμένη περιοχή (societal risk)» προσθέτει μια άλλη διάσταση στη μέτρηση της επικινδυνότητας, λαμβάνοντας υπόψη και το πλήθος των ατόμων που εκτίθενται στα διάφορα επίπεδα ατομικής διακινδύνευσης. Η συλλογική διακινδύνευση εκφράζεται με τη μορφή καμπυλών (F, N) και ορίζεται ως η συχνότητα F με την οποία αναμένεται ατύχημα που θα προκαλέσει αριθμό θανάτων μεγαλύτερο του N



Σχήμα 2.2.4: Τυπικό παράδειγμα καμπύλης F-N.

2.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμοί κάποιων ορίων έκθεσης σε **τοξική ουσία** που χρησιμοποιούνται από διεθνείς οργανισμούς (Γεωργιάδου 2001):

- ✓ Το όριο συγκέντρωσης **LC₅₀** (Median Lethal Concentration) στην οποία ένα ποσοστό 50% των εκτιθέμενων πειραματόζων θα πεθάνει αν εκτεθεί για κάποιο συγκεκριμένο χρόνο (συνήθως 10 ή 30 min).
- ✓ Το όριο δόσης **LD₅₀** (Median Lethal Dose) που είναι ανάλογο με το LC₅₀ και αναφέρεται στη δόση της τοξικής ουσίας.
- ✓ Το όριο συγκέντρωσης **IDLH** (Immediate Dangerous to Life and Health) και αφορά το μέγιστο όριο συγκέντρωσης της ουσίας στην οποία όταν ένας υγιής εργαζόμενος εκτεθεί για μισή ώρα, θα είναι ακόμη σε θέση να διαφύγει χωρίς να χάσει τη ζωή του. Τα όρια αυτά εκδίδονται από το NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) των ΗΠΑ.
- ✓ Τα όρια **ERPG** (Emergency Response Planning Guidelines for Air Contaminants) τα οποία εκδίδονται από την αμερικανική ένωση AIHA (American Industrial Hygiene Association). Για παράδειγμα, το **ERPG-1** είναι η μέγιστη συγκέντρωση στην οποία όλοι οι ανθρώπινοι οργανισμοί μπορούν να εκτεθούν έως 1 ώρα και να υποστούν μόνο ελαφρά παροδική ενόχληση ή να αισθανθούν σαφώς δυσάρεστη και συγκεκριμένη οσμή.
- ✓ Τα όρια **AETLs** (Acute Exposure Threshold Levels) τα οποία αποτελούν οριακές τιμές έκθεσης σε τοξικές ουσίες που εντάσσονται στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού project ACUTEX (Trainor et al. 2006; Wood et al. 2006). Σκοπός του συγκεκριμένου project είναι η εκπόνηση οριακών τιμών οξείας έκθεσης σε τοξικές ουσίες για τις εγκαταστάσεις που εντάσσονται στην οδηγία Seveso. Ωστόσο, σκοπός τους δεν είναι η νομική εφαρμογή από τα κράτη-μέλη της ΕΕ, όσο το να αποτελέσουν οδηγό για τα ζητήματα προστασίας σχετικά με το σχεδιασμό χρήσης και το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης.
- ✓ Τα όρια **AEGls** (Acute Exposure Guideline Levels) (EPA 2011) τα οποία αναφέρονται στους αμερικανικούς κανονισμούς. Τα όρια αυτά αναφέρονται στην έκθεση του πληθυσμού (συμπεριλαμβανομένων και ευαίσθητων ομάδων όπως τα παιδιά) και αφορούν σε έκθεση για χρονικό διάστημα από 10 λεπτά έως και 8 ώρες. Συγκεκριμένα υπάρχουν 3 είδη των οριακών αυτών τιμών, ανάλογα με τη βαρύτητα των επιπτώσεων (AEGl-1, AEGl-2, AEGl-3).

Όσον αφορά στις επιπτώσεις της **θερμικής ακτινοβολίας** στον άνθρωπο, στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένα όρια έκθεσης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 2.3.1: Επιπτώσεις θερμικής ακτινοβολίας.

Ένταση ακτινοβολίας (kW/m ²)	Παρατηρούμενη επίπτωση
37.5	Ικανή να προκαλέσει βλάβη σε εξοπλισμό.
25	Ελάχιστο επίπεδο για να προκαλέσει ανάφλεξη ξύλου σε πολύ μεγάλες περιόδους έκθεσης (διάχυτη ακτινοβολία).
12.5	Ελάχιστο επίπεδο για να προκληθεί ανάφλεξη ξύλου στην περίπτωση κατευθυνόμενης πρόσπτωσης (piloted), καθώς και λιώσιμο πλαστικών σωληνώσεων.
9.5	Επίπεδο πόνου μετά από 8 sec, εγκαύματα δευτέρου βαθμού μετά από 20 sec.
4	Ικανό να προκαλέσει το αίσθημα πόνου σε προσωπικό που δεν θα μπορέσει να καλυφθεί σε 20 sec, εγκαύματα δευτέρου βαθμού είναι πιθανά, 0% θνησιμότητα.
1.6	Θα προκαλέσει δυσάρεστο αίσθημα για μακρές εκθέσεις.

ΠΗΓΗ: (World Bank 1985)

Πίνακας 2.3.2: Χρόνος απαραίτητος για την πρόκληση αίσθησης πόνου σαν συνάρτηση της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας.

Ένταση ακτινοβολίας (kW/m ²)	Χρόνος για αίσθημα πόνου (sec)
1.74	60
2.33	40
2.90	30
4.73	16
6.94	9
9.46	6
11.67	4
19.87	2

ΠΗΓΗ: (API 1982)

Πίνακας 2.3.3: Προτεινόμενα επίπεδα σχεδιασμού θερμικής ακτινοβολίας από πυρσούς.

Επιτρεπόμενο επίπεδο (kW/m ²)	Προϋποθέσεις
15.77	Ένταση θερμικής ακτινοβολίας (K) σε κατασκευές και περιοχές όπου δεν είναι πιθανό να βρίσκεται χειριστής σαν μέρος της κανονικής λειτουργίας και όπου κάποια κάλυψη (π.χ. πίσω από μηχανήματα) είναι δυνατή.
9.46	Ένταση (K) σε οποιοδήποτε σημείο είναι προσβάσιμο σε ανθρώπους. Η έκθεση πρέπει να περιορισθεί σε μερικά δευτερόλεπτα απαραίτητα για διαφυγή.
6.31	Ένταση (K) σε περιοχές όπου δράσεις και ενέργειες έκτακτης ανάγκης διάρκειας μέχρι ενός λεπτού (1 min) είναι δυνατόν να απαιτηθούν, από προσωπικό χωρίς κάλυψη αλλά με κατάλληλα προστατευτικά ενδύματα.
4.73	Ένταση (K) σε περιοχές όπου δράσεις και ενέργειες έκτακτης ανάγκης διάρκειας μερικών λεπτών είναι δυνατόν να απαιτηθούν, από προσωπικό χωρίς κάλυψη αλλά με κατάλληλα προστατευτικά ενδύματα.
1.58	Ένταση (K) σε περιοχές όπου προσωπικό είναι συνεχώς εκτεθειμένο.

ΠΗΓΗ: (API 1982; World Bank 1985)

Για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από ωστικό κύμα ο αναλυτής μπορεί να χρησιμοποιήσει πίνακες παραπλήσιους με τον παραπάνω για την περίπτωση της θερμικής ακτινοβολίας.

3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες στον άνθρωπο και το περιβάλλον, συνεπώς η πρόληψή τους και η αύξηση της ετοιμότητας αντιμετώπισης έχουν ιδιαίτερη σημασία. Εξάλλου, αυτός είναι και ο λόγος που τα **Σχέδια Έκτακτης Ανάγκης (ΣΕΑ)** αναγορεύονται σε αναγκαία υποχρέωση και των βιομηχανιών και των δημοσίων υπηρεσιών αντιμετώπισης.

Η διαχείριση του κινδύνου από τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης θα μπορούσε να χωριστεί σε *τρεις φάσεις*: τη φάση της πρόληψης, τη φάση της απόκρισης στο ατύχημα και περιορισμού των συνεπειών από αυτό και τη φάση της αξιολόγησης (Χρήστου 1993):

1. **Πρόληψη:** Η πρόληψη αναφέρεται στις ενέργειες που έχουν ως στόχο την ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης και την προσπάθεια αποφυγής ενός ατυχήματος. Ζητήματα που πρέπει να περιλαμβάνει η συγκεκριμένη φάση είναι: Η επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας, η χωροταξία των διαφόρων μονάδων, ο διαχωρισμός των μονάδων είτε με απόσταση είτε με εμπόδια, ώστε να αποφευχθούν «φαινόμενα domino», η καλή σχεδίαση και κατασκευή της εγκατάστασης, ο ποιοτικός έλεγχος και πιστοποίηση των επιμέρους συστημάτων της, η εξασφάλιση καλών συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης, η καλή σχεδίαση των διαδικασιών ελέγχου και λειτουργίας, η καλή σχεδίαση των χειρισμών και η ύπαρξη αξιόπιστων μέτρων και συστημάτων ασφαλείας, η σωστή, τακτική και επιμελημένη συντήρηση της εγκατάστασης. Ο σημαντικότερος όρος που αφορά στην πρόληψη είναι η πρόβλεψη, κατά το δυνατόν, των συνθηκών που μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητες καταστάσεις και συνίσταται στην εκτίμηση της επικινδυνότητας. Χρησιμοποιούνται ποιοτικές ή ποσοτικές τεχνικές εκτίμησης, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.
2. **Απόκριση:** Η φάση αυτή αφορά στην περίοδο από την εμφάνιση μέχρι τη λήξη του ατυχήματος και περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες: Ειδοποίηση των αρχών, προσπάθεια να λειτουργήσουν τα συστήματα ασφαλείας και να μην εξαπλωθεί το ατύχημα, κινητοποίηση των αρχών και έναρξη των διαδικασιών έκτακτης ανάγκης, ειδοποίηση του προσωπικού και του πληθυσμού εκτός της εγκατάστασης που βρίσκονται σε κίνδυνο, λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας και καθοδήγηση του πληθυσμού, παροχή πρώτων βοηθειών σε όσους επλήγησαν κ.ά. Η φάση

λοιπόν αυτή δεν αφορά μόνο το εσωτερικό της εγκατάστασης αλλά και τον εξωτερικό χώρο.

3. **Αξιολόγηση:** Μετά το τέλος του ατυχήματος ακολουθεί η φάση της αξιολόγησης, η οποία αποτελεί τη διαδικασία εκμάθησης, την απόκτηση γνώσης και εμπειρίας από το συμβάν. Η διαδικασία της αξιολόγησης αναφέρεται σε ένα σύστημα καταγραφής του ατυχήματος, διερεύνησης των αιτιών πρόκλησής του, στατιστικής των ατυχημάτων, αλλαγών στην πρακτική που μέχρι τώρα ακολουθείται, δημοσιοποίησης των αποτελεσμάτων κ.λπ.

Στη φάση της απόκρισης εντάσσονται τα ΣΕΑ. Ο στόχος αυτών των σχεδίων είναι ο προσδιορισμός των απαιτούμενων μέτρων και μέσων που πρέπει να επιστρατευτούν για τον εντοπισμό, περιορισμό και, αν είναι δυνατόν, τον έλεγχο και τη μείωση των συνεπειών ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Σύμφωνα με τον F.P.Lees: «Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης είναι το σύνολο των προσχεδιασμένων ενεργειών και διαδικασιών για τη διαχείριση του βιομηχανικού ατυχήματος, που αποσκοπούν τόσο στην πρόληψη της κλιμάκωσης του αρχικού συμβάντος, όσο και στην ελαχιστοποίηση της έκθεσης των ανθρώπων σε κίνδυνο» (Lees 1996).

Από τον ορισμό αυτό φαίνεται ότι υπάρχει ένας διαχωρισμός των ενεργειών ανάλογα με το αν αυτές αναφέρονται εντός των ορίων της εγκατάστασης ή εκτός. Οι ενέργειες που εντάσσονται στο σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης και περιορίζονται **εντός της εγκατάστασης (on-site)** αφορούν στη λήψη μέτρων για την καταπολέμηση της αφορμής του ατυχήματος, την πρόληψη της εξάπλωσής του και την προστασία των εργαζομένων. Τέτοια μέτρα είναι η ενεργοποίηση των συστημάτων ασφαλείας, η ψύξη των πηγών θερμότητας, όπως για παράδειγμα των εστιών φωτιάς, η εφαρμογή, αν απαιτείται, εκκένωσης της εγκατάστασης από το προσωπικό, η χρήση μέσων ατομικής προστασίας κ.λπ. Οι ενέργειες που επεκτείνονται **εκτός των ορίων της εγκατάστασης (off-site)** αφορούν στην καθοδήγηση του πληθυσμού και τη λήψη προστατευτικών μέτρων ώστε να εκτεθεί όσο το δυνατόν λιγότερο στις επιπτώσεις του ατυχήματος (επικίνδυνη ουσία, ακτινοβολία, ωστικό κύμα).

Οι φορείς που εμπλέκονται στην αντιμετώπιση του ατυχήματος εξαρτώνται βέβαια από την έκτασή του και από το επίπεδο κινητοποίησης. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί η ανάγκη ολοκληρωμένης ανάλυσης και αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών και τεχνολογικών ατυχημάτων. Αφενός γιατί μια φυσική καταστροφή όπως σεισμοί, πλημμύρες κ.ά. μπορεί να αποτελέσουν εναρκτήριο γεγονός για τεχνολογικό ατύχημα μεγάλης έκτασης και αφετέρου γιατί τα δύο αυτά είδη καταστροφών παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες, αφού επηρεάζουν μεγάλες περιοχές και απαιτούν έγκαιρη επέμβαση των δυνάμεων αντιμετώπισης, οι οποίες καλούνται να εφαρμόσουν τη μέγιστη γνώση και εμπειρία στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Συνοπτικά οι κύριες ενέργειες των φορέων που εμπλέκονται στην αντιμετώπιση του ατυχήματος μπορεί να είναι οι εξής (Χρήστου 1993):

- ✓ αναγνώριση της επικίνδυνης κατάστασης
- ✓ αξιολόγηση του κινδύνου
- ✓ καθορισμός των ορίων της περιοχής που διατρέχει κίνδυνο
- ✓ απόφαση για τα μέτρα αντιμετώπισης
- ✓ διακήρυξη κατάστασης συναγερμού
- ✓ καθοδήγηση του πληθυσμού
- ✓ παροχή πρώτων βοηθειών στους πληγέντες
- ✓ παρακολούθηση της εξέλιξης του ατυχήματος
- ✓ συντονισμός των επιμέρους φορέων και ενεργειών.

Η ύπαρξη πολλαπλών και ανόμοιων φορέων, η πολυπλοκότητα των ενεργειών ο μικρός χρόνος μέσα στον οποίο πρέπει να ληφθούν και να υλοποιηθούν αποφάσεις, κάνουν επιτακτική την ανάγκη για ύπαρξη συντονισμού των ενεργειών σε όλα τα επίπεδα και τον καθορισμό αρμοδιοτήτων. Έτσι, το **ΣΕΑ προϋποθέτει:**

- ✓ καθορισμό του πεδίου δράσης, των αρμοδιοτήτων και της ευθύνης κάθε εμπλεκόμενου οργανισμού και γενικά φορέα
- ✓ ανάπτυξη αποτελεσματικού δικτύου επικοινωνιών
- ✓ καθορισμό των διαδρομών εκκένωσης του πληθυσμού
- ✓ εγκατάσταση κατάλληλου και αξιόπιστου συστήματος παρακολούθησης του ατυχήματος (σύστημα λήψης μετρήσεων π.χ. της συγκέντρωσης της επικίνδυνης ουσίας, σύστημα μετρήσεως των μετεωρολογικών συνθηκών κ.λπ.)
- ✓ διασφάλιση ύπαρξης υποδομής και κατάλληλων μέσων για την υλοποίηση του σχεδίου
- ✓ ίδρυση Επιχειρησιακού Κέντρου αντιμετώπισης της έκτακτης κατάστασης που θα συντονίζει τις επιμέρους επιχειρήσεις ανταπόκρισης στο ατύχημα
- ✓ ανάπτυξη του κατάλληλου Οργανογράμματος με τις ενέργειες και τις αρμοδιότητες κάθε φορέα
- ✓ διασφάλιση της ύπαρξης αξιόπιστου και αποτελεσματικού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης και ενημέρωσης του πληθυσμού.

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ

Οι σημαντικότερες φάσεις που αποτελούν τη βάση ενός ΣΕΑ είναι ο **Συναγερμός (alarm)**, η **Αντιμετώπιση (response)**, και η **Προστασία/Αποκατάσταση (protection/restoration)** (Γεωργιάδου 2001; ΕΜΠ 1998). Στη συνέχεια ακολουθεί συνοπτική αναφορά σε πλευρές που αφορούν στις φάσεις αυτές.

3.2.1 ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΣ

Η πρώτη αυτή φάση περιλαμβάνει την ανίχνευση πιθανού ατυχήματος, τη συγκέντρωση και επεξεργασία των απαραίτητων αρχικών στοιχείων και στη συνέχεια τις διαδικασίες για την ειδοποίηση των αρμοδίων αρχών ανάλογα με τη σοβαρότητα του ατυχήματος.

Αρχικά σε επίπεδο εγκατάστασης γίνεται η **ανίχνευση** ενός ασυνήθιστου γεγονότος που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ατύχημα μεγάλης έκτασης (π.χ. διαρροή εύφλεκτης ή τοξικής ουσίας, εστία φωτιάς κ.λπ.) και η συλλογή και αξιολόγηση των πρώτων στοιχείων. Η ανίχνευση μπορεί να γίνει είτε με αυτόματα συστήματα ανίχνευσης/ειδοποίησης ή από τους ίδιους τους εργαζόμενους ή ελεγκτές.

Τα **αρχικά δεδομένα** έχουν πολύ μεγάλη σημασία για τις περαιτέρω ενέργειες και το επίπεδο κινητοποίησης των αρμοδίων αρχών, για τους κινδύνους που διατρέχουν οι εργαζόμενοι ή το κοινό (πληθυσμός) εκτός εγκατάστασης, για το αν θα πραγματοποιηθεί κήρυξη κατάστασης έκτακτης ανάγκης κ.λπ. Τέτοια δεδομένα αφορούν στη φύση του περιστατικού, αν δηλαδή πρόκειται για φωτιά, έκρηξη, διαρροή επικίνδυνης ουσίας ή συνδυασμό αυτών, στη σοβαρότητά του, δηλαδή αν υπάρχουν θύματα ή τραυματίες, στις τρέχουσες συνθήκες εντός της εγκατάστασης, στο αν υπάρχει πιθανότητα επέκτασης των επιπτώσεων και εκτός της εγκατάστασης, στην πιθανότητα πρόκλησης «φαινομένου domino», στους κινδύνους που διατρέχουν οι ομάδες επέμβασης κ.λπ. Η σημασία των αρχικών στοιχείων για το επίπεδο κινητοποίησης και αντιμετώπισης ενός συμβάντος αναδεικνύει την ανάγκη ύπαρξης ποσοτικής εκτίμησης επικινδυνότητας σε κάθε εγκατάσταση.

Μετά την ανίχνευση, ανάλογα με τη σοβαρότητα του συμβάντος, η εγκατάσταση πρέπει να στείλει **σήμα συναγερμού** και να ειδοποιηθούν όλες οι απαραίτητες αρχές επέμβασης (Πυροσβεστική, ΕΚΑΒ, Αστυνομία, Λιμενικό κ.λπ.). Ένα σημαντικό ζήτημα είναι ότι η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση με τον εκτός των εγκαταστάσεων χώρο θα πρέπει να είναι αξιόπιστη και άμεση, εύκολη στη χρήση, να διασφαλίζεται για περιπτώσεις βλαβών κ.λπ.

Στη χώρα μας σε αυτό το πλαίσιο λειτουργεί το εθνικό επιχειρησιακό κέντρο στη *Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας*, το οποίο μέσω ενός σύγχρονου και εκτεταμένου τηλεπικοινωνιακού δικτύου συνδέεται με τις Περιφέρειες της χώρας και τα υφιστάμενα κέντρα των αρχών επέμβασης, έτσι ώστε να συντονίζει τις δράσεις σε περιπτώσεις έκτακτων καταστάσεων (τεχνολογικά ατυχήματα, σεισμοί, πλημμύρες, πυρκαγιές κ.λπ.).

3.2.2 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Αποτελεί την κύρια φάση της διαχείρισης ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης. Περιλαμβάνει ποικιλία δράσεων που έχουν ως στόχο την **καταστολή** και την **πολιτική προστασία**. Απαιτεί συντονισμό των δράσεων και των φορέων, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα στον ελάχιστο χρόνο.

Η αντιμετώπιση του βιομηχανικού ατυχήματος ιδιαίτερα στις περιπτώσεις επέκτασης εκτός των ορίων της εγκατάστασης, απαιτεί τη συμμετοχή πολλών και διαφορετικών υπηρεσιών και άρα προϋποθέτει το συντονισμό των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων

και των ομάδων επέμβασης μεταξύ τους. Αυτό αφορά και στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε «πραγματικό χρόνο», δηλαδή κατά τη διάρκεια του ατυχήματος, αλλά και στη διεξαγωγή ενεργειών που έχουν προκαθοριστεί και είναι ανεξάρτητες από το ατύχημα.

3.2.2.1 Οργανωτικά ζητήματα

Ιδιαίτερη σημασία για την επιτυχία του ΣΕΑ έχουν τα οργανωτικά ζητήματα. Οι οργανωτικές ρυθμίσεις που θα πρέπει να είναι αυστηρά προκαθορισμένες και δοκιμασμένες αφορούν:

- στο θεσμικό πλαίσιο της χώρας για τη διαχείριση κάθε είδους κρίσεων και καταστροφών, επομένως και των τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης (βλ. κεφάλαιο 1.4)
- στην αναγνώριση όλων των τοπικών, περιφερειακών, εθνικών αλλά και ιδιωτικών φορέων ή οργάνων που μπορεί να συμμετέχουν στη διαχείριση ενός ατυχήματος και στη λεπτομερή περιγραφή των αρμοδιοτήτων του καθενός, πριν και κατά η διάρκεια αυτού
- στο σύστημα διαχείρισης του ατυχήματος, δηλαδή στο συνδυασμό των ρόλων και μέσων σε μια κοινή οργανωτική δομή, με καθορισμένες διαδικασίες και τρόπους επικοινωνίας, με στόχο το συντονισμό και τη μεγιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων μέσων για την αποτελεσματική αντιμετώπισή του
- στα κριτήρια ειδοποίησης – κινητοποίησης των αρμοδίων φορέων από τον υπεύθυνο της εγκατάστασης
- στα κριτήρια ειδοποίησης – κινητοποίησης του κοινού, καθώς και στα μέσα υποστήριξης της ειδοποίησης, δηλαδή τα υπεύθυνα πρόσωπα και τις υπηρεσίες σε κάθε βαθμίδα
- στους φορείς που εμπλέκονται στην αντιμετώπιση ενός ατυχήματος, οι οποίοι εξαρτώνται από την έκτασή του και από το επίπεδο κινητοποίησης (π.χ. ομάδες αντιμετώπισης σε επίπεδο εγκατάστασης, Πυροσβεστική, Τοπικές αρχές, ΕΚΑΒ κ.ά.).

3.2.2.2 Συλλογή δεδομένων

Εκτός από τα οργανωτικά θέματα τα οποία αφορούν υπεύθυνους, φορείς, υπηρεσίες και τις αρμοδιότητές τους για μια αποτελεσματική αντιμετώπιση ενός ατυχήματος, ιδιαίτερη σημασία έχει η **συλλογή δεδομένων πριν το ατύχημα και ανεξάρτητα από αυτό**. Βασικές πλευρές σε αυτό το πλαίσιο είναι οι ακόλουθες:

- **Εκτίμηση Επικινδυνότητας:** Σε προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά σε μεθόδους ανάλυσης και εκτίμησης της επικινδυνότητας καθώς και στη σημασία της συνδυασμένης εφαρμογής ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων εκτίμησης. Για μια ολοκληρωμένη ανάλυση επικινδυνότητας ιδιαίτερη σημασία έχει η συμβολή της Γραπτής Εκτίμησης του Επαγγελματικού Κινδύνου (Παπαδόπουλος & Γεωργιάδου 1999). Μια ολοκληρωμένη ανάλυση επικινδυνότητας είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της πιθανότητας ενός σεναρίου ατυχήματος, καθώς και των συνεπειών που αυτό θα έχει σε επίπεδο εγκατάστασης και εργαζομένων σε

αυτή, σε γειτονικές εγκαταστάσεις και στην ευρύτερη περιοχή. Παρόλο που τα τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης είναι δυναμικά φαινόμενα και επηρεάζονται από πλήθος παραμέτρων ώστε είναι δύσκολο να υπάρχουν πλήρως προκαθορισμένα σενάρια για κάθε περίπτωση, η σημασία της ύπαρξης όσο περισσότερων και ολοκληρωμένων σεναρίων είναι μεγάλη. Επιπλέον, η ολοκληρωμένη και ποσοτική εκτίμηση επικινδυνότητας είναι απαραίτητη και για την αύξηση της ετοιμότητας μιας περιοχής και της εκπόνησης κατάλληλων σχεδίων έκτακτης ανάγκης, αλλά και για τη διαχείριση ενός ατυχήματος σε «πραγματικό χρόνο», γιατί δίνει πληροφορίες για τις παραμέτρους που μπορεί να επηρεάσουν την εξέλιξη του φαινομένου.

- **Συστήματα Στήριξης Αποφάσεων:** Τα τελευταία χρόνια οι ειδικοί προσπαθούν να αξιοποιήσουν τη μεγάλη ανάπτυξη στις τεχνολογίες διαχείρισης ηλεκτρονικών δεδομένων για το σχεδιασμό Συστημάτων Στήριξης Αποφάσεων (Decision Support Systems) για την αντιμετώπιση ενός τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης. Ένα τέτοιο κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα μπορεί να προσομοιώσει τις διαδικασίες απόφασης και να ενσωματώσει τα κριτήρια και τις μεταβλητές που το επηρεάζουν.
- **Βάσεις Δεδομένων:** Οι βάσεις δεδομένων είναι ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών υπολογιστών στη διαδικασία αντιμετώπισης ενός ατυχήματος. Ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται άμεσα και αξιόπιστα είναι ιδιαίτερα μεγάλος και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά λογισμικά βάσεων δεδομένων που έχουν τη δυνατότητα εύκολης πρόσβασης και αναζήτησης στοιχείων, αποθήκευσης, συσχέτισης στοιχείων μεταξύ τους κ.λπ. Τέτοιες βάσεις δεδομένων μπορεί να περιλαμβάνουν για παράδειγμα στατιστικά και ιστορικά στοιχεία όσον αφορά στις μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή, στοιχεία που αφορούν στις ποσότητες, στις ιδιότητες και στους κινδύνους που ενέχουν οι αποθηκευμένες επικίνδυνες ουσίες, καθώς και μέτρων προστασίας γι' αυτές κ.λπ.
- **Μέσα Έκτακτης Ανάγκης:** Αφορά τα ΣΕΑ, τις διαδικασίες που σχετίζονται με τα οργανωτικά θέματα, το ανθρώπινο δυναμικό, τον εξοπλισμό καταστολής και ασφάλειας προσωπικού, τον εξοπλισμό μετρήσεων και παρακολούθησης της έκθεσης σε επικίνδυνες ουσίες και καταστάσεις εντός και εκτός των εγκαταστάσεων, τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό κ.λπ.
- **Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS):** Ένα τέτοιο σύστημα προσφέρει μια βάση επί της οποίας μπορούν να αναπτυχθούν εφαρμογές σχετιζόμενες με σημεία ή περιοχές ενός χάρτη. Για τη διαχείριση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης απαιτούνται λεπτομερείς και πρόσφατα ενημερωμένοι χάρτες που θα αποδίδουν την ταυτότητα της περιοχής, την επικινδυνότητά της (σύμφωνα με την ανάλυση κινδύνων), καθώς και τη θέση φορέων και μέσων που θα καθορίζονται από τις απαιτήσεις της διαχείρισης. Τα στοιχεία αυτά θα είναι αποθηκευμένα σε βάσεις δεδομένων με τις οποίες θα συνδέεται το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.
- **Τεχνική υποστήριξη/εμπειρογνώμονες:** Αφορά στις διάφορες ομάδες, ινστιτούτα, εμπειρογνώμονες κ.λπ., που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τεχνική υποστήριξη και εξειδικευμένη γνώση πάνω σε ζητήματα που θα ήταν χρήσιμα για τη διαχείριση βιομηχανικών κινδύνων και ιδιαίτερα σοβαρών τεχνολογικών ατυχημάτων. Αυτοί

μπορεί να είναι ερευνητικά ινστιτούτα και εργαστήρια, πανεπιστήμια, χημικές βιομηχανίες, ειδικοί επιστήμονες και από το εσωτερικό ή εξωτερικό μιας χώρας. Εκτός από την τεχνική υποστήριξη που μπορεί να παρέχουν γενικά, είναι δυνατό να κληθούν στο Επιχειρησιακό Κέντρο αντιμετώπισης ατυχημάτων κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος ή να βοηθήσουν από απόσταση με βάση την εμπειρία και εξειδικευμένη γνώση που διαθέτουν.

3.2.2.3 Διαχείριση σε «πραγματικό χρόνο»

Μια πολύ σημαντική λειτουργία της διαχείρισης ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης είναι η διαχείριση σε «πραγματικό χρόνο», δηλ. κατά τη διάρκεια του ατυχήματος. Έχει σαν στόχο την εξασφάλιση της αναγκαίας ταχύτητας απόκρισης και την αξιόπιστη επικοινωνία των συμμετεχόντων και σχετίζεται με τις εξής ενέργειες και αρμοδιότητες:

- **Παρακολούθηση της εξέλιξης του ατυχήματος:** Αναφέρεται στη συνεχή παρακολούθηση του ατυχήματος, από τη στιγμή που αναφέρεται το περιστατικό, με στόχο τη συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου και την αξιολόγηση των κινδύνων, της επιλογής του κατάλληλου σχεδίου δράσης και την κινητοποίηση των κατάλληλων μέσων.
- **Παρακολούθηση μετεωρολογικών συνθηκών:** Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων, απαιτούνται η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, καθώς και η αντίστοιχη ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Όταν συμβεί κάποιο ατύχημα για να είναι αποτελεσματική η αντιμετώπιση και η προστασία του κοινού θα πρέπει να υπάρχουν δεδομένα για τα παραπάνω μεγέθη σε «πραγματικό χρόνο». Παρόλο που υπάρχουν δυσκολίες ανίχνευσης των μετεωρολογικών συνθηκών σε περιοχές που υπάρχουν εμπόδια (κτήρια, βουνά κ.λπ.), μπορεί να υπάρξει ικανοποιητική προσέγγιση με κατάλληλη τοποθέτηση μετεωρολογικών σταθμών σε πολλά σημεία που θα συνδέονται με Η/Υ.
- **Παρακολούθηση κυκλοφοριακών συνθηκών:** Είναι αναγκαία για την επιλογή των κατάλληλων οδών προσέγγισης των ομάδων επέμβασης στο τόπο του ατυχήματος, καθώς και για τη διευκόλυνση της εκκένωσης του πληθυσμού σε περίπτωση που αυτή αποφασιστεί. Εκτός από τη γνώση της περιοχής, των οδών και άλλων στοιχείων που πρέπει είναι αποθηκευμένα στο σύστημα διαχείρισης μέσω του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, η γνώση της κατάστασης στους δρόμους σε «πραγματικό χρόνο» είναι αναγκαία για τη συλλογή πληροφοριών που σχετίζονται με την κίνηση που υπάρχει, με έργα οδοποιίας που μπορεί να πραγματοποιούνται ή με οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο μπορεί να έχει προκύψει.
- **Επικοινωνία:** Μεγάλη σημασία έχει η αξιοπιστία της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης μεταξύ ενός Επιχειρησιακού Κέντρου αντιμετώπισης ατυχημάτων και του υπεύθυνου στον τόπο των επιχειρήσεων, όπως επίσης και η επικοινωνία μεταξύ των ομάδων επέμβασης στον τόπο του ατυχήματος. Η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση με βάση τα δεδομένα πραγματικού χρόνου, καθώς και η εξασφάλιση εφεδρικών συστημάτων επικοινωνίας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του ατυχήματος.

3.2.2.4 Ενημέρωση κοινού

Η έγκαιρη ειδοποίηση του κοινού (κάτοικοι, εργαζόμενοι στην ευρύτερη περιοχή) σε περίπτωση ατυχήματος έχει καθοριστική σημασία για το μέγεθος των επιπτώσεών του. Η ενημέρωση αφορά και την εκπαίδευση με ασκήσεις, ενημερώσεις του κοινού σε τακτά χρονικά διαστήματα κ.λπ., αλλά και στην καθοδήγηση του σε «πραγματικό χρόνο» σε περίπτωση που ένα ατύχημα συμβεί.

Για το θέμα, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει ειδική αναφορά στη σχετική νομοθεσία (οδηγία Seveso). Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια η ενημέρωση του κοινού έχει αποτελέσει το αντικείμενο πολλών ερευνητικών δραστηριοτήτων στα πλαίσια της οδηγίας Seveso και των αρμόδιων Γενικών Διευθύνσεων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Οι δραστηριότητες αυτές παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα πρακτικά προβλήματα του θέματος.

Σημαντικά ζητήματα που χρειάζεται να ερευνηθούν και προκαθοριστούν κατά το σχεδιασμό της ενημέρωσης κοινού είναι: Η οργάνωση και τεχνολογική υποδομή για τη διάχυση των αναγκαίων πληροφοριών, ο ρόλος των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης, η ύπαρξη κεντρικού συντονισμού, ο εντοπισμός των εγκαταστάσεων για την ασφαλή προσωρινή φιλοξενία του απειλούμενου πληθυσμού, ο καθορισμός υπεύθυνου για την εφαρμογή των άμεσων μέτρων προστασίας και την επαφή με το κοινό, κατάλληλα επεξεργασμένα μηνύματα και πληροφορίες προς το κοινό χωρίς αντιφάσεις και ανακρίβειες, ανάλυση των πιθανών αντιδράσεων του κοινού σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Μέσα για την ειδοποίηση του πληθυσμού μπορεί να είναι: Σειρήνες, Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης, Μεγάφωνα τοποθετημένα σε κατάλληλα σημεία, Μεγάφωνα κινητά τοποθετημένα σε αυτοκίνητα ή αεροπλάνα/ελικόπτερα κ.λπ.

3.2.2.5 Μετάβαση στον τόπο του ατυχήματος

Η άμεση κινητοποίηση και ανάθεση αποστολών στις κατάλληλες δυνάμεις επέμβασης (μέσα) και η έγκαιρη μετάβαση τους στον τόπο του ατυχήματος αποτελεί προϋπόθεση για μια επιτυχημένη αντιμετώπιση.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εκτίμηση σε «πραγματικό χρόνο» των απαιτούμενων μέσων ανάλογα με τη φύση, τη θέση, τη σοβαρότητα και την πιθανή εξέλιξη ενός ατυχήματος. Στη διαδικασία αυτή μπορούν να βοηθήσουν σχετικά ιστορικά δεδομένα ή και προεκτιμήσεις κατ' επέκταση της ανάλυσης κινδύνων που έχει γίνει σε μια περιοχή. Τη στιγμή της εκδήλωσης του ατυχήματος η πραγματική διαθεσιμότητα των μέσων που έχουν καταγραφεί εκ των προτέρων ως διαθέσιμα δεν είναι δεδομένη. Διάφοροι παράμετροι μπορεί να έχουν προκαλέσει αλλαγές στη διαθεσιμότητά τους, όμως η πραγματική κατάσταση έχει κρίσιμη σημασία για τους αποφασίζοντες, αφού δύναται να καθορίσει την επιλογή σχεδίου δράσης.

3.2.2.6 Διαδικασίες αντιμετώπισης

Η διαχείριση των επιχειρήσεων αντιμετώπισης έχει πρωταρχική σημασία για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών ενός ατυχήματος, την προστασία των εργαζομένων και του πληθυσμού εκτός της εγκατάστασης καθώς και του προσωπικού επέμβασης. Αφορά στην οργανωτική προετοιμασία και λεπτομερή περιγραφή όλων των διαδικασιών αντιμετώπισης, αλλά και στην υποστήριξη λήψης αποφάσεων σε «πραγματικό χρόνο».

Η αναγνώριση και η προετοιμασία των διαδικασιών αντιμετώπισης κατά το σχεδιασμό και με βάση την ανάλυση κινδύνων σε μια περιοχή, τις δυνατότητες επέμβασης και την εμπειρία των ομάδων επέμβασης, βοηθούν τους επιχειρησιακούς φορείς και όχι μόνο να αντεπεξέλθουν στην ένταση και φόρτιση της πρώτης στιγμής, ιδιαίτερα όταν τα πρώτα διαθέσιμα στοιχεία είναι ανεπαρκή.

Οι διαδικασίες αντιμετώπισης είναι:

- **Αξιολόγηση περιστατικού:** Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την αρχική αξιολόγηση που περιγράφηκε στη φάση του συναγερμού και συνεχίζεται μέχρι να εκλείψει ο κίνδυνος ή τα επίπεδα έκθεσης να μειωθούν στα επιτρεπόμενα όρια και να αποκατασταθούν κανονικές συνθήκες στην περιοχή. Οι βασικοί στόχοι της αξιολόγησης είναι: η αναγνώριση της φύσης, της ποσότητας και της θέσης των επικίνδυνων ουσιών, το είδος της απειλής στον άνθρωπο, η αναγνώριση πιθανών πρόσθετων δυνάμεων, η εκτίμηση της πιθανής κατεύθυνσης και διάρκειας της διαρροής, η αναγνώριση πιθανών συνεπειών στον άνθρωπο και το περιβάλλον, η αναγνώριση των προτεραιοτήτων αντιμετώπισης. Προϋπόθεση γι' αυτές τις εκτιμήσεις είναι ο καθορισμός ορίων επικινδυνότητας και ασφάλειας για κάθε είδος κινδύνου.
- **Έλεγχος της περιοχής επιχειρήσεων:** Ο έλεγχος της περιοχής των επιχειρήσεων είναι μια σημαντική παράμετρος που βοηθά καθοριστικά τις επιχειρήσεις αντιμετώπισης και ελαχιστοποίησης των συνεπειών ενός ατυχήματος. Διαχειριστικά, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τη διεθνή πρακτική, η περιοχή χωρίζεται σε δυο ζώνες:
 - (1) Επικίνδυνη ζώνη ή ζώνη άμεσης επέμβασης: Αποτελεί το πρώτο μέλημα των αρχών επέμβασης για την ανάληψη του απαραίτητου ελέγχου στην περιοχή των επιχειρήσεων σε μια ακτίνα γύρω από το σημείο του συμβάντος. Η ζώνη αυτή εκκενώνεται και δεν επιτρέπεται η είσοδος σε κανέναν εκτός των ομάδων επέμβασης, οι οποίες είναι εφοδιασμένες με τον απαραίτητο προστατευτικό εξοπλισμό. Η περιοχή αυτή απειλείται άμεσα και η είσοδος, η κίνηση και η τοποθέτηση των ομάδων επέμβασης μέσα σ' αυτή εξαρτάται από το είδος του κινδύνου και τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν.
 - (2) Ζώνη προστατευτικών δράσεων: Εκτείνεται πέρα από τη ζώνη αποκλεισμού μέχρι τα όρια της ασφαλούς περιοχής. Σημειώνεται ότι για αρκετές χώρες η ελάχιστη ακτίνα των προστατευτικών ζωνών έχει προεκτιμηθεί για διάφορες κατηγορίες ουσιών και για τις ανάγκες της αρχικής επέμβασης (για τις ζώνες προστατευτικών δράσεων που εφαρμόζονται στην Ελλάδα γίνεται συνοπτική αναφορά στη συνέχεια). Ακολούθως οι ακτίνες αυξάνονται σε «πραγματικό χρόνο» ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες και

μέσω έμπειρης παρατήρησης και κρίσης ή/και υπολογιστικών συστημάτων κινδύνων.

- **Έλεγχος της έκθεσης προσωπικού επέμβασης:** Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, οι εργαζόμενοι στις ομάδες επέμβασης (π.χ. πυροσβέστες) αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα υγείας και ασφάλειας (τραυματισμοί, θάνατοι, προβλήματα υγείας συμπεριλαμβανομένων καρδιοπαθειών, καρκίνων κ.ά.) λόγω της φύσης των δραστηριοτήτων τους στις οποίες περιλαμβάνονται τα ατυχήματα μεγάλης έκτασης (Γεωργιάδου 2010). Για την προστασία τους θα πρέπει να πραγματοποιείται εκτίμηση των επαγγελματικών κινδύνων που να περιλαμβάνει και στοχευμένο ιατρικό έλεγχο και να λαμβάνονται τα κατάλληλα τεχνικά και οργανωτικά μέτρα πρόληψης (κατάλληλος και επαρκής τεχνικός εξοπλισμός, εκπαίδευση, επάρκεια προσωπικού, διαλείματα, ανάλογα με τους κινδύνους περιορισμός και έλεγχος της εισόδου σε επικίνδυνες περιοχές στο μέγιστο δυνατό, χρήση ατομικού προστατευτικού εξοπλισμού κ.λπ.). Η επιλογή του κατάλληλου προστατευτικού εξοπλισμού απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή αφού αφενός δεν υπάρχει ένας μόνο συνδυασμός ικανός να προστατεύσει τον άνθρωπο από όλους τους κινδύνους και αφετέρου, όσο περισσότερα προστατευτικά μέτρα χρησιμοποιούνται τόσο αυξάνει ο κίνδυνος από άλλους παράγοντες όπως αύξηση της θερμοκρασίας, μειωμένη όραση, περιορισμένη ικανότητα κίνησης και επικοινωνίας κ.λπ.
- **Μέτρα προστασίας κοινού:** Η αναγνώριση και ανάλυση εκ των προτέρων όλων των διαθέσιμων προστατευτικών μέτρων για το κοινό είναι χρήσιμη για την επιλογή και εφαρμογή τους σε «πραγματικό χρόνο». Ανάλογα με το είδος και την έκταση της απειλής μπορεί να υιοθετηθούν τα παρακάτω μέτρα: (α) καταφύγιο σε εσωτερικούς χώρους, (β) εκκένωση κατοίκων και διερχόμενων από μια συγκεκριμένη περιοχή εκτεθειμένη στις συνέπειες ενός ατυχήματος προς ασφαλείς χώρους έξω απ' την πληγείσα ή απειλούμενη περιοχή, (γ) έλεγχος εισόδου στην απειλούμενη περιοχή, (δ) ιατρική βοήθεια (μεταφορά τραυματιών σε νοσοκομεία, απολύμανση), (ε) ειδικές δράσεις (π.χ. έλεγχος κατανάλωσης νερού και τροφών μολυσμένων από τοξικά, προστασία των παροχών νερού, προστασία του συστήματος αποχέτευσης). Οι περιοχές που έχουν ανάγκη προστατευτικών δράσεων αναγνωρίζονται κατά τη διαδικασία ανάλυσης κινδύνου και καλούνται ευαίσθητες ζώνες. Στις δράσεις για την προστασία του πληθυσμού θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια.
- **Ιατρική Υποστήριξη & Δημόσια Υγεία:** Αφορά στις διαδικασίες που προκαθορίζονται με σκοπό την άμεση παροχή των απαραίτητων ιατρικών υπηρεσιών κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος. Ιατρική βοήθεια μπορεί να χρειαστεί στον τόπο του ατυχήματος, αλλά και στη ζώνη των προστατευτικών δράσεων.
- **Επιλογή σχεδίου δράσης σε «πραγματικό χρόνο»:** Για τη διαδικασία αυτή απαιτούνται πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί εκ των προτέρων, καθώς και στοιχεία της πραγματικής κατάστασης όπως διαμορφώνεται από το ίδιο το συμβάν και τη στιγμή της εκδήλωσής του, δηλαδή μετεωρολογικές συνθήκες, διαθεσιμότητα και θέση μέσων, κυκλοφοριακές συνθήκες, ώρα εκδήλωσης ατυχήματος, χρόνος συναγερμού των αρχών από τη βιομηχανία, διαθεσιμότητα αρχικών στοιχείων και άλλες παράμετροι που δεν μπορεί να προβλεφθούν. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ανάλυση κινδύνου σε «πραγματικό χρόνο» χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που είτε

συνοδεύουν το σήμα συναγερμού, είτε συλλέγονται από τις πρώτες ομάδες επέμβασης.

3.2.3 ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Οι καταστροφικές συνέπειες των ατυχημάτων μεγάλης έκτασης δεν περιορίζονται στον άνθρωπο και στη δημόσια υγεία. Όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το περιβάλλον μπορεί ανάλογα με το είδος του κινδύνου να υποστεί σοβαρές βλάβες, ορισμένες εκ των οποίων απαιτούν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για την αποκατάσταση. Επίσης, η κοινωνική και προσωπική ζωή των κατοίκων της περιοχής που επλήγη από τις συνέπειες ενός ατυχήματος υφίσταται τις απότομες και δραματικές αλλαγές.

Όπως και σε κάθε περίπτωση φυσικών ή τεχνολογικών καταστροφών, τα μέτρα αποκατάστασης των πληγέντων και του περιβάλλοντος βαρύνουν τις αρμόδιες αρχές και την πολιτεία. Η διαχείριση ενός ατυχήματος μπορεί να τροφοδοτήσει τους αρμόδιους για την αποκατάσταση φορείς με σημαντικά στοιχεία για το είδος της βλάβης που πρέπει να διορθωθεί και για τις τεχνικές που ενδείκνυται να εφαρμοστούν, ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις διασποράς τοξικών ουσιών.

3.3 ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

3.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο πλαίσιο το σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης για ατυχήματα μεγάλης έκτασης (πυρηνικά ατυχήματα, ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται επικίνδυνες ουσίες), εφαρμόζονται προστατευτικές δράσεις (protective actions) για την προστασία του πληθυσμού.

Οι δράσεις αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν την εκκένωση τμήματος του πληθυσμού μιας περιοχής, την προστασία σε σπίτια ή σε ειδικά διαμορφωμένα κτήρια, την παροχή μέσων ατομικής προστασίας, την παροχή αντιδωτών (ανάλογα με το είδος της έκθεσης) κ.ά.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικά με τις προστατευτικές δράσεις για τον πληθυσμό σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης (χημικού ή ραδιολογικού) ή ακόμη και για άλλες περιπτώσεις καταστροφών, π.χ. (Hedemann-Jensen 2004; Rogers et al. 1990; Sohler 2002; Sorensen et al. 2004). Στους παράγοντες που αναφέρονται, μεταξύ άλλων, οι οποίοι επηρεάζουν τις σχετικές αποφάσεις είναι: η διαθεσιμότητα μέσων και υποδομών όσον αφορά στην πυρόσβεση, τη μεταφορά, την επικοινωνία, τις παροχές υγείας, την ύπαρξη καταφυγίων, μέσων ατομικής προστασίας κ.λπ. Επίσης, οργανωτικά ζητήματα, όπως η εκπαίδευση του προσωπικού έκτακτης ανάγκης και του πληθυσμού, είναι πλευρές που περιγράφονται στη βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά βασικών πλευρών που σχετίζονται με αυτές τις προστατευτικές δράσεις.

3.3.2 ΕΚΚΕΝΩΣΗ

Η εκκένωση αποτελεί μια βασική προστατευτική πολιτική σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης ή και φυσικής καταστροφής. Περιλαμβάνει τη μετακίνηση πληθυσμού από την περιοχή που απειλείται, είτε μέσω κάποιου μεταφορικού μέσου (π.χ. αυτοκίνητο, λεωφορεία κλπ), είτε με τα πόδια.

Συνήθως αναφερόμαστε σε δύο είδη εκκένωσης, την προληπτική (precautionary) και την ενεργητική (reactive). Στην πρώτη περίπτωση η εκκένωση πραγματοποιείται πριν από την έκλυση της επικίνδυνης ουσίας (π.χ. σε περίπτωση που λόγω φωτιάς σε μια εγκατάσταση με επικίνδυνες ουσίες υπάρχει πιθανότητα αστοχίας εξοπλισμού, που δεν έχει όμως ακόμη πραγματοποιηθεί). Στη δεύτερη περίπτωση η εκκένωση πραγματοποιείται αφού έχει λάβει χώρα η αστοχία και η έκλυση της επικίνδυνης ουσίας στην ατμόσφαιρα (Rogers and Shar 1990).

3.3.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ

Στη σχετική βιβλιογραφία η προστασία σε κάποιο κτήριο χαρακτηρίζεται με το γενικό όρο “in-place protection” ή αλλιώς “in-place sheltering”. Η προστασία αυτού του είδους αφορά στη μετακίνηση ή την παραμονή του πληθυσμού για προστασία του σε κάποιο είδος κτηριακής εγκατάστασης.

Για την περίπτωση των επικίνδυνων ουσιών, αναφέρονται οι ακόλουθες επιλογές (Rogers and Shar 1990):

- μετακίνηση-παραμονή σε υπάρχοντα κτήρια (π.χ. κατοικίες) που δεν έχουν υποστεί κάποια ειδική μετατροπή για να χρησιμοποιηθούν ως ειδικά καταφύγια (normal sheltering)
- μετακίνηση-παραμονή σε υπάρχοντα κτήρια (π.χ. κατοικίες) που έχουν υποστεί προσωρινά κάποια πρόχειρη μετατροπή ώστε να μειωθεί η εισροή αέρα, για παράδειγμα με χρήση ταινιών, πλαστικών υλικών, βρεγμένων υφασμάτων κ.λπ. (expedient sheltering)
- μετακίνηση-παραμονή σε κτήρια στα οποία η παροχή αέρα έχει μειωθεί μέσω τεχνικών εξαερισμού, πριν την εκδήλωση του ατυχήματος (enhances sheltering)
- μετακίνηση-παραμονή σε ειδικά κτήρια που έχουν σχεδιαστεί για τη προστασία του πληθυσμού σε περίπτωση χημικού ατυχήματος (specialized sheltering)
- μετακίνηση-παραμονή σε απλά ή ειδικά κτήρια τα οποία έχουν υποστεί αποσυμπίεση ώστε να αντικατασταθεί η επικίνδυνη ατμόσφαιρα με καθαρό αέρα (pressurized sheltering).

Για την εκτίμηση του βαθμού προστασίας κάθε κτηρίου, στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται ότι πρέπει να εκτιμηθεί ο ρυθμός εναλλαγής αέρα (“air changes per hour”). Συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος ACH. Αναφέρεται μάλιστα ότι για να είναι αποτελεσματική η προστασία εντός κτηρίων είναι σημαντικό να τερματιστεί κάποια χρονική στιγμή ανάλογα

με το είδος του ατυχήματος και το είδος των κτηρίων (Argonne National Laboratory 2001; Mannan and Kilpatrick 2000; Rogers and Shar 1990; Rogers et al. 1990).

3.3.4 ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

3.3.4.1 Μέσα ατομικής προστασίας

Στο πλαίσιο της εφαρμογής προστατευτικών δράσεων για τον πληθυσμό, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μέσα ατομικής προστασίας, δηλ. κατάλληλες μάσκες, στολές κ.λπ. Ανάλογα με τον τύπο της επικίνδυνης ουσίας ή για την περίπτωση ραδιολογικού ατυχήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά είδη μέσων ατομικής προστασίας τα οποία προσφέρουν διαφορετικό βαθμό προστασίας (Daugherty et al. 1992; Rogers and Shar 1990).

3.3.4.2 Άλλα μέτρα

Ανάλογα με τη φύση της επικίνδυνης ουσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ορμισμένα φάρμακα προληπτικά ώστε να μειωθούν τα αποτελέσματα της έκθεσης των ανθρώπων ή και αντίδοτα (Rogers and Shar 1990).

Στην περίπτωση ραδιολογικών ατυχημάτων χορηγούνται ταμπλέτες ιωδίου (ΙΑΕΑ 1997). Ο όρος που χρησιμοποιείται είναι “iodine prophylaxis” ή/και “stable iodine prophylaxis, thyroïd blocking, iodine administration”. Επίσης, αναφέρονται και άλλα μέτρα, όπως η αποφυγή κατανάλωσης γαλακτοκομικών και άλλων τροφίμων.

3.3.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΡΑΖΟΜΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΠΛΗΘΥΣΜΟ

Η επιλογή καταλληλότερης προστατευτικής δράσης για τον πληθυσμό πρέπει να λάβει υπόψη μια σειρά κριτηρίων.

Με κριτήριο την προστασία της υγείας του πληθυσμού, η απόφαση μεταξύ των βασικών προστατευτικών κατευθύνσεων δράσης, δηλ. της εκκένωσης ή της προστασίας σε κτήρια, πρέπει να βασίζεται αφενός στο αν υπάρχει επαρκής χρόνος για την πραγματοποίηση της εκκένωσης και αφετέρου στο αν η προστασία στα κτήρια θα είναι επαρκής. Στο βαθμό που δεν υπάρχει επαρκής χρόνος, η εκκένωση όλου του πληθυσμού μιας περιοχής μπορεί να αυξήσει την επικινδυνότητα. Αφετέρου συνεπάγεται μεγάλο «κοινωνικοοικονομικό κόστος».

Από την άλλη, η προστασία σε κτήρια που δεν εμποδίζουν επαρκώς την είσοδο ενός τοξικού νέφους για παράδειγμα, όχι μόνο δεν θα προστατεύσει τον πληθυσμό, αλλά αντίθετα, μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη έκθεση.

Παράγοντες που σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή προστατευτικής ενέργειας είναι (IAEA 1997; Rogers et al. 1990; Sorensen et al. 2004):

- ❖ Η επάρκεια χρόνου και μέσων για την πραγματοποίηση εκκένωσης, σε συνδυασμό με τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Σημαντικός παράγοντας είναι επίσης η εκπαίδευση και ενημέρωση του πληθυσμού με ασκήσεις ετοιμότητας για μια τέτοια διαδικασία και η διαδικασία προειδοποίησης για την εφαρμογή της εκκένωσης. Οι παράγοντες αυτοί είναι εξίσου σημαντικοί και για την προειδοποίηση και μετακίνηση του πληθυσμού στα σπίτια ή στα ειδικά κτήρια.
- ❖ Το είδος, η ποσότητα και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εκλύεται μια επικίνδυνη ουσία. Η προστασία σε κτήρια προτάσσεται στις περιπτώσεις διαρροής τοξικών ουσιών, δεδομένου ότι στην περίπτωση εύφλεκτων και εκρηκτικών ουσιών δε συνιστάται. Υπάρχουν βεβαίως και ερευνητές που αναφέρουν ότι ακόμη και σε ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται εύφλεκτες ουσίες, αν δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για εκκένωση αυτού του είδους, η προστασία σε κτήρια μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να βοηθήσει. Η προστασία σε κτήρια είναι κατάλληλη για μικρό χρονικό διάστημα στην αρχή της διαρροής, ωστόσο, στη συνέχεια μπορεί να αυξήσει τη δόση επικίνδυνης ουσίας που θα ληφθεί από τα άτομα που προστατεύονται στα κτήρια, στο βαθμό που υπάρχει είσοδος επικίνδυνης ουσίας.
- ❖ Οι μετεωρολογικές συνθήκες, πέρα από το ότι έχουν σημασία ως προς την επέκταση του νέφους σε ορισμένες περιοχές, επιδρούν επίσης στο επίπεδο προστασίας των ανθρώπων εντός των κτηρίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο περισσότερο πιθανό είναι να εισέλθει μεγαλύτερη ποσότητα επικίνδυνων ουσιών εντός των κατασκευών. Αντίστοιχα, η διείσδυση (infiltration) επικίνδυνης ουσίας εντός των κατασκευών επηρεάζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας εντός και εκτός αυτών.
- ❖ Ιδιαίτερη σημασία έχει το είδος των κτηρίων ή των μέσων (π.χ. αυτοκινήτων) που είναι διαθέσιμα για προστασία. Παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο προστασίας είναι η ηλικία του κτηρίου, το αν υπάρχουν υποδομές και εξοπλισμός για εξοικονόμηση ενέργειας, τα συστήματα εξαερισμού, το είδος των παραθύρων κ.ά.
- ❖ Άλλοι παράγοντες που επίσης επηρεάζουν τις αποφάσεις αφορούν σε μια σειρά οργανωτικών ζητημάτων για την πραγματοποίηση της κάθε ενέργειας, όπως επίσης και στην υποκειμενική γνώμη του πληθυσμού για το επίπεδο προστασίας.

Οι παραπάνω παράμετροι αναφέρονται αντίστοιχα και για την περίπτωση των ραδιολογικών ατυχημάτων (IAEA 1997; WHO 1999).

Στη βιβλιογραφία, η πλειοψηφία των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της κατάλληλης προστατευτικής ενέργειας, περιλαμβάνουν λίστες ελέγχου, πίνακες και δένδρα αποφάσεων με παραμέτρους όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω (βλ. για παράδειγμα (Chan 2006; Glickman and Ujihara 1990; Papamichail and French 2000; Sorensen et al. 2004; Wilson and Morrison 2000)). Υπάρχουν επίσης αναφορές σχετικά με το συνδυασμό προστατευτικών δράσεων ενώ έχουν αναπτυχθεί και σχετικά μοντέλα (Rogers and Shar 1990; Wein et al. 2010).

Για παράδειγμα, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται κριτήρια με τα οποία αξιολογείται μια προστατευτική ενέργεια με βάση κάποια χαρακτηριστικά για περιπτώσεις εκλύσεων επικίνδυνων ουσιών (Sorensen et al. 2004).

Πίνακας 3.3.1: Λίστα ελέγχου για επιλογή προστατευτικών ενεργειών.

Χαρακτηριστικό	Προστασία σε κτήρια	Εκκένωση
Διείσδυση νέφους	Στεγανά κτήρια	Μη στεγανά κτήρια
Διάρκεια νέφους	Μικρή	Μεγάλη
Ώρα της ημέρας	Νύχτα	Ημέρα
Πυκνότητα πληθυσμού	Υψηλή	Χαμηλή
Γεωμετρία οδικού δικτύου	Κλειστή	Ανοιχτή
Συνθήκες οδικού δικτύου	Κακές	Καλές
Κινητικότητα πληθυσμού	Χωρίς μέσο μετακίνησης	Με μέσο μετακίνησης
Κυκλοφοριακές συνθήκες	Εμποδιζόμενες	Ανεμπόδιστες
Υποκειμενική γνώμη πληθυσμού για το επίπεδο προστασίας των κτηρίων	Θετική	Αρνητική
Τοξικότητα	Υψηλή	Χαμηλή

ΠΗΓΗ: (Sorensen et al. 2004)

Άλλο παράδειγμα ενδεικτικό αποτελεί ο Πίνακας 3.3.2 στον οποίο αναφέρονται σύμφωνα με τους Paramichail and French κριτήρια και περιορισμοί με βάση τους οποίους μπορεί να αξιολογηθεί το «εφικτό» μιας στρατηγικής στην περίπτωση ραδιολογικού ατυχήματος (Paramichail and French 2000).

Αντίστοιχα, για την περίπτωση των ραδιολογικών ατυχημάτων, αναφέρονται τιμές δόσεων (avertable dose) με βάση τις οποίες επιλέγονται οι κατάλληλες προστατευτικές ενέργειες:

- 10 mSv για προστασία σε κτήρια
- 50-100 mSv για προσωρινή εκκένωση
- 100 mSv για προφύλαξη με ιώδιο.

Οι τιμές αυτές προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς (IAEA, WHO, FAO, ILO, NEA/OECD, PAHO) (IAEA 2011).

Πίνακας 3.3.2: Επιλογή στρατηγικής για πολιτική προστασίας.

Παράγοντας	Χαρακτηριστικό	Περιορισμοί - Κριτήρια	
		για να συμπεριληφθεί η στρατηγική	για αποκλεισμό της στρατηγικής
«Εφικτό» της εκκένωσης	Απαραίτητος χρόνος για να εκκενωθεί μια περιοχή	Στρατηγικές για τις οποίες ο απαραίτητος χρόνος εκκένωσης είναι \leq από τον ελάχιστο εκτιμώμενο χρόνο για ασφαλή εκκένωση	Στρατηγικές για τις οποίες ο απαραίτητος χρόνος εκκένωσης είναι $>$ από τον ελάχιστο εκτιμώμενο χρόνο για ασφαλή εκκένωση
Επίπεδα έκθεσης	Επίπεδο δόσης	Στρατηγικές με δόση $<$ όριο	Στρατηγικές με δόση $>$ όριο
Συνέχεια της θεραπείας	Τοποθεσία περιοχής σε σχέση με γειτονικές όπου ακολουθείται μια προστατευτική ενέργεια	Οι στρατηγικές που λαμβάνουν χώρα σε συνέχεια (και σε περιοχές κοντινές και μακριά από την πηγή κινδύνου)	Οι στρατηγικές που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές μακριά από την πηγή κινδύνου και όχι σε γειτονικές περιοχές κοντά στην πηγή κινδύνου
Κατεύθυνση έκλυσης	Περιοχές που επηρεάζονται από το «πλούμιο» της ακτινοβολίας	Στρατηγικές που εφαρμόζουν προστατευτικά μέτρα σε περιοχές από τις οποίες περνάει το «πλούμιο»	Στρατηγικές που εφαρμόζουν προστατευτικά μέτρα σε περιοχές που δεν επηρεάζονται από την ακτινοβολία
«Εφικτό» των προστατευτικών μέτρων. Μέσα και υποδομές που είναι διαθέσιμα.	Εφικτό των προστατευτικών μέτρων ή συνδυασμός προστατευτικών μέτρων	<u>Παράδειγμα:</u> Στρατηγικές που επιβάλλουν τη διανομή ταμπλέτων ιωδίου μόνο σε περιοχές που υπάρχει προσωπικό και υποδομή για να γίνει αυτό	<u>Παράδειγμα:</u> Στρατηγικές που επιβάλλουν εκκένωση και προστασία σε καταφύγια ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή

ΠΗΓΗ: (Papamichail and French 2000)

Πρέπει να επισημανθεί ότι στις μεθοδολογίες για την επιλογή καταλληλότερης προστατευτικής πολιτικής, το κριτήριο της επικινδυνότητας στην υγεία του πληθυσμού καθορίζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με βάση την ένταση των φαινομένων που ακολουθούν το ατύχημα, δηλ. της συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας, της έντασης της θερμικής ακτινοβολία ή της υπερπίεσης σε κάθε σημείο του χώρου. Στην πραγματικότητα, παράγοντες όπως οι κυκλοφοριακές συνθήκες που δημιουργούνται όταν εφαρμόζεται μια προστατευτική ενέργεια όπως η εκκένωση, λαμβάνοντας υπόψη και τη δυναμική φύση της επιλογής διαδρομής από τον πληθυσμό, επηρεάζει την επικινδυνότητα. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας στην υγεία του πληθυσμού δεν πρέπει να βασίζεται μόνο στην ένταση του φαινομένου αλλά στη δόση επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται πέρα από την ένταση του φαινομένου και από τη διάρκεια έκθεσης και σε τελευταία ανάλυση από τις διαδρομές εκκένωσης. Γι' αυτό είναι αναγκαία η βελτιστοποίηση της στρατηγικής απόκρισης λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά παράγοντες, ζήτημα που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Στο ζήτημα θα αναφερθούμε εκτενέστερα στα κεφάλαια 5 και 6.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της εφαρμογής της οδηγίας Seveso στην Ελλάδα, το Υπουργείο περιβάλλοντος (πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ) έχει προωθήσει άμεσα και μέσω Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων την εκτέλεση έργων σχεδιασμού και ετοιμότητας για την αντιμετώπιση πιθανών βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης στις πιο βιομηχανοποιημένες περιοχές της χώρας.

Μεταξύ των έργων περιλαμβάνονται η δημιουργία κινητών επιχειρησιακών κέντρων για την αντιμετώπιση βιομηχανικών ατυχημάτων και η εκπόνηση Σχεδίων Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (ΣΑΤΑΜΕ) για το Θριάσιο Πεδίο, τη βιομηχανική περιοχή Θεσσαλονίκης, τον Πειραιά, το Πέραμα κ.λπ.

Στη συνέχεια γίνεται ενδεικτική αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας του Επιχειρησιακού Κέντρου το οποίο αποτελεί και τον κορμό του συστήματος διαχείρισης ατυχημάτων μεγάλης έκτασης. Περισσότερες πληροφορίες περιλαμβάνονται στη σχετική βιβλιογραφία (Μαρκάτος 1999; Kiranoudis et al. 2002; Kiranoudis et al. 1999). Επιπλέον, γίνεται συνοπτική αναφορά στις βασικές αρχές των ΣΑΤΑΜΕ, που αφορούν στα επίπεδα κινητοποίησης και τις προστατευτικές δράσεις για τον πληθυσμό.

3.4.2 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

3.4.2.1 Γενικά

Ένα Επιχειρησιακό Κέντρο για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην προσφορά ποσοτικών εκτιμήσεων των επιπτώσεων του ατυχήματος και στην επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής δράσεων που πρέπει να ακολουθηθούν. Παρακάτω αναλύεται η αρχιτεκτονική και οι λειτουργίες ενός τέτοιου υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε για την περιοχή του Θριασίου Πεδίου.

Συντονιστής του έργου ήταν το ΕΜΠ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Υπεύθυνος Ν.Χ. Μαρκάτος) με συνεργάτες το Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιχειρησιακής Έρευνας & Μάρκετινγκ, Εργαστήριο Μεταφορών & Εφοδιαστικής Διαχείρισης (Υπεύθυνος: Κ.Γ. Ζωγράφος) και το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας (Υπεύθυνος: Ι.Ζιώμας). Για την εκτέλεση του έργου βοήθησαν ως σύμβουλοι οι: Δρ. Ι.Α. Παπάζογλου, ΕΚΦΕ Δημόκριτος, Ινστιτούτο Πυρηνικής Τεχνολογίας & Ακτινοπροστασίας, Health & Safety Executive (HSE) της Αγγλίας (D.A. Carter) και Joint Research Center (JRC, Ispra) στην Ιταλία (S. Contini, Δρ. Γ. Παπαδάκης).

3.4.2.2 Αρχιτεκτονική και λειτουργία του επιχειρησιακού κέντρου

Το επιχειρησιακό κέντρο αντιμετώπισης ατυχημάτων μεγάλης έκτασης αποτελεί ένα υπολογιστικό εργαλείο απεικόνισης χαρακτηριστικών και παραμέτρων τέτοιου είδους ατυχημάτων, εκτίμησης ποσοτικών πληροφοριών που σχετίζονται με τις επιπτώσεις ενός συγκεκριμένου ατυχήματος και επιλογής προτάσεων που έχουν να κάνουν με τις ενδεχόμενες δράσεις προστασίας του πληθυσμού από το ατύχημα αυτό.

Η αρχιτεκτονική του επιχειρησιακού κέντρου που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) και περιφερειακά εργαλεία λογισμικού. Όλα τα περιφερειακά εργαλεία αντλούν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη λειτουργία τους από μια εξωτερική κεντρική βάση δεδομένων. Το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών μέσω κατάλληλων όψεων εκτελεί τις περισσότερες από τις λειτουργίες του κέντρου σε σύνδεση με τη βάση δεδομένων. Κάθε όψη περιέχει χαρτογραφικές πληροφορίες που κατανέμονται σε αντίστοιχους χάρτες υποβάθρου επικαιροποιημένους με φωτογραμμικές μεθόδους κατάλληλης κλίμακας και λεπτομέρειας. Μερικά από τα στοιχεία που περιέχονται στους χάρτες είναι τα όρια των δήμων, οι χρήσεις γης, οι υψομετρικές καμπύλες, τα οικοδομικά τετράγωνα, το οδικό δίκτυο σε πολύ μεγάλη λεπτομέρεια, το σιδηροδρομικό δίκτυο, ο αγωγός φυσικού αερίου, λεπτομερείς κατόψεις των επιχειρήσεων (Seveso και non-Seveso), το σύνολο των δεξαμενών στις εγκαταστάσεις αυτές, τα σημεία ενδιαφέροντος, οι δημόσιοι οργανισμοί, τα μέσα επέμβασης και κατάσβεσης, το σύνολο των πληθυσμιακών κέντρων ανά οικοδομική περιοχή και οι περιοχές μαζικής μεταφοράς του πληθυσμού². Στο σχήμα φαίνεται ενδεικτικά η φόρμα εισαγωγής δεδομένων για τις Νομαρχίες.

Πολύ σημαντικό ρόλο έχει η βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τοπικής βιομηχανικής και διοικητικής δραστηριότητας (εταιρείες, δεξαμενές, αποθήκες φυτοφαρμάκων, σημεία ενδιαφέροντος, δεδομένα πληθυσμιακής κατανομής και λεπτομερή δεδομένα οδικού δικτύου περιοχής). Αποτελεί, επίσης, κοινό «αποθηκευτικό χώρο» για τα δεδομένα των περιφερειακών εργαλείων λογισμικού. Αξίζει να αναφέρουμε τα δεδομένα που περιέχονται στη βάση δεδομένων, σχετικά με τις ουσίες που εμπλέκονται σε πιθανά βιομηχανικά ατυχήματα στην περιοχή. Περιέχονται δεδομένα ως προς την τοξικότητα, την αναφλεξιμότητα ή τη χημική τους αστάθεια, σημαντικές πληροφορίες που αφορούν στην πυρόσβεση, στις σημαντικότερες δράσεις που εμπλέκονται στην προστασία του πληθυσμού από την προσβολή από τη συγκεκριμένη χημική ουσία κ.ά. (βλ. ενδεικτικά φόρμες παρουσίασης δεδομένων για τις χημικές ουσίες, στο σχήμα που ακολουθεί).

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων (μέσω του προσομοιωτή ατυχημάτων) από κάποιο βιομηχανικό ατύχημα χρησιμοποιούνται ανάλογα μαθηματικά πρότυπα που προσδιορίζουν το μέγεθος και τις συνέπειες με βάση το είδος του ατυχήματος και σχετικές πληροφορίες που δίνονται από το χρήστη. Τα μαθηματικά πρότυπα είναι βασισμένα σε διεθνώς αποδεκτές και χρησιμοποιούμενες επιστημονικές θεωρίες, μεθόδους και απόψεις και τα

² Το επιχειρησιακό κέντρο αναπτύχθηκε με πληροφορίες που αφορούν τις βιομηχανίες και εταιρείες του Θρησίου Πεδίου και της Θεσσαλονίκης.

αποτελέσματα έχουν συγκριθεί με αντίστοιχους σε κώδικες λογισμικού, αποδεκτούς για την ορθότητα της εκτίμησής τους στην αντίστοιχη περιοχή. Αντιμετωπίζονται συνολικά 31 περιπτώσεις ατυχημάτων (εκρήξεις, πυρκαγιές, διαρροή τοξικών, διαρροή βαρέως αερίου), καθώς επίσης και οι αντίστοιχες επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας κατάλληλα μαθηματικά πρότυπα διασποράς. Η εκτίμηση των επιπτώσεων του ατυχήματος γίνεται με τον προσδιορισμό τριών βασικών ζωνών επιπτώσεων, ανάλογα με την ένταση του ατυχήματος και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν (βλ. στην επόμενη ενότητα). Στην περίπτωση της προσομοίωσης ατυχημάτων που προέρχονται από πυρκαγιές σε χώρους αποθήκευσης τοξικών υλικών (διασπορά τοξικών) προσδιορίζεται και το πλούμιο διασποράς με βάση τις τρέχουσες μετεωρολογικές συνθήκες. Η επικοινωνία του εργαλείου αυτού με το σύστημα γίνεται μέσω της κοινής βάσης δεδομένων του συστήματος.

Για την τροφοδότηση του χρήστη με το κατάλληλο υπόβαθρο δράσεων, που θα μπορούσαν να προστατεύσουν αποτελεσματικότερα τον πληθυσμό, υπεύθυνο είναι το Σύστημα Στήριξης Αποφάσεων (DSS), το οποίο προτείνει τον καλύτερο δυνατό τρόπο εκκένωσης μιας περιοχής στην περίπτωση που αυτή αποφασιστεί από τα αντίστοιχα πολιτικά όργανα (βλ. ενδεικτικά στο σχήμα).

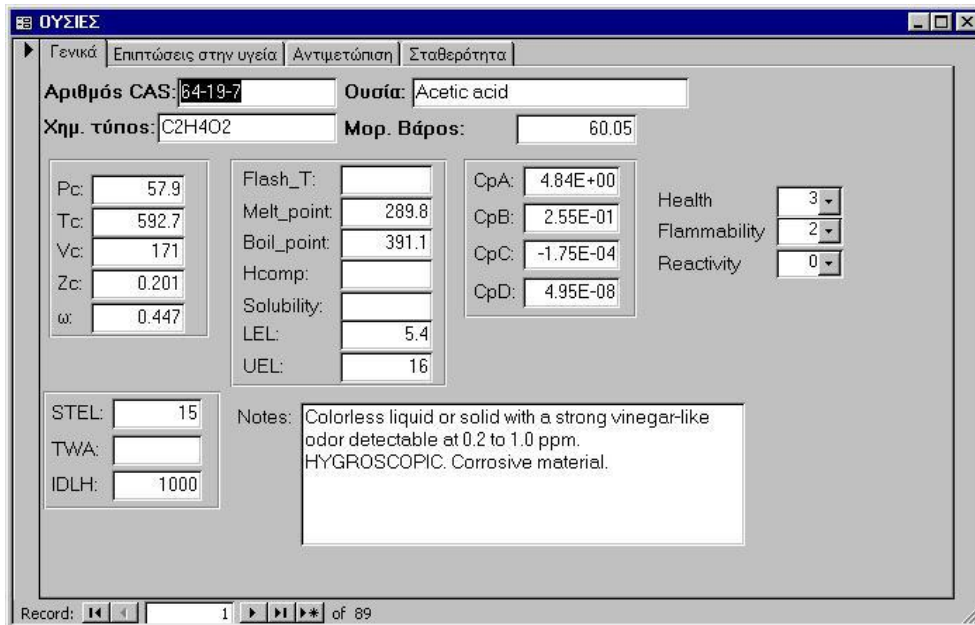


	name	population	area
▶	Οινόη	495	14431
	Νέα Πέραμος	6869	5525
	Ασπρόπυργος	15715	101983
	Ελευσίνα	22973	18455

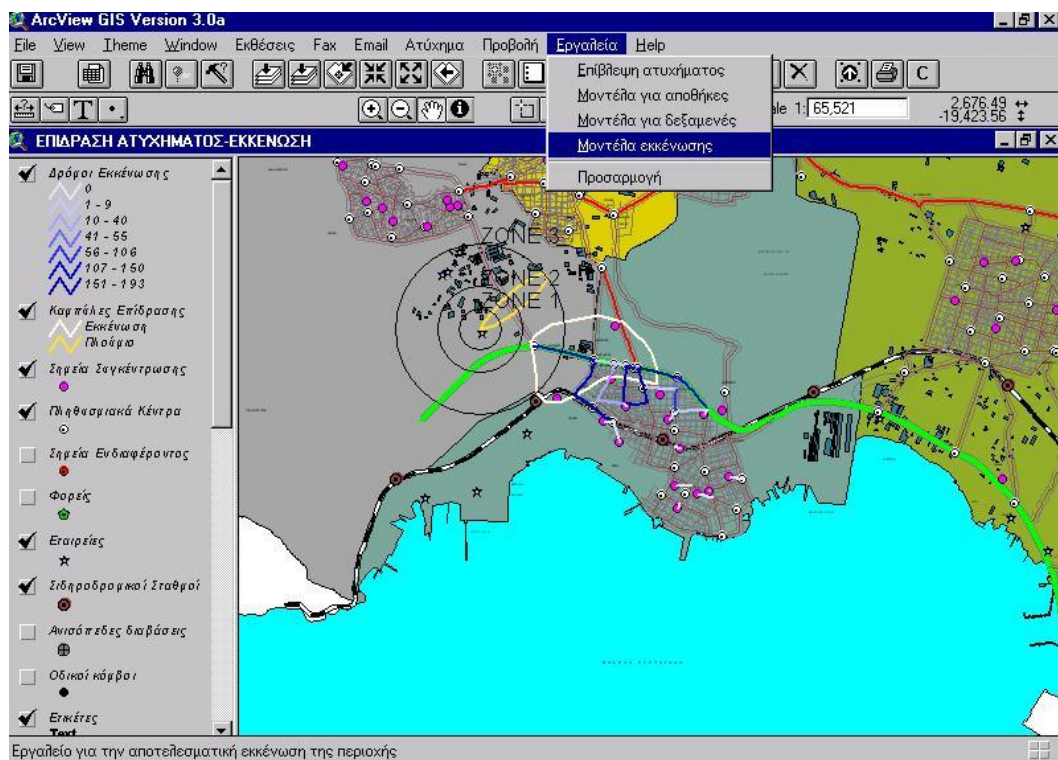
Record: 1 of 12

Record: 3 of 3

Σχήμα 3.4.1: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων για τις Νομαρχίες.



Σχήμα 3.4.2: Φόρμα δεδομένων χημικών ουσιών.



Σχήμα 3.4.3: Σύστημα στήριξης αποφάσεων (εκκένωση).

3.4.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

3.4.3.1 Γενικά

Στο πλαίσιο των ΣΑΤΑΜΕ, βασικό τμήμα αποτελεί εκείνο στο οποίο αναγνωρίζονται και περιγράφονται οι λειτουργίες που ενεργοποιούνται σε «πραγματικό χρόνο» για την αποτελεσματική αντιμετώπιση τυχόν ατυχήματος στην περιοχή στην οποία απευθύνεται το σχέδιο (ΕΜΠ 1998).

Στο τμήμα αυτό περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τα ακόλουθα:

- **Αρχική Ειδοποίηση & Κινητοποίηση:** καθορίζονται οι ευθύνες και οι διαδικασίες ειδοποίησης/κινητοποίησης των αρμοδίων φορέων σε περίπτωση ατυχήματος, ενώ επιχειρείται ο καθορισμός συγκεκριμένων κριτηρίων αξιολόγησης ενός περιστατικού όσον αφορά στη σοβαρότητά του και στην ενδεδειγμένη κινητοποίηση του μηχανισμού αντιμετώπισης.
- **Διεύθυνση & Έλεγχος αντιμετώπισης:** αφορά στο συντονισμό και στη διαχείριση των δράσεων αντιμετώπισης ενός ατυχήματος (ιεραρχία, αρμόδιοι λήψης αποφάσεων) μεταξύ των διαφορετικών διοικητικών επιπέδων της χώρας, αλλά και μεταξύ των συμμετεχόντων φορέων σε τοπικό επίπεδο.
- **Τηλεπικοινωνίες έκτακτης ανάγκης:** αναγνωρίζονται οι υφιστάμενες δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ των συμμετεχόντων στη διαχείριση ενός ατυχήματος. Οι τηλεπικοινωνίες έχουν καθοριστική σημασία στην υλοποίηση του όποιου οργανωτικού πλαισίου για την αντιμετώπιση μιας έκτακτης ανάγκης, δεδομένου ότι η άμεση και αξιόπιστη ροή πληροφοριών αποτελεί προϋπόθεση για το συντονισμό των συμμετεχόντων και την επιτυχή διαχείριση μιας έκτακτης ανάγκης.
- **Προειδοποίηση / Ενημέρωση κοινού:** πραγματοποιείται την ενημέρωση του κοινού είτε σε κανονικές συνθήκες (πριν συμβεί ατύχημα), είτε κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος.
- **Ασφάλεια Προσωπικού Επέμβασης:** προσδιορίζονται το προσωπικό (ομάδες) επέμβασης, τα επίπεδα του εξοπλισμού προστασίας του, καθώς και οι ενδεδειγμένες διαδικασίες/προφυλάξεις για την εκτέλεση της αποστολής του με τη μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια.
- **Προστασία Κοινού:** προσδιορισμός των προστατευτικών δράσεων για την προστασία του κοινού από τις συνέπειες ενός ατυχήματος και ο τρόπος διαχείρισης και ελέγχου τους γύρω από το σημείο του συμβάντος ανάλογα με τη σοβαρότητά του.
- **Δημόσια υγεία και Ιατρική Υποστήριξη.**

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά σε βασικές πλευρές που αφορούν στην προστασία του κοινού, δηλ. του πληθυσμού που εργάζεται και κατοικεί στην περιοχή στην οποία ενδέχεται να συμβεί ατύχημα.

3.4.3.2 Προστασία κοινού

3.4.3.2.1 Ευαίσθητες ζώνες (ζώνες επικινδυνότητας)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, «Ευαίσθητη Ζώνη» καλείται μια συγκεκριμένης έκτασης γεωγραφική περιοχή γύρω από το συμβάν που είναι δυνατόν να υποστεί τις συνέπειες ενός ατυχήματος μεγάλης έκτασης σε επίπεδα τέτοια που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία (θάνατος, σοβαροί τραυματισμοί ή ενοχλήσεις). Ο ορισμός των ευαίσθητων ζωνών βασίζεται στην εκτίμηση των επιπέδων έκθεσης ανάλογα με το είδος ενός ατυχήματος (συγκέντρωση επικίνδυνης ουσίας στην ατμόσφαιρα, ένταση θερμικής ακτινοβολίας ή ένταση ωστικού κύματος) και στην εφαρμογή συγκεκριμένων ορίων επικινδυνότητας για κάθε ζώνη και κάθε φυσικό μέγεθος.

Οι ευαίσθητες ζώνες προσδιορίζονται με βάση τη μεθοδολογία της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας (Smit 1993) και έχουν ως εξής :

- **Ζώνη I - Προστασία Δυνάμεων Καταστολής:** αντιστοιχεί στη Ζώνη πιθανών θανάτων της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας και αντιστοιχεί στην πιθανότητα να συμβεί θάνατος από εισπνοή τοξικής ουσίας στο 50% του πληθυσμού ή εγκαύματα γ' βαθμού από ακτινοβολία σε ποσοστό πάνω από το 50% του πληθυσμού ή σοβαρές ζημιές στους εξωτερικούς τοίχους από ωστικό κύμα σε ποσοστό 50%.
- **Ζώνη II - Προστασία Πληθυσμού - Σοβαρές Επιπτώσεις :** αντιστοιχεί στη Ζώνη σοβαρών τραυματισμών της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας και αντιστοιχεί στην πιθανότητα να συμβεί θάνατος από εισπνοή τοξικής ουσίας στο 1% του πληθυσμού ή εγκαύματα γ' βαθμού από ακτινοβολία στο 1% του πληθυσμού ή καταρρεύσεις στεγών και ζημιές σε τοίχους και πόρτες από ωστικό κύμα.
- **Ζώνη III - Προστασία Πληθυσμού - Μέτριες Επιπτώσεις :** αντιστοιχεί στη Ζώνη μικρών τραυματισμών της Ολλανδικής Πυροσβεστικής Ακαδημίας και αντιστοιχεί στην πιθανότητα να συμβούν ανατάξιμες βλάβες στην υγεία από εισπνοή τοξικής ουσίας ή εγκαύματα α' βαθμού από θερμική ακτινοβολία σε σημαντικό ποσοστό του πληθυσμού ή μικρές ζημιές σε κτήρια από ωστικό κύμα.

Για τον προσδιορισμό των ζωνών στην περίπτωση διαρροής τοξικών ουσιών, λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες οριακές τιμές:

- **LOC (Level of Concern):** Ορίζεται ως η συγκέντρωση στον αέρα μιας εξαιρετικά τοξικής ουσίας, πάνω από την οποία είναι δυνατόν να υπάρξουν βλάβες στην υγεία ενός ατόμου, για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα έκθεσης (30 min).
- **IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) :** Ορίζεται ως η μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας υγιής εργαζόμενος για 30 min και να διαφύγει χωρίς να υποστεί μη-ανατάξιμες βλάβες στην υγεία του ή τραυματισμούς που να εμποδίζουν τη διαφυγή του (κυρίως ερεθισμούς των ματιών ή των πνευμόνων). Στην παρούσα προσέγγιση το όριο IDLH ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (σε ελάχιστες περιπτώσεις υπάρχουν απευθείας τιμές του IDLH):

$$IDLH = 10 \cdot LOC \quad (3.1)$$

- **LC_{50} (Lethal Concentration 50):** Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανόν να συμβεί θάνατος στο 50% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (30 min). Στην παρούσα προσέγγιση ο προσδιορισμός γίνεται έμμεσα από το $IDLH$, με τη σχέση:

$$LC_{50} = 10 \cdot IDLH \quad (3.2)$$

- **LC_1 (Lethal Concentration 1):** Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανόν να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (30 min). Το όριο LC_1 ορίζεται έμμεσα από το LC_{50} με βάση τη συνάρτηση δόσης – απόκρισης

$$P = a + b \cdot \ln C^n \cdot t \quad (3.3)$$

και σύμφωνα με τη σχέση:

$$LC_1 = \exp \left[\ln LC_{50}^2 - 2.33 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

όπου: $t = 30 \text{ min}$, $b = 1$ και $n = 2$ για τα οργανοφωσφορικά, $n = 3.7$ για το NO_2 και $n = 2.4$ για το SO_2 (ΕΜΠ 1996).

- **Συnergιστική δράση τοξικών ουσιών:** Στην περίπτωση παρουσίας πολλών τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, εξετάζεται η περίπτωση της synergιστικής δράσης για τις ουσίες οι οποίες ανήκουν στην ίδια χαρακτηριστική ομάδα (π.χ. ομάδα οργανοφωσφορικών στα φυτοφάρμακα), ως ακολούθως:

$$C_{ef} = C \cdot \frac{A_{\max}}{A} \quad (3.5)$$

όπου C η συγκέντρωση τοξικής ουσίας, C_{ef} η ανοιγμένη συγκέντρωση της ουσίας, A_{\max} η οριακή τιμή της πλέον τοξικής ουσίας, A η οριακή τιμή της εξεταζόμενης ουσίας.

Για τον υπολογισμό των ζωνών στην περίπτωση της θερμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η συνάρτηση δόσης-απόκρισης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του TNO (TNO 1992). Πιο συγκεκριμένα, η σχέση αυτή για διάφορες μορφές εγκαυμάτων διατυπώνεται ως ακολούθως:

Έγκαυμα α' βαθμού :

$$P = -39.83 + 3.0186 \cdot \ln q^{4/3} \cdot t \quad (3.6)$$

Έγκαυμα β' βαθμού:

$$P = -43.14 + 3.0186 \cdot \ln q^{4/3} \cdot t \quad (3.7)$$

Έγκαυμα γ' βαθμού:

$$P = -36.38 + 2.56 \cdot \ln q^{4/3} \cdot t \quad (3.8)$$

όπου: q η ένταση ακτινοβολίας σε W/m^2 και t ο χρόνος σε sec.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα κριτήρια με βάση τα οποία καθορίζονται οι τρεις ζώνες επικινδυνότητας ανάλογα με την ένταση του φαινομένου που λαμβάνει χώρα (συγκέντρωσης τοξικής ουσίας, έντασης θερμικής ακτινοβολίας ή υπερπίεσης).

Πίνακας 3.4.1: Ευαίσθητες ζώνες και οριακές τιμές έντασης φαινομένων.

Ζώνες προστασίας	Τοξικές Ουσίες	Θερμική ακτινοβολία		Ώστικό κύμα
	Συγκέντρωση τοξικής ουσίας* (mg/m^3)	Δόση** (TDU)	Ένταση θερμικής ακτινοβολίας (KW/m^2)	Υπερπίεση (mbar)
Ζώνη I: Προστασία Δυνάμεων Καταστολής	LC ₅₀	1500	15	350
Ζώνη II: Προστασία Πληθυσμού - Σοβαρές Επιπτώσεις	LC ₁	450	6	140
Ζώνη III: Προστασία Πληθυσμού - Μέτριες Επιπτώσεις	IDLH	170	3	50

ΠΗΓΗ: (ΕΜΠ 1999; Christolis et al. 2008; Sebos et al. 2010)

* Ως μέγιστος χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή θεωρείται ο χρόνος $t=30$ min.

** Για φαινόμενο BLEVE ο χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή λαμβάνεται ίσος με τη διάρκεια του φαινομένου, ενώ για Pool fire ίσος με 40 s, οπότε η ένταση ακτινοβολίας για ακίνητο παρατηρητή για κάθε ζώνη αντιστοιχεί στις τιμές της σχετικής στήλης, δηλ. 15, 6, 3 KW/m^2 , αντίστοιχα ($1 \text{ TDU} = 1 (KW/m^2)^{4/3} \text{ s}$).

3.4.3.2.2 Προστατευτικές Δράσεις για το κοινό

Ανάλογα με το είδος και την έκταση της απειλής, μπορεί να υιοθετηθούν τα παρακάτω μέτρα:

- ✓ εκκένωση κατοίκων και διερχομένων από μια συγκεκριμένη περιοχή εκτεθειμένη στις συνέπειες ενός ατυχήματος, προς ασφαλείς χώρους έξω από την πληγείσα ή απειλούμενη περιοχή
- ✓ καταφύγιο σε εσωτερικούς χώρους
- ✓ έλεγχος εισόδου στην πληγείσα/απειλούμενη περιοχή
- ✓ ιατρική βοήθεια (μεταφορά τραυματιών σε νοσοκομεία, απολύμανση)
- ✓ ειδικές δράσεις (π.χ. έλεγχος κατανάλωσης νερού και τροφών μολυσμένων από τοξικά, προστασία των παροχών νερού, προστασία του συστήματος αποχέτευσης).

Ειδικότερα, με βάση τον καθορισμό των ζωνών επικινδυνότητας, οι κατευθύνσεις που δίνονται με βάση το ΣΑΤΑΜΕ είναι οι ακόλουθες:

- ✓ **Ζώνη I:** Σε αυτή τη ζώνη, οι προστατευτικές δράσεις που πρέπει να σχεδιαστούν είναι: (α) εγκλεισμός σε εσωτερικούς χώρους παρέχοντας στο κοινό τις απαραίτητες οδηγίες αυτοπροστασίας, (β) εκκένωση υποβοηθούμενη ή μη, όταν μπορεί να επιτευχθεί ασφαλώς για τη δημόσια υγεία.
- ✓ **Ζώνη II:** Αν και η πιθανότητα θνησιμότητας εξακολουθεί να υπάρχει, σε μικρότερο όμως ποσοστό, οι ευρισκόμενοι μέσα σε αυτήν την περιοχή κινδυνεύουν κύρια από σοβαρό τραυματισμό ή άλλες μη αντιστρεπτές βλάβες (ιδιαίτερα για τις ευπαθείς ομάδες πληθυσμού π.χ. νήπια, ασθενείς, ηλικιωμένοι κ.λπ.). Επομένως απαιτείται η λήψη άμεσων μέτρων προστασίας του κοινού που συνίστανται κυρίως στον εγκλεισμό στα σπίτια, χωρίς να αποκλείεται η εκκένωση όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές και υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος ασφαλούς απομάκρυνσης του πληθυσμού.
- ✓ **Ζώνη III:** Τυπικά, σε αυτή τη ζώνη παραμένει ο εγκλεισμός σε εσωτερικούς χώρους ως μέτρο προστασίας του πληθυσμού, αλλά σε συμβουλευτική βάση (σύσταση) και όχι ως διαταγή. Για τα ευαίσθητα σημεία ενδιαφέροντος που βρίσκονται σε αυτή τη ζώνη, θα πρέπει να προβλεφθούν προστατευτικές δράσεις δεδομένου ότι πρόκειται για ευπαθή πληθυσμό.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής απόκρισης στο πλαίσιο του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης γύρω από εγκαταστάσεις που μπορεί να προκαλέσουν τεχνολογικό ατύχημα μεγάλης έκτασης.

Σε κάθε πρόβλημα λήψης αποφάσεων, ο αποφασίζων ή οι αποφασίζοντες πρέπει να επιλέξουν μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών λύσεων σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αποτελούν να μέσα μέτρησης των επιδιώξεων του αποφασίζοντα και μπορεί να είναι ποσοτικά (π.χ. ποσότητα αέριων εκπομπών, καθαρό ετήσιο κέρδος κ.λπ.), ή ποιοτικά (εκφράζονται σε αριθμητική ή λεκτική κλίμακα). Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων τα κριτήρια είναι περισσότερα του ενός και συχνά είναι και αλληλοσυγκρουόμενα (π.χ. αύξηση ασφάλειας μιας εγκατάστασης-μείωση οικονομικού κόστους).

Η αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων εντάσσεται στην «*Επιχειρησιακή Έρευνα*» (*Operations Research*). Με τον όρο επιχειρησιακή έρευνα αυτό αναφερόμαστε «στην επιστήμη που ασχολείται με τη *βελτιστοποίηση* (optimization) της απόδοσης ενός συστήματος». Ειδικότερα, πρόκειται «για ένα σύνολο από τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα, δημιουργούν μια ποσοτική και ορθολογιστική βάση για τη λήψη αποφάσεων που θα βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του υπό μελέτη συστήματος» (Τσαντάς & Βασιλείου 2000).

Το πρώτο βήμα στην ανάλυση των προβλημάτων λήψης αποφάσεων είναι ο ολοκληρωμένος εντοπισμός των σκοπών. Μετά τον τελικό καθορισμό των σκοπών και αφού ο αποφασίζων έχει καταλήξει στα χαρακτηριστικά με τα οποία θα εκτιμηθεί η επίτευξη των σκοπών αυτών, είναι αναγκαία η μορφοποίηση του προβλήματος σε μαθηματικό μοντέλο. Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε ντετερμινιστικά ή προσδιοριστικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic), ανάλογα με το βαθμό ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας του περιβάλλοντος που περιέχουν.

Τα βασικά στοιχεία των προβλημάτων λήψης απόφασης είναι:

- ο αποφασίζων - *Decision maker*, που μπορεί να είναι ένας ή περισσότεροι (ομαδική λήψη αποφάσεων - group decision making)

- οι εναλλακτικές λύσεις - *Alternatives* (μεταβλητές απόφασης ή ελεγχόμενες μεταβλητές)
- ο σκοπός της απόφασης - *Objective*
- οι παράμετροι της απόφασης - *Decision parameters* (μη ελεγχόμενες μεταβλητές, επιδόσεις λύσεων)
- οι περιορισμοί της απόφασης - *Constraints*
- η ύπαρξη ή όχι αβεβαιότητας - *Uncertainty*.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, το πρόβλημα του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες, αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών σκοπών με κριτήρια που αφορούν στην υγεία του πληθυσμού και το «κοινωνικοοικονομικό κόστος» που σχετίζεται με την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών προστασίας. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη θεωρία των εξελικτικών (γενετικών) αλγορίθμων. Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας εκπονήθηκε στοχαστικό μοντέλο εκκένωσης βασισμένο στη θεωρία Markov. Αναπτύχθηκαν δυο είδη μοντέλων εκκένωσης. Η πλέον λεπτομερής λύση βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες της θεωρίας που αφορούν στα παραπάνω.

4.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η θεωρία των στοχαστικών διαδικασιών προέκυψε από την ανάγκη αντιμετώπισης ερωτημάτων που σχετίζονταν με την εφαρμογή της στατιστικής επιστήμης στη μελέτη φαινομένων στα οποία η ακολουθία ενδεχομένων στο χώρο και στο χρόνο αποτελούσε βασική παράμετρο (Κρητικού 2009).

Μια στοχαστική διαδικασία ή ανέλιξη ορίζεται ως εξής (Τσαντάς & Βασιλείου 2000):

«Στοχαστική διαδικασία είναι μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών ορισμένων σε ένα χώρο πιθανοτήτων (Ω, F, \mathbf{P}) . Εάν υπάρχει αριθμήσιμο πλήθος των μελών της οικογένειας, τότε η διαδικασία συμβολίζεται με X_1, X_2, X_3, \dots . Εάν το πλήθος των μελών της οικογένειας δεν είναι αριθμήσιμο, τότε η διαδικασία συμβολίζεται με $\{X(t): t \geq 0\}$ ή $\{X_t\}_{t \geq 0}$. Στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία ονομάζεται μια διαδικασία σε χρόνο διακριτό, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μια διακριτή διαδικασία σε χρόνο συνεχή».

Αντίστοιχα,

«Ο χώρος των καταστάσεων S , είναι ο χώρος που δημιουργείται απ' τις πιθανές τιμές X_t . Εάν $S = \{0, 1, 2, \dots\}$, αναφερόμαστε στη στοχαστική διαδικασία σαν μια στοχαστική διαδικασία με ακέραιες τιμές ή μια διακριτών καταστάσεων διαδικασία. Εάν $S = (-\infty, \infty)$ τότε η στοχαστική διαδικασία καλείται στοχαστική διαδικασία με πραγματικές τιμές. Εάν S είναι ο R^n τότε η στοχαστική διαδικασία καλείται n -διάστατη στοχαστική διαδικασία.

Η «κατάσταση» στις εφαρμογές συνήθως ορίζεται ανάλογα με το πρόβλημα και τους στόχους του μοντέλου. Γενικά, για μια στοχαστική διαδικασία διακρίνονται 4 περιπτώσεις (Παπακωνσταντίνου 1990):

- διακριτός χρόνος, διακριτό σύνολο καταστάσεων
- διακριτός χρόνος, συνεχές σύνολο καταστάσεων
- συνεχής χρόνος, διακριτό σύνολο καταστάσεων
- συνεχής χρόνος, συνεχές σύνολο καταστάσεων.

Στην ανάπτυξη της θεωρίας των στοχαστικών διαδικασιών πρωτοπόροι θεωρούνται οι Bachelier, Einstein, Lundberg, Rutherford – Geiger (Τσαντάρ & Βασιλείου 2000): Ο Bachelier το 1900 ανέλυσε τις μεταπτώσεις στις τιμές των προϊόντων στην αγορά και κατέληξε σε μια κατηγορία των στοχαστικών διαδικασιών. Η ίδια διαδικασία διαπιστώθηκε από τον Einstein το 1905 (κίνηση Brown). Ο Lundberg (1903) εξέτασε το ποσό εισπράξεων μιας ασφαλιστικής εταιρείας, με αποτέλεσμα μια κατηγορία στοχαστικών διαδικασιών ειδική περίπτωση της οποίας είναι η διαδικασία Poisson η οποία προτάθηκε από τον Erlang το 1905 σε ένα πρόβλημα συνωστισμού στις τηλεφωνικές γραμμές. Ο Geiger το 1908 μελέτησε τη ραδιενεργό αποσύνθεση με τη βοήθεια στοχαστικών διαδικασιών. Τα επόμενα χρόνια πραγματοποιήθηκαν και άλλες σχετικές έρευνες. Σταθμό στη μαθηματική θεμελίωση των στοχαστικών διαδικασιών αποτέλεσε η εργασία του ρώσου μαθηματικού Andrey Kolmogorov (1931). Μέχρι και σήμερα οι στοχαστικές διαδικασίες έχουν εφαρμογή σε όλους σχεδόν τους κλάδους της επιστήμης, δεδομένης και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα προβλήματα σε όλους τομείς της ζωής.

4.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ MARKOV

Σε πλήθος προβλημάτων της επιχειρησιακής έρευνας που έχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, χρησιμοποιούνται στοχαστικά μοντέλα που αναφέρονται με το γενικό τίτλο μαρκοβιανές διαδικασίες ή διαδικασίες Markov. Χαρακτηριστικό των συστημάτων υπό μελέτη είναι ότι έχουν τη *Μαρκοβιανή ιδιότητα* ή *ιδιότητα του Markov*. Για τα συστήματα που έχουν την ιδιότητα αυτή, η πρόβλεψη της μελλοντικής τους κατάστασης δεν εξαρτάται από το παρελθόν τους αλλά μόνο από την παρούσα κατάστασή τους (Λυμπερόπουλος 2007; Τσαντάρ & Βασιλείου 2000). Με άλλα λόγια, μπορούμε να πούμε ότι μια

στοχαστική διαδικασία που χαρακτηρίζεται από τη Μαρκοβιανή ιδιότητα είναι μια διαδικασία χωρίς μνήμη (Παπακωνσταντίνου 1990).

Η ιδέα της Μαρκοβιανής ιδιότητας σε μια στοχαστική διαδικασία εισήχθη από το ρώσο μαθηματικό Andrey Markov γι' αυτό και πήρε το όνομά του. Ο Markov μελετώντας τη διαδοχή των φωνηέντων στο ποίημα του Puskin "Eugene Onegin" δημιούργησε ένα μοντέλο που βασιζόταν στην ιδέα της απόρριψης της ανεξαρτησίας των τυχαίων μεταβλητών αλλά και στον περιορισμό της εξάρτησης τους στο αμέσως προηγούμενο βήμα. Στη συνέχεια πολλοί ερευνητές συνεισέφεραν πάνω στην ανάπτυξη των μαρκοβιανών διαδικασιών, όπως για παράδειγμα η επέκταση που δόθηκε στο συνεχή χώρο των παραμέτρων (Kolmogorov, Feller, Doeblin) και τις μη ομογενείς αλυσίδες (Bernstein, Doeblin, Dobrushin, Hajnal) (Κρητικού 2009). Οι μαρκοβιανές διαδικασίες έχουν βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιχειρησιακής έρευνας.

Μια στοχαστική διαδικασία X_t έχει τη *Μαρκοβιανή ιδιότητα* (Markovian property) αν:

$$\text{prob } X_{t+1} = j | X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i = \text{prob } X_{t+1} = j | X_t = i \quad (4.1)$$

για $t = 0, 1, 2, \dots$ και κάθε αλληλουχία $i, j, k_0, \dots, k_{t-1}$. Δηλαδή, η δεσμευμένη (υπό συνθήκη) πιθανότητα κάθε μελλοντικής περίπτωσης της διαδικασίας, δεδομένης οποιασδήποτε περασμένης περίπτωσης και της παρούσας κατάστασης $X_t = i$, είναι ανεξάρτητη από την περασμένη περίπτωση και εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση της διαδικασίας.

Η κατηγορία των μαρκοβιανών διαδικασιών που αντιστοιχεί σε διακριτό χρόνο και διακριτό χώρο καταστάσεων ονομάζεται *Μαρκοβιανή αλυσίδα*. Ειδικότερα, όταν ο χώρος των καταστάσεων S είναι ένα πεπερασμένο σύνολο, τότε αναφερόμαστε σε *πεπερασμένες Μαρκοβιανές αλυσίδες*.

Έστω $X_t (t = 0, 1, \dots)$ η Μαρκοβιανή αλυσίδα με τιμές στο χώρο των καταστάσεων $S = 0, 1, \dots, M$. Οι δεσμευμένες πιθανότητες μετάβασης της Μαρκοβιανής αλυσίδας X_t να μεταβεί στην κατάσταση j δεδομένου ότι προηγουμένως βρισκόταν στην κατάσταση i ονομάζονται *πιθανότητες μετάβασης (transition probabilities)*:

$$\text{prob } X_{t+1} = j | X_t = i \quad (4.2)$$

για $i, j = 1, 2, \dots, k$ και $t = 0, 1, 2, \dots$.

Αν οι πιθανότητες μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη είναι ανεξάρτητες από το χρόνο, τότε χαρακτηρίζονται ως *στάσιμες* (stationary) ή *ομογενείς* (homogeneous). Σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε σε *ομογενείς αλυσίδες Markov*. Δηλαδή για κάθε $t = 0, 1, 2, \dots$ για όλες τις καταστάσεις i και j θα είναι:

$$\text{prob } X_{t+n} = j | X_t = i = \text{prob } X_n = j | X_0 = i = p_{ij} \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση που οι πιθανότητες εξαρτώνται από το χρόνο ονομάζονται *μη-ομογενείς* (non-homogeneous) και τότε αναφερόμαστε σε *μη-ομογενείς αλυσίδες Markov*.

Έστω $p_{ij}^{(n)}$ η υπό συνθήκη πιθανότητα μετάβασης n -βημάτων (η υπό συνθήκη πιθανότητα η στοχαστική διαδικασία ξεκινώντας από την κατάσταση i να βρεθεί στην κατάσταση j μετά από n χρονικά διαστήματα). Αφού οι $p_{ij}^{(n)}$ είναι υπό συνθήκη πιθανότητες, πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

$$p_{ij}^{(n)} \geq 0, \text{ για όλα τα } i, j \text{ και } n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=1}^M p_{ij}^{(n)} = 1, \text{ για όλα τα } i \text{ και } n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

Η αναπαράσταση των πιθανοτήτων μετάβασης γίνεται με τη μορφή ενός πίνακα που ονομάζεται *Πίνακας Μετάβασης* και έχει πεπερασμένες διαστάσεις, όταν ο χώρος των καταστάσεων είναι πεπερασμένος (Λυμπερόπουλος 2007; Τσαντιάς & Βασιλείου 2000). Ο πίνακας μετάβασης θα είναι:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \begin{pmatrix} p_{00}^{(n)} & \cdots & p_{0M}^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M0}^{(n)} & \cdots & p_{MM}^{(n)} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Ο πίνακας μετάβασης είναι ένας *στοχαστικός πίνακας* (όλα τα στοιχεία του είναι θετικά ή μηδέν και το άθροισμα των γραμμών του ισούται με τη μονάδα), δεδομένου ότι τα στοιχεία του ικανοποιούν τις σχέσεις (4.4), (4.5).

Μια μέθοδος υπολογισμού των πιθανοτήτων μετάβασης n -βημάτων είναι μέσω των *εξισώσεων Chapman – Kolmogorov*:

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^M p_{ik}^{(v)} p_{kj}^{(n-v)} \text{ για όλα τα } i, j, n \text{ και } 0 \leq v \leq n \quad (4.7)$$

Το γινόμενο $p_{ik}^{(v)} p_{kj}^{(n-v)}$ είναι η δεσμευμένη πιθανότητα ότι ξεκινώντας από την κατάσταση i , η διαδικασία πηγαίνει στην κατάσταση k μετά από v βήματα και μετά στην κατάσταση j μετά από $n - v$ βήματα. Η πιθανότητα $p_{ij}^{(n)}$ δίνεται αθροίζοντας αυτές τις δεσμευμένες πιθανότητες για όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις k .

Ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης n - βημάτων δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P} \dots \mathbf{P} = \mathbf{P}^n = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^{n-1} = \mathbf{P}^{n-1} \cdot \mathbf{P} \quad (4.8)$$

Σημαντικό ζήτημα στις Μαρκοβιανές αλυσίδες είναι η εύρεση των πιθανοτήτων η Μαρκοβιανή αλυσίδα X_n να βρίσκεται στην κατάσταση j τη χρονική στιγμή n για όλα τα δυνατά j και n . Έστω $\pi_j(n)$ οι πιθανότητες η Μαρκοβιανή αλυσίδα να βρίσκεται στην κατάσταση j μετά από n - βήματα και $\boldsymbol{\pi}(n)$ το διάνυσμα των πιθανοτήτων αυτών:

$$\pi_j(n) = \text{prob } X_n = j \quad n=0,1,\dots, j=1,2,\dots,M \quad (4.9)$$

$$\boldsymbol{\pi}(n) = [\pi_1(n), \pi_2(n), \dots, \pi_M(n)] \quad (4.10)$$

Στην περίπτωση που ο χρόνος αρχίζει στο 0, τα n -βήματα αντιστοιχούν στην n -χρονική στιγμή. Δεδομένου ότι το σύστημα θα βρίσκεται σε μια από τις M καταστάσεις, θα ισχύει:

$$\sum_{j=1}^M \pi_j(n) = 1 \text{ για κάθε } n = 0,1,2,\dots \quad (4.11)$$

Έτσι, ο υπολογισμός των πιθανοτήτων $\boldsymbol{\pi}(n)$ ανάγεται στον υπολογισμό των πιθανοτήτων $p_{ij}^{(n)}$. Εάν \mathbf{P} είναι ο πίνακας της Μαρκοβιανής αλυσίδας, τότε θα ισχύουν:

$$\boldsymbol{\pi}(n) = \boldsymbol{\pi}(0)\mathbf{P}^n \text{ για } n = 0,1,2,\dots \quad (4.12)$$

όπου:

$\boldsymbol{\pi}(0)$: πίνακας με στοιχεία τις πιθανότητες των καταστάσεων $\pi_i(0)$ του συστήματος τη χρονική στιγμή 0

$\boldsymbol{\pi}(n)$: πίνακας με στοιχεία τις πιθανότητες των καταστάσεων $\pi_i(n)$ του συστήματος τη χρονική στιγμή n

\mathbf{P} : πίνακας μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος με στοιχεία τις πιθανότητες $p_{ij}^{(n)}$

Συνεπώς, σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση του, όταν είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες του συστήματος.

Στην ομογενή Μαρκοβιανή αλυσίδα έχουμε μόνο έναν πίνακα μετάβασης, ενώ στη μη ομογενή έχουμε μια ακολουθία πινάκων μετάβασης $\mathbf{P}(t)_{t=0}^{\infty}$.

Σε σύστημα στο οποίο ισχύει η Μαρκοβιανή υπόθεση αλλά οι μεταβάσεις δεν γίνονται σε διακριτές στιγμές αλλά σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t , η πιθανότητα $\pi_i(t + \Delta t)$ να βρίσκεται το σύστημα στην κατάσταση E_i τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ ισούται με το άθροισμα των πιθανοτήτων (Ανεζίρη 1999a):

- ✓ το σύστημα βρισκόταν τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση E_i και παρέμεινε στο διάστημα Δt στην κατάσταση αυτή
- ✓ το σύστημα βρισκόταν τη χρονική στιγμή t σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση E_j με ($E_j \neq E_i$) και μετέβηκε στην i το διάστημα Δt

$$\pi_i(t + \Delta t) = \pi_i(t) \left[1 - \sum_{i \neq j} a_{ij} \Delta t \right] + \sum_{j \neq i} \pi_j(t) a_{ji} \Delta t \quad (4.13)$$

Από τη σχέση (4.13) προκύπτει η εξίσωση Markov σε συνεχή χρόνο:

$$\frac{\partial \pi_i(t)}{\partial t} = -\pi_i(t) \sum_{i \neq j} a_{ij} + \sum_{j \neq i} \pi_j(t) a_{ji} \quad (4.14)$$

Αν ισχύει $a_{ii} = -\sum_{i \neq j} a_{ij}$, η σχέση (4.14) μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$\frac{\partial \pi_i(t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^M \pi_j(t) a_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.15)$$

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (4.15) μπορεί να γραφτεί με μορφή πινάκων ως εξής:

$$\left[\frac{\partial \pi_1(t)}{\partial t}, \frac{\partial \pi_2(t)}{\partial t}, \dots, \frac{\partial \pi_M(t)}{\partial t} \right] = \left[\pi_1(t), \pi_2(t), \dots, \pi_M(t) \right] \mathbf{A} \quad (4.16)$$

όπου \mathbf{A} είναι ο τετραγωνικός πίνακας ρυθμού μεταβάσεων διαστάσεων $M \times M$ με στοιχεία:

- a_{ij} : οι ρυθμοί μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j , όταν $i \neq j$
- a_{ii} : το αντίθετο άθροισμα όλων των μεταβάσεων από την κατάσταση i σε οποιαδήποτε άλλη j ($a_{ii} = -\sum_{i \neq j} a_{ij}$)
- $a_{ij} \Delta t$: δίνει την πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j , όταν $i \neq j$

$$\left[1 - \sum_{i \neq j} a_{ij} \Delta t \right] :$$

δίνει την πιθανότητα παραμονής στην κατάσταση i στο διάστημα Δt

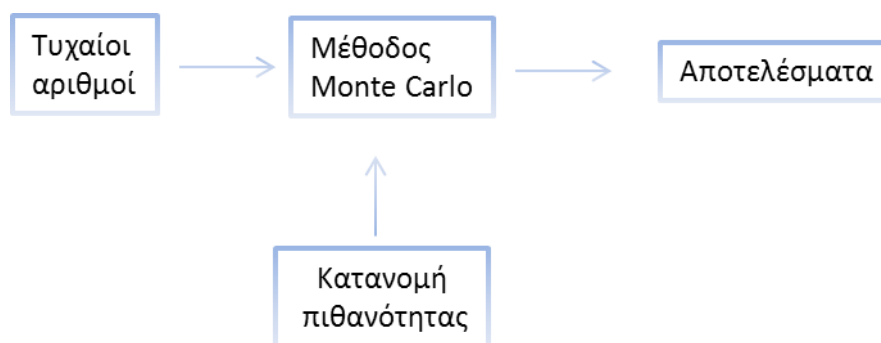
Για τους ρυθμούς μετάβασης ισχύει ότι $a_{ij} \geq 0$.

4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO

Η προσομοίωση *Monte-Carlo* είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική ανάλυσης αβεβαιοτήτων. Με τον όρο Monte Carlo χαρακτηρίζεται κάθε αλγόριθμος προσομοίωσης που χρησιμοποιεί γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Ως τέτοια γεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί και η ρουλέτα του καζίνο από όπου και προέρχεται και το όνομα της μεθόδου (Κουϊκόγλου 2002).

Το όνομα Monte Carlo προήλθε από τον τίτλο της εργασίας των (Eckhardt 1987). Η πρώτη χρήση έγινε πάνω στην εξέλιξη της ατομικής βόμβας. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε πλήθος τομέων, από τη θεωρητική φυσική, την αριθμητική ανάλυση, την αξιοπιστία σύνθετων συστημάτων, οικονομικών μοντέλων κ.λπ. Η εξέλιξη των υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα προσομοίωσης πολύ μεγάλων φυσικών και μαθηματικών προβλημάτων.

Η εφαρμογή των μεθόδων Monte Carlo μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια συσκευή με δυο εισόδους και μιας εξόδου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα που ακολουθεί. Οι εισόδοι είναι ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων αριθμών και κάποια κατανομή πιθανότητας την οποία επιθυμούμε να εξετάσουμε. Η έξοδος αποτελεί το αποτέλεσμα της τυχαίας δειγματοληψίας της προς εξέταση κατανομής πιθανότητας.



Σχήμα 4.3.1: Γενικό διάγραμμα ροής μιας τυπικής διαδικασίας Monte Carlo.

Οι μεταβλητές εισόδου αναφορικά με τις οποίες υπάρχει αβεβαιότητα χρησιμοποιούνται σαν τυχαίες μεταβλητές με συγκεκριμένες κατανομές και κατάλληλες συσχετίσεις. Με κατάλληλες κάθε φορά διαδικασίες στατιστικού δειγματισμού (ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος) παράγεται ένα πεπερασμένο δείγμα από συνδυασμούς τιμών εισόδου, παράγοντας έτσι ένα δείγμα τιμών των μεταβλητών εξόδου, που αποτελεί

την απόκριση του συστήματος σ' αυτούς τους συνδυασμούς τιμών εισόδου. Το τελευταίο αυτό δείγμα τιμών των μεταβλητών εξόδου αναλύεται στατιστικά, απ' όπου προκύπτουν η μέση τιμή, η διακύμανση και γενικά η κατανομή τους, καθώς και οι τυχόν συσχετίσεις (Χρήστου 1993).

4.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυκριτηριακή ή πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων αποτελεί ένα εξελιγμένο πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας. Αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση προβλημάτων λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια που συνήθως είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους.

Ιστορικά, σταθμοί στην ανάπτυξη της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποτελούν οι εργασίες του Pareto (Pareto 1896), όπου αντιμετωπίζεται επιστημονικά το πρόβλημα της σύνθεσης των κριτηρίων και εισάγεται και αναλύεται η έννοια της αποτελεσματικότητας, η ανάπτυξη της θεωρίας της χρησιμότητας από τους Von Neumann και Morgenstern (1944), η εισαγωγή της έννοιας του αποτελεσματικού συνόλου από τον Koopmans (Koopmans 1951), δηλ. του συνόλου εναλλακτικών δράσεων οι οποίες δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη εναλλακτική δραστηριότητα, η σύνδεση του γραμμικού προγραμματισμού με την πολυκριτηριακή ανάλυση από τους Charnes και Cooper (Charnes and Cooper 1961), η εργασία του Raifa (1969) για την πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας κ.ά. Προς το τέλος της δεκαετίας του 1960 άρχισε να αναπτύσσεται η λεγόμενη Ευρωπαϊκή σχολή της πολυκριτηριακής ανάλυσης, με πρωτοπόρο τον (Roy 1968) ο οποίος ανέπτυξε τη θεωρία των σχέσεων υπεροχής (outranking relations) (Ρηγόπουλος 2008).

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης που εφαρμόζονται σε όλους σχεδόν τους τομείς της ζωής. Η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής εξαρτάται από τη φύση και την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση (Multicriteria Analysis) αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία σαν πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων (Multicriteria Decision Making - MCDM) από την αμερικάνικη σχολή και σαν πολυκριτηριακή υποστήριξη αποφάσεων (Multicriteria Decision Aid – MCDA) από την ευρωπαϊκή σχολή. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται είναι πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ή βελτιστοποίηση πολλαπλών σκοπών (Decision with multiple objectives, Multiobjective decision analysis, multiobjective optimization κ.λπ.).

Ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών σκοπών (Multiobjective Optimization Problem – MOP) έχει τη μορφή (Miettinen 1999; Σταθοπούλου 2005):

$$\begin{aligned} \min \mathbf{y} &= f(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_Q(\mathbf{x}) \\ \mathbf{e}(\mathbf{x}) &= e_1(\mathbf{x}), e_2(\mathbf{x}), \dots, e_m(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \mathbf{x} &= x_1, x_2, \dots, x_n \in X \\ \mathbf{y} &= y_1, y_2, \dots, y_Q \in Y \end{aligned} \quad (4.17)$$

όπου

- \mathbf{e} : το διάνυσμα των περιορισμών
 \mathbf{x} : το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης (decision vector)
 \mathbf{y} : το διάνυσμα των αντικειμενικών συναρτήσεων (objective vector)
 X : ο χώρος των αποφάσεων (decision space)
 Y : ο αντικειμενικός χώρος (objective space)

Στο παραπάνω πρόβλημα (MOP) χρησιμοποιείται η φόρμα της ελαχιστοποίησης. Φυσικά μια σειρά πολυκριτηριακών προβλημάτων μπορεί να απαιτούν τη μεγιστοποίηση μιας ή πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Ωστόσο, κάθε αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να μετατραπεί από τη φόρμα ελαχιστοποίησης στη φόρμα μεγιστοποίησης και αντιστρόφως σύμφωνα με τις σχέσεις (Σταθοπούλου 2005):

$$\max f_i(\mathbf{x}) = \min -f_i(\mathbf{x}) \quad (4.18)$$

$$\min f_i(\mathbf{x}) = \max -f_i(\mathbf{x}) \quad (4.19)$$

Το σύνολο όλων των διανυσμάτων των μεταβλητών ελέγχου που ικανοποιούν τους περιορισμούς, ονομάζεται *εφικτό σύνολο* (feasible set):

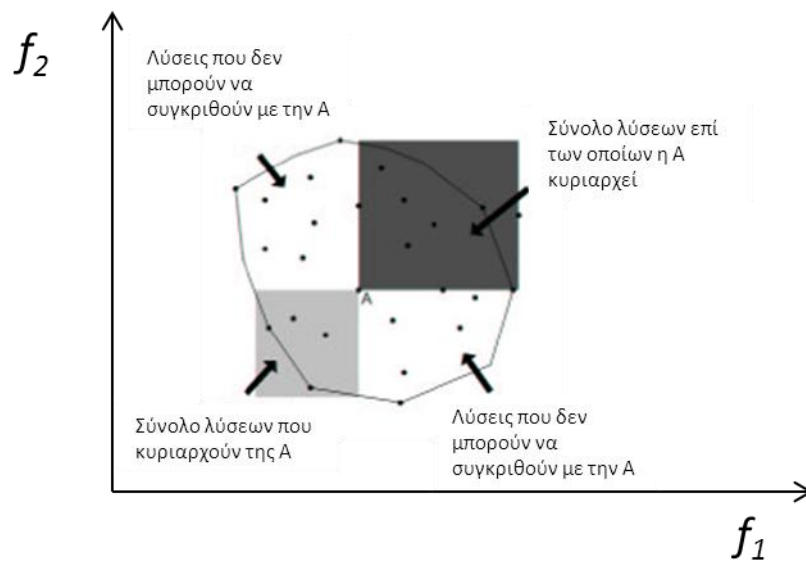
$$\begin{aligned} X_f &= \mathbf{x} \in X \mid \mathbf{e}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ Y_f &= f(X_f) = \bigcup_{\mathbf{x} \in X_f} f(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.4.2 ΣΥΝΟΛΟ ΜΗ –ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΜΕΝΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Μια πολύ σημαντική έννοια στην πολυκριτηριακή ανάλυση είναι η έννοια της κυριαρχίας. Στην περίπτωση αντικρουόμενων κριτηρίων είναι φανερό ότι θα υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις που θα είναι «καλύτερες» από άλλες ως προς κάποια κριτήρια και «χειρότερες» ως προς άλλα.

Για δύο τυχαίες λύσεις x_1 και x_2 στο παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ισχύει (βλ. παράδειγμα και στο σχήμα που ακολουθεί):

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \prec x_2 \text{ (η } x_1 \text{ κυριαρχεί της } x_2) \text{ αν } f(x_1) < f(x_2) \\ x_1 \preceq x_2 \text{ (η } x_1 \text{ κυριαρχεί ασθενώς της } x_2) \text{ αν } f(x_1) \leq f(x_2) \\ x_1 \square x_2 \text{ (η } x_1 \text{ δεν μπορεί να συγκριθεί με τη } x_2) \end{array} \right\} \quad (4.21)$$



Σχήμα 4.4.1: Παράδειγμα γεωμετρικής απεικόνισης κυριαρχίας.

Αντίστοιχα, η λύση x_2 κυριαρχείται από τη x_1 . Μια λύση x_i ονομάζεται *μη-κυριαρχούμενη* (non-dominated) ή *ικανή* (efficient) όταν δεν υπάρχει κάποια άλλη λύση η οποία να κυριαρχεί επί αυτής. Το σύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων ονομάζεται *μη-κυριαρχούμενο* (non-dominated set) ή *ικανό σύνολο* (efficient set) ή *βέλτιστο κατά Pareto σύνολο* (Pareto optimal set).

4.4.3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σύμφωνα με τον Χρήστου (Χρήστου 1993) οι πολυκριτηριακές μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Στις τεχνικές που *εμπεριέχουν προτιμήσεις*, όπου ο αποφασίζων πρέπει να προδιαγράψει όσο το δυνατόν αναλυτικότερα τις προτιμήσεις του και παρέχει την πληροφορία αυτή στον αναλυτή ώστε να καθοριστεί η λύση βέλτιστου συμβιβασμού. Στις τεχνικές που εμπεριέχουν προτιμήσεις κατατάσσονται μεταξύ άλλων η μέθοδος του σταθμισμένου μέσου (weighted sum), η πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας (MAUT), η μέθοδος UTA, η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος (AHP), οι τεχνικές που βασίζονται στις σχέσεις υπεροχής (outranking methods), ο προγραμματισμός στόχων κ.λπ.
- Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι *τεχνικές οι οποίες αποσκοπούν στην παραγωγή και εξερεύνηση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων*. Οι τεχνικές αυτές επικεντρώνουν το ενδιαφέρον στην ανάλυση του προβλήματος, το οποίο παρουσιάζεται με τέτοιο τρόπο στον αποφασίζοντα ώστε οι δυνατές επιλογές και ο ανταγωνισμός των κριτηρίων να είναι σαφής. Τέτοιες τεχνικές είναι η μέθοδος του σταθμισμένου μέσου, η μέθοδος των περιορισμών κ.λπ.
- Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι *τεχνικές που απαιτούν συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ του αποφασίζοντα και του αναλυτή*. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος ο αποφασίζων παρεμβαίνει δίνοντας πληροφορίες για τις προτιμήσεις του με βάση τα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Με τις πληροφορίες αυτές προσεγγίζονται νέες λύσεις που βρίσκονται πλησιέστερα στη λύση βέλτιστου συμβιβασμού. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί κάποια λύση που να ικανοποιεί τον αποφασίζοντα ή μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια καθορισμένη συνθήκη τερματισμού. Τέτοιες τεχνικές είναι η μέθοδος STEP (ή STEM), η μέθοδος των Zions - Wallenius, κ.α.

Τις τελευταίες δεκαετίες εφαρμόζονται τεχνικές που βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης. Σε αυτού του είδους τις τεχνικές βασίστηκε και η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ενδεικτικά μια πολύ συνοπτική αναφορά στην πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας και στις τεχνικές που είναι βασισμένες στις σχέσεις υπεροχής. Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται παρουσίαση βασικών εννοιών για τους εξελικτικούς αλγορίθμους.

4.4.3.1 Πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας

Η Πολυκριτηριακή Θεωρία της Χρησιμότητας (Multi-Attribute Utility Theory - MAUT) έχει τις βάσεις της στις θεωρίες των von Neumann and Morgenstern, των Keeney and Raiffa, Fishburn κ.α. Στηρίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει μια συνάρτηση που εκφράζει την προτιμησιακή δομή του αποφασίζοντα ανάγοντας τις πολυδιάστατες και αβέβαιες συνέπειες των εναλλακτικών λύσεων σε ένα μονοδιάστατο δείκτη, βάσει του οποίου διατάσσονται οι εναλλακτικές λύσεις. Η συνάρτηση αυτή είναι η συνάρτηση χρησιμότητας.

Σαν θετικά στοιχεία της μεθόδου αναγνωρίζονται η «μαθηματική λογική» στη θεωρητική της βάση, η εφαρμοσιμότητά της τόσο σε προβλήματα διακριτού συνόλου επιλογών όσο και συνεχούς και η άνεση που παρέχει στην αντιμετώπιση προβλημάτων όπου υπεισέρχεται αβεβαιότητα. Στα αρνητικά στοιχεία συγκαταλέγεται η δυσκολία που έχει ο αποφασίζων στον ακριβή καθορισμό της μορφής και των παραμέτρων της συνάρτησης χρησιμότητας, καθώς και των βαρών των κριτηρίων (Χρήστου 1993).

4.4.3.2 Τεχνικές βασισμένες σε σχέσεις υπεροχής

Οι τεχνικές που βασίζονται σε σχέσεις υπεροχής (outranking methods) εκπροσωπούν τη Γαλλική Σχολή στην πολυκριτηριακή ανάλυση των αποφάσεων και αναπτύχθηκαν κατά κύριο λόγο από τον Roy και τους συνεργάτες του (Χρήστου 1993).

Η σχέση διάταξης που ορίζουν αυτές οι σχέσεις υπεροχής δεν είναι ισοδύναμη με τη σχέση διάταξης των πραγματικών αριθμών, όπως στην περίπτωση των συναρτήσεων χρησιμότητας. Το νέο στοιχείο είναι ότι αναγνωρίζεται στον αποφασίζοντα η περίπτωση ασυγκριτότητας των δύο εναλλακτικών λύσεων.

Η παραδοχή της ασυγκριτότητας πέραν των σχέσεων προτίμησης και αδιαφορίας, αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων που βασίζονται στις σχέσεις υπεροχής. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι:

- Ότι η εφαρμογή τους βασίζεται στην ανά ζεύγη και ανά κριτήριο σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων.
- Ότι δέχονται, στις νεότερες εκδόσεις, την ύπαρξη ψευδοκριτηρίων. Τα ψευδοκριτήρια είναι μονότονες συναρτήσεις των προτιμήσεων του αποφασίζοντα, οι οποίες κατά μήκος της κλίμακάς τους εμφανίζουν δύο κατώφλια: Κατώφλι αδιαφορίας, το οποίο εκφράζει την περιοχή για κάθε σημείο της κλίμακας όπου υπάρχει αδιαφορία προτιμήσεων και το κατώφλι προτίμησης, το οποίο για κάθε σημείο της κλίμακας εκφράζει την περιοχή όπου υπάρχει σχέση προτίμησης. Δέχονται ακόμη την ύπαρξη κατωφλίων βέτο, περιοχών δηλαδή στα σημεία της κλίμακας κάθε κριτηρίου οι οποίες εκφράζουν διαφορές μεταξύ δύο εναλλακτικών λύσεων απαγορευτικές για τη διατύπωση μιας σχέσης προτίμησης μεταξύ τους.

Οι σημαντικότερες τεχνικές αυτού του είδους είναι της οικογένειας ELECTRE. Άλλες τεχνικές αυτού του είδους είναι οι PROMETHEE, ORESTE, MELCHIOR, TACTIC, MAPPAC κ.λπ. (Vanderpooten 2000). Επίσης υπάρχουν μέθοδοι που συνδυάζουν τις παραπάνω.

4.5 ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον χρησιμοποίησης αλγορίθμων οι οποίοι βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες.

Η εμφάνιση των μαζικά παράλληλων ηλεκτρονικών υπολογιστών έκανε αυτούς τους αλγόριθμους να αποκτήσουν πρακτικό ενδιαφέρον. Στους πιο γνωστούς αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται τα νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι, ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι εξελικτικές στρατηγικές, οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης και τα συστήματα ταξινόμησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί, αν και έγιναν γνωστοί ως τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην *Τεχνητή Νοημοσύνη* (Artificial Intelligence) και πιο συγκεκριμένα στη *Μάθηση Μηχανής* (Machine Learning), πρόσφατα αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως αλγόριθμοι *Υπολογιστικής Νοημοσύνης* (Computational Intelligence) (Λυκοθανάσης & Γεωργόπουλος 1999).

Ειδικότερα, τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της *Γενετικής Εξέλιξης* και της *Κληρονομικότητας*. Τα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού που να μπορεί να εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλικού, ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες σ' αυτήν την αναζήτηση. Αυτού του είδους τα συστήματα λειτουργούν διατηρώντας ένα πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτό διάφορες διαδικασίες επιλογής του «καλύτερου», καθώς και διάφορους *γενετικούς τελεστές*. Οι τελεστές αυτοί αντιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας τόσο τμήματα και στοιχεία από την προηγούμενη γενιά, όσο και εντελώς καινούρια τμήματα που δοκιμάζονται για τυχόν καλή απόδοσή τους. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιούν τις πληροφορίες που τους παρέχει το περιβάλλον τους.

Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται συχνά ο όρος «*εξελικτικοί αλγόριθμοι*» (evolutionary algorithms) αναφορικά με αυτές τις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης που προσομοιάζουν τη διαδικασία της φυσικής εξέλιξης. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας είναι (Gen and Cheng 2000) οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (genetic algorithms) που αναπτύχθηκαν από τον Holland (John Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1975). Άλλες αντίστοιχες τεχνικές είναι οι *στρατηγικές εξέλιξης* (evolution strategies), ο *εξελικτικός προγραμματισμός* (evolutionary programming) και ο *γενετικός προγραμματισμός* (genetic programming).

4.5.2 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ

Η *θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών* (*Evolution of Species*) που αναπτύχθηκε από το Δαρβίνο στα μέσα του περασμένου αιώνα, προκάλεσε μεγάλη αναστάτωση, αφού ερχόταν σε σύγκρουση με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις περί προέλευσης της ζωής.

Τα κυριότερά της σημεία που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των Εξελικτικών Αλγορίθμων είναι τα εξής (Λυκοθανάσης 2001):

- «Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους. Σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να ζήσουν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, με την αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσης, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους προσπαθώντας να προσαρμοστούν κάθε φορά, με στόχο την εξασφάλιση της επιβίωσής τους.
- Αυτή η αλλαγή, που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων είναι αλλαγή στα χρωμοσώματά τους (*chromosomes*), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια που κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως γονίδια (*genes*). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γονότυπος (*genotype*). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το φαινότυπο (*phenotype*).
- Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η αναπαραγωγή (*reproduction*) και η μετάλλαξη (*mutation*). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη, ορισμένες φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής.
- Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματά του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Ορισμένες φορές, τα δύο αυτά γονίδια συμφωνούν μεταξύ τους, όσον αφορά την «τιμή» που θα δώσουν στο χαρακτηριστικό, π.χ. γαλάζιο χρώμα ματιών, ενώ άλλες φορές δεν συμφωνούν, π.χ. το ένα υποδεικνύει καστανό χρώμα ματιών και το άλλο γαλάζιο. Στη δεύτερη περίπτωση, κυριαρχεί η «τιμή» ενός γονιδίου (π.χ. του καστανού) και αγνοείται η «τιμή» του άλλου, μολονότι το δεύτερο μπορεί να περάσει σε επόμενες γενιές. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατές (*dominant*) και το άλλο υπολειπόμενο (*recessive*). Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται αλληλόμορφα (*alleles*)».

Όλος αυτός ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής φάνηκε ιδιαίτερα ελκυστικός για τον John Holland, πρωτοπόρο των Γενετικών Αλγορίθμων, τις αρχές της δεκαετίας του '70. Ο John Holland φαντάστηκε ότι κάποιες ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε

αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων.

4.5.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η χρήση των γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι κυριότεροι, όπως αναφέρονται από τους Λυκοθανάση και Γεωργόπουλο είναι (Λυκοθανάσης & Γεωργόπουλος 1999) :

- ✓ **«Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.** Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των *Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ)* είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατών τους, για τους ΓΑ αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- ✓ **Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.** Οι ΓΑ προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίασή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
- ✓ **Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.** Οι ΓΑ δεν «αντιστέκονται» σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά ανεκτές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- ✓ **Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.** Αν και η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ.
- ✓ **Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο.** Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- ✓ **Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που εξεργάζονται.** Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κ.λπ. Τέτοιου είδους

ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους ΓΑ, ζήτημα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.

- ✓ **Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.** Η μόνη «επικοινωνία» του ΓΑ με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους ΓΑ. Όπου, όμως, δεν τα «καταφέρνουν», η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- ✓ **Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού.** Οι ΓΑ σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό «ψάξιμο» μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- ✓ **Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.** Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με την αναζήτηση με μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing) γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, ζήτημα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- ✓ **Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.** Οι ΓΑ μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.»

Σύμφωνα με το Ράπτη (Ράπτης 2001), οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έναντι των παραδοσιακών μεθόδων αναζήτησης εμφανίζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- ✓ «Οι ΓΑ δεν επιδρούν στις ίδιες παραμέτρους του υπό επίλυση προβλήματος, αλλά σε μια κωδικοποίηση των παραμέτρων αυτών. Συνεπώς, παραμένουν ανεπηρέαστοι από τις ακριβείς τιμές των εμπλεκόμενων μεγεθών καθώς εργάζονται στη μορφή τους, όπως αυτή καθορίζεται από τη χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση.
- ✓ Οι ΓΑ δεν εργάζονται με ένα μοναδικό σημείο του χώρου αλλά διατηρούν ένα πληθυσμό σημείων για τη διεξοδικότερη εξερεύνηση του χώρου. Έτσι, προβλήματα όπως η παγίδευση σε τοπικά ελάχιστα δεν υφίστανται.
- ✓ Οι ΓΑ χρησιμοποιούν συναρτήσεις απομίμησης και όχι παραγώγους ή άλλη παρόμοια πληροφορία. Η κατάσταση μιας συνάρτησης απομίμησης είναι σαφώς απλούστερη από τον υπολογισμό παραγώγων και απαιτεί ελάχιστες ή και καθόλου παραδοχές.

- ✓ Οι ΓΑ χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες και όχι ντετερμινιστικούς. Έτσι, η πορεία ενός ΓΑ θα είναι σε κάθε εκτέλεση διαφορετική ακόμη και ένα ξεκινά με τον ίδιο αρχικό πληθυσμό.»

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και ιδιαίτερα οι γενετικοί, έχουν εφαρμοστεί σε πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης, μονοκριτηριακών και πολυκριτηριακών.

Στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι κατάλληλοι για επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων και μάλιστα παρουσιάζουν σημαντικά *πλεονεκτήματα* έναντι των παραδοσιακών μεθόδων. Αναφέρεται χαρακτηριστικά (Coello Coello 2011) ότι παρόλο που υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνικές για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων (πάνω από 30), οι μέθοδοι αυτές έχουν περιορισμένη εφαρμοσιμότητα σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι κλασσικές τεχνικές τείνουν να προσεγγίζουν μία βέλτιστη κατά Pareto λύση σε κάθε επανάληψη. Επιπλέον, οι περισσότερες από αυτές είναι «ευαίσθητες» στο σχήμα του «μετώπου Pareto» (πρόβλημα εφαρμοσιμότητας όταν το μέτωπο Pareto είναι μη κυρτό και μη συνεχές).

Το γεγονός αυτό οδήγησε στη χρήση των εξελικτικών αλγορίθμων για *προβλήματα πολλαπλών σκοπών*. Το κύριο κίνητρο για τη χρήση πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων (MOEAs) είναι το γεγονός ότι έχουν τη δυνατότητα αναζήτησης ταυτόχρονα σε ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων (πληθυσμός) προσεγγίζοντας λύσεις βέλτιστες κατά Pareto ταυτόχρονα σε μια συγκεκριμένη επανάληψη του αλγορίθμου. Επίσης, είναι λιγότερο ευαίσθητοι στο σχήμα και τη συνέχεια του «μετώπου Pareto» (π.χ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μη συνεχών ή μη κυρτών «μετώπων Pareto») (Coello Coello 1999; Deb 2001; Giannakoglou et al. 2001; Giannakoglou et al. 2002).

Για πρώτη φορά, η ιδέα της χρήσης εξελικτικών αλγορίθμων σε πολυκριτηριακό πρόβλημα δόθηκε στο τέλος της δεκαετίας του '60 (Rosemberg 1967), αλλά η πρώτη πραγματική εφαρμογή για επίλυση προβλημάτων δεν είχε γίνει έως το 1985 (Schaffer 1985). Ωστόσο, η πραγματική ανάπτυξη εργασιών και εφαρμογών των εξελικτικών αλγορίθμων σε προβλήματα με πολλαπλά κριτήρια έγινε την τελευταία 15εντία (Coello Coello 1999; Deb 2001; Giannakoglou et al. 2001; Giannakoglou et al. 2002). Ο όρος που χρησιμοποιείται στη σχετική βιβλιογραφία είναι *“Evolutionary Multi-objective Optimization” (EMO)* ή *“Multi-objective Evolutionary Algorithms” (MOEA)* (Coello Coello et al. 2007; Deb 2001).

4.5.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με ένα σύνολο υποψήφιας λύσεων το οποίο διαδοχικά τροποποιείται με βάση τις δύο βασικές αρχές της εξέλιξης: τη «φυσική» επιλογή (selection) και τη «βιολογική» παραλλαγή (variation). Η επιλογή αναπαριστά τον ανταγωνισμό μεταξύ των ζώντων οργανισμών. Κάποιοι οργανισμοί είναι καλύτεροι από άλλους και είναι πιο πιθανό να επιβιώσουν και να αναπαράγουν τη γενετική τους πληροφορία. Στους εξελικτικούς αλγόριθμους, η φυσική επιλογή προσομοιάζεται με μια

στοχαστική διαδικασία επιλογής. Σε κάθε λύση δίνεται μια ευκαιρία για αναπαραγωγή που εξαρτάται από την ποιότητά της. Η ποιότητα των λύσεων εκτιμάται με την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών προσδιορίζοντας τους μετρητικές αξίες. Η άλλη αρχή, η παραλλαγή, μιμείται τη φυσική δυνατότητα δημιουργίας «νέων» ζώντων οργανισμών, με την έννοια της ανταλλαγής γονιδίων και της μετάλλαξης.

Τα γενικά χαρακτηριστικά ενός *εξελικτικού αλγορίθμου (EA)* είναι (Zitzler 1999):

1. διατήρηση ενός **συνόλου υποψήφιας λύσεων**, το οποίο
2. υφίσταται μια διαδικασία **επιλογής** και
3. «τροποποιείται» από **γενετικούς τελεστές**, συνήθως την ανταλλαγή γονιδίων (διασταύρωση - crossover) και τη μετάλλαξη (mutation).

Κατ' αναλογία με τη φυσική επιλογή, οι υποψήφιας λύσεις καλούνται **«άτομα» (individuals)** και το σύνολο των **υποψήφιας λύσεων «πληθυσμός» (population)**. Στη διαδικασία της επιλογής, που μπορεί να είναι είτε στοχαστική ή απολύτως ντετερμινιστική, οι μονάδες «χαμηλής ποιότητας» απομακρύνονται από τον πληθυσμό, ενώ οι μονάδες «υψηλής ποιότητας» αναπαράγονται. Η ποιότητα μιας μονάδας απεικονίζεται με μια μονόμετρη αξία που καλείται **«ικανότητα ή ποιότητα» μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης (fitness function)³**.

Η ανταλλαγή γονιδίων (διασταύρωση) και η μετάλλαξη στοχεύουν στην παραγωγή νέων λύσεων μέσα από το χώρο έρευνας, με την παραλλαγή των υπαρχόντων λύσεων. Ο **τελεστής της ανταλλαγής γονιδίων (crossover operator)** χειρίζεται έναν καθορισμένο αριθμό **«γονιών» (parents)** και δημιουργεί ένα συγκεκριμένο αριθμό **«παιδιών» (children)**, μέσω της ανταλλαγής γονιδίων των γονιών. Για τη μίμηση της στοχαστικής φύσης της εξέλιξης, μια **πιθανότητα ανταλλαγής γονιδίων (crossover probability)** συσχετίζεται με τον τελεστή της ανταλλαγής γονιδίων. Ο **τελεστής της μετάλλαξης (mutation operator)** τροποποιεί τις μονάδες αλλάζοντας μικτά τμήματα στα σχετικά διανύσματα, σύμφωνα με έναν δεδομένο **ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate)**.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά προκαταρκτικά βήματα πριν την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου⁴ σε ένα πρόβλημα, δηλ. καθορισμός (Koza R.J. et al. 1999):

1. του σχεδίου απεικόνισης και κωδικοποίησης (representation and encoding scheme)
2. του μέτρου της «ποιότητας» (fitness measure)

³ Στην ελληνική βιβλιογραφία συναντώνται διάφοροι όροι που αποδίδονται στη συνάρτηση αυτή, όπως συνάρτηση ποιότητας, συνάρτηση καταλληλότητας, συνάρτηση προσαρμοστικότητας, συνάρτηση ικανότητας, συνάρτηση αποτίμησης, συνάρτηση αξιολόγησης. Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιείται ο όρος «ποιότητα» και αντίστοιχα «συνάρτηση ποιότητας».

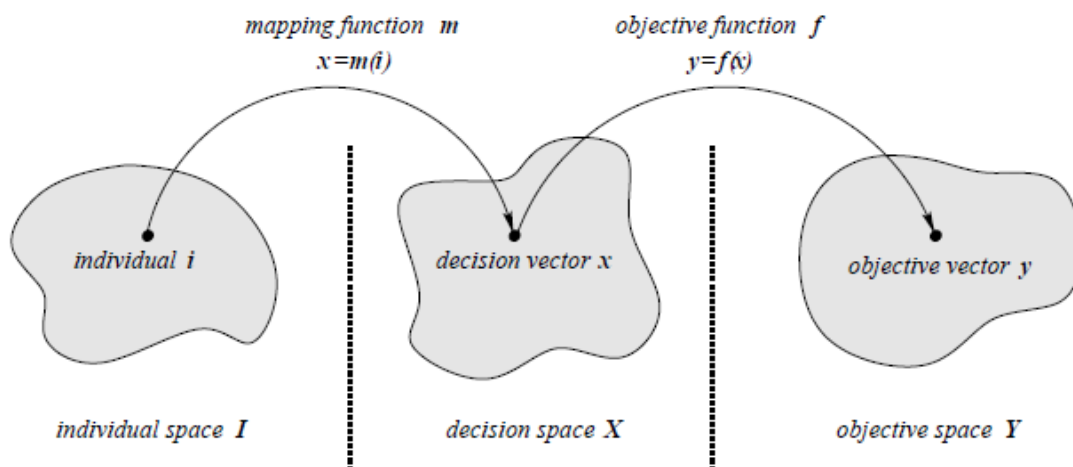
⁴ Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής το μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίστηκε στους γενετικούς αλγορίθμους. Ωστόσο, στη διατριβή χρησιμοποιείται ο όρος «εξελικτικός αλγόριθμος», που περιλαμβάνει και άλλες τεχνικές που βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης των ειδών.

3. των παραμέτρων ελέγχου (control parameters) για το «τρέξιμο» (run) του αλγορίθμου
4. του κριτηρίου τερματισμού (termination criterion) και της μεθόδου για τον προσδιορισμό αποτελεσμάτων.

Το **σχέδιο απεικόνισης** καθορίζει το μετασχηματισμό (transformation) που απεικονίζει σημεία από το χώρο έρευνας (search space) του προβλήματος, σε μια ειδική, σταθερού μήκους αλληλουχία χαρακτήρων (character string), ή άλλη δομή δεδομένων που χρησιμοποιείται από το γενετικό αλγόριθμο και ο αντίστροφος μετασχηματισμός που απεικονίζει κάθε δυνατή αλληλουχία σε ένα σημείο του χώρου έρευνας του προβλήματος. Η συνήθης μορφή για το σχέδιο αναπαράστασης είναι η αλληλουχία χαρακτήρων σταθερού μήκους (που παρομοιάζει με μια βάση του DNA ή ένα χρωμόσωμα). Αν οι μονάδες του πληθυσμού πρόκειται να αναπαρασταθούν με αυτόν τον τρόπο, τότε είναι απαραίτητος ο καθορισμός του μήκους της αλληλουχίας (string length), καθώς και του μεγέθους του αλφαβήτου. Συνήθως χρησιμοποιείται το δυαδικό σύστημα, αλλά στη βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλες μέθοδοι (π.χ. κωδικοποίηση πραγματικού αριθμού).

Για παράδειγμα ο αριθμός 35.5072 ανάλογα με το είδος της κωδικοποίησης παριστάνεται ως εξής:

1010110101100000000	35.5072 (binary encoding)
355072	35.5072 (floating point encoding)



Σχήμα 4.5.1: Αναπαράσταση λύσεων – χώρος αποφάσεων και αντικειμενικών συναρτήσεων.

Ο γενετικός αλγόριθμος «οδηγείται» από μια συγκεκριμένη για το πρόβλημα **συνάρτηση «ποιότητας» (fitness function)**. Στη πιο συνήθη μορφή της, η συνάρτηση αυτή καθορίζει μια αριθμητική αξία ποιότητας για κάθε άτομο (individual) του πληθυσμού (population). Σκοπός της συνάρτησης ποιότητας είναι η επιλογή μονάδων για αναπαραγωγή σύμφωνα με τις αρχές του Δαρβίνου, για την επιβίωση και την ανταλλαγή γονιδίων του πιο «υγιούς» ατόμου (fittest).

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης με βάση ένα κριτήριο, συνήθως η συνάρτηση ποιότητας είναι η ίδια η αντικειμενική συνάρτηση. Στα πολυκριτηριακά προβλήματα η διαδικασία αυτή είναι πιο πολύπλοκη και στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι για την απόδοση της ποιότητας των εναλλακτικών λύσεων (βλ. στη συνέχεια).

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι **επιλογής (selection)**, που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες γενετικών αλγορίθμων, ωστόσο αυτές συμμορφώνονται με τις παρακάτω τρεις αρχές:

- Τα «καλύτερα άτομα» (better individuals) είναι πιο πιθανό να επιλεγούν από ότι τα «υποδεέστερα» (inferior).
- Επιτρέπεται η επανεπιλογή (reselection). Αυτό σημαίνει ότι τα καλύτερα άτομα μπορεί να επιλεγούν για αναπαραγωγή πάνω από μια φορά.
- Η επιλογή είναι πιθανοτική (probabilistic).

Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών έχουν προταθεί, εξετασθεί και συγκριθεί πολλές μέθοδοι επιλογής, όπως: roulette wheel selection, $(\mu + \lambda)$ – selection, tournament selection, steady-state reproduction, ranking and scaling, sharing.

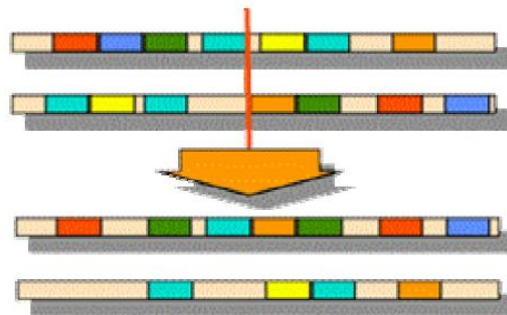
Οι αρχικές παράμετροι για το χειρισμό του γενετικού αλγόριθμου είναι το **μέγεθος του πληθυσμού M (population size)**, και ο **μέγιστος αριθμός γενεών (generations)** (αριθμός επαναλήψεων). Οι πληθυσμοί μπορεί να αποτελούνται από εκατοντάδες, χιλιάδες, εκατομμύρια ή και περισσότερα άτομα. Μπορεί επίσης οι γενεές σε ένα τρέξιμο να είναι εκατοντάδες, χιλιάδες ή και περισσότερες. Ο χρήστης καθορίζει την **πιθανότητα εκτέλεσης των διάφορων γενετικών λειτουργιών σε κάθε γενεά**. Υπάρχει, επίσης, και ένας αριθμός δευτερευόντων μεταβλητών ελέγχου για το γενετικό αλγόριθμο.

Κάθε επανάληψη (run) του γενετικού αλγορίθμου απαιτεί καθορισμό του **κριτηρίου τερματισμού (termination criterion)** για την απόφαση τερματισμού του τρεξίματος και μια μέθοδο για τον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων. Το κριτήριο τερματισμού συνήθως συνίσταται είτε στην ικανοποίηση μιας ιδιότητας επιτυχίας ειδικά για το πρόβλημα (problem-specific), είτε στην ολοκλήρωση ενός καθορισμένου μέγιστου αριθμού γενεών. Η ιδιότητα επιτυχίας εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος και το στόχο του χρήστη.

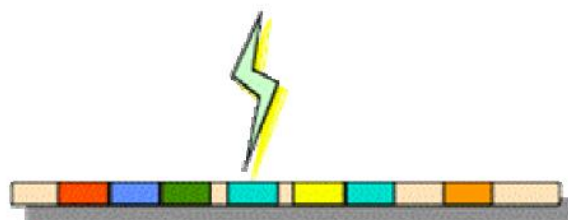
Μετά τα τέσσερα αυτά προκαταρκτικά βήματα, μπορεί να πραγματοποιηθεί το «τρέξιμο» (επαναληπτική διαδικασία) του γενετικού αλγόριθμου. Τα τρία βήματα για την εκτέλεση του ΓΑ στη βασική του μορφή είναι:

- (1) Τυχαία δημιουργείται ένας **αρχικός πληθυσμός** (γενεά 0) από άτομα (π.χ. αλληλουχίες χαρακτήρων συγκεκριμένου μήκους)
- (2) Επαναληπτική εκτέλεση των ακόλουθων υποβημάτων (που καλείται μια γενεά) μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού:
 - ✓ προσδίδεται μια **αξία ποιότητας** σε κάθε άτομο του πληθυσμού, χρησιμοποιώντας το μέτρο ποιότητας για το συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται

- ✓ **επιλέγονται** μια ή δύο μονάδες από τον πληθυσμό με πιθανότητα που βασίζεται στην ποιότητα (επιτρέπεται η επανεπιλογή), που θα συμμετάσχει στη γενετική λειτουργία που περιγράφεται στη συνέχεια
- ✓ δημιουργούνται **νέα** άτομα εφαρμόζοντας τις εξής γενετικές λειτουργίες με καθορισμένες πιθανότητες:
 - αναπαραγωγή (reproduction): αντιγραφή της επιλεγμένης μονάδας στο νέο πληθυσμό
 - ανταλλαγή γονιδίων - διασταύρωση (crossover): δημιουργία νέων απογόνων (offspring) για το νέο πληθυσμό με γενετικό ανασυνδυασμό των υποαλληλουχιών από τις δύο επιλεγμένες μονάδες (σε ένα ή περισσότερα σημεία που επιλέγονται τυχαία, γίνεται ανταλλαγή τμημάτων των γονέων) (στο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα διασταύρωσης ενός σημείου, (Αδαμίδης 1999))
 - μετάλλαξη (mutation): δημιουργία ενός απογόνου (offspring) για το νέο πληθυσμό μεταλλάσσοντας γονίδια του γονέα που επιλέγονται τυχαία (στο σχήμα φαίνεται ένα παραδειγμα μετάλλαξης ενός σημείου, (Αδαμίδης 1999)).



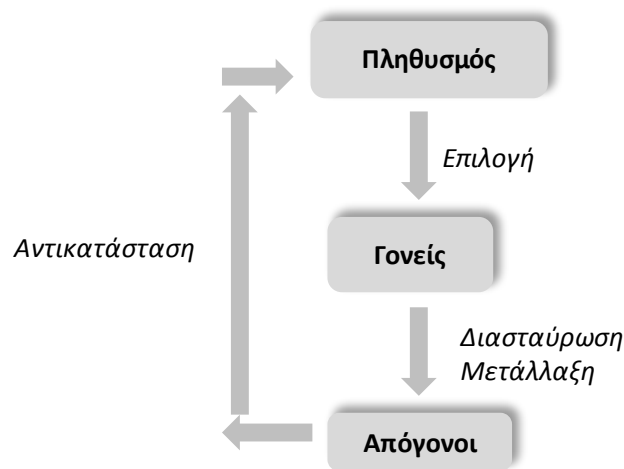
Σχήμα 4.5.2: Διασταύρωση ενός σημείου.



Σχήμα 4.5.3: Μετάλλαξη.

- (3) Προσδιορίζονται οι μονάδες που αναγνωρίζονται με τη μέθοδο του προσδιορισμού αποτελεσμάτων (π.χ. the best-so-far individual) σαν το αποτέλεσμα της επανάληψης

του γενετικού αλγόριθμου. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αντιπροσωπεύει μια λύση του προβλήματος.



Σχήμα 4.5.4: Εξελικτικός κύκλος.

4.5.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

4.5.5.1 Εισαγωγή

Η χρήση πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων (ΜΟΕΑ) είναι ευρέως διαδεδομένη. Στην περίπτωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης με πολλαπλούς σκοπούς (ΜΟΡ) δυο είναι τα κύρια ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπίσει ο χρήστης:

- με ποιο τρόπο θα γίνει η «απόδοση της ποιότητας» στις λύσεις (χρομοσώματα) και η «επιλογή», ώστε να κατευθυνθεί η έρευνα προς το βέλτιστο κατά Pareto σύνολο (Pareto optimal set)
- πως θα διατηρηθεί η ποικιλία στον πληθυσμό, ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου και να επιτευχθεί ένα καλά κατανομημένο και εκτεταμένο μη-κυριαρχούμενο σύνολο.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε πλευρές που αφορούν στα ζητήματα αυτά. Αξίζει να επισημάνουμε ότι τα τελευταία χρόνια έχει προχωρήσει σημαντικά η έρευνα στον τομέα των ΜΟΕΑ προκειμένου να αντιμετωπιστούν αδυναμίες των αλγορίθμων που αρχικά αναπτύχθηκαν (ελιτισμός, ανάγκη διατήρησης ποικιλίας πληθυσμού κ.λπ.). Ορισμένοι ερευνητές εξέλιξαν τους αλγορίθμους που αρχικά είχαν παρουσιάσει (π.χ. SPEA 2, NSGA II, PESA II). Σύμφωνα με τον Coello Coello (Coello Coello 2011), παρόλο που υπάρχει πληθώρα ΜΟΕΑ, στις περισσότερες εφαρμογές σήμερα χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι SPEA και SPEA II, NSGA II, PESA, PAES.

4.5.5.2 Απόδοση ποιότητας και επιλογή (fitness assignment and selection)

Σε αντίθεση με τα μονοκριτηριακά προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση συνήθως ταυτίζεται με τη συνάρτηση ποιότητας, στα πολυκριτηριακά προβλήματα, η απόδοση της ποιότητας των λύσεων και η επιλογή πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους πολλαπλά κριτήρια.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τρεις βασικές κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων πολλαπλών σκοπών (**Multiobjective Evolutionary Algorithms-MOEA**) με βάση τα παραπάνω:

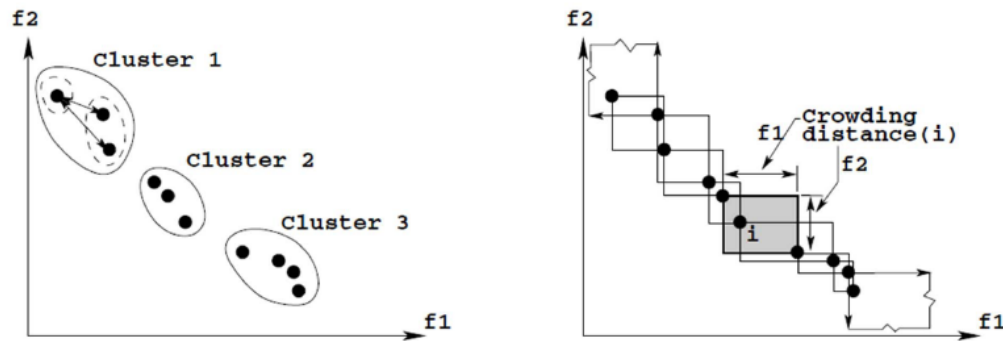
- **Επιλογή «εναλλάξ» (Selection by swithing objectives):** Σε αυτή την κατηγορία MOEA, αντί να πραγματοποιείται συνδυασμός των κριτηρίων σε μια και μόνο μετρητή αξία ποιότητας, η επιλογή γίνεται λαμβάνοντας διαφορετικό κριτήριο κάθε φορά.
- **«Αθροιστική» επιλογή (Aggregation selection with parameter variation):** Σε αυτή την κατηγορία τα κριτήρια αθροίζονται σε μια και μόνο αντικειμενική συνάρτηση και οι παράμετροι αυτής δεν αλλάζουν στις διαφορετικές επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αλλά αντίθετα, μεταβάλλονται συστηματικά κατά τη διάρκεια της ίδιας επανάληψης.
- **Επιλογή με βάση την «κυριαρχία» (Pareto-based selection):** Η αρχή του υπολογισμού της ποιότητας ενός ατόμου στη βάση της κυριαρχίας προτάθηκε αρχικά από τον Goldberg (1989). Πρώτα όλες οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις (άτομα) κατατάσσονται σε **θέση 1** (rank 1) και προσωρινά απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Στη συνέχεια οι επόμενες μη κυριαρχούμενες λύσεις κατατάσσονται στη **θέση 2** (rank 2) κ.ο.κ. Τέλος, η θέση μιας μονάδας καθορίζει την τιμή της ποιότητάς της. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση η ποιότητα μιας λύσης συνδέεται με όλο τον πληθυσμό, ενώ με άλλες αθροιστικές τεχνικές, η τιμή της ποιότητας μιας μονάδας υπολογίζεται ανεξάρτητα από άλλες μονάδες.

4.5.5.3 Διασπορά λύσεων

Για την προσέγγιση του βέλτιστου κατά Pareto συνόλου θα πρέπει να γίνει έρευνα σε πολλαπλά σημεία του χώρου αναζήτησης (Μακρόπουλος & Ευστρατιάδης 2011). Η διατήρηση της διασποράς των λύσεων του πληθυσμού είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή σύγκλισης προς ένα τοπικό βέλτιστο (Gen and Cheng 2000). Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι (π.χ. fitness sharing, restricted mating, isolation by distance, over specification, reinitialization, crowding).

Ο στόχος της τεχνικής κατανομής της ποιότητας (fitness sharing) είναι να κατανειμί τους πληθυσμούς σε έναν αριθμό διαφορετικών κορυφών στο χώρο έρευνας, με κάθε κορυφή να λαμβάνει ένα κλάσμα από τον πληθυσμό, ανάλογα με το ύψος της κορυφής. Για να επιτευχθεί αυτό εισάγεται η αρχή του «υποβιβασμού της ποιότητας» (fitness degradation). Κάθε κορυφή έχει πάρα πολλές λύσεις. Η αξία της ποιότητας για όλες τις λύσεις στην κορυφή υποβιβάζεται για να μειώσει τις ικανότητες αναπαραγωγής τους. Ένας τρόπος «υποβιβασμού» αυτής της ποιότητας μιας λύσης λόγω του συνωστισμού στη γειτονία του,

είναι η χρήση μιας συνάρτησης κατανομής (sharing function). Το μέτρο της απόστασης μεταξύ δυο λύσεων μπορεί να καθοριστεί είτε στο χώρο το γενότυπου είτε στο χώρο του φαινότυπου (genotypic sharing and phenotypic sharing). Στην πρώτη περίπτωση η απόσταση μετράται σε σχέση με το χώρο κωδικοποίησης, ενώ στη δεύτερη στο χώρο αποκωδικοποίησης.



Σχήμα 4.5.5: Διασπορά λύσεων.

4.5.5.4 Βέλτιστες λύσεις κατά Pareto

Με βάση τον αρχικό ορισμό, ένα σημείο θεωρείται βέλτιστη κατά Pareto λύση αν και μόνο αν είναι μη κυριαρχούμενο σημείο σε σχέση με όλα τα σημεία στο χώρο των κριτηρίων, για ένα δεδομένο πρόβλημα. Σε ορισμένους εξελικτικούς αλγόριθμους (όχι όλους), οι βέλτιστες κατά Pareto λύσεις προσδιορίζονται σε κάθε γενεά. Εξαιτίας του ότι ένας πληθυσμός σε κάθε γενεά περιέχει μόνο ορισμένες λύσεις από το αρχικό πρόβλημα, μια βέλτιστη κατά Pareto λύση έχει νόημα μόνο σε σχέση με όλες τις λύσεις που εξετάστηκαν επί του παρόντος. Μια μη-κυριαρχούμενη λύση σε μια γενεά μπορεί να γίνει κυριαρχούμενη από μια νέα λύση σε μια επόμενη γενεά.

Υπάρχουν βασικοί δύο τρόποι χειρισμού των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων, που οδηγούν σε δύο διαφορετικά είδη δομών εφαρμογής του εξελικτικού αλγορίθμου:

- (1) η διατήρηση των βέλτιστων λύσεων κατά Pareto ξεχωριστά από τον πληθυσμό (population pool)
- (2) χωρίς μηχανισμούς διατήρησης (preserving mechanisms).

Στις περισσότερες υπάρχουσες μεθόδους, οι βέλτιστες λύσεις κατά Pareto προσδιορίζονται σε κάθε γενεά και χρησιμοποιούνται μόνο για να υπολογίσουν τις τιμές της ποιότητας ή τις θέσεις (σειρά) κάθε χρωμοσώματος. Σε αυτή την περίπτωση δεν παρέχεται κάποιος μηχανισμός που θα εγγυηθεί ότι οι λύσεις κατά Pareto που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας, θα «περάσουν» στην επόμενη γενεά, κάποιες δηλ. μπορεί να «χαθούν». Για την αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων από πολλούς ερευνητές έχει προταθεί ο «μηχανισμός διατήρησης» (preserving mechanism) των λύσεων αυτών. Στη βασική δομή του εξελικτικού αλγορίθμου προστίθεται μια ειδική «δεξαμενή ή πισίνα» (pool) για τη διατήρηση των λύσεων κατά Pareto. Σε κάθε γενεά το

αρχείο που αντιστοιχεί σε αυτή τη «δεξαμενή» ενημερώνεται με διαγραφή των κυριαρχούμενων λύσεων και πρόσθεση όλων των νέων λύσεων κατά Pareto που έχουν παραχθεί.

4.5.5.5 Εξελικτικοί αλγόριθμοι πολλαπλών σκοπών

4.5.5.5.1 Γενικά

Στη συνέχεια παραθέτουμε τη βασική δομή εξελικτικού αλγορίθμου όπως παρουσιάζεται από τον Zitzler (Zitzler 1999). Ο πληθυσμός P σε μια συγκεκριμένη γενεά t παριστάνεται με το σύμβολο P_t .

Βασικός Εξελικτικός Αλγόριθμος

Είσοδος μοντέλου (Input)	:	N	μέγεθος πληθυσμού
		T	μέγιστος αριθμός γενεών
		p_c	πιθανότητα ανταλλαγής γονιδίων
		p_m	ρυθμός μετάλλαξης
Έξοδος μοντέλου (Output)	:	A	μη-κυριαρχούμενο σύνολο

Βήμα 1: *Έναρξη:* Τίθεται $P_0 = \emptyset$ και $t = 0$. Επανάληψη για $i = 1, \dots, N$

α) Επιλογή «ατόμου» (κωδικοποιημένη λύση) $i \in I$ με βάση μια κατανομή πιθανότητας

β) Τίθεται $P_0 = P_0 + i$

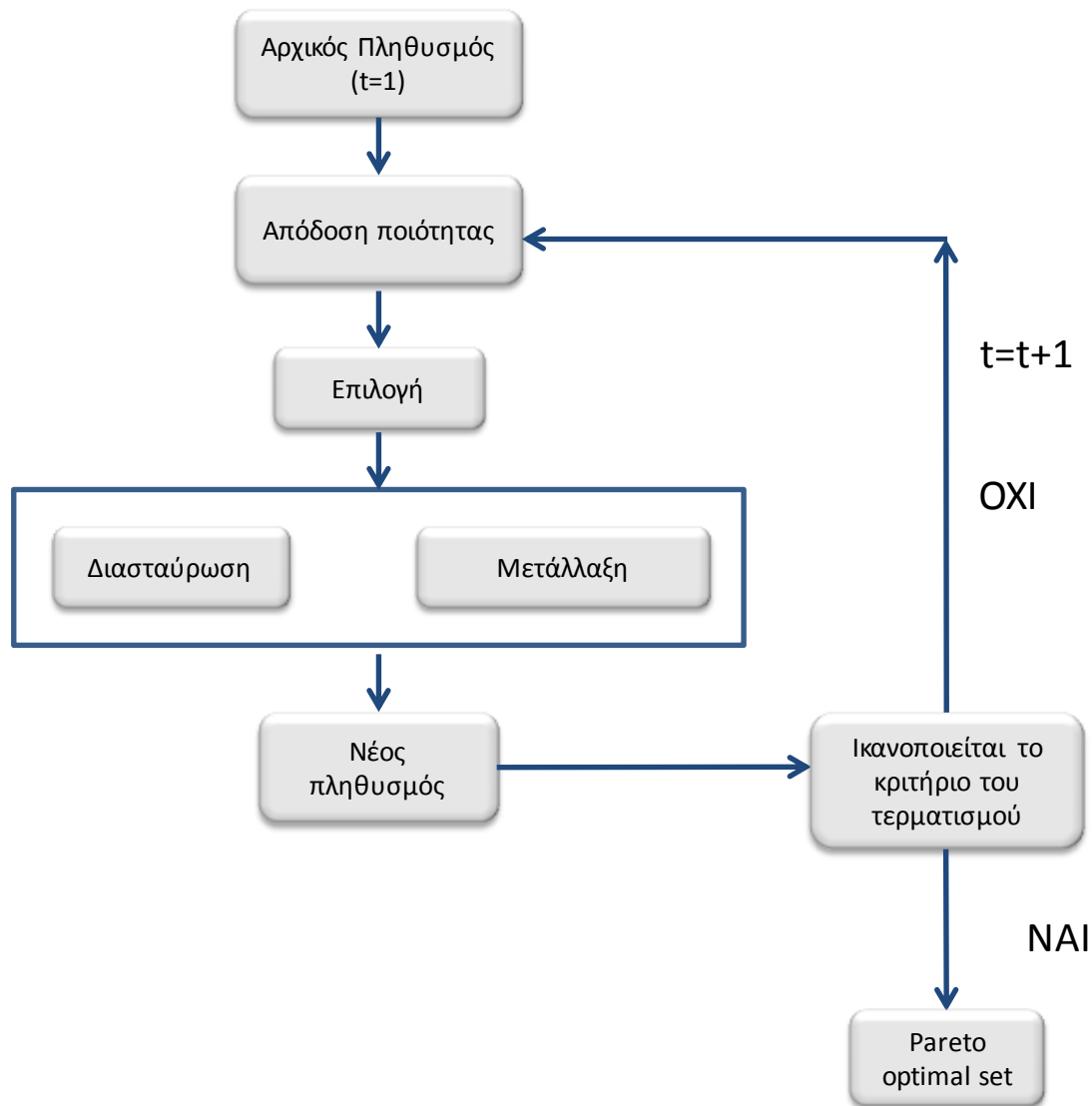
Βήμα 2: *Απόδοση «ποιότητας»:* Για κάθε «άτομο» $i \in P_t$ καθορίζεται το κωδικοποιημένο διάνυσμα απόφασης $x = m(i)$ καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση $y = f(x)$ και υπολογίζεται η μετρητή αξία ποιότητας $F(i)$

Βήμα 3: *Επιλογή:* Τίθεται $P' = \emptyset$ και $t = 0$. Επανάληψη για $i = 1, \dots, N$

α) Επιλογή ενός «ατόμου» $i \in P_t$ σύμφωνα με ένα δεδομένο σχέδιο και με βάση την αξία ποιότητας $F(i)$.

β) $P' = P' + i$ ο προσωρινός πληθυσμός P' ονομάζεται «πισίνα ζευγαρώματος» (mating pool)

- Βήμα 4:** **Ανταλλαγή γονιδίων:** Τίθεται $P'' = \emptyset$, επανάληψη για $i = 1, \dots, N/2$
- α) Επιλογή δύο ατόμων $i, j \in P'$ και απομάκρυνσή τους από το P'
- β) Ανταλλαγή γονιδίων των i, j . Προκύπτουν τα «παιδιά» $k, l \in I$.
- γ) Προστίθενται τα παιδιά k, l στο P'' με πιθανότητα p_c (διαφορετικά προστίθενται οι i, j στο P'').
- Βήμα 5:** **Μετάλλαξη:** Τίθεται $P''' = \emptyset$. Επανάληψη για κάθε άτομο $i \in P''$.
- α) Μετάλλαξη της i με ρυθμό μετάλλαξης p_m . Το άτομο που προκύπτει είναι $j \in I$.
- β) Τίθεται $P''' = P'' + j$
- Βήμα 6:** **Τερματισμός:** Τίθεται $P_{t+1} = P'''$, $t = t + 1$
- Αν $t \geq T$ ή ικανοποιείται κάποιο άλλο κριτήριο τερματισμού τότε $A = p(m(P_t))$, διαφορετικά, επιστροφή στο Βήμα 2.



Σχήμα 4.5.6: Διάγραμμα ροής βασικού εξελικτικού αλγορίθμου.

4.5.5.5.2 Vector - Evaluated Genetic Algorithm

Το 1985 ο Schaffer πρότεινε τον *Vector - Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)*. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αντιπροσωπευτικός της κατηγορίας «επιλογής εναλλάξ» (“selection by swithing objectives”). Σε αυτή την προσέγγιση, η επιλογή γίνεται για κάθε ένα από τα κριτήρια k ξεχωριστά, συμπληρώνοντας ίσα τμήματα της «δεξαμενής ζευγαρώματος». Δηλαδή, σε ένα πρόβλημα με k κριτήρια δημιουργούνται k υποπληθυσμοί με μέγεθος k/N , όπου N το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού και στη συνέχεια αθροίζονται για να δημιουργήσουν το νέο πληθυσμό στον οποίο θα εκτελεστούν η ανταλλαγή γονιδίων και η μετάλλαξη ως συνήθως.

4.5.5.3 Pareto Ranking Method

Η συγκεκριμένη προσέγγιση προτάθηκε αρχικά από τον Goldberg με βασική έννοια την επίτευξη ίσων ενδεχόμενων αναπαραγωγής για όλες τις βέλτιστες κατά Pareto λύσεις. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη διαδικασία επιλογής του Baker, αλλά ο πληθυσμός κατηγοριοποιείται στη βάση των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Η ιδέα της επιλογής με βάση την ταξινόμηση (ranking selection) του Baker είναι:

1. κατάταξη του πληθυσμού βασισμένη στην «κατά Pareto» ταξινόμηση
2. απόδοση πιθανοτήτων επιλογής στις λύσεις με βάση την κατάταξη.

Η διαδικασία κατάταξης αντιστοιχεί σε απόδοση θέσης 1 σε μη-κυριαρχούμενες λύσεις και απομάκρυνσή τους από τον ανταγωνισμό, εύρεση των μη-κυριαρχούμενων λύσεων μεταξύ των εναπομεινάντων (θέση 2) κ.λπ. Με αυτόν τον τρόπο, η προσέγγιση αυτή αποδίδει σε όλες τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις την ίδια ακριβώς αξία ποιότητας, με σκοπό να τους δώσει ίση πιθανότητα αναπαραγωγής.

Οι Fonseca και Fleming πρότειναν μια ελαφρώς διαφορετική μέθοδο κατάταξης κατά Pareto (Pareto ranking). Σε όλα τα μη-κυριαρχούμενα άτομα αποδίδεται θέση 1 και στα άλλα θέση (rank) ίση με τον αριθμό των κυριαρχούμενων λύσεων τους συν ένα (*Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm – FFGA*). Η διαδικασία προχωρά με κατάταξη του πληθυσμού σύμφωνα με τις θέσεις. Η ποιότητα αποδίδεται με παρεμβολή (γραμμική ή μη γραμμική) από την καλύτερη στη χειρότερη λύση και στη συνέχεια με το μέσο όρο των λύσεων με την ίδια θέση. Η επιλογή γίνεται με τη μέθοδο *stochastic universal sampling* που προτάθηκε από τον Baker.

Οι Srinivas and Deb εφάρμοσαν μια παρόμοια διαδικασία (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm-NSGA*). Ο πληθυσμός ταξινομείται με βάση τη μέθοδο ταξινόμησης του Goldberg. Προσδιορίζονται τα μη-κυριαρχούμενα άτομα (λύσεις) και τους αποδίδεται μια μεγάλη (ψεύτικη – dummy) αξία ποιότητας. Για τη διατήρηση της ποικιλίας του πληθυσμού, αυτές οι λύσεις κατανέμονται με βάση τις ψεύτικες τιμές ποιότητας τους. Μετά την κατανομή, οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις αγνοούνται προσωρινά και προσδιορίζεται το δεύτερο μη-κυριαρχούμενο μέτωπο (*non-dominated front*) στο υπόλοιπο του πληθυσμού στο οποίο αποδίδεται μια ψεύτικη αξία ποιότητας που κρατιέται μικρότερη από την ελάχιστη ψεύτικη ποιότητα του προηγούμενου μετώπου. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου όλος ο πληθυσμός να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορα μέτωπα. Για την αναπαραγωγή μιας νέας γενεάς χρησιμοποιείται η μέθοδος επιλογής που αναφέρεται ως «*stochastic remainder proportionate selection*».

4.5.5.4 Pareto Tournament Method

Προτάθηκε από τους Horn, Nafpliotis και Goldberg (*Niched Pareto Genetic Algorithm - NPGA*). Σε αυτή τη μέθοδο δυο υποψήφια λύσεις για επιλογή, διαλέγονται τυχαία από τον πληθυσμό. Επιπλέον, επιλέγεται τυχαία ένα σύνολο σύγκρισης από λύσεις (άτομα-individuals) του πληθυσμού. Κάθε υποψήφια λύση συγκρίνεται με κάθε στοιχείο από το σύνολο σύγκρισης. Δύο περιπτώσεις υπάρχουν:

- (1) Αν μια υποψήφια κυριαρχείται από το σύνολο σύγκρισης αλλά η άλλη όχι, η μη-κυριαρχούμενη λύση επιλέγεται για αναπαραγωγή.
- (2) Αν και οι δύο υποψήφια λύσεις είναι είτε κυριαρχούμενες είτε μη-κυριαρχούμενες, χρησιμοποιείται μια μέθοδος κατανομής της ποιότητας (sharing) για να επιλεγεί η «νικήτρια».

4.5.5.5 Random Weighted approach

Οι Murata, Ishibuchi και Tanaka, πρότειναν τη συγκεκριμένη προσέγγιση που χρησιμοποιεί τυχαία «βάρη» (random-weight).

Υποθέτουμε ότι πρόκειται να μεγιστοποιηθούν q αντικειμενικές συναρτήσεις. Η αντικειμενική συνάρτηση από το άθροισμα των βαρών θα είναι:

$$z = \sum_{k=1}^q w_k f_k(x) \quad (4.22)$$

Οι τυχαίοι συντελεστές στάθμισης (βάρη) υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$w_k = \frac{r_k}{\sum_{j=1}^q r_j} \quad (4.23)$$

όπου $k=1,2,\dots,q$ και r_j είναι τυχαίοι μη αρνητικοί αριθμοί.

Πριν επιλεγεί ένα ζευγάρι γονιών για την ανταλλαγή γονιδίων (crossover), ένα νέο σύνολο τυχαίων βαρών προσδιορίζεται μέσω της σχέσης (4.23). Στη συνέχεια, η πιθανότητα επιλογής p_i για το άτομο (λύση) i καθορίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$p_i = \frac{z_i - z_{\min}}{\sum_{j=1}^{pop-size} (z_j - z_{\min})} \quad (4.24)$$

όπου η z_{\min} είναι η «χειρότερη» αξία ποιότητας στον τρέχοντα πληθυσμό. Σε κάθε γενεά αποθηκεύεται και ενημερώνεται ένα δοκιμαστικό σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Για ένα πρόβλημα με q σκοπούς, υπάρχουν q ακραία σημεία στις λύσεις κατά Pareto, καθένα από τα οποία μεγιστοποιεί έναν σκοπό. Στη μέθοδο προτείνεται, επίσης, μια στρατηγική διαφύλαξης των επίλεκτων (elite preserving strategy) για την υπαγωγή των ακραίων

σημείων συν κάποιες άλλες τυχαία επιλεγμένες λύσεις κατά Pareto, στον επόμενο πληθυσμό.

4.5.5.5.6 *Hajela and Lin's Weighting-based Genetic Algorithm*

Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στη μέθοδο των σταθμισμένων συντελεστών (weighing method). Προκειμένου να ερευνηθούν πολλαπλές λύσεις παράλληλα, τα βάρη δεν είναι σταθερά αλλά, αντίθετα, κωδικοποιούνται στο διάνυσμα απόφασης του ατόμου (individual's vector). Έτσι, κάθε άτομο (λύση) αξιολογείται με βάση έναν ενδεχόμενα διαφορετικό συνδυασμό βαρών (*HLGA—Hajela and Lin's Genetic Algorithm*).

4.5.5.5.7 *Goal programming approach*

Η βασική ιδέα του προγραμματισμού στόχων, είναι η επαλήθευση ενός συγκεκριμένου αριθμητικού στόχου για κάθε κριτήριο και στη συνέχεια αναζήτηση λύσης που ελαχιστοποιεί το άθροισμα βαρών των αποκλίσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων από τους σχετικούς στόχους.

Στην ουσία υπάρχουν δύο είδη προβλημάτων προγραμματισμού στόχων. Στην μία περίπτωση (non-preemptive goal programming), όλοι οι στόχοι είναι περίπου συγκρίσιμης σημασίας. Στην άλλη (preemptive goal programming), υπάρχει μια ιεράρχηση επιπέδων προτεραιότητας για τους στόχους, ώστε στους στόχους κύριας σημασίας δίνεται πρώτη προτεραιότητα κ.ο.κ. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως αναγνωρισμένη για επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια. Οι Gen and Liu πρότειναν έναν γενετικό αλγόριθμο για επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού στόχων. Χρησιμοποιείται η μέθοδος ιεράρχησης της ποιότητας για την εκτίμηση του μεριδίου κάθε χρωμοσώματος. Τα άτομα ταξινομούνται με βάση τη λεξικογραφική κατάταξη. Στη συνέχεια αποδίδεται μια αξία ποιότητας σε κάθε άτομο με παρεμβολή από το καλύτερο προς το χειρότερο, σύμφωνα με μια εκθετική συνάρτηση.

4.5.5.5.8 *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*

Προτάθηκε από τον Zitzler και συνδυάζει ορισμένες από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA*) παρόμοια με τους υπόλοιπους MOEA:

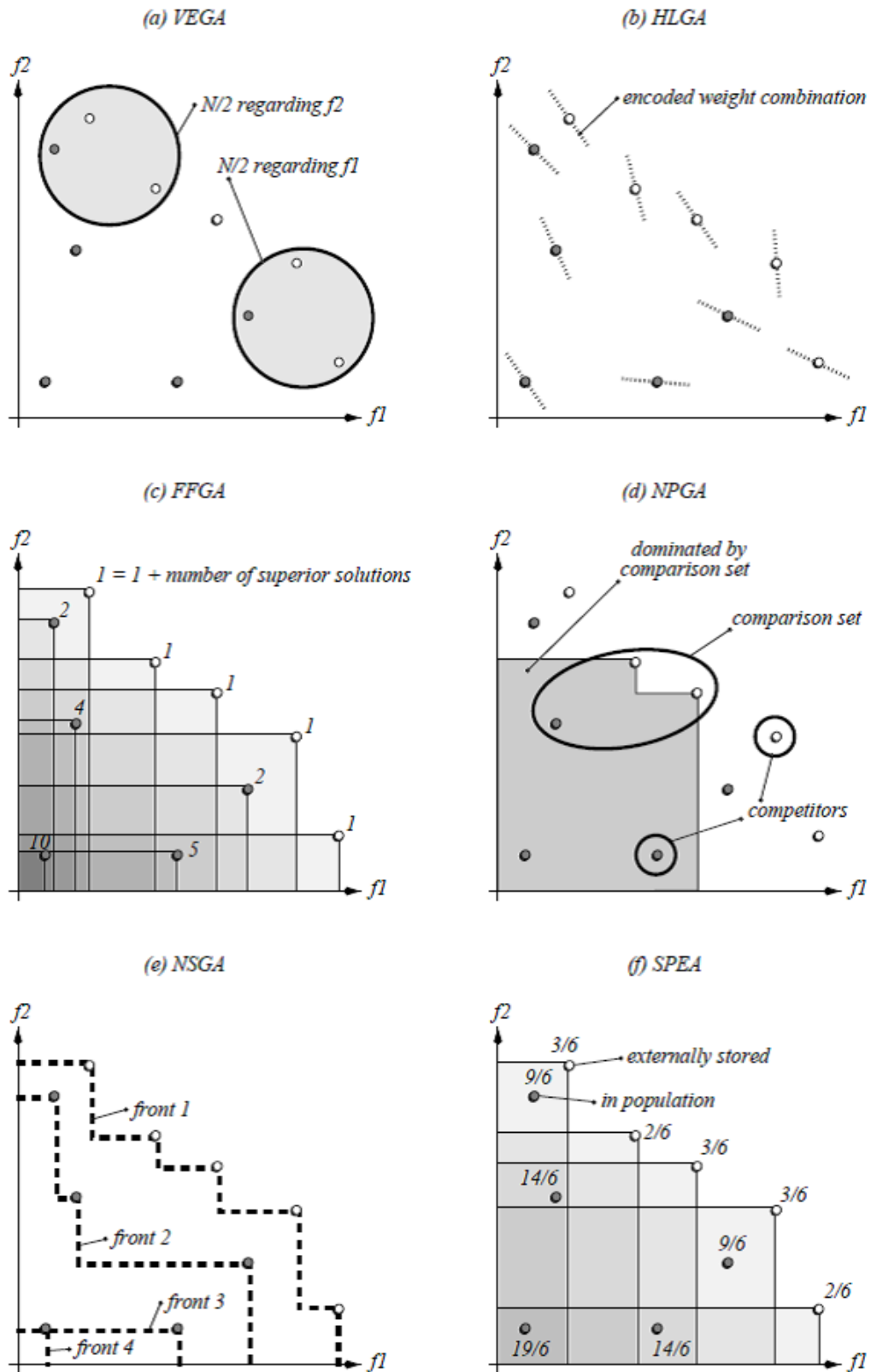
- αποθηκεύει τα άτομα που αντιπροσωπεύουν ένα μη-κυριαρχούμενο μέτωπο (*no dominated front*)
- χρησιμοποιεί την αρχή της κυριαρχίας για να δώσει αξίες ποιότητας στις λύσεις (άτομα)
- δημιουργεί συγκροτήματα (clustering) για να μειώσει τον αριθμό των λύσεων που αποθηκεύονται εξωτερικά, χωρίς να καταστρέφει τα χαρακτηριστικά του μετώπου.

Από την άλλη, έχει τα εξής στοιχεία πρωτοτυπίας:

- συνδυάζει τις παραπάνω τρεις τεχνικές σε έναν και μόνο αλγόριθμο
- η ποιότητα ενός μέλους του πληθυσμού καθορίζεται μόνο από τις λύσεις που έχουν αποθηκευτεί στο εξωτερικό σύνολο
- όλες οι λύσεις στο εξωτερικό σύνολο λαμβάνουν μέρος στην επιλογή
- χρησιμοποιείται μια νέα μέθοδος για τη διατήρηση της διασποράς των λύσεων.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται συγκριτικά η μέθοδος επιλογής σε 6 περιπτώσεις MOEA (Zitzler 1999).

Στη βάση του αλγόριθμου SPEA αναπτύχθηκε νεώτερος, πιο εξελιγμένος αλγόριθμος ο SPEA 2. Στον δεύτερο βασίζεται και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής και συνεπώς ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 6.



Σχήμα 4.5.7: Αναπαράσταση επιλογής λύσεων για διάφορους MOEA.

5

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη διδακτορική διατριβή αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της *βελτιστοποίησης της πολιτικής απόκρισης στο πλαίσιο του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης* γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες. Το συγκεκριμένο πρόβλημα συνίσταται στον *καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού δράσεων προστασίας* για τον πληθυσμό γύρω από τις εγκαταστάσεις σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος (εκκένωση, προστασία διαφόρων βαθμών σε κτήρια κ.λπ.). Πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια.

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται έμφαση στην παρουσίαση του μοντέλου εκκένωσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε και στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης με βάση το κριτήριο των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού. Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Για την εκτίμηση των συνεπειών στην υγεία του πληθυσμού που συμμετέχει σε δράσεις που περιλαμβάνουν εκκένωση, αναπτύχθηκε ένα *στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της κίνησης* των οχημάτων, το οποίο βασίζεται στις *διαδικασίες Markov*. Αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικές μορφές, η κάθε μια εκ των οποίων προσφέρει διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας προσομοίωσης της κίνησης. Η πλέον αναλυτική μορφή βασίζεται στη *μέθοδο Monte Carlo*.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε μοντέλα εκκένωσης που έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία. Στη συνέχεια περιγράφονται τα μοντέλα εκκένωσης που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής και παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές τους.

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

5.2.1 ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Τις δυο τελευταίες δεκαετίες παρουσιάστηκαν σημαντικές αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με τη μοντελοποίηση της εκκένωσης σε περίπτωση εκτάκτων καταστάσεων. Πλήθος μοντέλων έχει αναπτυχθεί που αφορούν στην εκκένωση κτηρίων σε περίπτωση πυρκαγιάς ή άλλης έκτακτης εγκατάστασης (π.χ. εμπορικών κέντρων, σχολείων, εργασιακών χώρων). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπήρξε μετά και από το συμβάν της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 στο World Trade Center στις ΗΠΑ. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα:

- μοντέλα που προσομοιάζουν την κίνηση των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση (Santos and Aguirre 2004), όπως τα EXIT89 (Fahy 1991), EXODUS (Galea and Perez Galparsoro 1994), EGRESS (Ketchell et al. 1993), SIMULEX (Thompson and Marchant 1995), ACCEM (Sun and de Vries 2009), Social Force Model (Parisi and Dorso 2007) κ.ά.
- μοντέλα που βελτιστοποιούν την κίνηση των ατόμων (π.χ. ελαχιστοποιούν το χρόνο εκκένωσης), όπως το EVACNET+ και η παραλλαγή του SAFE-R, καθώς και νεότερες προσεγγίσεις (Chen and Feng 2009).

Πέρα από την εκκένωση σταθερών κτηριακών εγκαταστάσεων που αναφέρθηκαν, στη βιβλιογραφία υπάρχουν εργασίες που αφορούν μοντέλα που προσομοιάζουν την εκκένωση σε άλλου είδους εγκαταστάσεις όπως πλοία (π.χ. (Ginnis et al. 2010; Lee et al. 2003)), υπόγειους σταθμούς - μετρό (Zarboutis and Marmaras 2007) ή και άλλες σταθερές εγκαταστάσεις.

Πιο πρόσφατα μοντέλα που προσομοιάζουν την κίνηση πεζών που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση είναι για παράδειγμα αυτά που παρουσιάζονται από τους (Zheng and Liu 2010; Zong et al. 2010).

5.2.2 ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

5.2.2.1 Γενικά

Τα μοντέλα που προσομοιάζουν ή βελτιστοποιούν την κίνηση κατά τη διάρκεια της εκκένωσης από κτήρια ή άλλες εγκαταστάσεις, μοντελοποιούν την κίνηση των ανθρώπων (με τα πόδια) λαμβάνοντας βεβαίως υπόψη μια σειρά χαρακτηριστικών (όπως η ταχύτητα κίνησης). Στην περίπτωση, ωστόσο, που αναφερόμαστε σε εκκένωση μεγάλων γεωγραφικών περιοχών για την οποία απαιτείται η μετακίνηση του πληθυσμού σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. στην περίπτωση φυσικών καταστροφών (όπως ο τυφώνας, οι πλημμύρες και οι δασικές πυρκαγιές) ή στην περίπτωση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης (πυρηνικά ατυχήματα, ατυχήματα σε εγκαταστάσεις με επικίνδυνες ουσίες, μεταφορά επικίνδυνων φορτίων), εμπλέκονται μέσα μετακίνησης (π.χ. αυτοκίνητα, μέσα μαζικής μεταφοράς). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν σημαντικές εργασίες για τη μοντελοποίηση της εκκένωσης μεγάλων περιοχών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (*regional or urban*

evacuation models). Αρκετά μοντέλα χρησιμοποιούν αρχές που έχουν εφαρμοστεί σε μοντέλα εκκένωσης κτηρίων και το αντίστροφο.

Μια αναλυτική επισκόπηση μοντέλων αυτού του είδους πριν το 1991 έχει γίνει από τον Southworth (Southworth 1991). Στην εργασία αυτή επισημαίνεται ότι η προσομοίωση της εκκένωσης μεγάλων τμημάτων του πληθυσμού σε περιπτώσεις εκτάκτων καταστάσεων απαιτεί τη γνώση μιας σειράς πληροφοριών, όπως αυτές που σχετίζονται με:

- τις υποδομές μεταφοράς (π.χ. δρόμοι εκκένωσης)
- την κατανομή του πληθυσμού (χωρική) στην περιοχή ενδιαφέροντος
- τη δυνατότητα χρήσης οχημάτων μεταφοράς (διαθεσιμότητα, είδος)
- το χρόνο προειδοποίησης του πληθυσμού
- τη συμπεριφορά των ατόμων που θα λάβουν μέρος στην εκκένωση σχετικά με την επιλογή διαδρομής (*evacuation route choice*) κ.ά.

Εργασίες της τελευταίας δεκαετίας επικεντρώνουν, μεταξύ άλλων, και στην ενσωμάτωση στα μοντέλα εκκένωσης της δυνατότητας χρήσης δεδομένων πραγματικού χρόνου (*remotely sensed data*) (π.χ. (Franzese and Xiong 2001; Hu 2004). Ωστόσο, η πλειοψηφία των μοντέλων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται στη φάση του σχεδιασμού (*pre-planning phase*).

Πρόσφατα, έμφαση έχει δοθεί από ορισμένους ερευνητές στη μοντελοποίηση της εκκένωσης σε αστικά κέντρα με μεγάλο πληθυσμό (π.χ. σε πόλεις όπως το Πεκίνο), όπου θα χρειαστεί να πραγματοποιηθεί η εκκένωση με μέσα μαζικής μεταφοράς, όπως τα λεωφορεία και όχι με αυτοκίνητα (Sayyady and Eksioglu 2010; Song et al. 2009).

Αρκετά μοντέλα εκκένωσης βασίζονται σε μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης οχημάτων που αρχικά είχαν δημιουργηθεί για τη μελέτη και μοντελοποίηση των κυκλοφοριακών συνθηκών.

Τα *μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης των οχημάτων* για τη μελέτη των κυκλοφορικών συνθηκών (*Traffic Simulation Models*), συνήθως κατηγοριοποιούνται ως εξής (Εμμανουηλίδης 2008; Georgiadou et al. 2007; Sisiopiku et al. 2004):

1. **«μακροσκοπικά» μοντέλα** (*macroscopic*), όπου η κυκλοφοριακή ροή (*traffic flow*) μελετάται μέσω της προσομοίωσης ομάδων από οχήματα (*composition of platoons of vehicles*)
2. **«μικροσκοπικά» μοντέλα** (*microscopic*), τα οποία βασίζονται σε χαρακτηριστικά των μεμονωμένων οχημάτων
3. **«μεσοσκοπικά» μοντέλα** (*mesoscopic*), τα οποία εφαρμόζουν αρχές και από τα δυο είδη που προαναφέρθηκαν, παρέχοντας ένα επίπεδο λεπτομέρειας που βρίσκεται μεταξύ αυτών που προσφέρουν τα μακροσκοπικά και τα μικροσκοπικά.

Τα μοντέλα προσομοίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών χαρακτηρίζονται, επίσης, ως «δυναμικά» (dynamic traffic assignment models) ή «στατικά» (static assignment models), ανάλογα με το βαθμό ενσωμάτωσης χαρακτηριστικών που αφορούν στον κυκλοφοριακό φόρτο (congestion) και τη χωρητικότητα (capacity) των δρόμων κυκλοφορίας (Alsnih and Stopher 2004).

Με βάση τα παραπάνω, τα μοντέλα εκκένωσης (όπως και τα απλά μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως μακροσκοπικά, μικροσκοπικά ή μεσοσκοπικά και αντίστοιχα ως δυναμικά ή στατικά.

Επιπλέον, τα μοντέλα εκκένωσης μπορούν με βάση τον τρόπο επιλογής της διαδρομής εκκένωσης (route choice behavior) να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες (Georgiadou et al. 2007):

1. *Καθορισμένες διαδρομές εκκένωσης* (pre-defined route choice): Στα μοντέλα αυτής της κατηγορίας η επιλογή των διαδρομών εκκένωσης είναι καθορισμένη από πριν σύμφωνα με ένα ορισμένο σχέδιο έκτακτης ανάγκης ή με βάση υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί από το χρήστη, βασιζόμενος σε κριτήρια όπως τη διαδρομή που αντιστοιχεί στη μικρότερη απόσταση που πρέπει να διανυθεί κατά την εκκένωση.
2. *Βελτιστοποίηση διαδρομών εκκένωσης* (system optimal or user optimal route selection models): στα μοντέλα αυτής της κατηγορίας γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης των διαδρομών εκκένωσης σύμφωνα με κάποια κριτήρια (π.χ. ελαχιστοποίηση του χρόνου εκκένωσης, ελαχιστοποίηση απόστασης που θα διανυθεί). Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνουν τις πληροφορίες σχετικά με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
3. *Δυναμική επιλογή διαδρομής εκκένωσης*: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα στα οποία η επιλογή της διαδρομής εκκένωσης κατά την προσομοίωση αυτής γίνεται δυναμικά (dynamically), στη βάση κάποιων κριτηρίων. Για παράδειγμα, τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι:
 - ο προτιμήσεις των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση (evacuee's preference factors) με βάση τον τελικό προορισμό τους (π.χ. τόπος κατοικίας συγγενικών προσώπων) ή με βάση τον τύπο του οχήματος που χρησιμοποιούν κατά την εκκένωση
 - οι ζητήματα που αφορούν στην επικινδυνότητα για την υγεία του πληθυσμού (π.χ. κατεύθυνση τοξικού νέφους μετά από τεχνολογικό ατύχημα μεγάλης έκτασης)
 - ο «κόστος» μετακίνησης (travel "cost") ανάλογα με την κατεύθυνση εκκένωσης (π.χ. χρόνος μετακίνησης ή απόσταση)
 - ο διαθέσιμα δεδομένα κυκλοφοριακών συνθηκών για μια συγκεκριμένη περιοχή (συχνά χρησιμοποιείται ο όρος "myopic" view of the traffic conditions, δηλ. τα οχήματα επιλέγουν τη διαδρομή τους μεταξύ

εναλλακτικών διαδρομών ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν τη δεδομένη στιγμή στο συγκεκριμένο σημείο)

- ο αναγνώριση πιθανού «μποτιλιαρίσματος» σε ορισμένα σημεία, που θα μπορούσε να δυσκολέψει την ανεμπόδιστη ροή των οχημάτων και κατά συνέπεια την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών πολιτικών εκκένωσης, κ.ά.

Με βάση κριτήρια σαν αυτά που ενδεικτικά αναφέρθηκαν, στην περίπτωση των δυναμικών μοντέλων εκκένωσης, η επιλογή διαδρομής μπορεί να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες αβεβαιότητας, οπότε αναφερόμαστε σε «στοχαστικά» μοντέλα (probabilistic route choice) ή αντίστοιχα σε «ντετερμινιστικά» (deterministic route choice) όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης μοντέλων εκκένωσης που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με την επιλογή διαδρομής (route choice).

5.2.2.2 Καθορισμένη επιλογή διαδρομής εκκένωσης

Ένα από τα παλαιότερα μοντέλα εκκένωσης είναι το NETSIM (Southworth 1991). Χαρακτηρίζεται σαν «μικροσκοπικό» μοντέλο (microscopic model) που λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως τον τύπο του οχήματος που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης και τη συμπεριφορά των οδηγών ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν. Ωστόσο, κάθε αλλαγή διαδρομής σε διασταύρωση (intersection) πρέπει να έχει καθοριστεί από πριν (a priori) γι' αυτό και δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως δυναμικό μοντέλο επιλογής διαδρομής (dynamic route selection model) (Mei 2002).

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ορισμένα μειονεκτήματα για τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου σε περίπτωση εκκένωσης, όπως για παράδειγμα η μειωμένη χωρητικότητά του (Alsnih and Stopher 2004) και το γεγονός ότι απαιτεί λεπτομερή δεδομένα εισόδου, ζήτημα που το καθιστά μη αποτελεσματικό για περιπτώσεις μεγάλων οδικών δικτύων (Sattayhatewa and Ran 2000). Αναφέρεται, επίσης, ότι οι έλεγχοι αξιοπιστίας για το NETSIM έχουν πραγματοποιηθεί σε μικρό αστικό δίκτυο και κάτω από κανονικές συνθήκες, ζήτημα το οποίο πιθανά το καθιστά μη αποτελεσματικό για προσομοίωση εκκένωσης σε περίπτωση έκτακτων καταστάσεων (Sheffi et al. 1982).

Άλλα μοντέλα εκκένωσης που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία (pre-selected routes) είναι ενδεικτικά αυτά που περιγράφονται από τους Tweedie et al. (Tweedie et al. 1986), το μοντέλο CLEAR (Moeller et al. 1981) και το μοντέλο που προτάθηκε από τον Farahmand (Farahmand 1997) για εκκένωση σε περίπτωση τυφώνα (hurricane evacuation).

5.2.2.3 Βελτιστοποίηση διαδρομής εκκένωσης

Σύμφωνα με τον Southworth (Southworth 1991), το πρώτο μοντέλο που βασίζεται στη βελτιστοποίηση της κίνησης είναι το DYMODO το οποίο παρουσιάστηκε από τον Janson το 1989. Πρόκειται για δυναμικό μοντέλο όσον αφορά στην ενσωμάτωση παραμέτρων που αφορούν στις κυκλοφοριακές συνθήκες.

Ο Tufekci (Tufekci 1995; Tufekci and Kisko 1991) ανέπτυξε το μοντέλο REMS (Regional Evacuation Modeling System), το οποίο προσομοιάζει την εκκένωση σε περίπτωση τυφώνα. Το υπολογιστικό σύστημα βελτιστοποιεί την κατανομή του πληθυσμού με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εκκένωσης. Αντίστοιχα μοντέλα βελτιστοποίησης της κατανομής του πληθυσμού σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης παρουσιάστηκαν από τους (Bakuli and MacGregor Smith 1996) και τον Barrett (Barrett et al. 2000).

Οι (Sattayhatewa and Ran 2000) ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο εκκένωσης για την περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος. Στόχος του υπολογιστικού συστήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εκκένωσης (για όλα τα άτομα που συμμετέχουν σε αυτή), λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ροή της κυκλοφορίας και εμπόδια στη διαδρομή.

Το υπολογιστικό σύστημα HARIA-2 για το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης βασίζεται στην προσέγγιση της ελαχιστοποίησης της απόστασης που θα διανυθεί, καθώς και της ελαχιστοποίησης του χρόνου εκκένωσης (Mazzini et al. 2001).

Η προσέγγιση της ελαχιστοποίησης της διαδρομής εκκένωσης ακολουθείται και στο σχετικό μοντέλο που περιλαμβάνεται στο σύστημα στήριξης αποφάσεων του Επιχειρησιακού Κέντρου Αντιμετώπισης Ατυχημάτων στη χώρα μας (Kiranoudis et al. 2002; Kiranoudis et al. 1999).

Στο μοντέλο που παρουσιάζεται από τους Cova και Johnson (Cova and Johnson 2003) στόχος είναι η κατεύθυνση του πληθυσμού προς την πλησιέστερη έξοδο, δηλ. η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εκκένωσης, καθώς και η ελαχιστοποίηση του αριθμού των συγκρούσεων των οχημάτων (intersection conflicts).

Στο μοντέλο που παρουσιάζεται από τον Chen (Chen and Zhan 2005) ο σκοπός της ελαχιστοποίησης της διαδρομής επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κανονικής κυκλοφορίας.

Στο μοντέλο που περιλαμβάνεται στη μεθοδολογία αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων που παρουσιάζεται από τον Ishigami (Ishigami et al. 2004), η επιλογή εναλλακτικής διαδρομής εξαρτάται από την απόσταση λαμβάνοντας υπόψη κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας (μέση ταχύτητα και πυκνότητα οχημάτων). Το μοντέλο αυτόματα επιλέγει τη συντομότερη διαδρομή (με βάση τις κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας) που οδηγεί μακριά από την πυρηνική εγκατάσταση.

Ο Lu (Lu et al. 2003) παρουσιάζει τον Capacity Constrained Route Planner (CCRP). Πρόκειται για έναν υβριδικό αλγόριθμο (heuristic algorithm) ο οποίος καθορίζει τις

διαδρομές για ομάδες ατόμων που συμμετέχουν στην εκκένωση σύμφωνα με κάποια σειρά προτεραιότητας. Η σειρά προτεραιότητας βασίζεται στο στόχο της ελαχιστοποίησης του χρόνου εκκένωσης (συντομότερη χρονικά διαδρομή) για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος δεν λαμβάνει υπόψη του παραμέτρους που αφορούν στον κυκλοφοριακό φόρτο που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Από τον Kongomsaksakul (Kongsomsaksakul et al. 2005) παρουσιάζεται ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της κατανομής του πληθυσμού σε καταφύγια σε περίπτωση πλημμύρας. Το μοντέλο βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου που θα διανυθεί έως τα καταφύγια.

Αντίστοιχα, οι Feng και Wen (Feng and Wen 2005) παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της απόστασης εκκένωσης σε περίπτωση σεισμού, όπου δίνεται η δυνατότητα διοχέτευσης της κυκλοφοριακής ροής μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη χωρητικότητα των δρόμων.

Πιο πρόσφατα μοντέλα που ανήκουν στην κατηγορία αυτών που βελτιστοποιούν την κίνηση παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία από τους (Saadatseresht et al. 2009; Song et al. 2010; Stepanov and Smith 2009; Uno and Kashiyama 2008; Wu et al. 2010; Xie et al. 2010; Xie and Turnquist 2011; Yuan and Dingwei 2007; Zhan et al. 2010).

5.2.2.4 Δυναμική επιλογή διαδρομής εκκένωσης

Από τα πρώτα και σημαντικότερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι το μοντέλο *NETVAC* (Sheffi et al. 1982). Πρόκειται για μακροσκοπικό μοντέλο το οποίο προσομοιάζει την κίνηση κατά τη διάρκεια εκκένωσης γύρω από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Για την επιλογή εναλλακτικής διαδρομής από τους οδηγούς το μοντέλο υποθέτει ότι υπάρχει γνώση από πριν των διαδρομών, ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν οι τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες (“myopic” view of the traffic conditions) (Sheffi et al. 1982; Southworth 1991). Το μοντέλο είναι ντετερμινιστικό, ενώ από ορισμένους ερευνητές αναφέρεται ως μειονέκτημά του ότι δεν είναι «ευαίσθητο» στη συμπεριφορά των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση (Jamei 1984; Mei 2002; Sattayhatewa and Ran 2000).

Οι Stern (Sinuany-Stern and Stern 1993) πρότειναν το μοντέλο *SLAM II*, σύμφωνα με το οποίο η επιλογή διαδρομής πραγματοποιείται δυναμικά με βάση το λιγότερο «επιβαρυσμένο» δρόμο (least “loaded” road). Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η μεγιστοποίηση της απόστασης από το τελευταίο αυτοκίνητο (όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση αυτή, τόσο λιγότερο «επιβαρυσμένος» θεωρείται ο συγκεκριμένος δρόμος). Μια παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιείται και στο μοντέλο εκκένωσης *SNET* (Southworth 1991).

Ένα από τα πιο γνωστά δυναμικά μοντέλα εκκένωσης είναι το *MASSVAC* (MASS eVACuation). Πρόκειται για ένα στοχαστικό μοντέλο το οποίο βασίζεται σε παρόμοιες αρχές διατήρησης δεδομένων με αυτές του *NETVAC*. Ο καθορισμός των εναλλακτικών διαδρομών

εκκένωσης πραγματοποιείται μέσω μιας εκδοχής της στοχαστικής διαδικασίας πολλαπλών διαδρομών του Dial (Dial's probabilistic multipath assignment procedure) (Hobeika and Jamei 1985; Southworth 1991). Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού του χρόνου πλήρους εκκένωσης μιας περιοχής (evacuation clearness time), όπως επίσης και του υπολογισμού του εκ νέου, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές περιοχές κυκλοφοριακής συμφόρησης. Ένα μειονέκτημα που αναφέρεται στη βιβλιογραφία είναι ότι ο χρόνος για την προσέγγιση της κοντινότερης μεγάλης «αρτηρίας» αγνοείται (Alsnih and Stopher 2004). Το συγκεκριμένο μοντέλο αναβαθμίστηκε στην εκδοχή του MASSVAC 4.0 (Hobeika and Kim 1998). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η τροποποίηση αυτή έγινε λόγω των μειονεκτημάτων του μοντέλου Dial που σχετίζονταν με το γεγονός ότι οι πιθανότητες επιλογής διαφορετικών εναλλακτικών διαδρομών ήταν ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αν και το μοντέλο MASSVAC 4.0 περιλαμβάνει τεχνικές σχετικά με την ενσωμάτωση παραμέτρων που αφορούν στις κυκλοφοριακές συνθήκες, τα δεδομένα εισόδου απαιτούν τον καθορισμό διαδρομής σε κάθε κόμβο προέλευσης. Επιπλέον, παρόλο που οι διαδρομές αυτές καθορίζονται δυναμικά, το σύστημα δεν αποθηκεύει τις θέσεις των οχημάτων, καθώς θεωρείται ότι διανύουν όλη τη διαδρομή ταυτόχρονα (Fu 2004). Το μοντέλο του Dial (Dial's Logit model) για τον καθορισμό της πιθανότητας επιλογής εναλλακτικής διαδρομής εφαρμόζεται επίσης και στο μοντέλο που προτείνεται από τους (Tanaka et al. 1998).

Το μοντέλο *DYNEV* (DYnamic Network Evacuation, KLD Associates) αναπτύχθηκε για λογαριασμό του ομοσπονδιακού γραφείου αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων στις ΗΠΑ (Federal Emergency Management Agency - FEMA) με σκοπό την υποστήριξη αποφάσεων σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος σε πυρηνική εγκατάσταση (Fu 2004). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του παράγοντες που αφορούν στην κυκλοφοριακή συμφόρηση που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Το μοντέλο αυτό αναβαθμίστηκε ως προς μια σειρά λειτουργικά χαρακτηριστικά του (I-DYNEV). Ωστόσο, αναφέρεται ότι τα δυο αυτά μοντέλα παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα που αφορούν στη διαμόρφωση των διαδρομών στα δεδομένα εισόδου (Mei 2002). Ένα άλλο μοντέλο, το *PCDYNEV* ανήκει επίσης σε αυτή την κατηγορία και συνδυάζει πλευρές των μοντέλων TRAD και I-DYNEV (Goldblatt 2004).

Στα δυναμικά μοντέλα ως προς την επιλογή διαδρομής περιλαμβάνεται επίσης και αυτό του συστήματος στήριξης αποφάσεων για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης *CEMPS* (Configurable Emergency Management and Planning Simulator) (Alsnih and Stopher 2004; Pidd et al. 1996).

Οι *Cova & Johnson* (Cova and Johnson 2002) πρότειναν μια μέθοδο για την αξιολόγηση της εκκένωσης μιας μικρής περιοχής (γειτονιάς) (neighbourhood evacuations) με τη χρήση ενός μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης. Η επιλογή διαδρομής βασίζεται στην ατομική επιλογή του οδηγού σε κάθε διασταύρωση.

Ιδιαίτερα θα πρέπει να επισημάνουμε το υπολογιστικό πρόγραμμα *OREMS* (Oak Ridge Evacuation Modeling System), το οποίο αφορά στη μοντελοποίηση εκκένωσης μεγάλων περιοχών (Chin-Ping Chang 2003). Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τις βέλτιστες

διαδρομές λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους που αφορούν στις κυκλοφοριακές συνθήκες και την πιθανότητα δημιουργίας μπουτλιαρίσματος (Franzese and Sorensen 2004).

Πρόσφατα μοντέλα στα οποία η επιλογή διαδρομής γίνεται δυναμικά παρουσιάζονται από τους (de Silva 2001; So and Daganzo 2010; Tu et al. 2010).

5.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΜΑΡΚΟΒ

5.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το βασικότερο κριτήριο για την αξιολόγηση ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης (ΣΕΑ) σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης, είναι οι επιπτώσεις στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού. Για την εκτίμηση αυτών των επιπτώσεων πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό των ατόμων που βρίσκονται σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος, κάθε χρονική στιγμή. Στην περίπτωση που κάποια δράση προστασίας στο πλαίσιο ενός ΣΕΑ περιλαμβάνει μετακίνηση του πληθυσμού (π.χ. στην περίπτωση εκκένωσης), η θέση των ατόμων και ο χρόνος παραμονής τους σε κάθε σημείο αλλάζουν. Αυτό, φυσικά, επηρεάζει και τις επιπτώσεις στην υγεία κάθε ομάδας πληθυσμού, δεδομένου ότι ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθείται διαφοροποιείται η έκθεση στην επικίνδυνη ουσία η οποία εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης και από την ένταση του φαινομένου σε κάθε σημείο του χώρου.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή (σε σχέση με το χρόνο) του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται σε κάθε τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας μετακίνησης του πληθυσμού κατά τη διάρκεια ενός ΣΕΑ. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε καθορίστηκε από τους ακόλουθους στόχους:

- την ανάγκη καταγραφής της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού
- την ανάγκη ενσωμάτωσης παραγόντων που σχετίζονται με την επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης και της αβεβαιότητας κατά την επιλογή διαδρομής του πληθυσμού, παραγόντων που επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά των υποπεριοχών που εντάσσονται σε δράσεις προστασίας που περιλαμβάνουν εκκένωση και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους
- τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανομής των δόσεων επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ο πληθυσμός κατά τη διάρκεια της μετακίνησης (διαφορετικές διαδρομές τμημάτων του πληθυσμού αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές δόσεων επικίνδυνης ουσίας)
- την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους στο βαθμό του δυνατού, με δεδομένο ότι το μοντέλο εκκένωσης αποτελεί μέρος του πολυκριτηριακού εξελικτικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης
- τη δυνατότητα ευέλικτης προσαρμογής του μοντέλου σε γεωγραφικές περιοχές (οδικά δίκτυα) διαφορετικού μεγέθους και σε διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας καταγραφής της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού.

Οι παραπάνω στόχοι δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ολοκληρωμένα από τα υπάρχοντα μοντέλα εκκένωσης που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, τα οποία προϋποθέτουν καθορισμένες διαδρομές εκκένωσης ή βελτιστοποιούν τις διαδρομές με κάποιο κριτήριο (π.χ. ελαχιστοποίηση απόστασης ή ελαχιστοποίηση χρόνου εκκένωσης) με δεδομένη όμως την περιοχή εκκένωσης. Ο καθορισμός της περιοχής εκκένωσης από πριν (π.χ. με βάση την ένταση του φαινομένου), δεν αντιστοιχεί πάντα στη βέλτιστη πολιτική προστασίας. Παράγοντες που σχετίζονται με τις συνθήκες κυκλοφορίας που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φύση και την αβεβαιότητα που σχετίζεται με την επιλογή διαδρομής τμημάτων του πληθυσμού που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επιδρά στην επικινδυνότητα. Με βάση, λοιπόν, το στόχο της βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης, σκοπός μας είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης (στην περίπτωση του ενός κριτηρίου) ή των μη-κυριαρχούμενων λύσεων (την περίπτωση πολλαπλών κριτηρίων), δηλ. του βέλτιστου συνδυασμού των περιοχών που θα λάβουν μέρος στην εκκένωση, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση παραγόντων (π.χ. κυκλοφοριακός φόρτος) ανάλογα με τις περιοχές που θα ενταχθούν σε κάθε δράση προστασίας.

Τα μοντέλα εκκένωσης στα οποία η διαδρομή επιλέγεται δυναμικά (συνοπτική αναφορά έγινε προηγουμένως), είτε είναι ντετερμινιστικά, είτε παρουσιάζουν αδυναμίες ως προς το υπολογιστικό κόστος και την ευελιξία ενσωμάτωσης παραμέτρων του προβλήματος για το επιθυμητό αποτέλεσμα ως προς την καταγραφή της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της μετακίνησης προκειμένου να εκτιμηθούν οι συνέπειες στην υγεία του πληθυσμού. Αντίστοιχα, στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής που παρουσιάζονται στη σχετική βιβλιογραφία (π.χ. (Alfa 1995; Hazelton 2002; Lan and Davis 1999; Porikli and Xiaokun 2004; Sheu et al. 2004; Viti and van Zuylen 2005)), επίσης, δεν καλύπτουν το σύνολο των στόχων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής είναι «μεσοσκοπικό» και ανήκει στην κατηγορία των δυναμικών και στοχαστικών μοντέλων όσον αφορά στην επιλογή διαδρομής. Οι πιθανότητες μετάβασης ενός ατόμου από κάθε κόμβο (γεωγραφικό τμήμα) προς τους γειτονικούς του εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου και από τις συνθήκες κυκλοφοριακής ροής που επικρατούν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή στον κόμβο προέλευσης και στον κόμβο μετάβασης. Η αναπαράσταση του δικτύου γίνεται με τέτοιο τρόπο που επιτρέπει την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού επαναλήψεων του εξελικτικού αλγορίθμου χωρίς μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ακόμη και για μεγάλες περιοχές. Από την άλλη, παρέχεται η δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσης του μοντέλου σε μεγάλα ή μικρά δίκτυα μεταφοράς, με μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό λεπτομέρειας της προσομοίωσης της κίνησης.

Το μοντέλο προσομοιάζει τη μετακίνηση του πληθυσμού με μια στοχαστική διαδικασία. Αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι επίλυσής του που παρέχουν διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας της κίνησης, με αντίστοιχα διαφορετικό υπολογιστικό κόστος και διαφορετικό βαθμό ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τη μετακίνηση του πληθυσμού. Η πλέον λεπτομερής λύση βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.4.2.

5.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές αρχές του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης, το οποίο βασίζεται στις διαδικασίες Markov.

Ακολουθείται η εξής μεθοδολογία: η περιοχή ενδιαφέροντος γύρω από την εγκατάσταση χωρίζεται σε N γεωγραφικά τμήματα σε κάθε ένα από τα οποία εφαρμόζεται μια «δράση προστασίας» (protective action) ή αποφασίζεται η «συνέχιση της κανονικής δραστηριότητας». Κάθε δράση αντιστοιχεί σε μια «πολιτική». Θεωρούμε ότι ένα Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης (ΣΕΑ)⁵ καθορίζεται όταν καθοριστούν οι πολιτικές σε κάθε υποπεριοχή (Georgiadiou et al. 2004).

Μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι **πολιτικές** που θα εφαρμοστούν σε κάθε τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος. Ενδεικτικά, οι πολιτικές που μπορούν να εφαρμοστούν είναι:

- εκκένωση (evacuation)
- συνέχιση της κανονικής δραστηριότητας
- προστασία με παραμονή στα σπίτια
- συγκέντρωση και παραμονή σε μεγάλα κτήρια⁶
- σταδιακή εκκένωση (παραμονή εντός κτηρίων για ένα χρονικό διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση)
- λήψη φαρμάκων
- χρήση μέσων ατομικής προστασίας κ.ά.

Οι εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος αντιστοιχούν σε εναλλακτικά ΣΕΑ, δηλ. εναλλακτικούς συνδυασμούς πολιτικών στις υποπεριοχές της περιοχής ενδιαφέροντος.

Τα **κριτήρια** με βάση τα οποία μπορεί να γίνει αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων, ενδεικτικά μπορεί να ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην υγεία και την ασφάλεια του πληθυσμού από ενδεχόμενο ατύχημα στην εγκατάσταση (π.χ. επιπτώσεις από διαρροή τοξικών ουσιών, επιπτώσεις από εκρήξεις κ.λπ.).
- Ελαχιστοποίηση κοινωνικοοικονομικού κόστους (συναισθηματική δοκιμασία του πληθυσμού που θα λάβει μέρος στην εκκένωση, κοινωνικές επιπτώσεις από τη διακοπή της καθημερινής δραστηριότητας και της αναστάτωσης που αυτή

⁵ Στο πλαίσιο της περιγραφής της μεθοδολογίας, με την έννοια ΣΕΑ (Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης) αναφερόμαστε στο σχεδιασμό στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης και όχι στο σύνολο των πλευρών που αφορούν στις λειτουργίες του σχεδιασμού αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης (συναγερμός, απόκριση, αποκατάσταση), όπως αυτές παρουσιάστηκαν συνοπτικά στην παράγραφο 3.2.

⁶ Όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η διαφορά μεταξύ παραμονής του πληθυσμού σε μεγάλα κτήρια και της παραμονής στις κατοικίες έγκειται στους διαφορετικούς συντελεστές προστασίας και τα διαφορετικά επίπεδα αερισμού που έχουν τα δυο αυτά είδη κτηρίων.

συνεπάγεται, οικονομικό κόστος που αντιστοιχεί στις δραστηριότητες εκείνες που θα διακοπούν λόγω ΣΕΑ κ.λπ.).

Οι **περιορισμοί** για το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί ενδεικτικά να είναι:

- γεωγραφικοί περιορισμοί (που δεν επιτρέπουν την εφαρμογή κάποιων προστατευτικών πολιτικών)
- υπάρχοντα μέσα μετακίνησης
- υπάρχοντα κτήρια για παραμονή πληθυσμού
- απόρριψη λύσεων που προβλέπουν εκκένωση σε τμήματα πολύ απομακρυσμένα από την εγκατάσταση
- σύγκριση δόσης επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ένα τμήμα του πληθυσμού σε σχέση με επιτρεπόμενα όρια κ.ά.

Στη σχετική βιβλιογραφία για τη μοντελοποίηση εκκένωσης μεγάλων περιοχών, το δίκτυο (urban network) συνήθως αναπαριστάται με ένα γράφημα (graph representation) το οποίο αποτελείται από κόμβους (nodes) και συνδέσεις (links) (π.χ. μοντέλα που παρουσιάζονται από τους (Cova and Johnson 2003; Ishigami et al. 2004; Jain and Smith 1997; Sattayhatewa and Ran 2000; Sheffi et al. 1982; Sinuany-Stern and Stern 1993)). Ωστόσο, συχνά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των προσεγγίσεων που ακολουθούνται (π.χ. διαφοροποίηση στο μήκος των συνδέσεων).

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε N διακριτούς κόμβους (nodes). Πρέπει να επισημανθεί ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο ο κόμβος δεν αποτελεί κάποια διασταύρωση (intersection) όπως συχνά συναντάται στη σχετική βιβλιογραφία, αλλά μια **γεωγραφική περιοχή** η οποία καθορίζεται από το χρήστη του μοντέλου (μέγεθος, σχήμα κ.λπ.). Έτσι, για παράδειγμα, ένας κόμβος μπορεί να παριστάνει μια περιοχή που περιλαμβάνει ένα ή παραπάνω οικοδομικά τετράγωνα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής του μοντέλου σε δίκτυα διαφορετικού μεγέθους και σε διαφορετικό επιθυμητό από το χρήστη βαθμό λεπτομέρειας καταγραφής της χωρικής κατανομής του πληθυσμού.

Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με **συνδέσεις (links)**. Οι συνδέσεις μπορεί να αντιστοιχούν σε μεμονωμένους υπάρχοντες δρόμους μεταξύ δυο οικοδομικών τετραγώνων, ωστόσο, στην περίπτωση που ένας κόμβος αντιστοιχεί σε περισσότερα οικοδομικά τετράγωνα, μια σύνδεση τελικά αντιπροσωπεύει τη **δυνατότητα μετακίνησης** από τον ένα κόμβο στον άλλο (γειτονικό). Φυσικά, στην περίπτωση αυτή τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων (απόσταση, χωρητικότητα) λαμβάνουν υπόψη τις σχετικές παραμέτρους των επιμέρους πραγματικών δρόμων που περιλαμβάνονται στην περιοχή.

Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής του αλγορίθμου σε μεγάλα αστικά δίκτυα, χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά το υπολογιστικό κόστος. Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι το μοντέλο αποτελεί τμήμα του εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια που εκτελεί μεγάλο αριθμό επαναλήψεων υπολογίζοντας τις συνέπειες για μεγάλους πληθυσμούς εναλλακτικών

λύσεων σε κάθε επανάληψη. Φυσικά, ο αλγόριθμος μπορεί εύκολα να μετατραπεί και σε πιο λεπτομερή αναπαράσταση του δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος.

Κάθε κόμβος (node) χαρακτηρίζεται από ένα αρχικό πληθυσμό και έναν αριθμό οχημάτων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση:

$$n_i(0) = \frac{V_i}{\bar{V}_p} \quad (5.1)$$

όπου

$n_i(0)$: ο αριθμός των οχημάτων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση και βρίσκονται στον κόμβο i τη χρονική στιγμή 0

V_i : ο αριθμός των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση (evacuees) και βρίσκονται στον κόμβο i τη χρονική στιγμή 0

\bar{V}_p : ο μέσος αριθμός ατόμων ανά όχημα.

Ο πληθυσμός που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση μπορεί να εντάσσεται στο κοινό (κάτοικοι περιοχής), στους εργαζόμενους ή στους επισκέπτες της περιοχής κ.ά. Ο συνολικός αριθμός των ατόμων που θα συμμετάσχουν στην εκκένωση θα είναι:

$$V = \sum_{i=1}^N V_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (5.2)$$

Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση, αντίστοιχα, θα είναι:

$$n_T = \sum_{i=1}^N n_i(0) \quad (5.3)$$

Το μοντέλο προσομοιάζει την κίνηση του πληθυσμού απ' τον ένα κόμβο στον άλλο σαν μια στοχαστική διαδικασία, όπου ο επόμενος κόμβος (και η αντίστοιχη σύνδεση με αυτόν) επιλέγονται στοχαστικά από τον πληθυσμό. Η πιθανότητα μετάβασης ενός ατόμου (οχήματος) από ένα γεωγραφικό τμήμα (κόμβο) σε ένα γειτονικό (υπολογίζεται για κάθε χρονικό διάστημα, το μέγεθος του οποίου καθορίζεται από το χρήστη), εξαρτάται από την απόσταση και τον κυκλοφοριακό φόρτο της διασύνδεσης των δυο κόμβων. Ο κυκλοφοριακός φόρτος εξαρτάται από τη χωρητικότητα των δρόμων διασύνδεσης (μήκος, πλάτος), το είδος των οχημάτων που χρησιμοποιούνται και τον αριθμό αυτών που βρίσκονται εντός του γεωγραφικού τμήματος για το τρέχον χρονικό διάστημα. Εάν ένας κόμβος δεν συνδέεται με κάποιον, η συγκεκριμένη πιθανότητα μετάβασης θεωρείται ίση με μηδέν. Μέσα σε ένα χρονικό βήμα μεταβάσεις από ένα κόμβο είναι δυνατές μόνο σε γεωγραφικά γειτνιάζοντες κόμβους. Επισημαίνεται ότι θεωρείται ότι η κίνηση γίνεται προς μια κατεύθυνση (καθορίζεται από το χρήστη με βάση το κριτήριο της απομάκρυνσης από

τον κόμβο στον οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση στην οποία εκδηλώθηκε το ατύχημα) και ότι τα άτομα που κινούνται με τα οχήματα έχουν γνώση των διαφορετικών εναλλακτικών κατευθύνσεων προς τις οποίες μπορούν να κινηθούν.

Πιο συγκεκριμένα, το στοχαστικό μοντέλο εκκένωσης Markov (Howard 1971) θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{A}(t) \quad (5.4)$$

όπου

$\mathbf{x}(t)$: διάνυσμα $1 \times N$ με στοιχεία $[x_i(t)]$

$\dot{\mathbf{x}}(t)$: διάνυσμα $1 \times N$ με στοιχεία $[\dot{x}_i(t)]$

$\mathbf{A}(t)$: πίνακας $N \times N$ με στοιχεία $[a_{ij}(t)]$

$x_i(t)$: πιθανότητα ότι ένα άτομο (ή όχημα) που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση θα βρίσκεται στον κόμβο i τη χρονική στιγμή t $0 \leq x_i(t) \leq 1$

$\dot{x}_i(t)$: η παράγωγος ως προς το χρόνο του $x_i(t)$

$a_{ij}(t)$: ο ρυθμός μετάβασης (probability rate) ενός ατόμου (οχήματος) από τον κόμβο i τη χρονική στιγμή t στον κόμβο j τη χρονική στιγμή

$$t + \Delta t \left\{ \sum_{i,j=1}^N a_{ij}(t) = 0, \quad a_{ii}(t) = -\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N a_{ij}(t), \quad a_{ij}(t) > 0 \text{ if } i \neq j \right\}$$

Δt : το χρονικό διάστημα μετάβασης.

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, ο ρυθμός μετάβασης (πιθανότητα) $a_{ij}(t)$ εξαρτάται από το χρόνο που θα διανυθεί κατά τη μετακίνηση μεταξύ των κόμβων i και j . Δηλαδή, η πιθανότητα ένα άτομο να επιλέξει μεταξύ δυο διαφορετικών διαδρομών είναι μεγαλύτερη για τη διαδρομή που αντιστοιχεί σε μικρότερο χρόνο μετακίνησης. Το ζήτημα αυτό υποθέτουμε ότι είναι γνωστό στα άτομα που μετακινούνται (π.χ. μέσω συστημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας).

Στην περίπτωση, λοιπόν, που δεν λαμβάνεται υπόψη η κυκλοφοριακή συμφόρηση, ο χρόνος μετακίνησης μεταξύ των κόμβων i και j εξαρτάται από τους υπάρχοντες δρόμους-συνδέσεις μεταξύ τους (δηλ. από το μήκος των δρόμων), καθώς επίσης και από την ταχύτητα μετακίνησης των οχημάτων που χρησιμοποιούνται. Έτσι, ο ρυθμός $a_{ij}(t)$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση (αν $i \neq j$):

$$\alpha_{ij}(t) = \frac{U}{d_{ij}} \quad (5.5)$$

όπου

U : μέση ταχύτητα των οχημάτων, η οποία εξαρτάται από τον τύπο αυτών (αυτοκίνητα, λεωφορεία, βαριά οχήματα κ.λπ.), όπως επίσης και από παραμέτρους που αφορούν σε εμπόδια όπως η πραγματοποίηση τεχνικών έργων, δυστυχήματα, καιρικές συνθήκες (βροχή⁷, χιόνι, πάγος, ομίχλη), από το μέσο αριθμό διασταυρώσεων κ.ά.

d_{ij} : μήκος σύνδεσης (link) μεταξύ των κόμβων i και j .

Στις περιπτώσεις όπου οι κόμβοι i και j δεν συνδέονται (είτε μόνιμα ή περιστασιακά), είτε στην περίπτωση που υπάρχουν περιορισμοί⁸, τότε ο ρυθμός μετάβασης $\alpha_{ij}(t)$ θεωρείται ίσος με μηδέν.

Σύμφωνα με τη σχέση (5.5), ο χρόνος μετακίνησης υπολογίζεται θεωρώντας ότι η κίνηση είναι ανεμπόδιστη χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι κυκλοφοριακές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός μετάβασης εξαρτάται από τις συνθήκες κυκλοφοριακής ροής που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός $\alpha_{ij}(t)$ αυξάνεται όταν το επίπεδο του συνωστισμού των οχημάτων (level of congestion) μεταξύ των κόμβων i και j αυξάνεται και το αντίστροφο. Εξαρτάται όχι μόνο από το επίπεδο συνωστισμού του κόμβου προορισμού, αλλά και από το επίπεδο συνωστισμού του κόμβου προέλευσης.

⁷ Για παράδειγμα, αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Urbanik 2000) ότι η βροχή μειώνει την ταχύτητα μετακίνησης έως και 10% και τη χωρητικότητα των δρόμων από 10 έως και 20% (λόγω της αύξησης της απόστασης μεταξύ των οχημάτων).

⁸ Για παράδειγμα, στην περίπτωση που δίνεται οδηγία μετακίνησης προς μια μόνο κατεύθυνση για την απομάκρυνση του πληθυσμού, μακριά από τον τόπο εκδήλωσης του τεχνολογικού ατυχήματος.

Για την προσομοίωση της κίνησης λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αντί για τη σχέση (5.5), για τον υπολογισμό του $\alpha_{ij}(t)$ χρησιμοποιείται η ακόλουθη:

$$\alpha_{ij}(t) = \begin{cases} \left(\frac{U}{d_{ij}} \right) \cdot [1 - r_i(t)] \cdot [1 - r_j(t)], & \text{αν } i \neq j \\ - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \alpha_{ij}(t), & \text{αν } i = j \end{cases} \quad (5.6)$$

Η συνάρτηση $r_i(t)$, η οποία ορίζεται ως «αντίσταση» του κόμβου i , αντιστοιχεί στο επίπεδο συνωστισμού των οχημάτων στον κόμβο i και υπολογίζεται ως εξής:

$$r_i(t) = \begin{cases} r_{\max}, & \text{αν } n_i(t) \geq c \cdot M_i \\ r_{\max} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-n_i(t)}{M_i - n_i(t)}\right) \right], & \text{αν } n_i(t) < c \cdot M_i \end{cases} \quad (5.7)$$

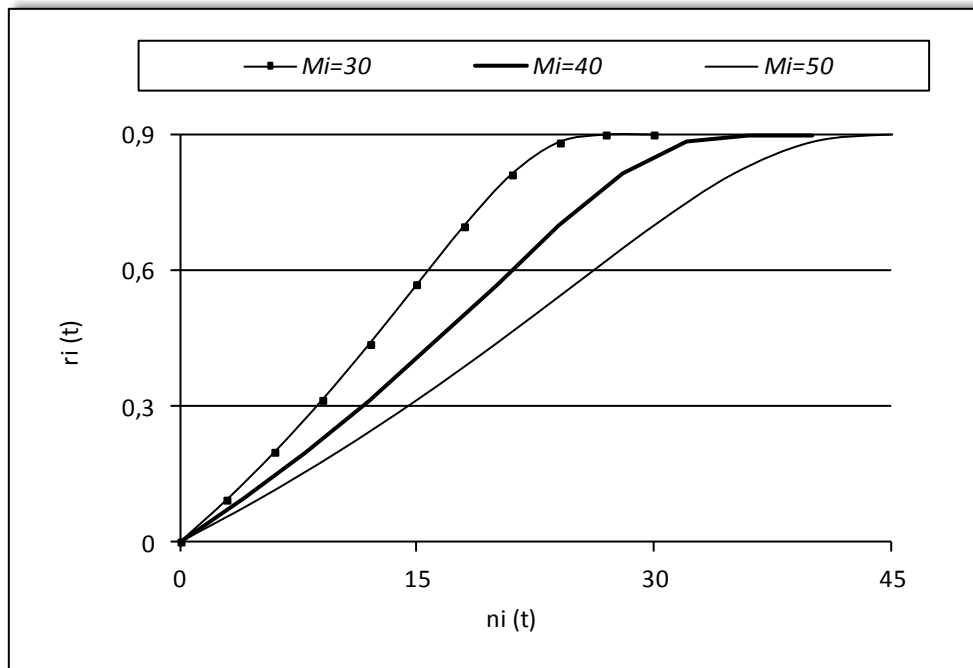
όπου

- $n_i(t)$: αριθμός των οχημάτων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση και βρίσκονται στον κόμβο i τη χρονική στιγμή t $n_i(t) = x_i(t) \cdot n_T$
- r_{\max} και c : παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μοντέλου
 $r_{\max} < 1, c < 1$
- M_i : μέγιστη χωρητικότητα (capacity) του κόμβου.

Για τον υπολογισμό του μέγιστου αριθμού των οχημάτων που κάποιος κόμβος μπορεί να περιλάβει (μέγιστη χωρητικότητα M_i), λαμβάνονται υπόψη το μήκος των δρόμων που περιλαμβάνονται στο σχετικό κόμβο, το πλάτος αυτών (λωρίδες κυκλοφορίας), η μέση απόσταση μεταξύ των οχημάτων κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, όπως επίσης και το μέσο μήκος των οχημάτων. Είναι φανερό ότι ανάλογα με το είδος του οχήματος που θεωρείται ότι πραγματοποιείται η εκκένωση διαφοροποιείται και το μέσο μήκος που θα θεωρηθεί (αυτοκίνητα, πούλμαν, λεωφορεία κ.λπ.). Τα δεδομένα αυτά αποτελούν αρχικές παραμέτρους του μοντέλου που ορίζονται από το χρήστη και μπορεί να εκτιμηθούν είτε με πραγματικά δεδομένα κυκλοφοριακής ροής, είτε με υπολογισμούς κατά προσέγγιση με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Η παράμετρος c δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο μοντέλο χαρακτηριστικών που αφορούν στη μείωση της μέσης ταχύτητας λόγω καιρικών συνθηκών ή άλλων παραμέτρων.

Σύμφωνα με τη σχέση (5.7), η συνάρτηση συνωστισμού («αντίσταση») κάθε κόμβου i αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με τον αριθμό των οχημάτων $n_i(t)$ λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της r_{\max} όταν ο κόμβος θεωρείται «γεμάτος» (over congested), δηλ. ο αριθμός των οχημάτων προσεγγίζει τη μέγιστη χωρητικότητα M_i . Στο σχήμα που ακολουθεί

παρουσιάζεται ένα γραφικό παράδειγμα της μεταβολής της συνάρτησης $r_i(t)$ σε σχέση με τη μεταβολή του αριθμού των οχημάτων $n_i(t)$ στο συγκεκριμένο κόμβο ενδιαφέροντος i . Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετική τιμή της μέγιστης χωρητικότητας M_i ενώ σε όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί ίδια τιμή $r_{max} = 0.9$. Η παράμετρος r_{max} μπορεί να λάβει και άλλες τιμές ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε προβλήματος.



Σχήμα 5.3.1: Επίπεδο συνωστισμού οχημάτων («αντίσταση» $r_i(t)$ κόμβου i) ως συνάρτηση της πυκνότητας οχημάτων $n_i(t)$ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων εκκένωσης M_i .

Για την προσομοίωση της ταχύτητας των οχημάτων σε σχέση με τη ροή της κυκλοφορίας έχουν προταθεί διαφορές προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία (Ortuzar and Willumsen 1994). Οι προσεγγίσεις αυτές ελήφθησαν υπόψη για την επιλογή εκθετικής συνάρτησης για τον υπολογισμό της «αντίστασης» των κόμβων. Οι Jain & Smith (Jain and Smith 1997) στην εργασία τους για τη μοντελοποίηση των κυκλοφοριακών ροών μέσω ενός μοντέλου διαδοχικών καταστάσεων (state dependent queuing model), εκτιμούν την πυκνότητα των οχημάτων (vehicular density) μέσω γραμμικών και εκθετικών συναρτήσεων. Επισημαίνουν, ότι η εκθετική συνάρτηση δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Επιπλέον, εκθετικές συναρτήσεις για την προσομοίωση του συνωστισμού των οχημάτων έχουν προταθεί και από άλλους ερευνητές (Carey and McCartney 2004; Lan and Davis 1999; Ortuzar and Willumsen 1994; Wilson 1970).

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο αριθμός των οχημάτων $n_i(t)$ στη σχέση (5.7) δίνεται από τη σχέση:

$$n_i(t) = x_i(t) \cdot n_T \quad (5.8)$$

Συνεπώς, οι σχέσεις (5.4), (5.6) και (5.7) συνεπάγονται ότι:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{A}[\mathbf{x}(t)] \quad (5.9)$$

Η σχέση (5.9) επιλύεται αριθμητικά διακριτοποιώντας το χρόνο ως εξής:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{x}(n) \cdot \mathbf{P}(n) \quad (5.10)$$

όπου

$\mathbf{x}(n)$: διάνυσμα $N \times N$ με στοιχεία τις πιθανότητες $x_i(n)$

$x_i(n)$: πιθανότητα ότι ένα όχημα που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση να βρίσκεται στον κόμβο i στο χρονικό διάστημα Δt_n (μεταξύ των χρονικών στιγμών t_n και $t_n + \Delta t_n$ $n = 1, 2, \dots, T$)

$\mathbf{P}(n)$: πίνακας $N \times N$ με στοιχεία τις πιθανότητες μετάβασης $p_{ij}(n)$

$p_{ij}(n)$: πιθανότητα μετάβασης (transition probability) ενός οχήματος από τον κόμβο i τη χρονική στιγμή $t_n = n \cdot \Delta t$ στον κόμβο j τη χρονική στιγμή $t_{n+1} = (n+1) \cdot \Delta t$, όπου

$$\left\{ 0 \leq p_{ij}(n) \leq 1 \text{ και } \sum_{i,j=1}^N p_{ij}(n) = 1 \right\}$$

n : το τρέχον χρονικό βήμα $n = 1, 2, \dots, T$

T : συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων $\left\{ T = \frac{T_e}{\Delta t} \right\}$

T_e : συνολικός χρόνος προσομοίωσης της εκκένωσης που ορίζεται από το χρήστη του μοντέλου.

Η πιθανότητα μετάβασης $p_{ij}(n)$ θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_{ij}(n) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_{ij} t}{\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N a_{ij} t} \cdot \left[1 - \exp\left(-\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N a_{ij} t \cdot \Delta t\right) \right], \quad \alpha\nu i \neq j \\ \exp\left(-\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N a_{ij} t \cdot \Delta t\right), \quad \alpha\nu i = j \end{array} \right\} \quad (5.11)$$

Συνοψίζοντας, το στοχαστικό μοντέλο εκκένωσης Markov εκτιμά τον αριθμό των ατόμων (αριθμό οχημάτων) που μετακινούνται και βρίσκονται σε κάθε γεωγραφικό τμήμα κάθε χρονική στιγμή. Για την εκτίμηση αυτή, λαμβάνεται υπόψη η μείωση της ταχύτητας που συνεπάγεται η αύξηση της ροής των οχημάτων στους δρόμους.

Η επίδραση του συνωστισμού των οχημάτων εκτιμάται μέσω της «αντίστασης» κάθε γεωγραφικού τμήματος (αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με τον αριθμό των οχημάτων και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν ο αριθμός αυτός γίνει ίσος με τη μέγιστη χωρητικότητα των δρόμων μετακίνησης του συγκεκριμένου γεωγραφικού τμήματος). Το μοντέλο προσομοιάζει τη μετακίνηση του πληθυσμού με μια στοχαστική διαδικασία.

Ορισμένα αρχικά δεδομένα που δίνονται από το χρήστη, αφορούν:

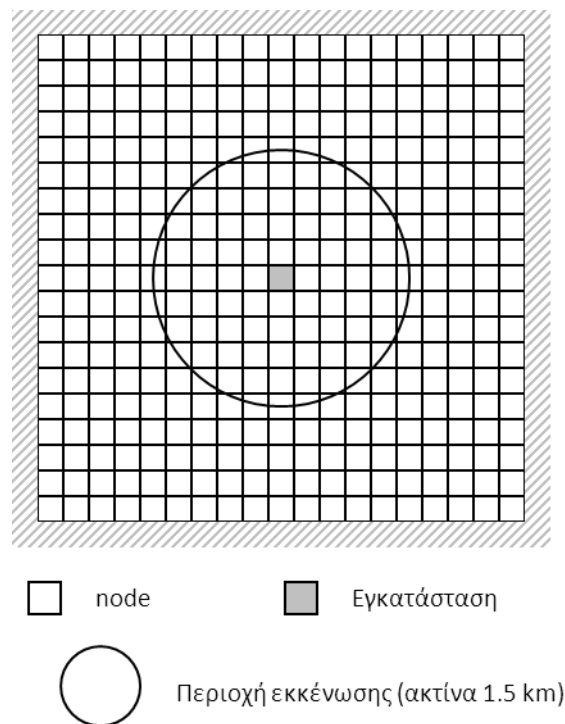
(α) τον καθορισμό των υποπεριοχών, ο πληθυσμός των οποίων θα λάβει μέρος σε μια πολιτική που απαιτεί μετακίνηση, όπως για παράδειγμα η εκκένωση (καθορίζονται με βάση το εναλλακτικό ΣΕΑ),

(β) τη γνώση μιας σειράς αρχικών δεδομένων όπως: γεωγραφικά δεδομένα (διασύνδεση υποπεριοχών με δρόμους, δεδομένα χωρητικότητας και μήκους των δρόμων διασύνδεσης κ.λπ.), μέση ταχύτητα μετακίνησης των οχημάτων (στην περίπτωση που η κίνηση διεξάγεται ανεμπόδιστα), μέσο μήκος και χωρητικότητα οχημάτων μεταφοράς, πληθυσμιακά δεδομένα κάθε τμήματος της περιοχής γύρω απ' την εγκατάσταση κ.ά.

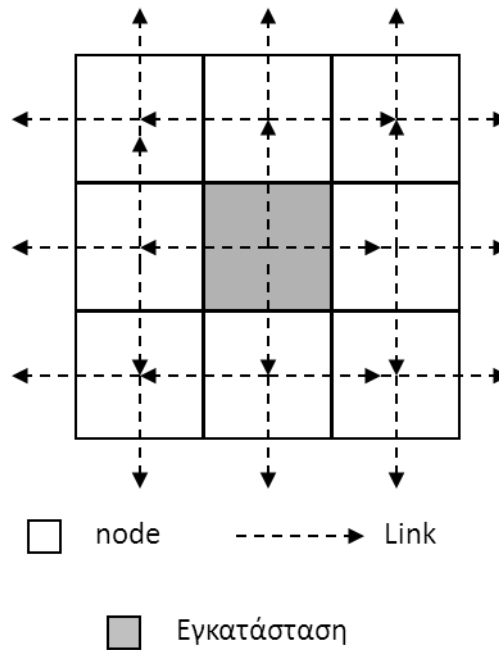
5.3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου εκκένωσης.

Θεωρούμε μια γεωγραφική περιοχή η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (υποθετικό σενάριο). Η περιοχή χωρίζεται σε 361 κόμβους (γεωγραφικά τμήματα) ίδιου μεγέθους. Θεωρώντας ότι η εκκένωση θα πραγματοποιηθεί μέσω μιας κατεύθυνσης (απομάκρυνση από την εγκατάσταση στην οποία υποθέτουμε ότι συμβαίνει ένα τεχνολογικό ατύχημα), προκύπτουν 760 συνολικά σύνδεσμοι (links) (βλ. Σχήμα 5.3.2). Ένα μικρό τμήμα της γεωγραφικής αυτής περιοχής φαίνεται στο Σχήμα 5.3.3.



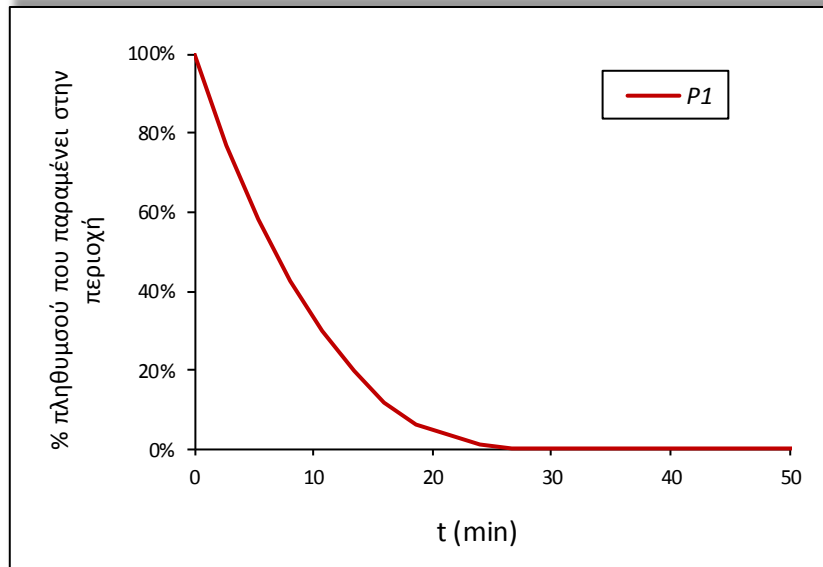
Σχήμα 5.3.2: Πυκνοκατοικημένη περιοχή ($2.916 \times 10^7 \text{ m}^2$).



Σχήμα 5.3.3: Τμήμα του δικτύου της περιοχής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.2.

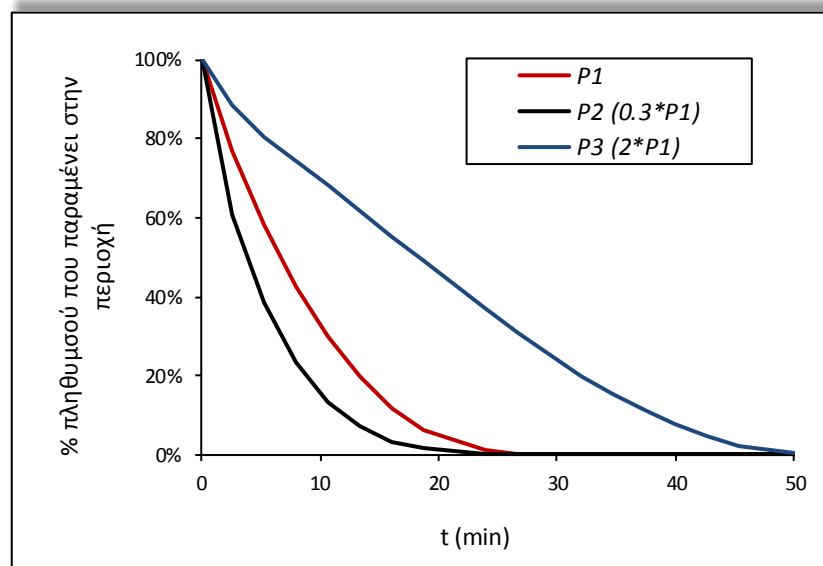
Έστω ότι η πολιτική έκτακτης ανάγκης προβλέπει εκκένωση μιας περιοχή (κυκλικής) με ακτίνα 1.5 km από την εγκατάσταση (για παράδειγμα στην περίπτωση ενός ατυχήματος BLEVE). Κάθε κόμβος, τη χρονική στιγμή μηδέν θα αντιστοιχεί σε έναν αριθμό οχημάτων $n_i(0)$ που θα λάβουν μέρος στην εκκένωση. Ο αριθμός αυτός είναι ίσος με το μηδέν στην περίπτωση που κάποιος κόμβος βρίσκεται εκτός της αρχικά καθορισμένης περιοχής εκκένωσης. Έστω M_i η μέγιστη χωρητικότητα κάθε κόμβου η οποία υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό μήκος και πλάτος των δρόμων που περιλαμβάνονται στα τμήματα των συνδέσεων που βρίσκονται στο συγκεκριμένο κόμβο, σε συνδυασμό με τη μέση απόσταση που θεωρείται ότι θα κρατούν τα οχήματα κατά τη διάρκεια της κίνησης όπως επίσης και το μέσο μήκος κάθε οχήματος. Τα δεδομένα αυτά δίνονται ως δεδομένα εισόδου και υπολογίζουν αρχικά τη μέγιστη χωρητικότητα κάθε κόμβου. Θεωρείται, επίσης, ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο μέσος αριθμός των ατόμων ανά όχημα θα είναι ίσος με 3, η μέση ταχύτητα των οχημάτων (U) θα είναι 10 km/h και οι παράμετροι r_{\max} και c αντιστοιχούν σε τιμές 0,9 και 1. Οι παράμετροι αυτές καθορίζονται από το χρήστη.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, για το συγκεκριμένο παράδειγμα εκτιμάται γύρω στα 25 λεπτά ο χρόνος εκκένωσης όλης της περιοχής (evacuation “clearness time”), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.4. (θεωρείται ότι ο χρόνος προειδοποίησης δεν περιλαμβάνεται στο χρόνο εκκένωσης).



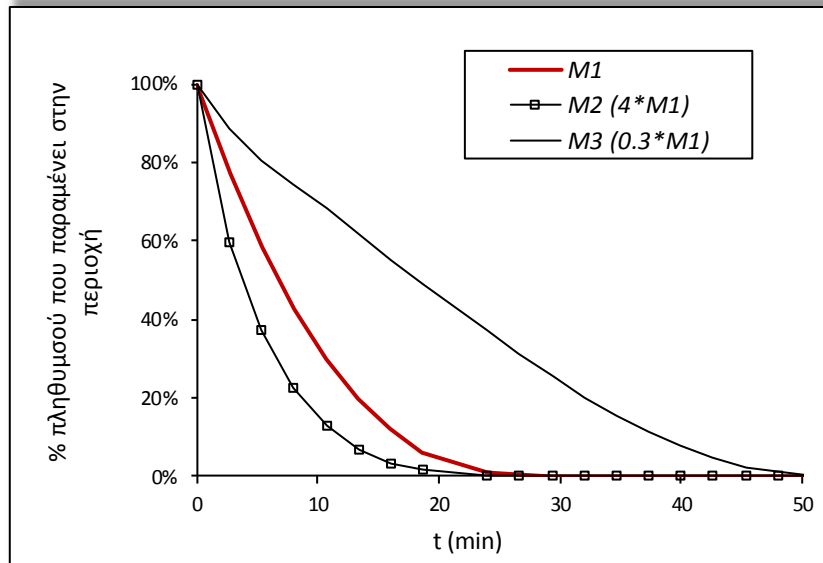
Σχήμα 5.3.4: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο $P_i = P_1$, $M_i = M_1$, $U = U_1$.

Για να εξετάσουμε τη λειτουργία του μοντέλου ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν οι διάφορες παράμετροι, στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή του χρόνου εκκένωσης του πληθυσμού για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στην πυκνότητα του πληθυσμού, τη μέγιστη χωρητικότητα των δρόμων και τη μέση ταχύτητα των οχημάτων.



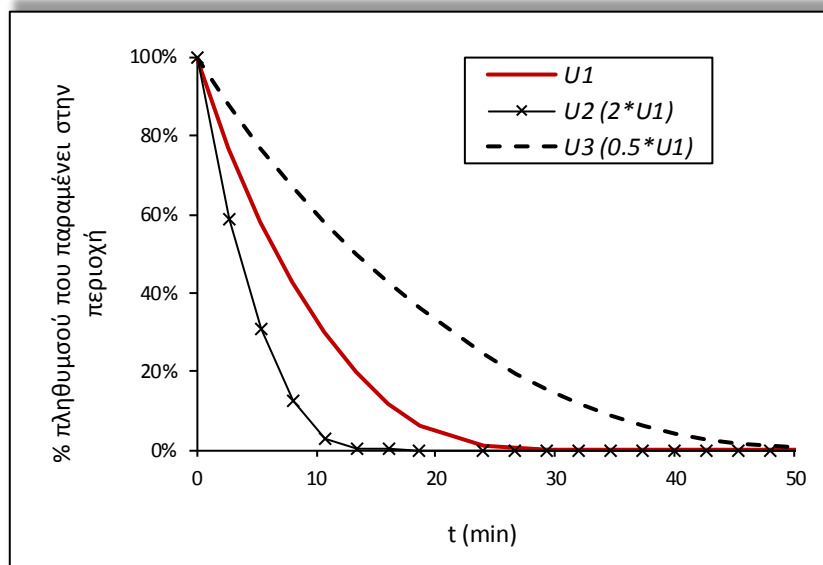
Σχήμα 5.3.5: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές πυκνότητες πληθυσμού

$$P_i = P_1, P_i = P_2 = 0.3 \cdot P_1, P_i = P_3 = 2 \cdot P_1, M_i = M_1, U = U_1.$$



Σχήμα 5.3.6: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές τιμές της μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων

$$M_i = M_1, M_i = M_2 = 4 \cdot M_1, M_i = M_3 = 0.3 \cdot M_1, P_i = P_1, U = U_1.$$



Σχήμα 5.3.7: Ποσοστό (%) του πληθυσμού που παραμένει στην περιοχή (Σχήμα 5.3.2) σε σχέση με το χρόνο, για διαφορετικές τιμές της μέσης ταχύτητας των οχημάτων

$$U = U_1, U = U_2 = 2 \cdot U_1, U = U_3 = 0.5 \cdot U_1, M_i = M_1, P_i = P_1.$$

Από τα παραπάνω σχήματα, φαίνεται η σημαντική επίδραση που έχουν οι παράμετροι που εξετάστηκαν στο χρόνο εκκένωσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Ιδιαίτερα έχει σημασία να επισημάνουμε την επίδραση της αύξησης της πυκνότητας του πληθυσμού που αυξάνει το συνολικό χρόνο εκκένωσης. Το γεγονός αυτό θα έχει με τη σειρά του σημαντική

επίπτωση στις συνέπειες από ενδεχόμενο ατύχημα και αναδεικνύει το ζήτημα που προαναφέρθηκε, δηλαδή ότι μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση δεν συνεπάγεται πάντα μείωση των επιπτώσεων. Το ζήτημα αυτό θα εξεταστεί αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα.

Επίσης, η μέγιστη χωρητικότητα των δρόμων αυξάνει ή αντίστοιχα μειώνει σημαντικά το συνολικό χρόνο εκκένωσης, ζήτημα το οποίο μπορεί να ληφθεί υπόψη όσον αφορά στο χωροταξικό σχεδιασμό περιοχών που περιλαμβάνουν επικίνδυνες εγκαταστάσεις.

5.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

5.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΔΟΣΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ Ο ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης προϋποθέτει την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος (εναλλακτικών ΣΕΑ) με βάση ορισμένα κριτήρια. Το σημαντικότερο κριτήριο είναι, φυσικά, η επίπτωση που θα έχει ένα εναλλακτικό ΣΕΑ στην ασφάλεια και υγεία του πληθυσμού.

Μια απλοϊκή προσέγγιση θα μπορούσε να θεωρεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή εκκένωσης, τόσο μικρότερες θα είναι οι επιπτώσεις στον πληθυσμό. Ωστόσο, πέρα από το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού οδηγείται να λάβει μέρος στην εκκένωση, τόσο μεγαλύτερο είναι το «κοινωνικοοικονομικό κόστος», ακόμη και στην περίπτωση που κάθε εναλλακτικό ΣΕΑ αξιολογείται μόνο με το κριτήριο της προστασίας της υγείας, η παραπάνω θεώρηση δεν ευσταθεί. Η πολιτική εκκένωσης μεγάλου τμήματος της γεωγραφικής περιοχής γύρω από την εγκατάσταση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες συνέπειες για την υγεία του πληθυσμού. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα του πληθυσμού που θα λάβει μέρος στην εκκένωση, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο κυκλοφοριακός φόρτος που θα δημιουργηθεί στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, το τμήμα του πληθυσμού που βρίσκεται πιο κοντά στο χώρο του ατυχήματος θα καθυστερήσει περισσότερο να απομακρυνθεί.

Η εκτίμηση των συνεπειών ενός ατυχήματος στην υγεία του πληθυσμού βασίζεται στη μεθοδολογία ποσοτικής εκτίμησης επικινδυνότητας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2 και γίνεται μέσω της δόσης επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ο συνολικός πληθυσμός κατά τη διάρκεια ενός ΣΕΑ, με βάση μια σειρά σεναρίων ατυχημάτων που θα μπορούσαν να συμβούν στην εγκατάσταση. Το σενάριο ατυχήματος μπορεί να αφορά έκλυση τοξικών ουσιών, πυρκαγιές ή εκρήξεις. Ο υπολογισμός της δόσης επικίνδυνης ουσίας πραγματοποιείται με βάση τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας, της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας και της υπερπίεσης, αντίστοιχα, σε κάθε σημείο του χώρου και του χρόνου, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα και λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια έκθεσης κάθε τμήματος του πληθυσμού σε συγκεκριμένη ένταση φαινομένου.

Έτσι, για την εκτίμηση των συνεπειών στην υγεία του πληθυσμού είναι απαραίτητη η γνώση της κατανομής του πληθυσμού στο χώρο και το χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν υπάρχει επαρκής χρόνος προειδοποίησης (δηλ. χρόνος ειδοποίησης του πληθυσμού για εκκένωση σε σχέση με το χρόνο εκδήλωση του ατυχήματος), όπως επίσης και το γεγονός ότι οι αποφασίζοντες διστάζουν να «διατάξουν» εκκένωση μεγάλων περιοχών στα πρώιμα στάδια ενός ατυχήματος, έχει ιδιαίτερη σημασία η δυνατότητα εκτίμησης των συνεπειών στην υγεία του πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή του στο χώρο και το χρόνο κατά τη διάρκεια της μετακίνησής του.

Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται μέσω του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ο χρόνος έναρξης της μετακίνησης του πληθυσμού σε σχέση με το χρόνο εκδήλωσης του ατυχήματος δίνεται στα αρχικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου.

Ανάλογα με το σενάριο ατυχήματος (τοξική διαρροή, έκρηξη, πυρκαγιά) με κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα υπολογίζεται η ένταση του φαινομένου (συγκέντρωση τοξικής ουσίας, θερμική ακτινοβολία, ωστικό κύμα) σε κάθε σημείο του χώρου για κάθε χρονική στιγμή, όπως περιγράφηκε στη σχετική ενότητα (Papazoglou et al. 1992; TNO 1997). Με βάση αυτά τα δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί η δόση επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ένα άτομο αν είναι γνωστή η διαδρομή του στο χώρο και το χρόνο μέσω της σχέσης (2.26) που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.2.5.1.1. Στη συνέχεια, με βάση τις σχέσεις (2.31) και (2.33) μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των θανάτων (ή άλλων συνεπειών) αυτών που έχουν εκτεθεί και έχουν λάβει τη συγκεκριμένη δόση.

Μέσω του μοντέλου εκκένωσης υπολογίζουμε την κατανομή του πληθυσμού σε σχέση με το χρόνο σε κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος. Έστω $D_i(t_n)$ η δόση που θα λάβει ένα άτομο το οποίο βρίσκεται στον κόμβο (γεωγραφικό τμήμα) i κατά το χρονικό διάστημα Δt_n $t_n < t < t_n + \Delta t_n$, $n = 1, 2, \dots, T$ η οποία θεωρείται σταθερή και μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης:

$$D(x, y) = \int_0^{T_{ex}} f\{c(x, y, t)\} dt \quad (5.12)$$

όπου

$c(x, y, t)$: η ένταση του φαινομένου ανάλογα με το σενάριο ατυχήματος (συγκέντρωση τοξικής ουσίας, θερμική ακτινοβολία, υπερπίεση) σε κάθε σημείο (x, y) και για κάθε χρονική στιγμή t

T_{ex} : η διάρκεια της έκθεσης στην επικίνδυνη ουσία ή φαινόμενο.

Σαν αποτέλεσμα, η δόση που αναμένεται να λάβει κάποιο άτομο που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση μετακινούμενο από κόμβο σε κόμβο (ή παραμένοντας σε κάποιο κόμβο για ένα χρονικό διάστημα λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης), έως τον τελικό προορισμό του, μπορεί τα υπολογιστεί με τα ακόλουθα βήματα:

- 1ο.** Υπολογίζεται η μέση δόση [$D(t_n)$] που έχει λάβει ένα άτομο τη χρονική στιγμή t_n ($n = 1, \dots, T$) μέσω της συνολικής δόσης, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των κόμβων της περιοχής ενδιαφέροντος:

$$D(t_n) = \sum_{i=1}^N x_i(t_n) \cdot D_i(t_n) \quad (5.13)$$

όπου $x_i(t_n)$ αντιστοιχεί στην πιθανότητα ότι ένα άτομο που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση θα βρίσκεται στον κόμβο i τη χρονική t_n , η οποία υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5.1) έως (5.5) και (5.7) έως (5.11).

- 2ο.** Στη συνέχεια, η συνολική δόση που λαμβάνεται από ένα άτομο για όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκκένωσης δίνεται από τη σχέση:

$$D_T = \sum_{n=1}^T D(t_n) \quad (5.14)$$

- 3ο.** Η πιθανότητα επίπτωσης P_D (π.χ. θανάτου, διάφορα είδη τραυματισμού) λόγω της λήψης δόσης D υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$P_D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \quad (5.15)$$

όπου Y υπολογίζεται μέσω της σχέσης (Probit variable):

$$Y = A + B \cdot \ln(D) \quad (5.16)$$

και A, B είναι σταθερές που σχετίζονται με το είδος του ατυχήματος.

- 4ο.** Ο μέσος αριθμός N_c των ατόμων που θα υποστούν τη συγκεκριμένη επίπτωση (π.χ. θάνατο) υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$N_c = N_0 \cdot P_D \quad (5.17)$$

όπου N_0 ο αριθμός των ατόμων που έλαβαν δόση P_D .

Αντίστοιχα, υπολογίζεται και η δόση που λαμβάνει το τμήμα του πληθυσμού που δεν παίρνει μέρος στην εκκένωση. Για αυτή την ομάδα του πληθυσμού η σχέση (5.13) χρησιμοποιείται μόνο για τον κόμβο (γεωγραφικό τμήμα) στον οποίο βρίσκεται για όλη τη χρονική περίοδο T_{ex} .

5.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO

Η δόση που υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5.13) και (5.14) αντιστοιχεί στη μέση δόση που θα λάβει ένα άτομο που συμμετέχει στην εκκένωση. Στην πραγματικότητα, διαφορετικά άτομα ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές, κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί σε διαφορετική δόση.

Κατά συνέπεια, ο πληθυσμός που μετακινείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης θα λάβει δόσεις που θα αντιστοιχούν σε ένα διάστημα τιμών, κάθε μια από τις οποίες θα αντιστοιχεί σε μια πιθανότητα. Έτσι, η πιθανότητα επίπτωσης (π.χ. θάνατος, διάφορα είδη τραυματισμού) θα δίνεται από την:

$$p_{P_D} = \int f(D) \cdot g(P_D/D) \cdot dD \quad (5.18)$$

όπου

$f(D)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – pdf) της δόσης (D) που λαμβάνεται

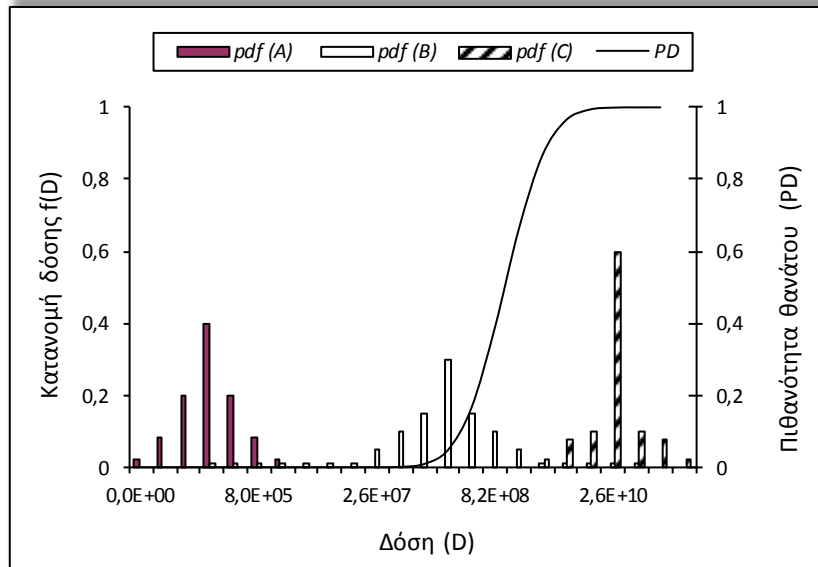
$g(P_D/D)$: η δεσμευμένη πιθανότητα (conditional probability) επίπτωσης, με δεδομένη τη λήψη δόσης D η οποία υπολογίζεται μέσω της (5.15).

Η πιθανότητα επίπτωσης που υπολογίζεται μέσω της μέσης δόσης, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, μπορεί να αντιστοιχεί σε μια προσέγγιση συντηρητική, μη-συντηρητική ή αντίστοιχη με την πιθανότητα επίπτωσης που υπολογίζεται αν λάβουμε υπόψη μας την κατανομή των δόσεων με βάση τις διαφορετικές διαδρομές εκκένωσης.

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 5.4.1, αν η κατανομή των δόσεων $f(D)$ αντιστοιχεί στις συναρτήσεις πυκνότητας $pdf(A)$ ή $pdf(C)$, τότε η πιθανότητα επίπτωσης $g(P_D/D)$ μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, με $g_A(P_D/D) = \varepsilon$ και $g_C(P_D/D) \approx 1$, αντίστοιχα. Έτσι, η σχέση (5.18), προσεγγίζεται μέσω της ακόλουθης:

$$p_{P_D} = \bar{D} \cdot g(P_D/\bar{D}) \quad (5.19)$$

Όπου \bar{D} είναι η δόση που εκτιμάται μέσω της (5.13).



Σχήμα 5.4.1: Κατανομή δόσεων για τρία σενάρια ατυχημάτων.

Ωστόσο, στην περίπτωση που η κατανομή των δόσεων αντιστοιχεί σε συνάρτηση πυκνότητας όπως η $pdf(B)$ του σχήματος, τότε η πιθανότητα επίπτωσης που υπολογίζεται μέσω της (5.19) δεν μπορεί να θεωρηθεί «καλή» προσέγγιση της πιθανότητας επίπτωσης που αντιστοιχεί στην (5.18). Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εκτιμηθεί η κατανομή των δόσεων και μέσω αυτής να εκτιμηθεί η πιθανότητα επίπτωσης μέσω της (5.18).

Για τον υπολογισμό της κατανομής των δόσεων που λαμβάνει ο πληθυσμός κατά τη διάρκεια της εκκένωσης μέσω διαφορετικών διαδρομών, η σχέση (5.4) επιλύεται με τη μέθοδο Monte Carlo (MC) (Marseguerra and Zio 2002).

Πραγματοποιούνται T_r πειράματα τα οποία αντιστοιχούν σε διαδρομές που ακολουθούν άτομα που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση. Κάθε επιμέρους διαδρομή καθορίζεται σύμφωνα με τις αρχές που περιγράφηκαν για τη στοχαστική διαδικασία Markov, σύμφωνα με τις σχέσεις (5.1) έως (5.5) και (5.7) έως (5.11).

Μια τυχαία διαδρομή (random walk) καθορίζεται ως εξής: δεδομένου ότι ένα άτομο βρίσκεται στον κόμβο i ο επόμενος κόμβος στον οποίο θα μεταβεί καθορίζεται από τις πιθανότητες $p_{ij}(n)$ σύμφωνα με την (5.11). Επισημαίνεται ότι υπάρχει η πιθανότητα να μην μεταβεί σε γειτονικό κόμβο αλλά να παραμένει στον κόμβο i για το τρέχον χρονικό διάστημα.

Έστω $i_k(t_n)$ ένας δείκτης σχετικός με το k^{th} άτομο $k=1,2,\dots,T_r$ που ακολουθεί την διαδρομή (route) κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, σύμφωνα με την έκφραση:

$$i_k(t_n) = \left\langle j \text{ αν τη χρονική στιγμή } t_n \text{ (} n=1,\dots,T \text{) το άτομο βρίσκεται στον κόμβο (} j \text{)} \right\rangle \quad (5.20)$$

Η πιθανότητα $x_i(t_n)$ ότι ένα άτομο θα βρίσκεται στον κόμβο i τη χρονική στιγμή t_n εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές τιμές που λαμβάνει ο δείκτης $i_k(t_n)$ με βάση την έκφραση (5.20), ως ακολούθως:

$$x_i(t_n) = \sum_{k=1}^{Tr} \frac{R_k(t_n)}{Tr} \quad (5.21)$$

$$R_k(t_n) = \begin{cases} 1, & \text{αν } i_k(t_n) = i \\ 0, & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases} \quad (5.22)$$

όπου $n = 1, 2, \dots, T$ και $i = 1, 2, \dots, N$.

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι το γεγονός ότι μέσω της μεθόδου δεν εκτιμάται μόνο η πιθανότητα $x_i(t_n)$ αλλά δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης των διαδρομών $i_k(1), i_k(2), \dots, i_k(T)$ για κάθε k^{th} άτομο (όχημα) που καθορίζεται μέσω των τιμών του δείκτη $i_k(t_n)$ σύμφωνα με την έκφραση (5.20).

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος $[t_n, t_n + \Delta t_n]$ το άτομο λαμβάνει δόση $D_k(t_n)$ η οποία καθορίζεται από τις συνθήκες στον κόμβο j στον οποίο βρίσκεται στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι, κατά τη διάρκεια της διαδρομής, το k^{th} άτομο λαμβάνει δόση που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D_k = \sum_{n=1}^T D_k(t_n) \quad (5.23)$$

Η μέση δόση ενός ατόμου που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση δίνεται κατά συνέπεια από τη σχέση:

$$D_T = \frac{1}{Tr} \cdot \sum_{k=1}^{Tr} D_k \quad (5.24)$$

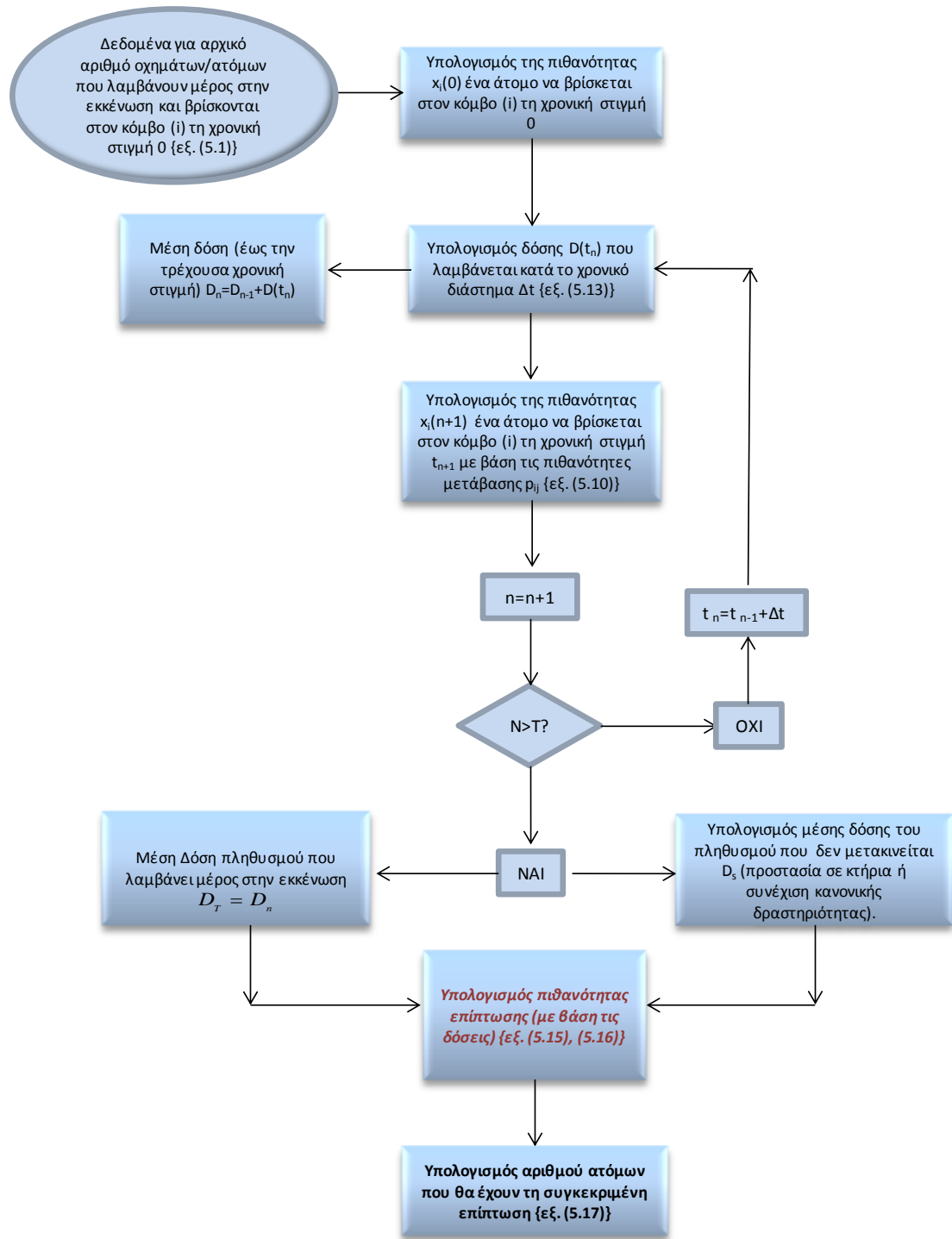
Για την προσέγγιση της δόσης που εκτιμάται από τη σχέση (5.14) μέσω της (5.24), θα πρέπει το δείγμα Tr να είναι επαρκώς μεγάλο (σε σχέση και με τον αριθμό των κόμβων της περιοχής).

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται οι τιμές των δόσεων D_k για το δείγμα που έχει επιλεγεί και συνεπώς μπορεί να εκτιμηθεί η συνάρτηση *pdf* της κατανομής των δόσεων $f(D)$. Στη συνέχεια η επίπτωση που αντιστοιχεί σε κάθε διαδρομής μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της (5.18).

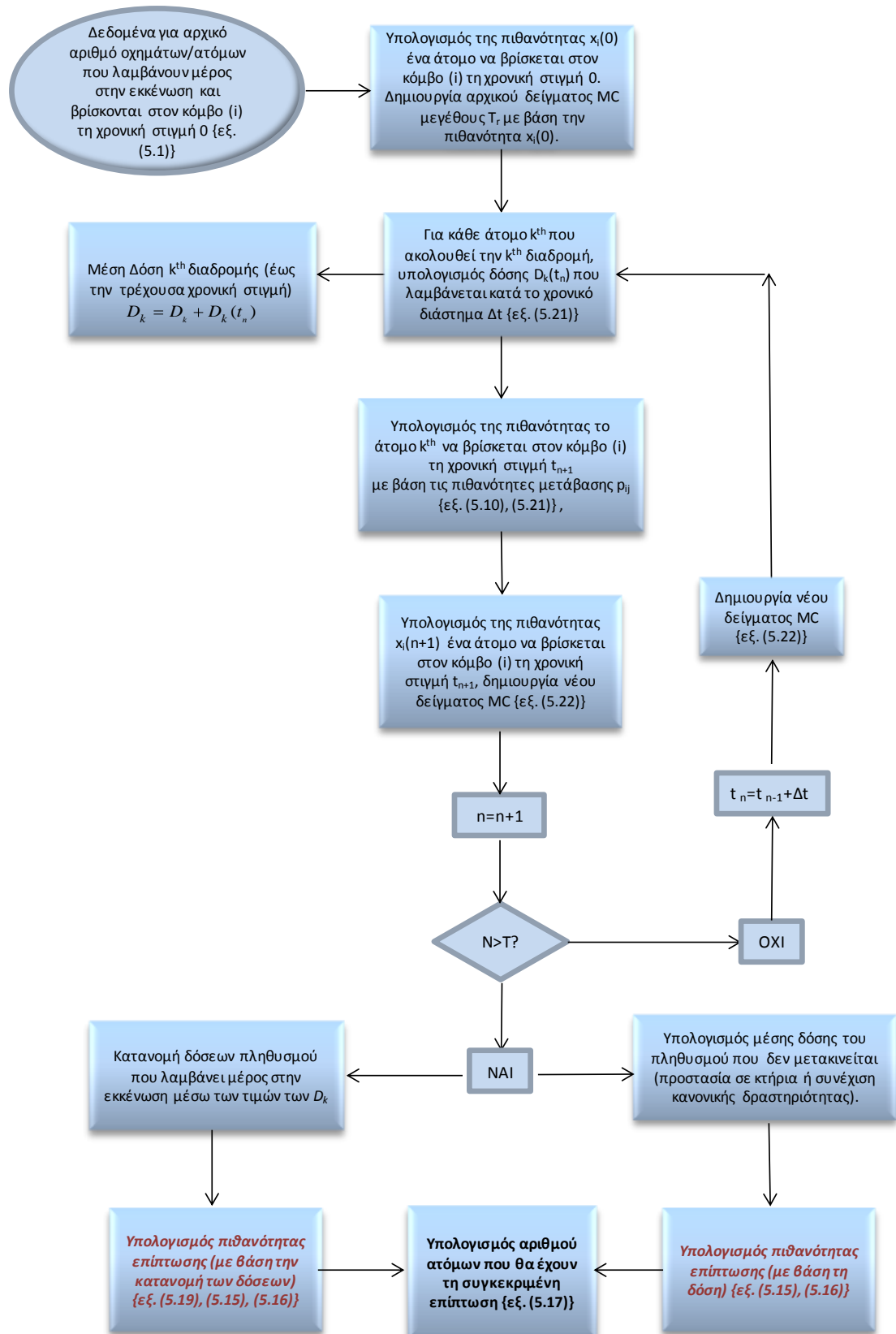
Συνοψίζοντας, μέσω της εκδοχής του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov που βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo, είναι δυνατή η εκτίμηση της πυκνότητας κατανομής πιθανότητας των αναμενόμενων δόσεων και κατά συνέπεια των επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές διαδρομές εκκένωσης.

Η λύση αυτή συνεπάγεται μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αλλά δίνει πιο ακριβή εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού σε σχέση με την εκτίμηση των επιπτώσεων αυτών μόνο μέσω της μέσης δόσης.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά γραφικές αναπαραστάσεις των βημάτων υπολογισμού των συνεπειών για κάθε μια από τις δυο εκδοχές του μοντέλου Markov.



Σχήμα 5.4.2: Εκτίμηση επιπτώσεων στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού μέσω της μέσης δόσης (1^η εκδοχή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov).



Στοχαστικό Μοντέλο Εκκένωσης για την Αντιμετώπιση Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Εκτάσεως

Σχήμα 5.4.3: Εκτίμηση επιπτώσεων στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές εκκένωσης (2^η εκδοχή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov – προσομοίωση Monte Carlo).

5.4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές του μοντέλου. Θεωρούμε ένα σενάριο ατυχήματος στην περιοχή που φαίνεται στο Σχήμα 5.3.2 (υποθετικό παράδειγμα που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα). Το σενάριο αφορά ατύχημα BLEVE σε κυλινδρική δεξαμενή υγραερίου (2000 m³).

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.4, με τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων υπολογίζεται η θερμική ακτινοβολία σε κάθε σημείο του χώρου και κατά συνέπεια σε κάθε κόμβο i της περιοχής ενδιαφέροντος (Papazoglou et al. 1996). Στη συνέχεια υπολογίζεται η δόση και η αντίστοιχη πιθανότητα θανάτου, όπου για την περίπτωση του συγκεκριμένου ατυχήματος γίνεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$D_{x,y} = \frac{q^{4/3}}{10^4} \cdot T_B \quad (5.25)$$

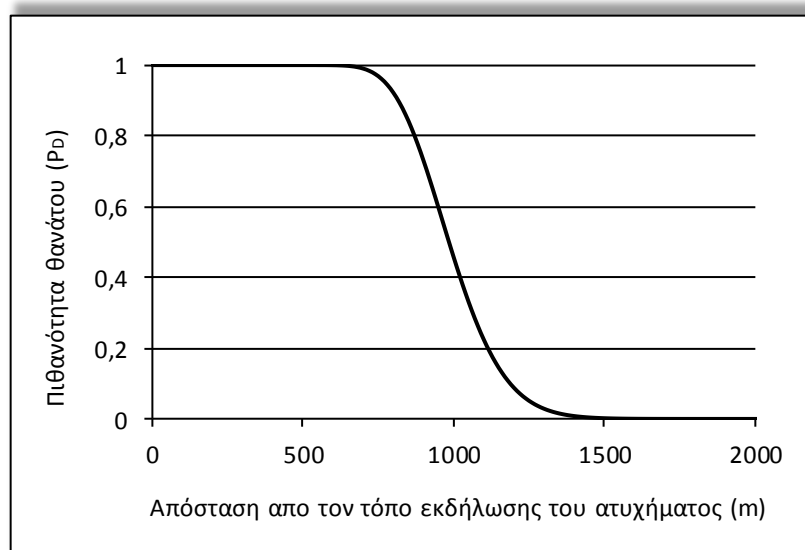
όπου

$D(x,y)$: η δόση που λαμβάνει ένα άτομο που βρίσκεται στη θέση (x,y) σαν αποτέλεσμα της έκθεσής του στη θερμική ακτινοβολία

q : η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας στη θέση (x,y)

T_B : ο χρόνος έκθεσης, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί στο χρόνο διάρκειας του φαινομένου BLEVE.

Η πιθανότητα θανάτου υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5.15) και (5.16) χρησιμοποιώντας κατάλληλες τιμές των παραμέτρων A και B (TNO 1992). Στο Σχήμα 5.4.4 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της πιθανότητας θανάτου P_D σε σχέση με την απόσταση από το σημείο του ατυχήματος (για το συγκεκριμένο σενάριο BLEVE).

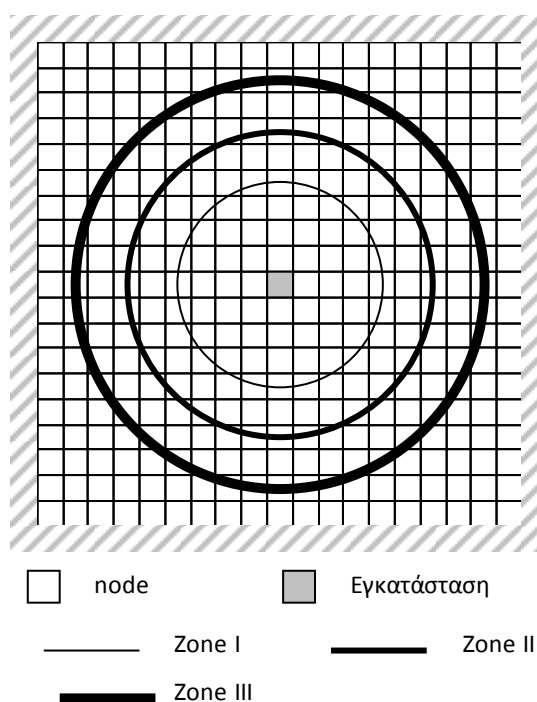


Σχήμα 5.4.4: Πιθανότητα θανάτου σε σχέση με την απόσταση από το σημείο του ατυχήματος (σενάριο: BLEVE, κυλινδρική δεξαμενή υγραερίου 2000 m³).

Θεωρούμε διαφορετικές πολιτικές εκκένωσης και συγκεκριμένα τις πολιτικές που αντιστοιχούν στις τρεις ζώνες που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.4.3.2. Οι πολιτικές αυτές αντιστοιχούν σε περιοχή εκκένωσης με ακτίνα αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 5.4.1. Έστω ERP_i οι διαφορετικές πολιτικές εκκένωσης (Emergency Response Policies). Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.4.3.2, συνήθως η απόφαση αφορά εκκένωση στις Ζώνες I και II. Οι πολιτικές αυτές αναπαριστώνται στο σχήμα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.4.1: Πολιτικές εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.2.

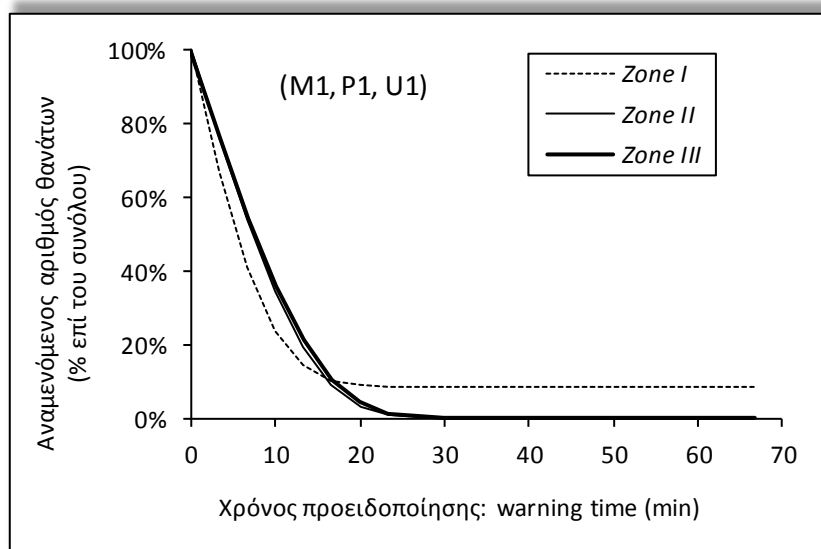
Ζώνη	Δόση θερμικής ακτινοβολίας (TDU)	Πιθανότητα θανάτου (περίμετρος ζώνης)	Απόσταση από το σημείο εκδήλωσης του ατυχήματος	Πολιτικές εκκένωσης (ERPs)
I	1500	1.2×10^{-1}	1170	ERP_1
II	450	1×10^{-5}	1830	ERP_2
III	170	7.3×10^{-12}	2640	ERP_3



Σχήμα 5.4.5: Γραφική παράσταση πολιτικών εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.2.

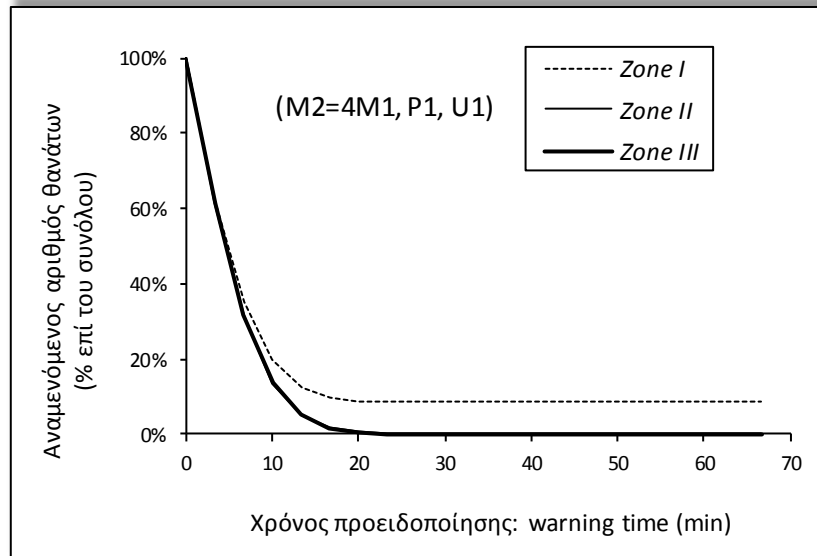
Θεωρείται, επίσης, ότι υπάρχει χρόνος προειδοποίησης (t : warning time) πριν το ατύχημα και συνεπώς η εκκένωση ξεκινάει σε χρόνο t πριν την εκδήλωσή του⁹. Εφαρμόζοντας το μοντέλο εκκένωσης Markov για τις παραπάνω πολιτικές και για διαφορετικούς χρόνους προειδοποίησης, εκτιμάται η κατανομή του πληθυσμού στο χώρο και το χρόνο, για κάθε σενάριο ατυχήματος. Με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 5.4.1 γίνεται αντίστοιχα η εκτίμηση των επιπτώσεων στον πληθυσμό, που για το συγκεκριμένο παράδειγμα εκφράζεται μέσω του αριθμού των θανάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή του συνολικού αριθμού των αναμενόμενων θανάτων για τις πολιτικές που εξετάζονται σε σχέση με το χρόνο προειδοποίησης, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων, για δεδομένη πυκνότητα πληθυσμού και μέση ταχύτητα μετακίνησης των οχημάτων. Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων εκτιμάται ως % επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική. Για όλες τις περιπτώσεις θεωρείται πυκνότητα πληθυσμού P_1 , μέση ταχύτητα οχημάτων U_1 ενώ όσον αφορά στη μέγιστη χωρητικότητα θεωρούνται τρεις περιπτώσεις M_1 , $M_2 = 4 \cdot M_1$ και $M_3 = 0.5 \cdot M_1$ αντίστοιχα.

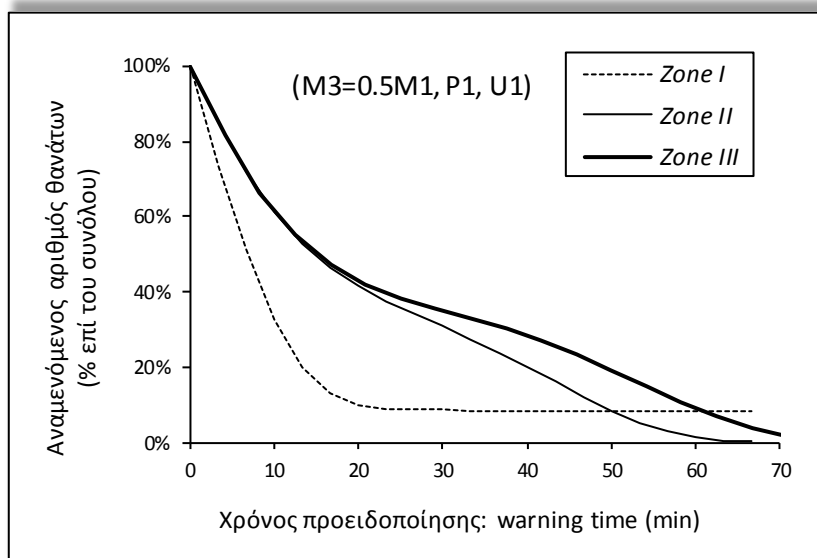


Σχήμα 5.4.6: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων M_1).

⁹ Δεδομένου ότι το φαινόμενο BLEVE διαρκεί ελάχιστα (περίπου μισό λεπτό), η πολιτική εκκένωσης έχει νόημα στην περίπτωση που υπάρχει η «απειλή» ενός BLEVE, για παράδειγμα λόγω εκδήλωσης πυρκαγιάς σε γειτονικό χώρο από το σημείο στο οποίο θα εκδηλωθεί το φαινόμενο.



Σχήμα 5.4.7: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων $M_2 = 4 \cdot M_1$).



Σχήμα 5.4.8: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για τρεις πολιτικές εκκένωσης (χωρητικότητα δρόμων $M_3 = 0.5 \cdot M_1$).

Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται, αν δεν υπάρχει χρόνος προειδοποίησης όλες οι πολιτικές αντιστοιχούν σε αριθμό θανάτων ίδιο με αυτόν που θα αντιστοιχούσε στην περίπτωση που καμιά πολιτική εκκένωσης δεν θα είχε έχει εφαρμοστεί. Αυτό είναι

αναμενόμενο λόγω της πολύ μικρής διάρκειας του φαινομένου BLEVE. Ωστόσο, είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος προειδοποίησης, η επικινδυνότητα μειώνεται.

Ιδιαίτερα θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η βέλτιστη πολιτική δεν είναι αυτή που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ακτίνα εκκένωσης. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.7 (μικρή χωρητικότητα δρόμων και συνεπώς πιθανότητα δημιουργίας μεγάλου κυκλοφοριακού φόρτου κατά την εκκένωση), στην περίπτωση που ο χρόνος προειδοποίησης είναι τουλάχιστον 50 min η εκκένωση μόνο της ζώνης I (ERP_1) είναι πιο αποτελεσματική σε σχέση με την εκκένωση της ζώνης II (ERP_2), με κριτήριο το συνολικό αριθμό θανάτων. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν συγκρίνοντας τις πολιτικές μεταξύ ζώνης II και III.

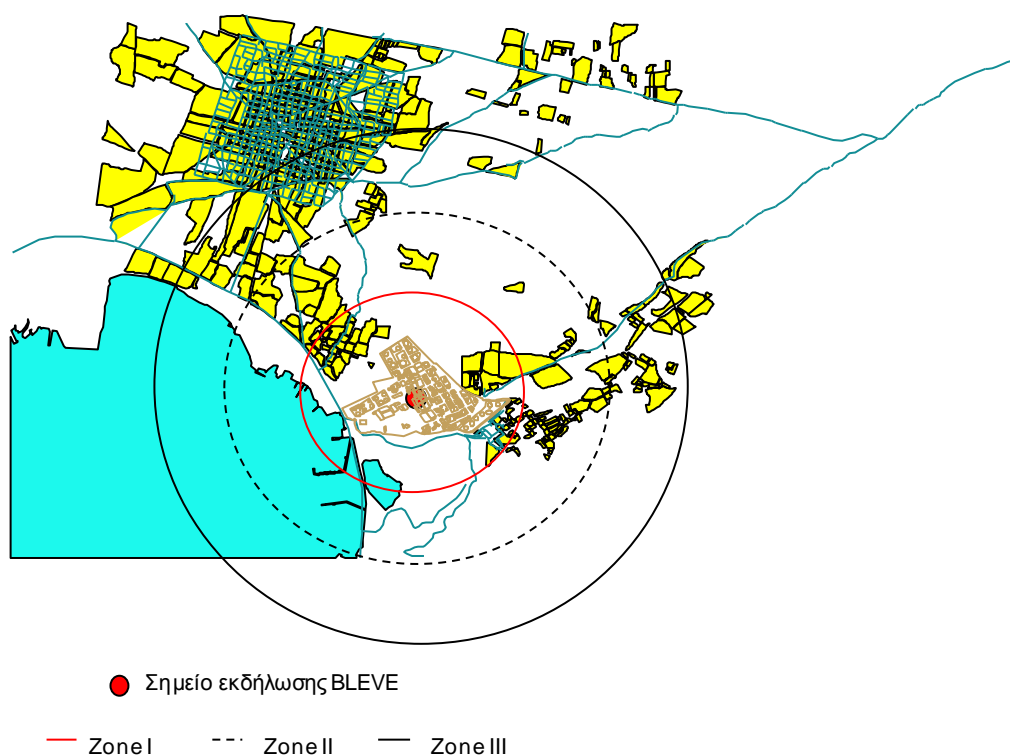
Από την άλλη βέβαια, φαίνεται ότι στην περίπτωση που επαρκεί ο χρόνος προειδοποίησης, η εκκένωση της ζώνης II είναι καλύτερη, δεδομένου ότι η εκκένωση μόνο της ζώνης I προϋποθέτει ότι ένα μέρος του πληθυσμού θα παραμείνει εντός της ακτίνας επιπτώσεων του BLEVE. Επιβεβαιώνεται, επίσης, ότι η εκκένωση της ζώνης III σε σχέση με την εκκένωση της ζώνης II δεν αυξάνει το βαθμό προστασίας, αντιθέτως, ο χρόνος προειδοποίησης που απαιτείται για να προσεγγίσουμε το μηδενικό αριθμό θανάτων είναι μεγαλύτερος από αυτόν που αντιστοιχεί στη ζώνη II.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου. Θεωρούμε ένα ατύχημα BLEVE σε κυλινδρική δεξαμενή (3840 m^3) σε εγκατάσταση που βρίσκεται στην περιοχή. Θεωρούμε 992 κόμβους (γεωγραφικά τμήματα) διαφορετικού μεγέθους. Θεωρώντας ότι η κίνηση θα πραγματοποιείται προς μια κατεύθυνση με σκοπό την απομάκρυνση των οχημάτων από το σημείο του ατυχήματος, προκύπτουν 1384 σύνδεσμοι (links). Τα αρχικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου που αφορούν στη μέγιστη χωρητικότητα κάθε κόμβου M_i και τον αριθμό του πληθυσμού που βρίσκεται σε κάθε γεωγραφικό τμήμα ($n_i(O)$), καθορίστηκαν με βάση τα δεδομένα του Επιχειρησιακού Κέντρου Αντιμετώπισης Ατυχημάτων που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4.2. (Kiranoudis et al. 2002). Θεωρούμε, επίσης, ότι η μετακίνηση θα πραγματοποιηθεί με αυτοκίνητα (μέσος όρος 4 άτομα/όχημα) με μέση ταχύτητα (U) 10 km/h .

Υπολογίζοντας τις επιπτώσεις για το συγκεκριμένο σενάριο ατυχήματος, καθορίζονται οι τρεις ζώνες επικινδυνότητας που αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο παράδειγμα, οι οποίες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές πολιτικές εκκένωσης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα για τις ζώνες αυτές, ενώ στο σχήμα αποτυπώνονται γραφικά οι διαφορετικές πολιτικές εκκένωσης.

Πίνακας 5.4.2: Πολιτικές εκκένωσης για ατύχημα BLEVE στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου.

Ζώνη	Δόση θερμικής ακτινοβολίας (TDU)	Πιθανότητα θανάτου (περίμετρος ζώνης)	Απόσταση από το σημείο εκδήλωσης του ατυχήματος	Πολιτικές εκκένωσης (ERPs)
I	1500	1.2×10^{-1}	1610	ERP ₁
II	450	1×10^{-5}	2525	ERP ₂
III	170	7.3×10^{-12}	3635	ERP ₃

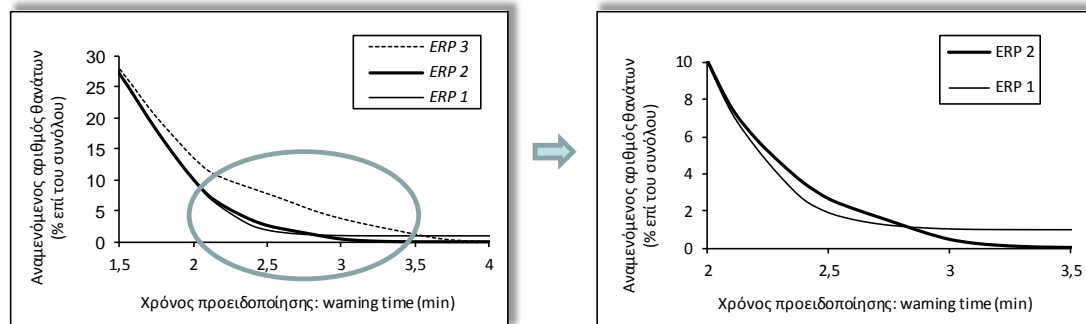


Σχήμα 5.4.9: Περιοχή Θριασίου Πεδίου - Ζώνες επικινδυνότητας (σενάριο BLEVE).

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή του συνολικού αριθμού των αναμενόμενων θανάτων για τις πολιτικές ERP₁ και ERP₂ σε σχέση με το χρόνο προειδοποίησης. Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων εκτιμάται ως % επί του συνόλου (αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική).

Από τη συγκεκριμένη αυτή εφαρμογή προκύπτει ότι απαιτείται χρόνος προειδοποίησης μεγαλύτερος από 2 ώρες ώστε να υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των πολιτικών εκκένωσης (μικρότερες συνέπειες αν εφαρμοστεί η πολιτική της ζώνης II). Στην περίπτωση που ο χρόνος προειδοποίησης είναι μικρότερος, οι πολιτικές φαίνονται σχεδόν ταυτόσημες

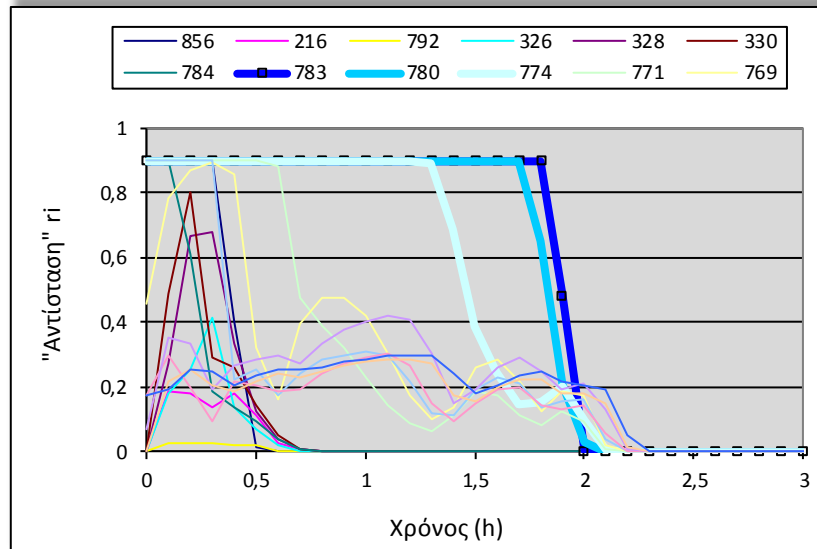
(και από αυτή την άποψη είναι προτιμότερη η πολιτική της ζώνης I, δεδομένου ότι συνεπάγεται και μικρότερο «κοινωνικοοικονομικό κόστος»).



Σχήμα 5.4.10: Αναμενόμενος αριθμός θανάτων (% επί του συνόλου των αναμενόμενων θανάτων αν δεν εφαρμοστεί προστατευτική πολιτική) σαν συνάρτηση του χρόνου προειδοποίησης για δυο πολιτικές εκκένωσης (Θριάσιο Πεδίο, σενάριο BLEVE).

Το αποτέλεσμα αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπόψη μας τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του δικτύου που εξετάζεται. Στην πραγματικότητα, ο μεγάλος αριθμός του πληθυσμού (που καθορίζει τελικά και τον αναμενόμενο αριθμό θανάτων), βρίσκεται εντός μιας ακτίνας της τάξης των 1600 μ. Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα και οι τρεις πολιτικές περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο γεωγραφικό τμήμα (στην ακτίνα μεταξύ της ζώνης I και II δεν βρίσκεται μεγάλο τμήμα πληθυσμού). Το ζήτημα αυτό αναδεικνύει και τη σημασία της ενσωμάτωσης στην εκτίμηση των συνεπειών των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των δικτύων και της πληθυσμιακής πυκνότητας και όχι μόνο της έντασης του φαινομένου που καθορίζει τις τρεις ζώνες επικινδυνότητας.

Η ύπαρξη συγκεκριμένων κόμβων που δημιουργούν μπουτιλιάρισμα καθυστερεί την εκκένωση των γεωγραφικών τμημάτων που βρίσκονται εντός της ακτίνας των 1600 μ. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα που ακολουθεί, όπου παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή της τιμής της «αντίστασης» ορισμένων κόμβων της περιοχής ενδιαφέροντος. Παρατηρούμε ότι ορισμένοι κόμβοι παραμένουν σχεδόν για όλη τη διάρκεια της εκκένωσης με τη μέγιστη «αντίσταση», ζήτημα το οποίο αναδεικνύει τις αναγκαίες επεμβάσεις που πιθανά πρέπει να πραγματοποιηθούν στο οδικό δίκτυο του συγκεκριμένων κόμβων προκειμένου να βελτιωθεί η δυνατότητα πιο γρήγορης εκκένωσης.



Σχήμα 5.4.11: Μεταβολή της αντίστασης ορισμένων κόμβων (περιοχή Θριασίου Πεδίου).

5.4.3.1 Εφαρμογή στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης Markov με τη μέθοδο Monte Carlo

Στα παραδείγματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η επίδραση των διαδρομών εκκένωσης στην εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού. Οι εφαρμογές αφορούν σε σενάρια διαρροής αμμωνίας. Τα σενάρια αυτά επιλέχθηκαν με βάση σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές για τέτοιου είδους μεγάλα ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται τοξικές ουσίες, τα οποία έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Michaels 1999).

Θεωρούμε τις περιοχές που εξετάστηκαν στα προηγούμενα παραδείγματα, δηλ. το υποθετικό σενάριο μιας γεωγραφικής περιοχής με κόμβους ίδιου μεγέθους και την περιοχή του Θριασίου Πεδίου, με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των δικτύων κυκλοφορίας. Οι περιοχές αυτές αναπαριστώνται αντίστοιχα στο Σχήμα 5.3.2 και Σχήμα 5.4.9.

Για διαφορετικά σενάρια έκλυση αμμωνίας (αέριο βαρύτερο του αέρα), υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις επικίνδυνης ουσίας για κάθε σημείο του χώρου και για κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας κατάλληλο υπολογιστικό μοντέλο (Papazoglou et al. 1996) και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.4.2.

Η δόση $D(x, y)$ που λαμβάνει ένα άτομο που βρίσκεται στη θέση (x, y) σαν αποτέλεσμα της έκθεσής του σε τοξικές ουσίες, μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.2.5.1.1. Για τις τοξικές ουσίες η σχέση υπολογισμού λαμβάνει τη μορφή:

$$D_{x, y} = C^b_{x, y} \cdot T_{ex} \quad (5.26)$$

όπου:

- $C^b(x, y)$: η συγκέντρωση της τοξικής ουσίας στη θέση (x, y) η οποία θεωρείται σταθερή στην περίπτωση συνεχούς έκλυσης για όλη τη διάρκεια της έκλυσης
- b : σταθερά που εξαρτάται από την τοξική ουσία
- T_{ex} : ο χρόνος έκθεσης .

Η πιθανότητα θανάτου υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5.15) και (5.16) χρησιμοποιώντας κατάλληλες τιμές των παραμέτρων A και B (Papazoglou et al. 1996; TNO 1992).

Στον Πίνακα 2.3.1 που ακολουθεί αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που εξετάζονται. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε διαφορετικό ρυθμό έκλυσης αμμωνίας (συνεχής έκλυση), διαφορετικό χρόνο έναρξης της διαδικασίας εκκένωσης σε σχέση με την έναρξη της διαρροής και διαφορετική κατεύθυνση του ανέμου.

Με την εφαρμογή του μοντέλου εκκένωσης με τη μέθοδο Monte Carlo, εκτιμάται η κατανομή των δόσεων που λαμβάνει ο πληθυσμός σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 5.4.2. Στον πίνακα φαίνεται για κάθε σενάριο που εξετάζεται η πιθανότητα θανάτου P_D που προκύπτει μέσω του απλού μοντέλου Markov (μέση δόση) και η πιθανότητα θανάτου $P_{D(M.C.)}$ που υπολογίζεται μέσω του μοντέλου Monte Carlo, όπου λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των διαδρομών εκκένωσης.

Πίνακας 5.4.3: Εφαρμογή πολιτικών εκκένωσης για διαφορετικά σενάρια έκλυσης αμμωνίας.

Σενάριο ατυχήματος	Ρυθμός έκλυσης αμμωνίας (kg/sec)	Διάρκεια έκλυσης (sec)	Κατεύθυνση ανέμου (γωνία σε °)	Γεωγραφική περιοχή εκκένωσης	Χρόνος έναρξης εκκένωσης σε σχέση με την έναρξη της διαρροής σε sec (t)
1	264	600	0	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη I)	0
2	264	600	0	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη II)	0
3	264	600	0	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη III)	0
4	264	600	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη II)	0
5	264	600	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη III)	0
6	264	600	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη I)	0
7	264	600	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη I)	600
8	1	100	0	Σχήμα 5.3.2 (κόμβος εγκατάστασης)	600
9	264	600	0	Σχήμα 5.3.2 (zone I)	0
10	264	600	0	Σχήμα 5.3.2 (zone I)	1800
11	264	600	0	Σχήμα 5.3.2 (zone II)	0
12	264	600	0	Σχήμα 5.3.2 (zone III)	0
13	20	72000	0	Σχήμα 5.3.2 (zone I)	0
14	20	72000	0	Σχήμα 5.3.2 (zone II)	1200
15	20	72000	0	Σχήμα 5.3.2 (zone I)	1200
16	20	72000	0	Σχήμα 5.3.2 (zone II)	0
17	20	72000	0	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη III)	0
18	20	72000	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη III)	60
19	20	72000	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη III)	1200
20	264	600	130	Σχήμα 5.4.9 (Ζώνη I)	600

Πίνακας 5.4.4: Εκτίμηση επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού μέσω της μέσης δόσης επικίνδυνης ουσίας και της κατανομής των δόσεων για τα σενάρια έκλυσης αμμωνίας του πίνακα 5.4.4.

Σενάριο ατυχήματος	Μέση τιμή δόσης (D)	Πιθανότητα θανάτου που υπολογίζεται μέσω της μέσης δόσης $p(P_{\bar{D}})$	Πιθανότητα θανάτου που υπολογίζεται μέσω της κατανομής των δόσεων $p(P_{D(M.C.)})$	Σχήμα στο οποίο αναπαρίσταται η κατανομή των δόσεων
1	1,3E+09	5,72E-01	4,72E-01	Σχήμα 5.4.12
2	1,13E+09	5,17E-01	4,11E-01	Σχήμα 5.4.13
3	8,74E+08	4,16E-01	3,19E-01	Σχήμα 5.4.14
4	3,38E+08	1,23E-01	1,49E-01	Σχήμα 5.4.15
5	4,59E+08	1,96E-01	6,07E-02	Σχήμα 5.4.16
6	2,77E+08	8,69E-02	1,21E-01	Σχήμα 5.4.17
7	9,05E+08	4,30E-01	9,75E-02	Σχήμα 5.4.18
8	1,58E+07	1,2E-05	1,29E-05	Σχήμα 5.4.19
9	1,19E+08	1,37E-02	3,67E-02	Σχήμα 5.4.20
10	3,49E+09	8,80E-01	7,33E-01	Σχήμα 5.4.21
11	4,28E+07	6,26E-04	1,20E-02	Σχήμα 5.4.22
12	1,31E+07	5,04E-06	2,14E-03	Σχήμα 5.4.23
13	1,37E+07	6,38E-06	5,20E-03	Σχήμα 5.4.24
14	6,27E+08	2,93E-01	6,83E-02	Σχήμα 5.4.25
15	1,87E+09	7,08E-01	2,05E-01	Σχήμα 5.4.26
16	5,05E+06	4,03E-08	1,82E-03	Σχήμα 5.4.27
17	1,01E+08	8,82E-03	2,88E-02	Σχήμα 5.4.28
18	8,38E+08	4,00E-01	9,08E-02	Σχήμα 5.4.29
19	2,51E+09	8,01E-01	1,36E-01	Σχήμα 5.4.30
20	1,36E+10	9,94E-01	9,87E-01	Σχήμα 5.4.31

Στοχαστικό Μοντέλο Εκκένωσης για την Αντιμετώπιση Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Εκτάσης

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των δόσεων με βάση τα παραπάνω σενάρια. Όπως φαίνεται από τα παραδείγματα αυτά, στις περιπτώσεις των *σεναρίων 8 και 20* η πιθανότητα θανάτου είναι *σχεδόν ταυτόσημη*, είτε υπολογιστεί μέσω του απλού μοντέλου εκκένωσης (δηλ. μέσω της μέσης τιμής της δόσης που λαμβάνει ο πληθυσμός) είτε μέσω του μοντέλου Monte Carlo (δηλ. μέσω της κατανομής των δόσεων ανάλογα με τις διαδρομές εκκένωσης). Στις περιπτώσεις αυτές είτε η κατανομή των δόσεων είναι στην περιοχή πολύ μικρής επικινδυνότητας, όπως και η τιμή που προκύπτει με βάση τη μέση δόση (σενάριο 8), είτε, αντίστοιχα, στην περιοχή μεγάλων τιμών των δόσεων και πιθανότητας θανάτου (σενάριο 20). Αντιστοιχούν, δηλαδή, σε κατανομές της μορφής $pdf(A)$ και $pdf(C)$ που παρουσιάστηκαν ενδεικτικά στο Σχήμα 5.4.1. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εφαρμογή του μοντέλου Monte Carlo δεν είναι απαραίτητη, καθώς δεν προσθέτει επιπλέον ακρίβεια στους υπολογισμούς της επικινδυνότητας, ενώ από την άλλη συνεπάγεται μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.

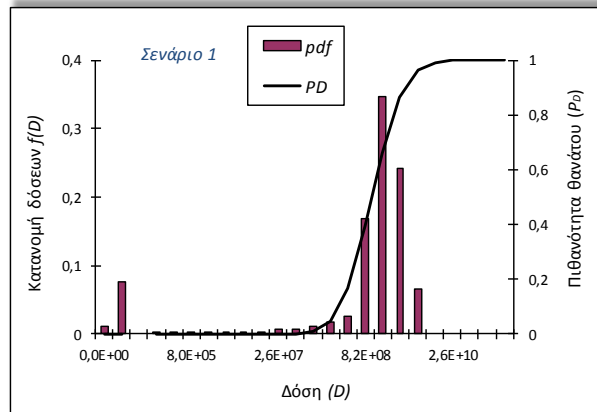
Ωστόσο, έχει σημασία να αναδειχθεί ότι για ορισμένα σενάρια, η διαφορά που προκύπτει στην εκτίμηση των επιπτώσεων ανάλογα με το αν θα ληφθεί υπόψη η μέση δόση ή η κατανομή δόσεων, είναι σημαντική.

Από τη μια, είναι πιθανό η εκτίμηση μέσω της μέσης δόσης να αντιστοιχεί σε μια *συντηρητική εκτίμηση των επιπτώσεων*, όπως συμβαίνει χαρακτηριστικά στις περιπτώσεις των *σεναρίων 4, 6, 9, 11, 12, 13, 16 και 17*.

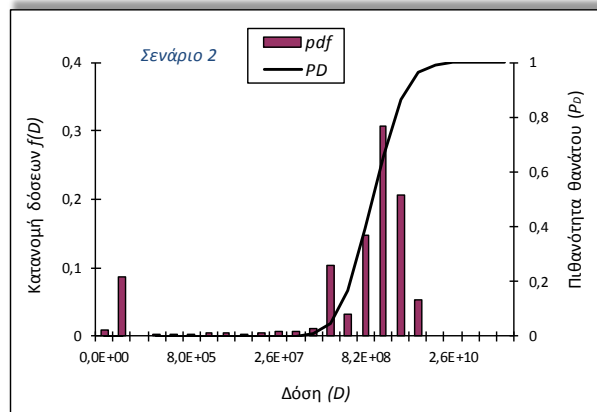
Από την άλλη, η εκτίμηση μέσω της μέσης δόσης μπορεί να είναι *υπερβολική* σε σχέση με την εκτίμηση μέσω της κατανομής των δόσεων, που επίσης μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα όσον αφορά στην επιλογή καταλληλότερης πολιτικής εκκένωσης, όπως συμβαίνει στα παραδείγματα που αντιστοιχούν στα *σενάρια 1, 2, 3, 5, 10* και ακόμη περισσότερο στα *σενάρια 14, 15, 18 και 19*.

Η διαφορά που αντιστοιχεί στον αναμενόμενο αριθμό θανάτων, ο οποίος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πιθανότητα θανάτου με τον πληθυσμό, είναι πολύ σημαντική για τα παραπάνω σενάρια (εκτός των σεναρίων 8 και 20). Σε αυτές τις περιπτώσεις, παρόλο που το υπολογιστικό κόστος του μοντέλου εκκένωσης Markov/Monte-Carlo είναι μεγαλύτερο, ο υπολογισμός των επιπτώσεων στη υγεία του πληθυσμού μέσω της κατανομής των δόσεων είναι απαραίτητος για μια ολοκληρωμένη εκτίμηση.

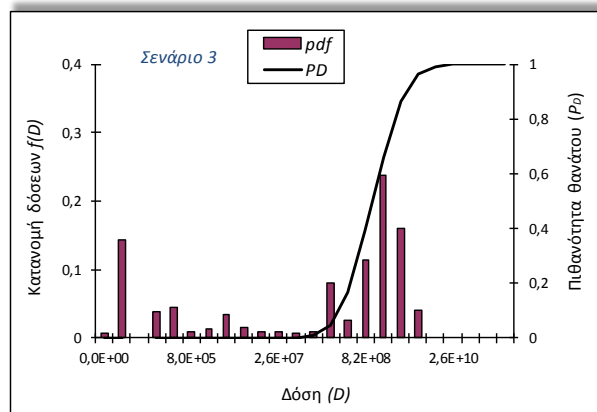
Η διαφορά αυτή αναδεικνύει και τη σημασία του να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές διαδρομές που ακολουθεί ο πληθυσμός κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Δεδομένης της δυναμικής φύσης και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την επιλογή διαδρομής από τον πληθυσμό, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, αναδεικνύεται η σημασία της βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης. Η προσέγγιση της εκκένωσης περιοχών μόνο με βάση την ένταση του φαινομένου μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπο-προστασία του πληθυσμού ή να αυξήσει σημαντικά το «κοινωνικοοικονομικό κόστος» χωρίς απαραίτητα να συνεπάγεται μείωση της επικινδυνότητας.



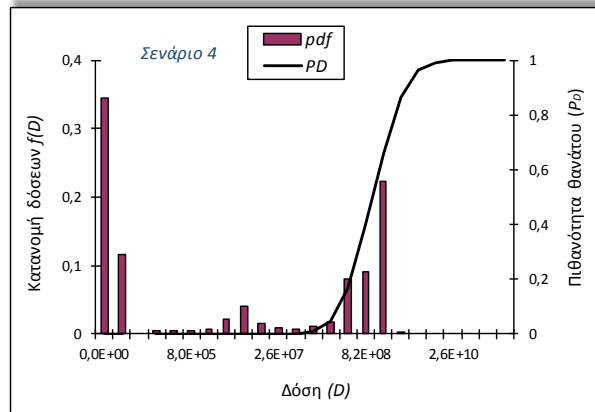
Σχήμα 5.4.12: Κατανομή δόσεων (σενάριο 1, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



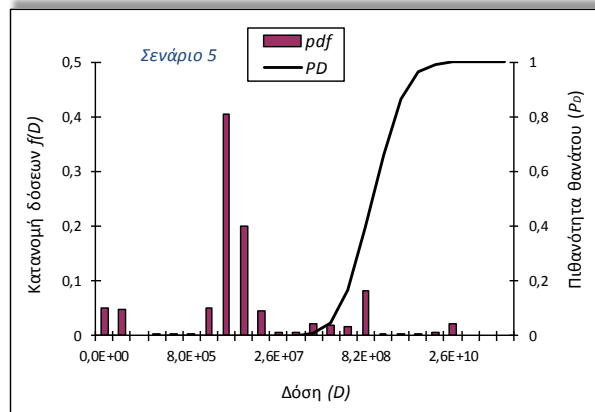
Σχήμα 5.4.13: Κατανομή δόσεων (σενάριο 2, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



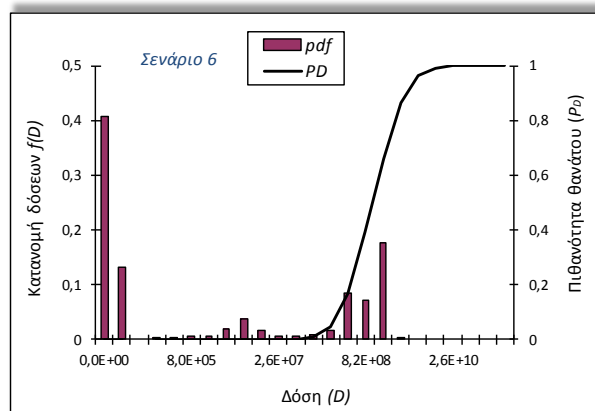
Σχήμα 5.4.14: Κατανομή δόσεων (σενάριο 3, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



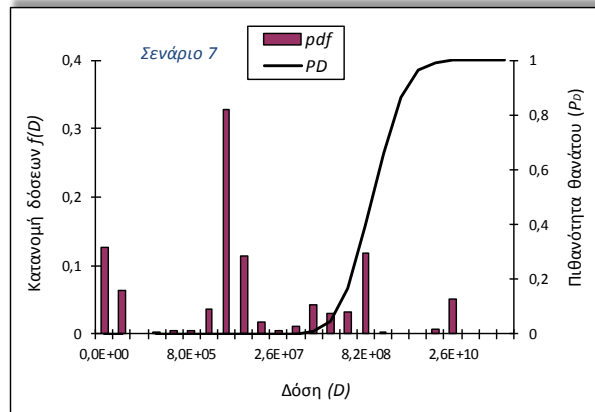
Σχήμα 5.4.15: Κατανομή δόσεων (σενάριο 4, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



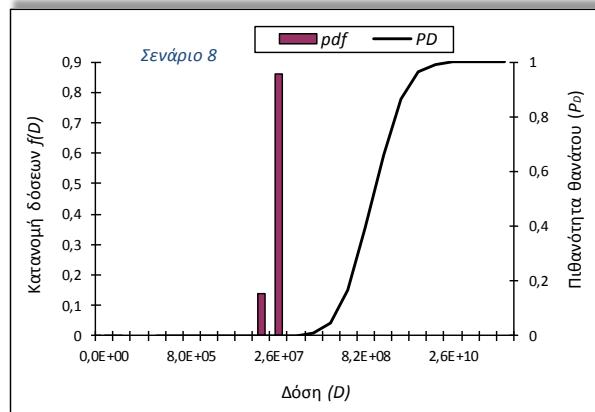
Σχήμα 5.4.16: Κατανομή δόσεων (σενάριο 5, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



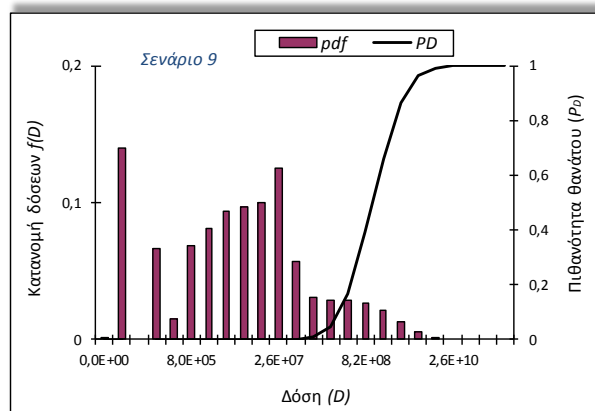
Σχήμα 5.4.17: Κατανομή δόσεων (σενάριο 6, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



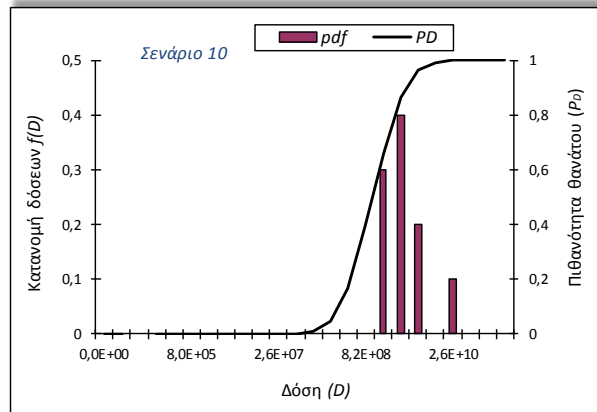
Σχήμα 5.4.18: Κατανομή δόσεων (σενάριο 7, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



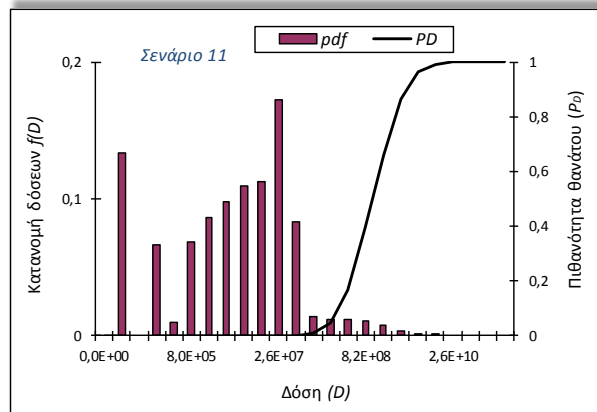
Σχήμα 5.4.19: Κατανομή δόσεων (σενάριο 8, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



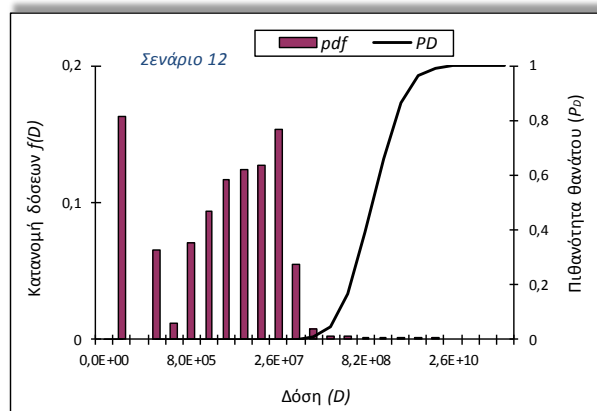
Σχήμα 5.4.20: Κατανομή δόσεων (σενάριο 9, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



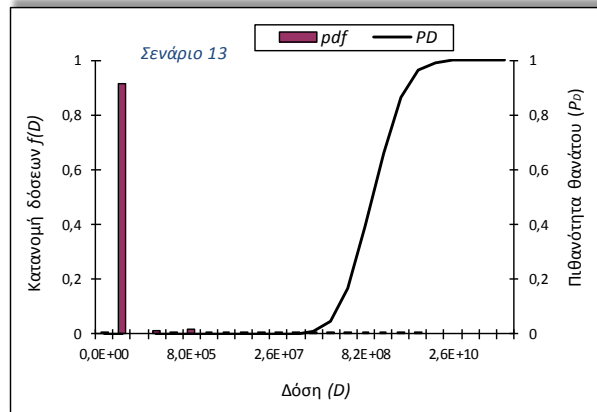
Σχήμα 5.4.21: Κατανομή δόσεων (σενάριο 10, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



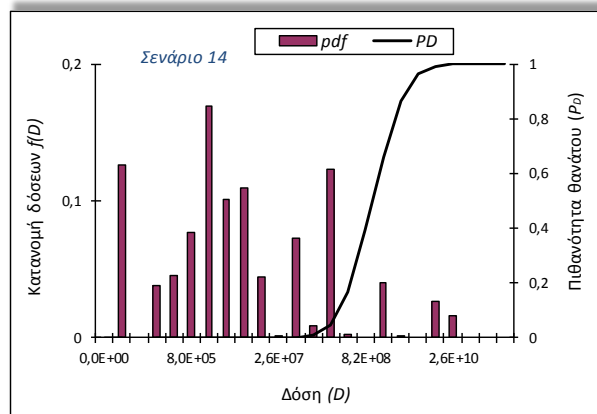
Σχήμα 5.4.22: Κατανομή δόσεων (σενάριο 11, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



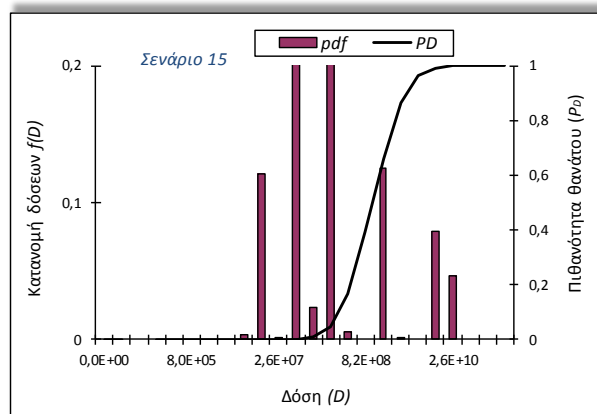
Σχήμα 5.4.23: Κατανομή δόσεων (σενάριο 12, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



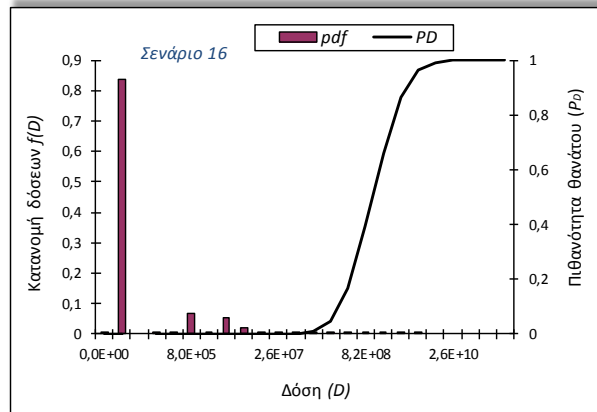
Σχήμα 5.4.24: Κατανομή δόσεων (σενάριο 13, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



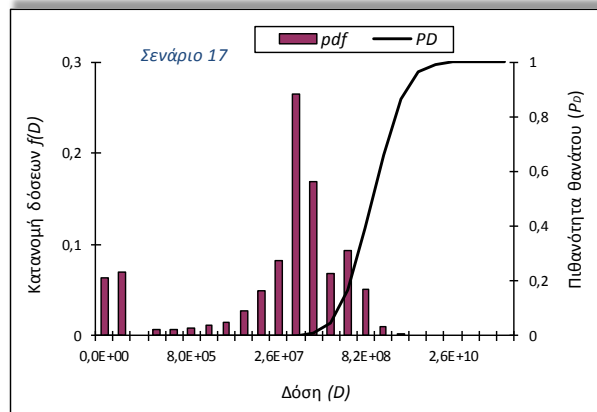
Σχήμα 5.4.25: Κατανομή δόσεων (σενάριο 14, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



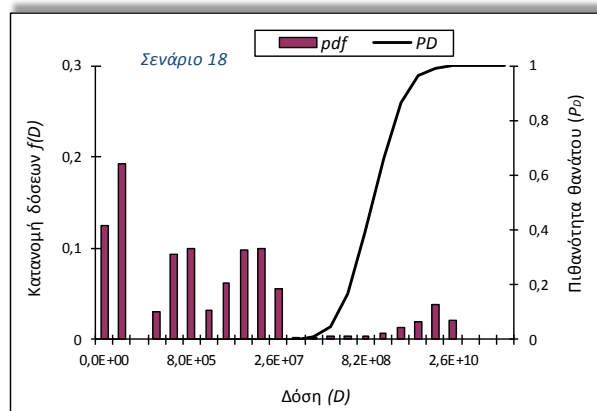
Σχήμα 5.4.26: Κατανομή δόσεων (σενάριο 15, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



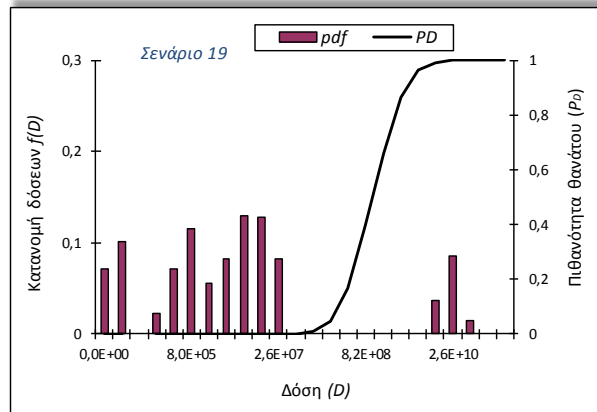
Σχήμα 5.4.27: Κατανομή δόσεων (σενάριο 16, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



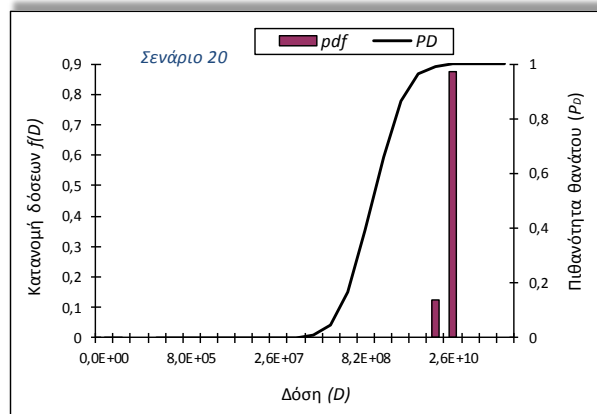
Σχήμα 5.4.28: Κατανομή δόσεων (σενάριο 17, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



Σχήμα 5.4.29: Κατανομή δόσεων (σενάριο 18, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



Σχήμα 5.4.30: Κατανομή δόσεων (σενάριο 19, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



Σχήμα 5.4.31: Κατανομή δόσεων (σενάριο 20, πίνακες 5.4.3 και 5.4.4).



ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα που εξετάζεται στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής συνίσταται στην εύρεση του *βέλτιστου συνδυασμού προστατευτικών δράσεων* σε περιοχές γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες και μπορεί να προκαλέσουν τεχνολογικό ατύχημα μεγάλης έκτασης.

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3.2, η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε τμήματα σε κάθε ένα από τα οποία μπορεί να εφαρμοστεί μια «πολιτική» (προστατευτική πολιτική ή συνέχιση κανονικής δραστηριότητας). Κάθε διαφορετικός συνδυασμός πολιτικών αντιστοιχεί σε μια διαφορετική εναλλακτική λύση του προβλήματος.

Όπως αναδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακόμη και αν προσεγγίσουμε το πρόβλημα μόνο με το κριτήριο της ελαχιστοποίησης των *συνεπειών ενός πιθανού ατυχήματος στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού*, η βέλτιστη πολιτική αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που μπορεί να σχετίζονται με τον τύπο του ατυχήματος, την πυκνότητα του πληθυσμού, τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου, το χρόνο προειδοποίησης πριν το ατύχημα και ιδιαίτερα τις διαδρομές που ακολουθούνται από τα άτομα που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση. Από την άλλη, κάθε πολιτική συνεπάγεται και μια σειρά *κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες* (ό όρος «κοινωνικοοικονομικό κόστος» χρησιμοποιείται συνήθως για να τις χαρακτηρίσει).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το πρόβλημα του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης γύρω από εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες αντιμετωπίζεται ως *πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια*. Για την αποφυγή καθορισμού υποκειμενικών συντελεστών «βαρύτητας» στα κριτήρια, η μεθοδολογία που περιγράφεται στοχεύει στην προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων του προβλήματος,

που δίνει στη συνέχεια τη δυνατότητα στους αποφασίζοντες να επιλέξουν με βάση τις προτιμήσεις τους μεταξύ των λύσεων αυτών.

Η μεθοδολογία για την προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων βασίζεται στους *εξελικτικούς αλγορίθμους*. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των μεθοδολογιών που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία για το σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης, περιγράφεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής και παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της.

6.2 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ – ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στην πλειοψηφία των προσεγγίσεων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία σχετικά με τη λήψη αποφάσεων για τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που σχετίζονται με τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης, η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού προστατευτικών δράσεων (protective actions) πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την ένταση του φαινομένου (Hedemann-Jensen 2004; Rogers et al. 1990; Sohler 2002; Sorensen et al. 2004). Ανάλογα με τον τύπο του ατυχήματος, με κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα προσδιορίζεται η ένταση του φαινομένου σε κάθε σημείο του χώρου και για κάθε χρονική στιγμή (συγκέντρωση τοξικής ουσίας, ένταση θερμικής ή ιοντίζουσας ακτινοβολίας, υπερπίεση κ.λπ.). Με βάση την ένταση αυτή καθορίζονται ζώνες επικινδυνότητας (που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τον τόπο εκδήλωσης του ατυχήματος) για τις οποίες υπάρχουν συγκεκριμένα κριτήρια εφαρμογής διαφορετικών προστατευτικών πολιτικών (Kirchsteiger 2006). Παράγοντες όπως ο χρόνος προειδοποίησης πριν το ατύχημα και οργανωτικά ζητήματα λαμβάνονται επίσης υπόψη από τον αποφασίζοντα. Σχετική αφορά έγινε στην ενότητα 3.3.

Σημαντικές ερευνητικές εργασίες που ακολουθούν την προσέγγιση της επιλογής προστατευτικών δράσεων με βάση την ένταση του φαινομένου που σχετίζεται με το ατύχημα (συνήθως μέσω του καθορισμού ζωνών επικινδυνότητας ή/και λαμβάνοντας υπόψη το «χειρότερο» σενάριο ατυχήματος), παρουσιάζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις εργασίες που αφορούν την αντιμετώπιση ατυχημάτων:

- σε πυρηνικές εγκαταστάσεις (Cheng et al. 2008; Conklin and Edwards 2000; EPA 1991; Lindell 2000; McKenna 2000; Papazoglou and Christou 1997; Sinkko et al. 2004; Urbanik 2000)
- σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες (Contini et al. 2000; Kiranoudis et al. 2002; O'Mahony et al. 2008; Sorensen et al. 1992)
- που σχετίζονται με τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων (Fabiano et al. 2005; Godoy et al. 2007; Zografos and Androutsopoulos 2008).

Ο καθορισμός της πολιτικής αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης με βάση την ένταση του φαινομένου και τις ζώνες επικινδυνότητας, δεν είναι πάντα κατάλληλος για την επίτευξη

του στόχου της ελαχιστοποίησης των συνεπειών. Ειδικότερα, όσον αφορά στην προσέγγιση του «χειρότερου» σεναρίου ατυχήματος, θα πρέπει να τονιστεί ότι μια πολιτική έκτακτης ανάγκης που μπορεί να είναι βέλτιστη για αυτή την περίπτωση, μπορεί να μην είναι βέλτιστη για άλλες κατηγορίες ατυχημάτων (με διαφορετικές συνθήκες έκλυσης επικίνδυνης ουσίας, καιρικών συνθηκών κ.λπ.). Όπως αναδείχτηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο κυκλοφοριακός φόρτος που συνεπάγεται η μετακίνηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τις συγκεκριμένες διαδρομές που ακολουθούνται από ομάδες του πληθυσμού, είναι πιθανό να επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα μιας προστατευτικής πολιτικής (Georgiadiou et al. 2007).

Επιπλέον, άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την εφαρμογή κάποιας συγκεκριμένης προστατευτικής πολιτικής, όπως για παράδειγμα η διατάραξη του καθημερινού ρυθμού ζωής, το άγχος που συνεπάγεται η εφαρμογή της εκκένωσης, πρακτικά προβλήματα και οικονομικά ζητήματα (πλευρές που συχνά αναφέρονται υπό το γενικό όρο «κοινωνικοοικονομικό κόστος»), επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση μιας πολιτικής έκτακτης ανάγκης.

Τα δυο αυτά κριτήρια, δηλ. η ελαχιστοποίηση της επικινδυνότητας και η ελαχιστοποίηση του «κοινωνικοοικονομικού κόστους» είναι γενικά αντικρουόμενα (Crick et al. 2004; Govaerts 2004; Kiker et al. 2005; Papazoglou et al. 2000; Papazoglou and Christou 1997; Papazoglou and Kollas 1997; Sinkko et al. 2004).

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, αναδεικνύεται η *ανάγκη βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης για την υποστήριξη των σχετικών αποφάσεων* (Georgiadiou et al. 2007; Papazoglou and Christou 1997).

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης έχει μελετηθεί προηγουμένως, για ατυχήματα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις. Στην πλειοψηφία αυτών των προσεγγίσεων η μεθοδολογία που ακολουθείται προϋποθέτει τον καθορισμό «βαρών» στις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος καταλήγοντας σε μια συνάρτηση που μετρά την «αξία» κάθε εναλλακτικής λύσης. Σε αυτή την κατηγορία μεθοδολογιών περιλαμβάνονται οι εργασίες των: (Ikeda et al. 2010; Ishigami et al. 2004; Levy and Taji 2007; Schenker-Wicki 1997).

Αναφέρουμε ειδικότερα τη χρήση της πολυκριτηριακής θεωρίας της χρησιμότητας στο σύστημα στήριξης αποφάσεων RODOS (Real-time On line DecisiOn Support), το οποίο εντάσσεται σε πρόγραμμα της ΕΕ για την αντιμετώπιση πυρηνικών ατυχημάτων (French 1996; Geldermann et al. 2009; Hamalainen et al. 2000; Mustajoki et al. 2007; Papamichail and French 2000; Papamichail and French 2005; Sohier 2002). Στην προσέγγιση αυτή οι εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος αξιολογούνται μέσω μιας συνάρτησης «αξίας» που καθορίζεται από τις συνέπειες του ατυχήματος και τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα.

Οι αποφάσεις με βάση τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι υποκειμενικές και επηρεάζονται από μια σειρά παράγοντες (αβεβαιότητα,

πολιτικούς και οικονομικούς παράγοντες κ.ά.) (Levy and Taji 2007). Για την αποφυγή της χρησιμοποίησης «βαρών» ή «ανταλλαγμάτων» (value trade-offs) στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται, τα οποία εμπεριέχουν μεγάλο βαθμό υποκειμενισμού, μια εναλλακτική μεθοδολογία είναι αυτή της *προσπάθειας προσέγγισης του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων* (Keeney and Raiffa 1993; Marseguerra et al. 2004; Miettinen 1999). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποφυγή (έως το τελευταίο στάδιο της επιλογής) της χρήσης συντελεστών «βαρύτητας» ανάλογα με τις υποκειμενικές προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Μετά την εύρεση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει μεταξύ αυτών με βάση τις προτιμήσεις του και ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται (π.χ. απόρριψη εναλλακτικών μη-κυριαρχούμενων λύσεων που διαφέρουν σημαντικά ως προς το ένα κριτήριο, ενώ για τα υπόλοιπα η διαφοροποίηση μεταξύ τους είναι αμελητέα). Επιπρόσθετα, μια συζήτηση για την προτιμητέα επιλογή μεταξύ περισσότερων του ενός αποφασιζόντων μπορεί να διευκολυνθεί κατά πολύ αν συγκεντρωθεί στη σύγκριση λύσεων του μη-κυριαρχούμενου συνόλου δεδομένου ότι ο προσδιορισμός του είναι απαλλαγμένος από υποκειμενικές απόψεις.

Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης με πολλαπλά κριτήρια μέσω της προσέγγισης του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων έχει μελετηθεί προηγουμένως για πυρηνικές εγκαταστάσεις (Papazoglou and Christou 1997; Papazoglou and Kollas 1997). Σε αυτές τις προσεγγίσεις, επίσης η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε γεωγραφικά τμήματα σε κάθε ένα εκ των οποίων εφαρμόζεται μια πολιτική έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, η μεθοδολογία πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων που εφαρμόζεται προϋποθέτει την ανεξαρτησία των συνεπειών κάθε επιμέρους γεωγραφικού τμήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα. Δηλαδή, για την εκτίμηση των επιπτώσεων που συνεπάγεται κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος, δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των δράσεων προστασίας που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή. Η αλληλεπίδραση αυτών, ωστόσο, έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι για παράδειγμα η εκκένωση σε μια υποπεριοχή πιθανά αυξάνει τον κυκλοφοριακό φόρτο σε γειτονικές υποπεριοχές, επηρεάζοντας έτσι την επικινδυνότητα (επίδραση στην επιλογή διαδρομής του πληθυσμού, καθυστέρηση τμήματος του πληθυσμού να απομακρυνθεί).

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων. Πρόκειται για στοχαστικές μεθόδους που προσομοιάζουν τη διαδικασία της φυσικής εξέλιξης και τις δυο τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη βελτιστοποίηση πολυκριτηριακών προβλημάτων.

Μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος χωρίς την προϋπόθεση ανεξαρτησίας των συνεπειών μεταξύ διαφορετικών σταδίων, δηλαδή λύσεων που αντιστοιχούν σε αλληλεπίδραση των επιμέρους δράσεων που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών πολυκριτηριακών μεθόδων (π.χ. έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίσουν πολλές μη-κυριαρχούμενες λύσεις ταυτόχρονα σε μια συγκεκριμένη επανάληψη του αλγορίθμου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μη συνεχών ή μη κυρτών «μετώπων» Pareto). Επίσης, πέρα από τις «κλασσικές» δράσεις προστασίας (π.χ. εκκένωση,

προστασία σε κτήρια κ.λπ.), δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και άλλων εναλλακτικών πολιτικών (όπως για παράδειγμα η σταδιακή εκκένωση, δηλ. η παραμονή εντός κτηρίων για ένα διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση).

Η χρήση πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων (ΜΟΕΑ) στον τομέα της αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων αποτελεί ακόμη νέο πεδίο έρευνας. Πρόσφατες αναφορές είναι για παράδειγμα αυτές των Narzisi et al. (Narzisi et al. 2006) και Saadatseresht et al. (Saadatseresht et al. 2009) οι οποίες όμως αναφέρονται σε διαφορετικό πρόβλημα από ότι αυτό που περιγράφεται στην παρούσα εργασία, ενώ δεν λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες που αφορούν στις συνθήκες κυκλοφορίας που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα κάθε εναλλακτικής λύσης.

Με βάση τα παραπάνω η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης αφορά εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.
- Λαμβάνονται υπόψη πολλαπλά κριτήρια και σκοπός είναι η προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων.
- Η αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής λύσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των πολιτικών που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Η μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος (αλληλεπίδραση μεταξύ πολιτικών σε κάθε υποπεριοχή), καθώς και πλεονεκτήματα αυτών των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης.

6.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

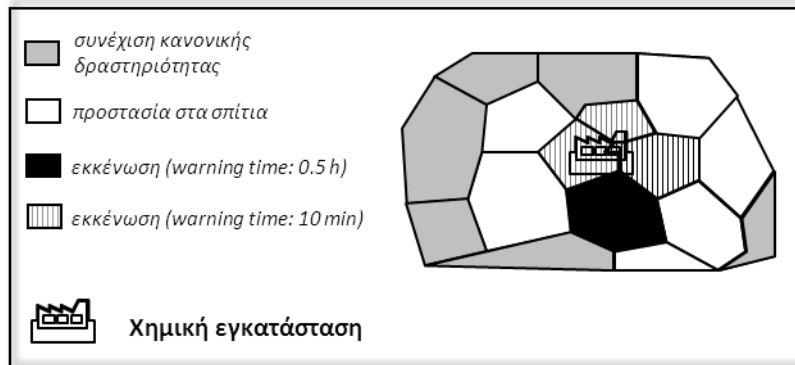
6.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

6.3.1.1 Γενικά

Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης (ERP – *Emergency Response Policy*) που θα αντιστοιχεί σε μια εναλλακτική λύση του προβλήματος,

καθορίζεται ως εξής: Η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε N γεωγραφικά τμήματα διαφορετικού ή ίδιου μεγέθους (καθορίζεται από το χρήστη).

Έστω για παράδειγμα η περιοχή που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Στην περιοχή εφαρμόζονται διαφορετικές δράσεις προστασίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (ή καθορίζεται ως «πολιτική» η συνέχιση της κανονικής δραστηριότητας).



Σχήμα 6.3.1: Εφαρμογή προστατευτικών δράσεων σε περιοχή γύρω από μια χημική εγκατάσταση.

Οι προστατευτικές δράσεις μπορεί να αφορούν την προστασία σε σπίτια ή άλλα κτήρια (shelter in-place), εκκένωση ή την εφαρμογή άλλων βοηθητικών δράσεων όπως η λήψη αντιδότην και η χρήση μέσων ατομικής προστασίας. Στις δράσεις που αφορούν εκκένωση, μπορεί να θεωρηθεί ως διαφορετική πολιτική προστασίας η σταδιακή εκκένωση (δηλ. εκκένωση που ξεκινά σε διαφορετικό χρόνο, αντιστοιχεί δηλ., σε διαφορετικό χρόνο προειδοποίησης).

Μια εναλλακτική πολιτική αντιμετώπισης έκτακτης κατάστασης (ERP) είναι καθορισμένη όταν έχει καθοριστεί μια συγκεκριμένη πολιτική σε κάθε γεωγραφικό τμήμα. Οι συνδυασμοί που μπορεί να πραγματοποιηθούν δημιουργούν ένα διακριτό χώρο αποφάσεων με μεγάλες διαστάσεις:

$$K = \prod_{n=1}^N d_n \quad (6.1)$$

όπου

- K : ο συνολικός ρυθμός των εναλλακτικών λύσεων
- N : ο αριθμός των κόμβων (nodes), δηλ. των γεωγραφικών τμημάτων στα οποία χωρίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος (ακέραιος αριθμός)
- d_n : ο αριθμός των εναλλακτικών δράσεων που μπορούν να εφαρμοστούν στον κόμβο n , $\underline{d} = d_1, d_2, \dots, d_N$.

Κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος θα καθορίζεται ως εξής:

$$as_i \rightarrow \underline{F}_j, F_1^i, F_2^i, \dots, F_M^i \quad (6.2)$$

όπου

as_i : εναλλακτική λύση ERP ($i=1,2,\dots,K$)

j : αντιστοιχεί στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων $j=1,2,\dots,M$

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μεθοδολογία τα οποία εντάσσονται σε δυο κατηγορίες (επιπτώσεις στην υγεία και ασφάλεια του πληθυσμού και «κοινωνικοοικονομικό κόστος»). Ωστόσο, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής μπορεί να επεκταθεί και στη χρήση και άλλων κριτηρίων.

6.3.1.2 Επιπτώσεις στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού

Η εκτίμηση των επιπτώσεων στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού πραγματοποιείται μέσω της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το στοχαστικό μοντέλο Markov (είτε στην απλή μορφή, είτε στην πιο πολύπλοκη εκδοχή του με τη μέθοδο Monte Carlo), για κάθε εναλλακτική λύση as_i , μπορεί να υπολογίσει τις συνέπειες (π.χ. αναμενόμενο αριθμό θανάτων με βάση το σενάριο ατυχήματος που εξετάζεται).

Στα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο οι εναλλακτικές δράσεις αφορούσαν είτε σε εκκένωση είτε σε συνέχιση κανονικής δραστηριότητας. Στο βαθμό που εφαρμόζεται μια πολιτική προστασίας σε κτήρια (*sheltering-in-place/SIP*), η εκτίμηση των επιπτώσεων προϋποθέτει την προσομοίωση της κίνησης του πληθυσμού στην τοποθεσία που βρίσκεται το κτήριο και την εκτίμηση του βαθμού προστασίας που προσφέρει το συγκεκριμένο κτήριο (Argonne National Laboratory 2001; Mannan and Kilpatrick 2000; Rogers and Shar 1990).

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.3, για την εκτίμηση του βαθμού προστασίας κάθε κτηρίου για ένα σενάριο *SIP* πρέπει να εκτιμηθεί ο *ρυθμός εναλλαγής αέρα* (*ACH: air changes per hour*) (Rogers and Shar 1990). Οι Rogers & Shar αναφέρονται σε ενδεικτικούς υπολογισμούς του δείκτη ACH για διάφορα ειδή κτηρίων.

Οι τιμές του δείκτη *ACH* που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και στους σχετικούς υπολογισμούς για να εκτιμηθεί η συγκέντρωση τοξικής ουσίας εντός των κτηρίων στη μεθοδολογία που ακολουθείται στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής.

Επιπλέον, μια παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι ο χρόνος τερματισμού της προστασίας στα κτήρια. Όπως αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία μια πολιτική προστασίας σε κτήρια μπορεί να είναι αποτελεσματική στο βαθμό που θα τερματιστεί

κάποια στιγμή. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, όταν θα έχει «περάσει» το τοξικό νέφος, η συγκέντρωση της τοξικής ουσίας εντός του κτηρίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη συγκέντρωση εκτός αυτού.

Η παράμετρος του χρόνου τερματισμού της προστασίας στα κτήρια (*“time for terminating the SIP” (tT)*) λαμβάνεται υπόψη ως εξής στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται:

- είτε καθορίζεται από το χρόνο όπου πλέον θα έχει «περάσει» το τοξικό νέφος από την περιοχή
- είτε ενσωματώνεται ως παράμετρος της εναλλακτικής προστατευτικής πολιτικής (σταδιακή εκκένωση, δηλ. η εκκένωση ξεκινά σε χρόνο tT σε σχέση με τον αρχικό χρόνο έναρξης της μετακίνησης του πληθυσμού στο μοντέλο εκκένωσης).

Επισημαίνεται ότι, δεδομένης της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την εκτίμηση του χρόνου tT , η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη διατριβή δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης και του χρόνου αυτού. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της θεώρησης εναλλακτικών πολιτικών προστασίας που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς χρόνους tT . Για παράδειγμα:

- ERP1: εκκένωση μιας υποπεριοχής XXX στην οποία αρχικά είχε εφαρμοστεί η προστασία σε κτήρια (SIP) σε “ tT ” min μετά την εκδήλωση του ατυχήματος,
- ERP2: εκκένωση μιας υποπεριοχής XXX στην οποία αρχικά είχε εφαρμοστεί η προστασία σε κτήρια (SIP) σε “ $2tT$ ” min μετά την εκδήλωση του ατυχήματος, κ.ο.κ.

Στη συνέχεια, εκτιμώντας τις σχετικές δόσεις επικίνδυνης ουσίας η εκτίμηση της επικινδυνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

6.3.1.3 «Κοινωνικοοικονομικό κόστος»

Οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις από την εφαρμογή μιας εναλλακτικής πολιτικής αντιμετώπισης έκτακτης κατάστασης (ERP) εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Οι επιπτώσεις αυτές συνήθως αναφέρονται υπό το γενικό όρο «κοινωνικοοικονομικό κόστος» και μπορεί να σχετίζονται με (Hedemann-Jensen 2004; Papazoglou and Christou 1997):

- φυσικούς κινδύνους για τον πληθυσμό (π.χ. πρόκληση ατυχημάτων κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, διακοπή παραγωγής σε κρίσιμους τομείς)
- ψυχολογικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η διαδικασία υλοποίησης μιας προστατευτικής δράσης (πανικός κ.λπ.)
- διατάραξη του κανονικού ρυθμού ζωής
- πρακτικά προβλήματα και οικονομικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η υλοποίηση των δράσεων αυτών

- άγχος και ανασφάλεια για τον πληθυσμό λόγω της μη υλοποίησης προστατευτικών δράσεων, που αυξάνονται όσο μεγαλύτερη είναι η επικινδυνότητα (π.χ. πληθυσμός πλησίον της εγκατάστασης)
- διακοπή παραγωγικών και άλλων δραστηριοτήτων κ.ά.

Οι επιπτώσεις αυτές, βέβαια, μπορεί να είναι αντικρουόμενες (π.χ. άγχος από τη μη υλοποίηση προστατευτικών ενεργειών με τη διατάραξη του κανονικού ρυθμού ζωής από την πραγματοποίηση προστατευτικών πολιτικών). Επιπλέον, το κριτήριο της προστασίας του πληθυσμού (είτε λόγω του τεχνολογικού ατυχήματος, είτε λόγω της υλοποίησης των δράσεων) είναι πρωτεύον σε σχέση με άλλες παραμέτρους. Ωστόσο, σε μια μεθοδολογική προσέγγιση όπου θα προσεγγιστεί το σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων, ο αποφασίζων μπορεί να κρίνει με βάση τις προτιμήσεις του ποια ή ποιες λύσεις θα επιλεγούν.

Δεδομένου, ότι είναι δύσκολο να μετρηθούν οι παραπάνω επιπτώσεις, για την προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστικό μέτρησης του κοινωνικοοικονομικού «κόστους» ο αριθμός των ατόμων που συμμετέχουν σε μια προστατευτική πολιτική, με σκοπό την ελαχιστοποίησή του. Αντίστοιχη προσέγγιση ακολουθείται και από τους Papazoglou & Christou (Papazoglou and Christou 1997).

Οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (δείκτης C) εκτιμώνται μέσω της (Papazoglou and Christou 1997):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^G g_i \cdot C_i}{N_{pop}} \quad (6.3)$$

όπου

C_i	:	ο αριθμός των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην προστατευτική δράση i
G	:	ο αριθμός των διαφορετικών ειδών προστασίας που εφαρμόζονται
g_i	:	«βάρη» τα οποία καθορίζουν τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα για τις προστατευτικές ενέργειες
N_{pop}	:	ο συνολικός αριθμός των ατόμων στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Φυσικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πιο πολύπλοκες μέθοδοι εκτίμησης των συνεπειών αυτών, που πιθανά αυξάνουν το υπολογιστικό κόστος.

6.3.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ

6.3.2.1 Εισαγωγή

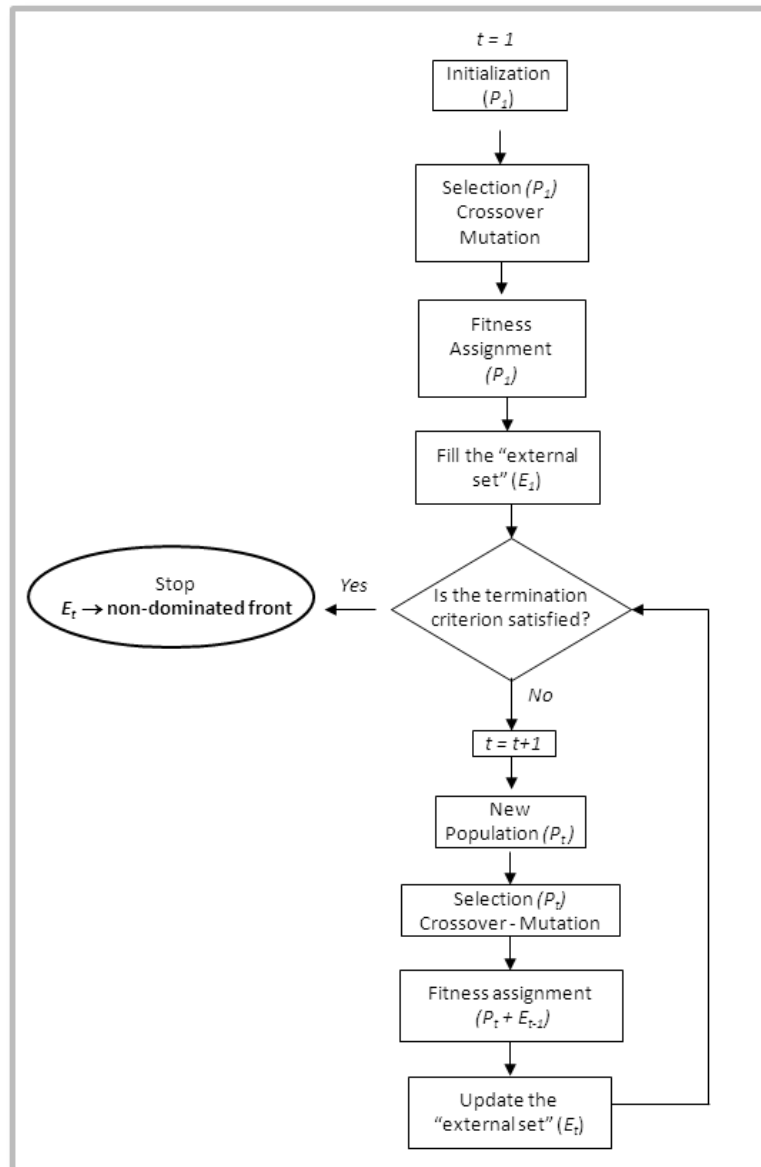
Για την προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης της αντιμετώπισης τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης, αναπτύχθηκε πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στις αρχές των γενετικών αλγορίθμων, ωστόσο, χρησιμοποιείται ο όρος εξελικτικός στο πλαίσιο της παρούσας της μεθοδολογίας. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στον πολυκριτηριακό εξελικτικό αλγόριθμο που παρουσιάστηκε από τον Zitzler στην εξελιγμένη του μορφή (SPEA 2) (Zitzler et al. 2001).

Μια βασική αρχή του αλγορίθμου SPEA 2 (Zitzler et al. 2001), η οποία επίσης χρησιμοποιείται στην παρούσα μεθοδολογία, είναι η διατήρηση ενός «εξωτερικού συνόλου» (“external set”) «ατόμων» του «πληθυσμού» (λύσεων κωδικοποιημένων σε χρωμοσώματα), που περιλαμβάνει τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις έως την τρέχουσα χρονική στιγμή – επανάληψη. Το σύνολο αυτό επικαιροποιείται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

Ορίζονται τα εξής:

- P_t : πληθυσμός ατόμων (σύνολο λύσεων που έχουν κωδικοποιηθεί σε χρωμοσώματα) που θα αναπαραχθεί στο χρονικό «βήμα» (t)
- E_t : εξωτερικό σύνολο που περιλαμβάνει τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις (*non-dominated front*) που έχουν προσεγγιστεί έως την τρέχουσα επανάληψη (γενεά) του αλγορίθμου στο χρονικό «βήμα» (t)
- N : μέγεθος του συνόλου που αντιστοιχεί στον πληθυσμό “population (P)”
- N' : μέγεθος του συνόλου που αντιστοιχεί στο εξωτερικό σύνολο “external set (E)”
- M_G : μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (γενεών)
- t : χρονικό «βήμα» που αντιστοιχεί στο δείκτη των γενεών ($t=1, \dots, M_G$).

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το διάγραμμα ροής του εξελικτικού αλγορίθμου. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του και εξηγούνται τα σύμβολα που φαίνονται στο σχήμα.



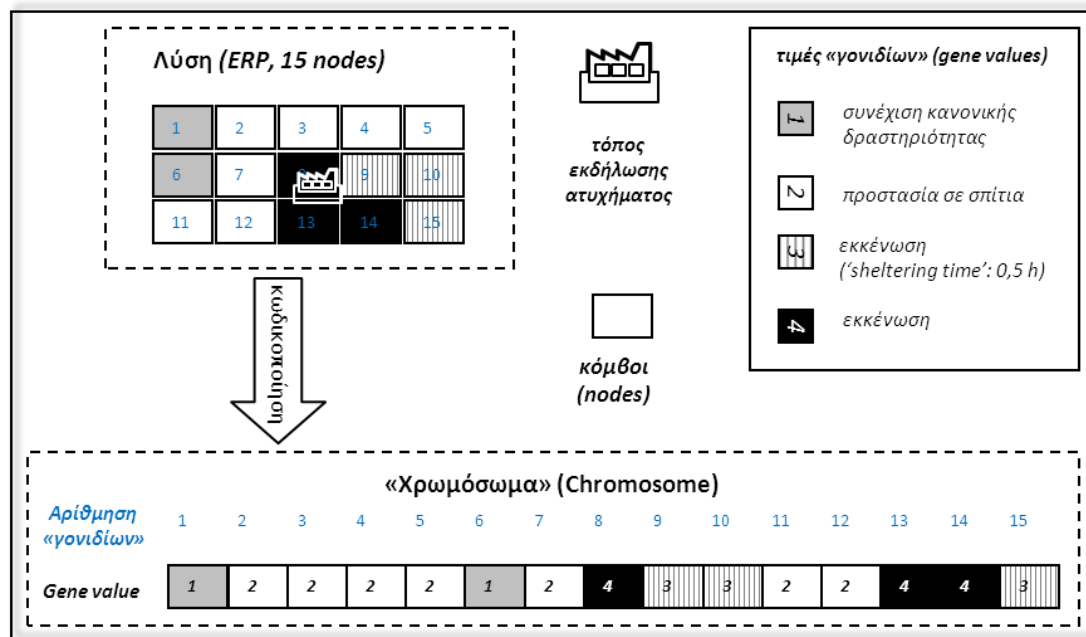
Σχήμα 6.3.2: Βασικά βήματα εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης.

6.3.2.2 Αναπαράσταση λύσεων

Σύμφωνα με τις γενικές αρχές των εξελικτικών αλγορίθμων, κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος (εναλλακτικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης ERP), κωδικοποιείται σε ένα «χρωμόσωμα» (“chromosome”). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από τόσα «γονίδια» (“genes”) όσα και τα γεωγραφικά τμήματα (κόμβοι) της περιοχής ενδιαφέροντος. Δηλαδή, κάθε γονίδιο αναπαριστά ένα γεωγραφικό τμήμα. Η μορφή αυτή κωδικοποίησης (land-block representation) έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού χρήσεων γης με γενετικούς αλγορίθμους (Datta et al. 2006; Matthews et al. 2000).

Η τιμή κάθε γονιδίου καθορίζεται ανάλογα με την προστατευτική πολιτική (ή τη συνέχιση κανονικής δραστηριότητας) που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο γεωγραφικό τμήμα στο οποίο αντιστοιχεί το εν λόγω γονίδιο. Χρησιμοποιούνται πραγματικοί αριθμοί. Επισημαίνεται ότι για τη σταδιακή εκκένωση που αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρόνο προστασίας σε κτήρια (sheltering times) χρησιμοποιείται διαφορετική τιμή στα αντίστοιχα γονίδια.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης (συνδυασμός πολιτικών) για μια περιοχή με 15 κόμβους (γεωγραφικά τμήματα) γύρω από την εγκατάσταση και ο τρόπος αναπαράστασης της (κωδικοποίηση στο αντίστοιχο χρωμόσωμα).



Σχήμα 6.3.3: Κωδικοποίηση εναλλακτικών λύσεων (παράδειγμα).

6.3.2.3 Αρχικοποίηση

Στον αλγόριθμο που έχει αναπτυχθεί υπάρχουν διαφορετικές δυνατότητες δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος:

- δημιουργία τυχαίου πληθυσμού, όπου με χρήση τυχαίων αριθμών δημιουργούνται τα χρωμοσώματα που θα αντιστοιχούν σε εναλλακτικές λύσεις (εναλλακτικούς συνδυασμούς δράσεων προστασίας για την περιοχή ενδιαφέροντος)
- ο αλγόριθμος ξεκινά με αρχικό πληθυσμό έναν πληθυσμό που έχει ήδη τροποποιηθεί και εξελιχθεί από προηγούμενα «τρεξίματα» του εξελικτικού αλγορίθμου

- τα χρωμοσώματα αντιστοιχούν σε εναλλακτικές λύσεις που έχουν καθοριστεί από το χρήστη (π.χ. λύσεις που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες πολιτικές εκκένωσης)
- συνδυασμός των παραπάνω.

6.3.2.4 Απόδοση «ποιότητας» λύσεων

Η απόδοση της ποιότητας (fitness assignment) κάθε λύσης γίνεται με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τον Zitzler στον αλγόριθμο SPEA2. Πραγματοποιείται στο σύνολο που αντιστοιχεί στην Ένωση των συνόλων P_t και E_{t-1} . Για κάθε μία από τις λύσεις του νέου συνόλου, λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός των λύσεων στις οποίες κυριαρχεί και ο αριθμός των λύσεων από τις οποίες κυριαρχείται (στην τρέχουσα γενεά), όπως επίσης και η «απόσταση» κάθε λύσης (στο χώρο των αποφάσεων) από όλες τις υπόλοιπες (Zitzler et al. 2001).

Συγκεκριμένα, σε κάθε λύση i της Ένωσης των δυο συνόλων P_t και E_{t-1} , αποδίδεται μια τιμή $S(i)$ (strength) η οποία αντιστοιχεί στον αριθμό των λύσεων στις οποίες κυριαρχεί:

$$S(i) = \left| \left\{ j \mid j \in P_t + E_{t-1} \wedge i \succ j \right\} \right| \quad (6.4)$$

Με βάση τις τιμές $S(i)$ υπολογίζεται μια τιμή ποιότητας $R(i)$ που χαρακτηρίζεται «raw fitness» και καθορίζεται από τις τιμές των $S(j)$ των λύσεων από τις οποίες κυριαρχείται:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t + E_{t-1}, j \succ i} S(j) \quad (6.5)$$

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ένα βασικό πρόβλημα στους εξελικτικούς αλγόριθμους είναι η διατήρηση ενός συνόλου λύσεων με ικανοποιητική διασπορά στο διάστημα τιμών των κριτηρίων. Ένα συχνό πρόβλημα είναι η σύγκλιση προς μια κατεύθυνση μόνο. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, στη βιβλιογραφία αναφέρονται μια σειρά από μεθόδους με πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τη μέθοδο της «ελάττωσης» της ποιότητας μιας λύσης ανάλογα με τον αριθμό των λύσεων που βρίσκονται γύρω της.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου στον αλγόριθμο SPEA2 εφαρμόζεται η εξής μεθοδολογία: για κάθε λύση i υπολογίζονται οι αποστάσεις (στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων) σε σχέση με όλες τις λύσεις j στο σύνολο $(P_t + E_{t-1})$ και αποθηκεύονται σε μια λίστα. Στη συνέχεια γίνεται ταξινόμηση (σε αύξουσα σειρά) και επιλέγεται το k -th στοιχείο και η σχετική απόσταση αντιστοιχεί στο σ_i^k , όπου $k = \sqrt{N + N'}$. Στη συνέχεια, η πυκνότητα που αντιστοιχεί στη λύση i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (6.6)$$

Προστίθεται το 2 στον παρανομαστή προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η τιμή θα είναι μεγαλύτερη από το μηδέν και ότι $D(i) < 1$. Τελικά, η ποιότητα $F(i)$ για κάθε λύση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (6.7)$$

6.3.2.5 Επιλογή λύσεων για αναπαραγωγή

Έστω $N''(t)$ ο αριθμός των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που έχουν βρεθεί έως την τρέχουσα γενεά (t). Αν $N''(t) \leq N'$ τότε γίνεται ταξινόμηση των λύσεων σε αύξουσα σειρά με βάση τις τιμές της ποιότητάς τους. Στη συνέχεια οι «πρώτες» λύσεις έως και αριθμό N' από το $(P_t + E_{t-1})$, δηλ. όλες οι μη-κυριαρχούμενες ως τη δεδομένη χρονική στιγμή και οι «καλύτερες» (με βάση την ποιότητά τους) από τις κυριαρχούμενες, αντιγράφονται στο εξωτερικό σύνολο E_t .

Στην περίπτωση που $N''(t) > N'$ ακολουθείται μια μέθοδος απόρριψης κάποιων μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, αυτό πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού της απόστασης κάθε λύσης από όλες τις υπόλοιπες και στη συνέχεια με την απομάκρυνση των λύσεων με τις μικρότερες αποστάσεις (έως ότου φτάσουμε στον αριθμό N') (Zitzler et al. 2001).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η επιλογή των λύσεων για αναπαραγωγή η οποία πραγματοποιείται στο σύνολο E_t προκειμένου να δημιουργηθεί το νέο σύνολο P_{t+1} . Η μέθοδος επιλογής που χρησιμοποιείται στην παρούσα μεθοδολογία βασίζεται στην ακόλουθη έκφραση:

$$index_i = 1 - \sqrt{Rand} \cdot N - 1 \quad (6.8)$$

όπου

$Rand$: τυχαίος αριθμός

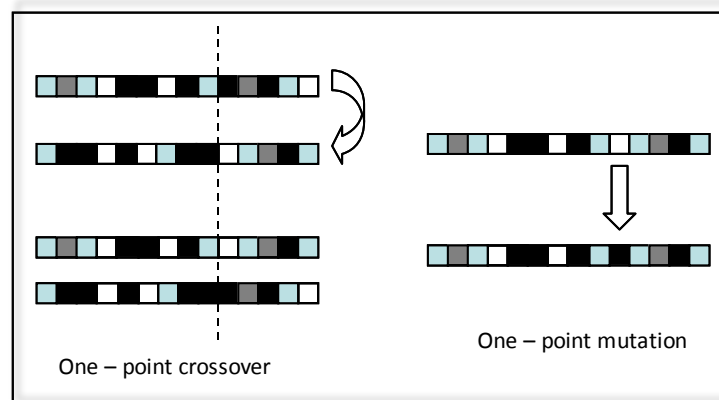
$index_i$: δείκτης του χρωμοσώματος που θα επιλεγεί για αναπαραγωγή με βάση τη σειρά προτεραιότητας του προηγούμενου βήματος (οι λύσεις με καλύτερη ποιότητα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν).

6.3.2.6 Αναπαραγωγή

Στο βήμα αυτό εφαρμόζονται οι γενετικοί τελεστές της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης στις λύσεις του συνόλου P_{t+1} το οποίο δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα.

Ο αριθμός των λύσεων που θα αναπαραχθούν μέσω διασταύρωσης, όπως επίσης και ο αριθμός των σημείων διασταύρωσης μπορεί να καθοριστεί ντετερμινιστικά από το χρήστη ή να επιλεγεί με κάποια πιθανότητα. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα παράδειγμα διασταύρωσης ενός σημείου όπου γίνεται ανταλλαγή τμημάτων των χρωμοσωμάτων των «γονιών» και δημιουργούνται δυο νέες λύσεις («παιδιά»).

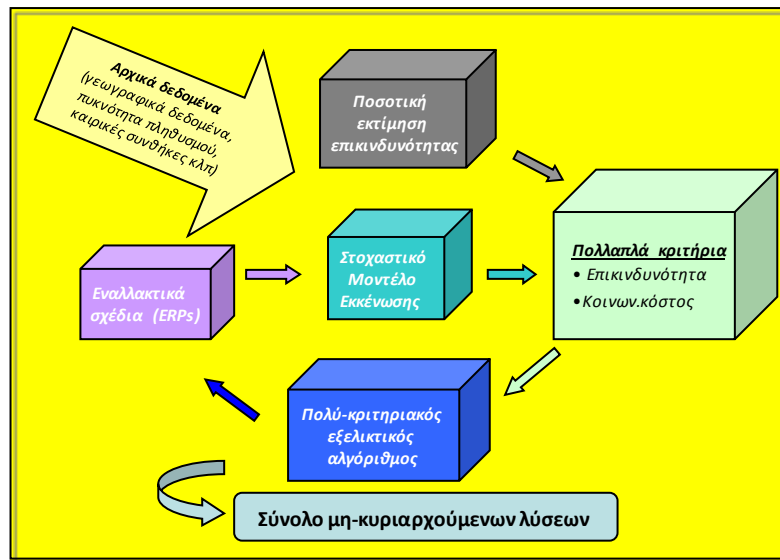
Αντίστοιχα, η επιλογή του αριθμού των σημείων που θα μεταλλαχθούν μπορεί να γίνει ντετερμινιστικά ή στοχαστικά. Ένα παράδειγμα μετάλλαξης ενός σημείου φαίνεται επίσης στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.3.4: Παράδειγμα διασταύρωσης και μετάλλαξης ενός σημείου.

6.3.3 ΣΥΝΟΨΗ

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη των αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης.



Σχήμα 6.3.5: Μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης.

Ο αλγόριθμος (σε γλώσσα προγραμματισμού C++) ενσωματώνει τον εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης και το μοντέλο εκκένωσης Markov (και στις δυο εκδοχές του). Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές.

6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.4.1 ΑΤΥΧΗΜΑ BLEVE

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου. Θεωρούμε την περιοχή με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στα παραδείγματα της ενότητας 5.4.3. Θεωρούμε ατύχημα BLEVE σε δεξαμενή υγραερίου περίπου 4000 m³. Οι ζώνες επικινδυνότητας είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στο παράδειγμα της ενότητας 5.4.3. και φαίνονται στο σχήμα 5.4.9 και τον πίνακα 5.4.2.

Θεωρείται ότι εφαρμόζονται δυο εναλλακτικές πολιτικές στα γεωγραφικά τμήματα στα οποία έχει χωριστεί η περιοχή: η πολιτική της «εκκένωσης» και η «συνέχιση της κανονικής δραστηριότητας». Εξετάζουμε διαφορετικά σενάρια ατυχήματος που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς χρόνους προειδοποίησης (warning time) και διαφορετικές συνθήκες όσον αφορά στην πυκνότητα του πληθυσμού και τη μέγιστη χωρητικότητα των δρόμων του οδικού δικτύου.

Λαμβάνονται υπόψη δυο κριτήρια:

- η ελαχιστοποίηση της επικινδυνότητας που στις συγκεκριμένες εφαρμογές εκτιμάται μέσω του αναμενόμενου αριθμού θανάτων ως αποτέλεσμα της έκθεσης στη θερμική ακτινοβολία
- το κοινωνικοοικονομικό «κόστος», το οποίο εκτιμάται σύμφωνα με τη σχέση (6.9)

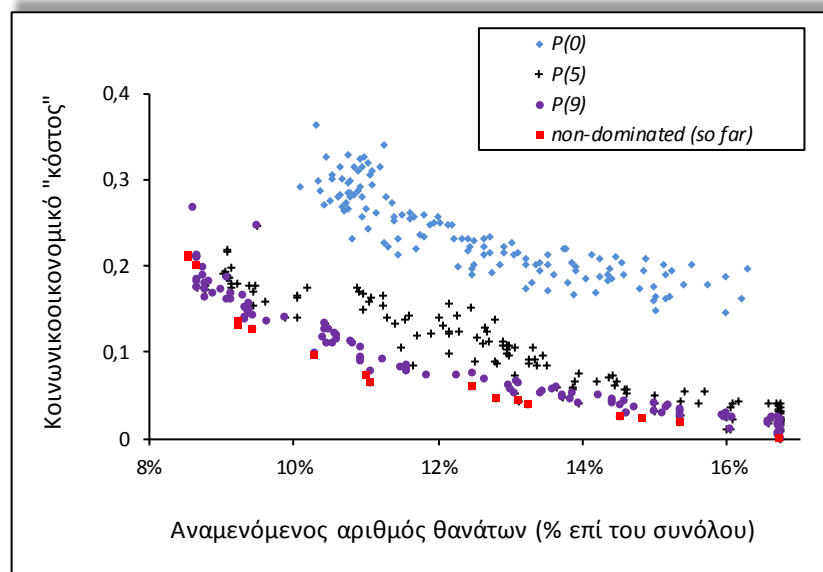
$$C = \frac{C_{evac}}{N_{pop}} \% 100 \quad (6.9)$$

όπου

C_{evac} : ο αριθμός των ατόμων που λαμβάνει μέρος στην εκκένωση

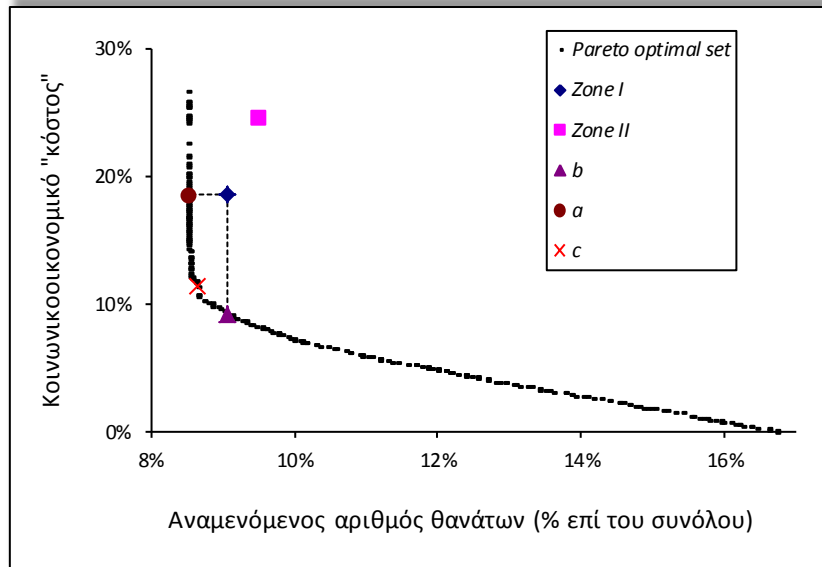
N_{pop} : ο συνολικός αριθμός ατόμων στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται χαρακτηριστικά η εξέλιξη της προσέγγισης «καλύτερων» λύσεων από γενεά σε γενεά. Φαίνεται ο αρχικός πληθυσμός $P(0)$ και η εξέλιξη του έως την ένατη γενεά $P(9)$. Στο συγκεκριμένο σενάριο ατυχήματος έχει θεωρηθεί ότι ο χρόνος προειδοποίησης (warning time) είναι 1800 sec.



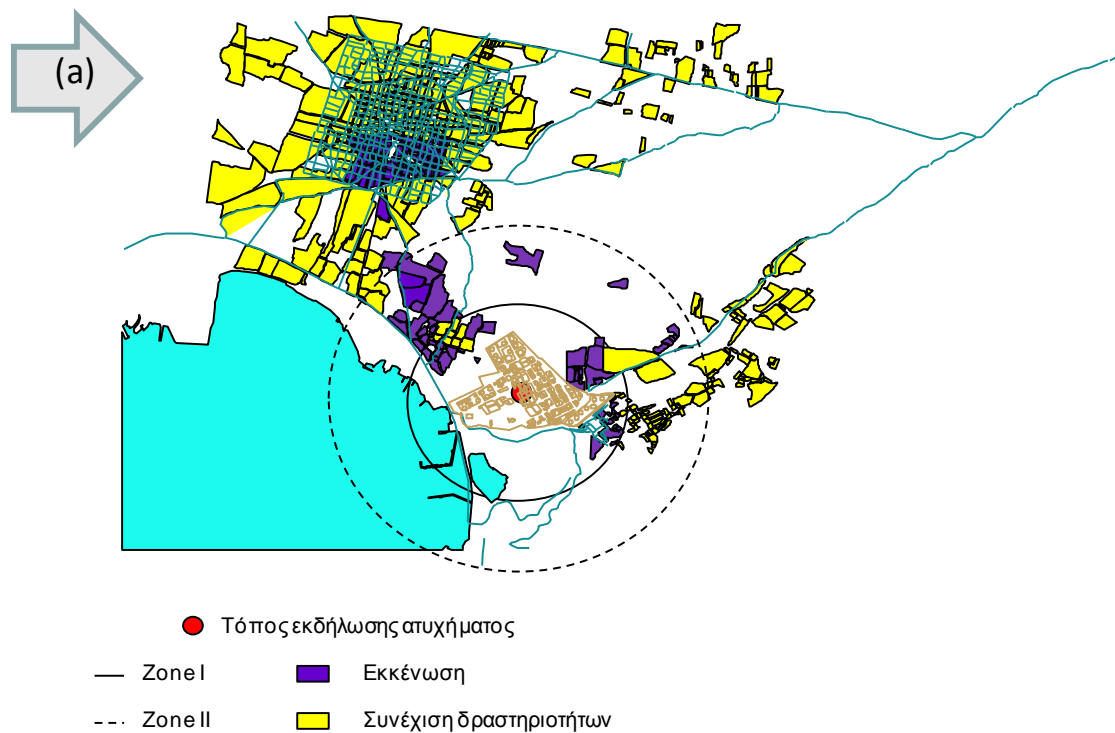
Σχήμα 6.4.1: Παράδειγμα εξέλιξης πληθυσμών προς αναπαραγωγή «καλύτερων» λύσεων από γενεά σε γενεά.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η προσέγγιση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων μετά από 300 γενεές. Η πολιτική έκτακτης ανάγκης (ERP) που θα εφαρμοστεί μπορεί να επιλεγεί από τους αποφασίζοντες μεταξύ αυτών των λύσεων. Μάλιστα, η μεθοδολογία δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των μη-κυριαρχούμενων λύσεων με αυτές που θα εφαρμόζονταν αν ακολουθούσαν η κλασική μεθοδολογία λήψης αποφάσεων (μέσω των τριών ζωνών επικινδυνότητας).



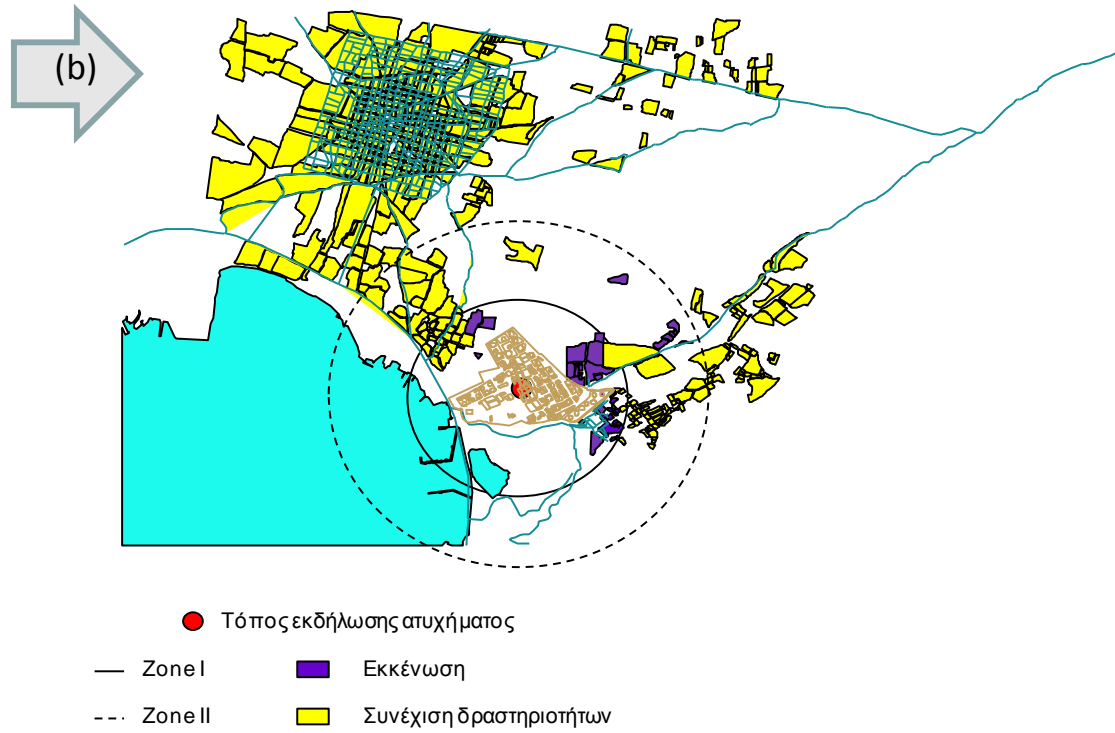
Σχήμα 6.4.2: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο BLEVE, Θριάσιο Πεδίο).

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι γραφικές αναπαραστάσεις τριών λύσεων που επιλέχθηκαν από το σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (λύσεις a, b, c στο Σχήμα 6.4.2). Οι συγκεκριμένες λύσεις συγκρίνονται και με αυτές που αντιστοιχούν στις ζώνες επικινδυνότητας (Ζώνες I και II για τις οποίες συνήθως λαμβάνεται απόφαση για εκκένωση με βάση την ισχύουσα πολιτική αντιμετώπισης τεχνολογικών ατυχημάτων στη χώρα μας).

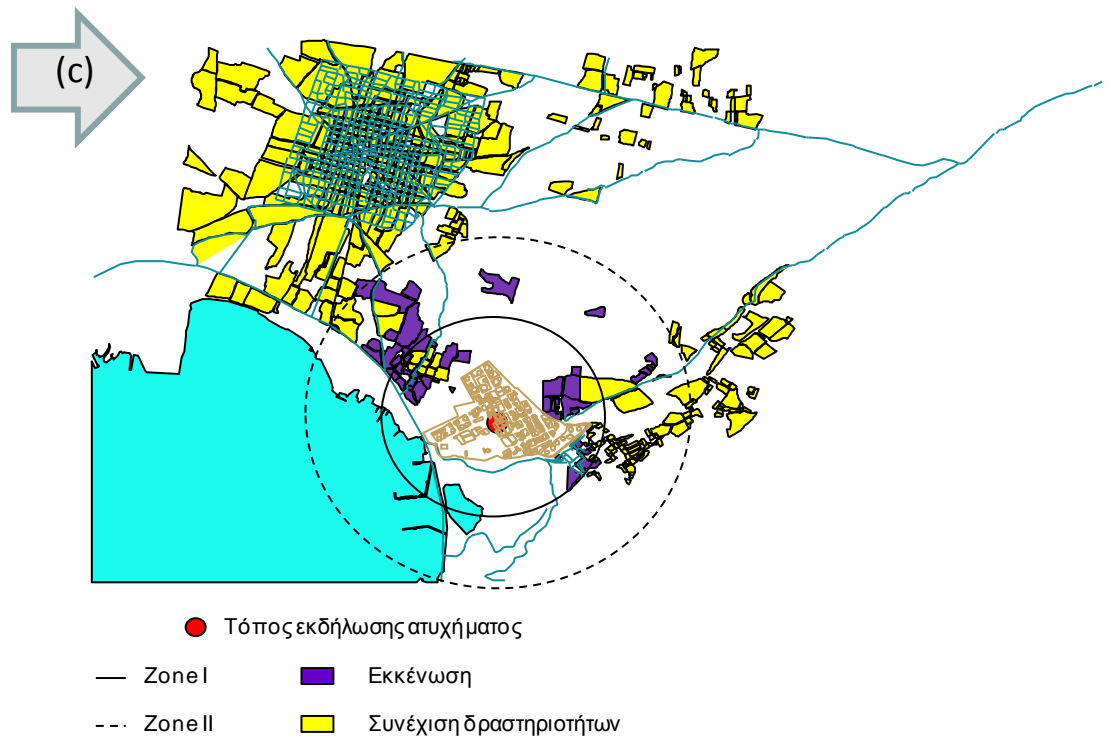


Σχήμα 6.4.3: Γραφική παράσταση λύσης (a) σε GIS.

Μεθοδολογία Υποστήριξης Αποφάσεων Αντιμετώπισης Ατυχημάτων Μεγάλης Εκτασης με Πολλαπλά Κριτήρια



Σχήμα 6.4.4: Γραφική παράσταση λύσης (b) σε GIS.



Σχήμα 6.4.5: Γραφική παράσταση λύσης (c) σε GIS.

Για το συγκεκριμένο σενάριο ατυχήματος προκύπτει ότι οι λύσεις που αντιστοιχούν στις τρεις ζώνες επικινδυνότητας είναι κυριαρχούμενες με βάση και τα δυο κριτήρια με τα οποία πραγματοποιείται η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.

Φαίνεται, επίσης, ότι η λύση που αντιστοιχεί στη Ζώνη I είναι προτιμότερη αυτής που αντιστοιχεί στη Ζώνη II (με βάση το κριτήριο της επικινδυνότητας). Το φαινόμενο αυτό εξηγήθηκε στα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου και σχετίζεται με τον κυκλοφοριακό φόρτο που δημιουργείται λόγω των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του δικτύου. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα που εξετάζουμε στην ενότητα αυτή έχουμε θεωρήσει διαφορετική πυκνότητα πληθυσμού από τα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Φαίνεται, επίσης, ότι υπάρχει πλήθος μη-κυριαρχούμενων λύσεων που είναι «καλύτερες» και από την εκκένωση μόνο της Ζώνης I και από την εκκένωση της Ζώνης II. Για παράδειγμα, όλες οι λύσεις του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων μεταξύ των λύσεων που αντιστοιχούν στα σημεία (a) και (c) είναι «καλύτερες» από τη λύση που αντιστοιχεί στη Ζώνη I. Η λύση (a) αντιστοιχεί σε μικρότερη επικινδυνότητα αλλά με ίδιο κοινωνικοοικονομικό «κόστος» σε σχέση με τη λύση της Ζώνης I, ενώ η λύση (b) αντιστοιχεί σε πολύ μικρότερο κοινωνικοοικονομικό «κόστος» αλλά με ίδιο αναμενόμενο αριθμό θανάτων. Αντίστοιχα, «πάνω» από τη λύση (c) παρατηρείται γραμμική αύξηση του κοινωνικοοικονομικού «κόστους» χωρίς όμως να μειώνεται η επικινδυνότητα.

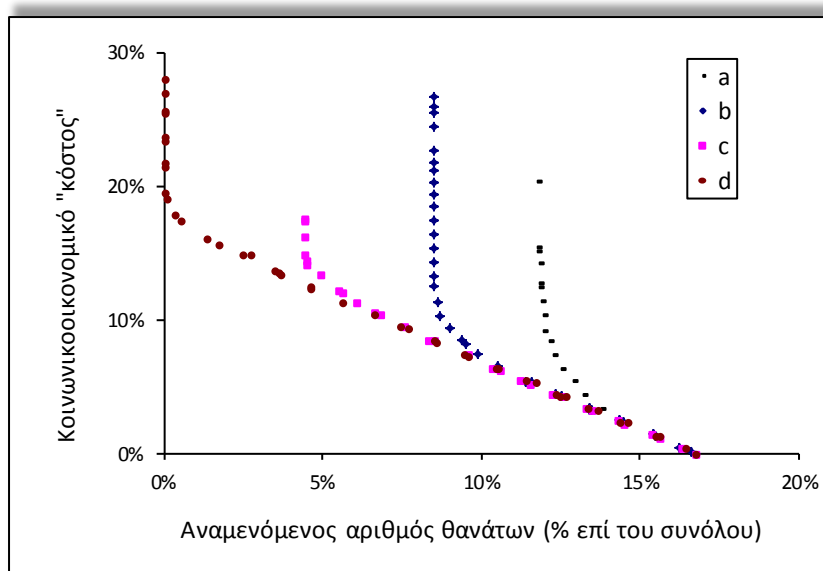
Πρέπει να επισημανθεί ότι η κατανομή του πληθυσμού στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή δεν είναι ομοιόμορφη. Όπως αναδείχτηκε και στα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου, αλλά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.4.3 και Σχήμα 6.4.4, Σχήμα 6.4.5, είναι φανερό ότι κάποιες υποπεριοχές που βρίσκονται εκτός της Ζώνης I και εντός της Ζώνης II πιθανά δημιουργούν μπουτιλιάρισμα λόγω των χαρακτηριστικών του οδικού δικτύου. Έτσι, οι λύσεις που αντιστοιχούν στις Ζώνες I και II συνεπάγονται μεγαλύτερο αναμενόμενο αριθμό θανάτων από αυτές που αντιστοιχούν στα σημεία (a), (c) (Σχήμα 6.4.3, Σχήμα 6.4.5).

Από την άλλη, αν υπάρχουν αρκετές υποπεριοχές που εξαιρούνται από την πολιτική εκκένωσης ενώ βρίσκονται εντός της ακτίνας επικινδυνότητας (π.χ. λύση που αντιστοιχεί στο σημείο (b), με μικρότερο κοινωνικοοικονομικό «κόστος» όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.4.4), τότε ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων παραμένει υψηλός.

Συμπερασματικά, για το συγκεκριμένο σενάριο που περιγράφηκε στην ενότητα αυτή, φαίνεται ότι μια «καλή» λύση είναι αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο (c), διότι κάθε επιπλέον προσπάθεια μείωσης της επικινδυνότητας με αύξηση του πληθυσμού που συμμετέχει στην εκκένωση δεν έχει νόημα, αντίθετα το κοινωνικοοικονομικό «κόστος» αυξάνεται σημαντικά.

Όπως αναδείχθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σημαντικό ρόλο στην επικινδυνότητα για ένα συγκεκριμένο σενάριο ατυχήματος παίζουν οι παράμετροι του χρόνου προειδοποίησης και της μέγιστης χωρητικότητας των δρόμων. Ορισμένα παραδείγματα που αναδεικνύουν το ζήτημα αυτό παρουσιάζονται επίσης στη συνέχεια. Συγκεκριμένα, στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων

για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις χρόνου προειδοποίησης, δηλ. 1800 sec (case a), 3600 sec (case b), 7200 sec (case c), όπου φαίνεται ότι με σταθερή χωρητικότητα δρόμων (με βάση τα πραγματικά χαρακτηριστικά του δικτύου), ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων μειώνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος προειδοποίησης. Ωστόσο, και στις τρεις περιπτώσεις ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων δεν φτάνει στο μηδέν, δεδομένων των χαρακτηριστικών του δικτύου (όπως αναλύθηκε και στα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου).



Σχήμα 6.4.6: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο BLEVE, Θριάσιο Πεδίο) για διαφορετικούς χρόνους προειδοποίησης και διαφορετική χωρητικότητα οδικού δικτύου.

Παρατηρούμε, επίσης, ότι με πενταπλασιασμό της παραμέτρου που αφορά στη μέγιστη χωρητικότητα των δρόμων, ακόμη και με μικρό χρόνο προειδοποίησης, το σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων δίνει λύσεις που συνεπάγονται μηδενική επικινδυνότητα με βάση το κριτήριο που έχει καθοριστεί (case d).

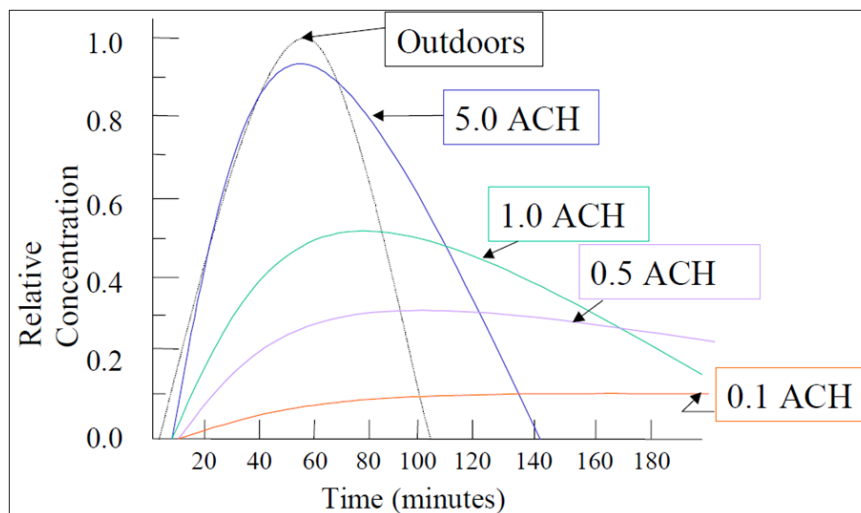
6.4.2 ΔΙΑΡΡΟΗ ΤΟΞΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθοδολογίας για την περίπτωση τοξικής διαρροής. Θεωρούμε την περιοχή του Θριάσιου Πεδίου (με τα χαρακτηριστικά του δικτύου που θεωρήθηκε στα προηγούμενα παραδείγματα). Θεωρούμε δυο υποθετικά σενάρια έκλυσης αμμωνίας (Georgiadou et al. 2010; Michaels 1999), με τόπο εκδήλωσης του ατυχήματος εγκατάσταση που θεωρητικά βρίσκεται στο σημείο που εικονίζεται στο σχήμα 5.4.9.

Τα σενάρια διαρροής που εξετάζονται είναι: (1) ρυθμός έκλυσης 264 kg/sec, διάρκεια έκλυσης 600 sec (σενάριο 1) και (2) ρυθμός έκλυσης 72 kg/sec, διάρκεια έκλυσης 20000 sec (σενάριο 2).

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίζεται η συγκέντρωση της τοξικής ουσίας σε κάθε σημείο του χώρου για κάθε χρονική στιγμή. Ο αναμενόμενος αριθμός θανάτων υπολογίζεται για κάθε εναλλακτική πολιτική με βάση το στοχαστικό μοντέλο εκκένωσης Markov στην εκδοχή που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Monte Carlo προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση των διαδρομών εκκένωσης.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων που αφορούν στην εφαρμογή της προστατευτικής πολιτικής «προστασία σε κτήρια», θεωρούμε ως δείκτη ανανέωσης του αέρα “air changes per hour” (ACH) ίσο με 0.5 που αντιστοιχεί σε μέση προστασία (weatherized house) (Rogers and Shar 1990). Χρησιμοποιώντας εμπειρικά αποτελέσματα που δίνονται στη βιβλιογραφία εκτιμάται η συγκέντρωση εντός των κτηρίων εφαρμόζοντας έναν συντελεστή μείωσης. Για παράδειγμα, για ACH=0.5 εκτιμάται ότι η συγκέντρωση της τοξικής ουσίας (για δεδομένο σενάριο έκλυσης) θα φτάνει εντός του κτηρίου στο 30% της συγκέντρωσης εκτός αυτού όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα που ακολουθεί (Argonne National Laboratory 2001).



Σχήμα 6.4.7: Μεταβολή συγκέντρωσης τοξικής ουσίας εντός των κτηρίων ανάλογα με το βαθμό προστασίας τους (ACH).

Θεωρούμε τις ακόλουθες εναλλακτικές πολιτικές που μπορεί να εφαρμοστούν στα γεωγραφικά τμήματα της περιοχής:

- συνέχιση κανονικής δραστηριότητας
- εκκένωση (η οποία ξεκινά πριν την έναρξη της διαρροής)
- προστασία σε κτήρια με δείκτη ρυθμού ανανέωσης αέρα ACH=0.5 έως ότου να «περάσει το νέφος» και στη συνέχεια εκκένωση κτηρίου ή κατάλληλος εξαερισμός αυτού.

Θεωρούνται ως κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών λύσεων η ελαχιστοποίηση του αριθμού θανάτων και η ελαχιστοποίηση του κοινωνικοοικονομικού «κόστους».

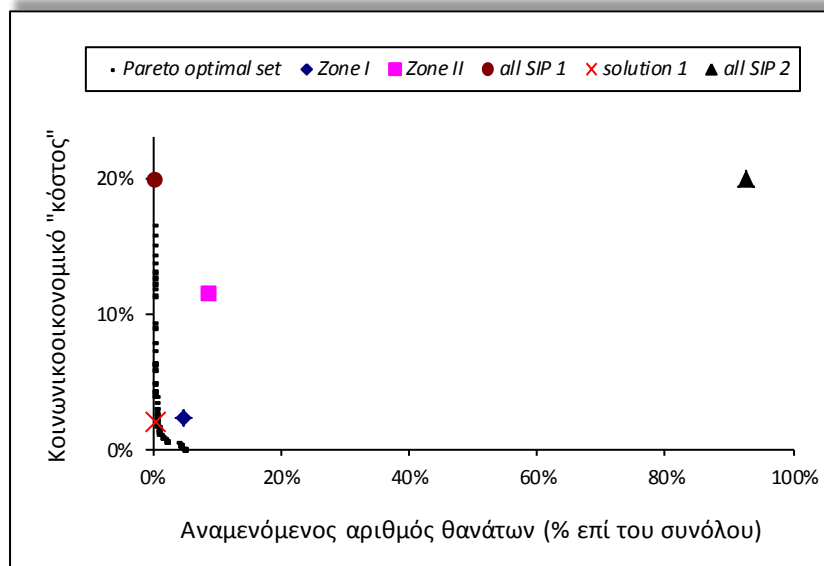
Το κοινωνικοοικονομικό «κόστος» εκτιμάται μέσω της ακόλουθης έκφρασης:

$$C = \frac{0.8 \cdot N_{evac} + 0.2 \cdot N_{shelt}}{N_{pop}} \quad (6.10)$$

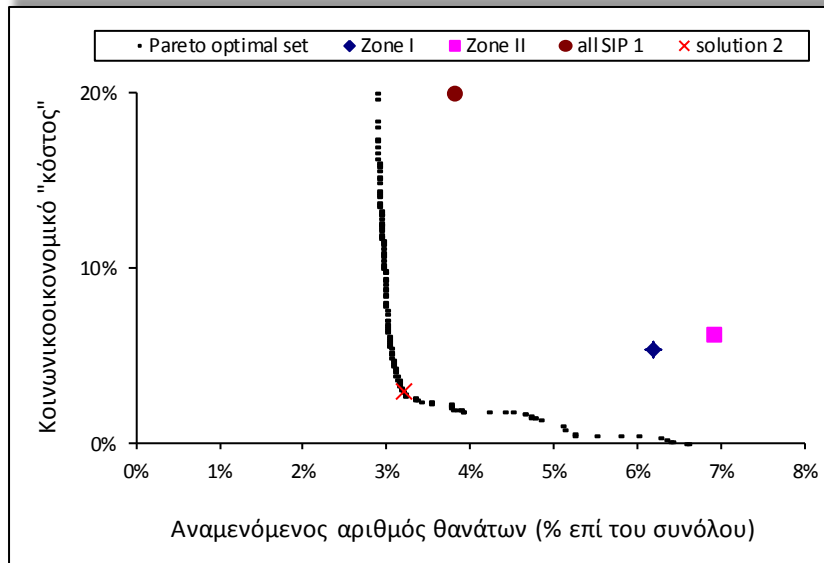
όπου

- N_{evac} : ο ρυθμός των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση
 N_{shelt} : ο αριθμός των ατόμων που θα προστατευτούν εντός κτηρίων
 N_{pop} : ο συνολικός πληθυσμός στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα σύνολα μη-κυριαρχούμενων λύσεων για τα δύο σενάρια ατυχήματος που εξετάζονται, όπως αυτά προκύπτουν μετά τη εφαρμογή του αλγορίθμου.

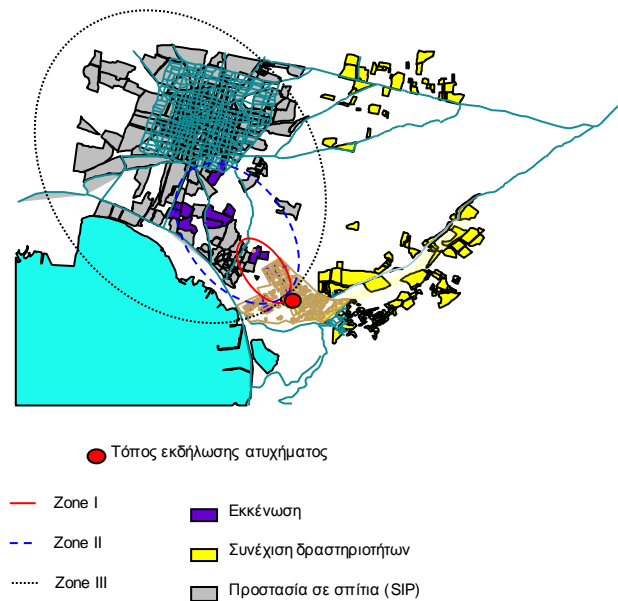


Σχήμα 6.4.8: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο 1 έκλυσης αμμωνίας, Θριάσιο Πεδίο).

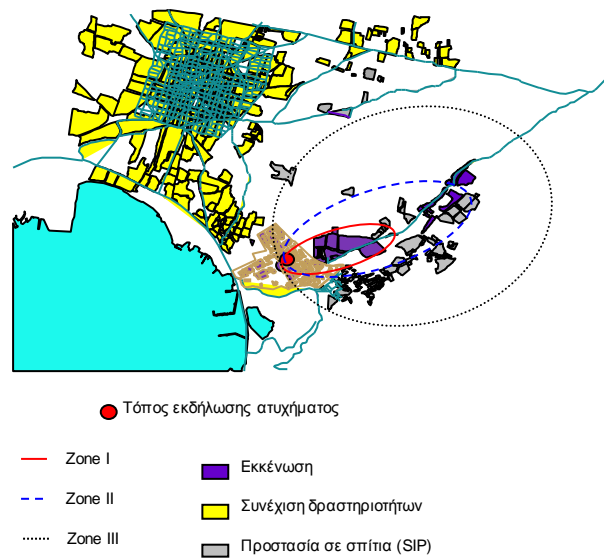


Σχήμα 6.4.9: Σύνολο μη-κυριαρχούμενων λύσεων (σενάριο 2 έκλυσης αμμωνίας, Θριάσιο Πεδίο).

Και για τις δυο περιπτώσεις, επιλέγεται μια λύση η οποία απεικονίζεται αντίστοιχα στο Σχήμα 6.4.10 και Σχήμα 6.4.11.



Σχήμα 6.4.10: Γραφική απεικόνιση επιλεγμένης λύσης σεναρίου 1 (solution 1).



Σχήμα 6.4.11: Γραφική απεικόνιση επιλεγμένης λύσης σεναρίου 2 (solution 2).

Στα σχήματα αυτά φαίνονται παράλληλα και οι Ζώνες προστασίας I, II, και III. Οι ζώνες έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.4.3.2.1. Για την περίπτωση των τοξικών ουσιών η εκτίμηση πραγματοποιείται μέσω των οριακών τιμών LC_{50} , LC_1 , $IDLH$ (χρόνος έκθεσης 30 min). Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς, οι αποστάσεις που αντιστοιχούν στις τρεις ζώνες αντιστοιχούν σε πιθανότητα θανάτου 0.5 , 9.9×10^{-3} και 9.2×10^{-12} .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4.8 και Σχήμα 6.4.9, μια «καλή» λύση είναι αυτή που αντιστοιχεί σε ένα συνδυασμό προστατευτικών πολιτικών. Οι λύσεις που αντιστοιχούν στην εκκένωση της Ζώνης I ή και της Ζώνης II είναι κατά πολύ «χειρότερες» από τις παραπάνω λύσεις και για τα δυο κριτήρια που εξετάζονται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον κυκλοφοριακό φόρτο που συνεπάγεται η εκκένωση μεγαλύτερης περιοχής από αυτή που περιλαμβάνουν οι λύσεις που αναπαριστώνται στο Σχήμα 6.4.10 και Σχήμα 6.4.11.

Σημαντικά είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν όσον αφορά στην προστασία εντός κτηρίων. Επισημαίνεται ότι στα συγκεκριμένα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν θεωρήθηκε δεδομένος ο χρόνος προστασίας εντός κτηρίων (δεν έγινε βελτιστοποίηση του χρόνου αυτού σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε στην ενότητα 6.3.1.2.). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4.10 και Σχήμα 6.4.11, οι λύσεις που αντιστοιχούν στην προστασία όλου του πληθυσμού εντός κτηρίων (χωρίς να δίνεται κατεύθυνση για εκκένωση ή αερισμό του χώρου μετά το πέρασμα του νέφους από την περιοχή), είναι κατά πολύ «χειρότερες» από τις υπόλοιπες. Από την άλλη, αν θεωρηθεί ότι τα καταφύγια εκκενώνονται ή αερίζονται κατάλληλα μετά το πέρασμα του νέφους, τότε στις μη-κυριαρχούμενες λύσεις (σενάριο 1) περιλαμβάνεται λύση που συνεπάγεται μηδενικό αριθμό θανάτων, αν και υπάρχουν και άλλες λύσεις σε αυτή την περίπτωση που συνεπάγονται μικρότερο κοινωνικοοικονομικό «κόστος» με πολύ μικρή αύξηση επικινδυνότητας (βλ. Σχήμα 6.4.10).

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τις αναφορές στη σχετική βιβλιογραφία σύμφωνα με τις οποίες για να είναι αποτελεσματική η προστασία εντός κτηρίων πρέπει να

τερματίζεται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εξαρτώμενη από τον τύπο του ατυχήματος και το βαθμό προστασίας των κτηρίων (Argonne National Laboratory 2001; Mannan and Kilpatrick 2000; Rogers and Shar 1990).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την υποστήριξη των αποφάσεων στο πλαίσιο της αντιμετώπισης ατυχημάτων μεγάλης έκτασης. Ειδικότερα, η μεθοδολογία αφορά στη *βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης στη φάση της απόκρισης* σε περίπτωση τεχνολογικού ατυχήματος μεγάλης έκτασης σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.

Η *χάραξη κατάλληλης στρατηγικής απόκρισης* στο πλαίσιο του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης συνίσταται στον καθορισμό δράσεων προστασίας για τον πληθυσμό που βρίσκεται στην περιοχή γύρω από την εγκατάσταση που διαχειρίζεται επικίνδυνες ουσίες (εργαζόμενοι, κάτοικοι, επισκέπτες κ.ά.). Η περιοχή χωρίζεται σε γεωγραφικά τμήματα (υποπεριοχές) σε κάθε ένα από τα οποία εφαρμόζεται μια «πολιτική» (προστατευτική δράση ή συνέχιση κανονικής δραστηριότητας). Μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι πολιτικές που θα εφαρμοστούν σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος (κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό συνδυασμό πολιτικών στις υποπεριοχές αυτές).

Οι *δράσεις προστασίας* που μπορούν να εφαρμοστούν είναι ενδεικτικά:

- εκκένωση
- προστασία με παραμονή στα σπίτια
- συγκέντρωση και παραμονή σε μεγάλα κτήρια (η διαφορά μεταξύ παραμονής του πληθυσμού σε μεγάλα κτήρια και της παραμονής στις κατοικίες έγκειται στους διαφορετικούς συντελεστές προστασίας και τα διαφορετικά επίπεδα αερισμού που έχουν τα δυο αυτά είδη κτηρίων)
- σταδιακή εκκένωση (δηλ. παραμονή εντός κτηρίων για ένα διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση)
- χρήση μέσων ατομικής προστασίας
- χρήση φαρμακευτικών ουσιών κ.ά.

Η ανάγκη *βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης* έγκειται στη σοβαρότητα και την πολυκριτηριακή φύση των συνεπειών των τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης (π.χ. επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού και κοινωνικές - οικονομικές επιπτώσεις από την εφαρμογή δράσεων προστασίας). Κάθε διαφορετικός συνδυασμός πολιτικών, αντιστοιχεί σε διαφορετικές επιπτώσεις με βάση τα κριτήρια με τα οποία αξιολογούνται οι εναλλακτικές λύσεις, κριτήρια που η ταυτόχρονη ικανοποίησή τους συχνά αντιστοιχεί σε αντικρουόμενους στόχους (π.χ. η μείωση της επικινδυνότητας μπορεί να αντιστοιχεί σε αύξηση του «κοινωνικοοικονομικού κόστους»).

Από την άλλη, ακόμη και αν η αξιολόγηση πραγματοποιηθεί μόνο με το κριτήριο της μείωσης των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού, η βέλτιστη πολιτική προστασίας δεν αντιστοιχεί πάντα σε μεγαλύτερη περιοχή εκκένωσης. Ο κυκλοφοριακός φόρτος, για παράδειγμα, που συνεπάγεται κάθε εναλλακτική λύση του προβλήματος και ειδικότερα οι

διαδρομές που ακολουθούν τμήματα ατόμων που συμμετέχουν στην εκκένωση, επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα ως προς τις αντιστοιχούσες επιπτώσεις στην υγεία στο σύνολο του πληθυσμού. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μεγαλύτερη έκταση εκκένωσης όχι μόνο δεν αντιστοιχεί σε μείωση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού, αλλά αντίθετα, συνεπάγεται αύξηση αυτών.

Το πρόβλημα, λοιπόν, αντιμετωπίζεται ως *πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια*, με στόχο την εύρεση του *συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων*, των λύσεων δηλ. οι οποίες είναι «καλύτερες» από τις υπόλοιπες σε τουλάχιστον ένα κριτήριο. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποφυγή (έως το τελευταίο στάδιο της επιλογής) της χρήσης συντελεστών «βαρύτητας» ανάλογα με τις υποκειμενικές προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Μετά την εύρεση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει μεταξύ αυτών με βάση τις προτιμήσεις του και ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται (π.χ. απόρριψη εναλλακτικών μη-κυριαρχούμενων λύσεων που διαφέρουν σημαντικά ως προς το ένα κριτήριο, ενώ για τα υπόλοιπα η διαφοροποίηση μεταξύ τους είναι αμελητέα). Επιπρόσθετα, μια συζήτηση για την προτιμητέα επιλογή μεταξύ περισσότερων του ενός αποφασιζόντων, μπορεί να διευκολυνθεί κατά πολύ αν συγκεντρωθεί στη σύγκριση λύσεων του μη-κυριαρχούμενου συνόλου, δεδομένου ότι ο προσδιορισμός του είναι απαλλαγμένος από υποκειμενικές απόψεις.

Τα *κριτήρια* με βάση τα οποία πραγματοποιείται η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων, εντάσσονται στις δύο ακόλουθες κατηγορίες, ωστόσο, η μεθοδολογία επιτρέπει και την εξέταση και άλλων:

1. ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού από ενδεχόμενο ατύχημα στην εγκατάσταση (επιπτώσεις από διαρροή τοξικών ουσιών, επιπτώσεις από πυρκαγιές-εκρήξεις)
2. ελαχιστοποίηση «κοινωνικοοικονομικού κόστους» (συναισθηματική δοκιμασία του πληθυσμού που θα λάβει μέρος στην εκκένωση, κοινωνικές επιπτώσεις από τη διακοπή της καθημερινής δραστηριότητας και της αναστάτωσης που αυτή συνεπάγεται, φυσικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την εφαρμογή προστατευτικών δράσεων κ.ά.).

Η εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού πραγματοποιείται για κάθε σενάριο ατυχήματος (π.χ. τοξική διαρροή, φωτιά λίμνης, BLEVE κ.λπ.), λαμβάνοντας υπόψη τη χωρο-χρονική κατανομή της έντασης του φαινομένου που ακολουθεί το ατύχημα (συγκέντρωση τοξικής ουσίας, θερμική ακτινοβολία, υπερπίεση) σε συνδυασμό με τη χωρο-χρονική κατανομή του πληθυσμού που βρίσκεται στην περιοχή. Προκειμένου να εκτιμηθεί η χρονική μεταβολή του αριθμού των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην εκκένωση σε κάθε τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης της κίνησης των οχημάτων που μεταφέρουν τον πληθυσμό κατά την εφαρμογή μιας στρατηγικής απόκρισης.

Το μοντέλο είναι «*μεσοσκοπικό*», προσομοιάζει την κίνηση του πληθυσμού με μια στοχαστική διαδικασία (*μη-ομογενής αλυσίδα Markov*) και αποτελεί τμήμα του εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης του πολυκριτηριακού προβλήματος. Η *πιθανότητα μετάβασης* ενός οχήματος από ένα γεωγραφικό τμήμα σε ένα γειτονικό (υπολογίζεται για κάθε χρονικό διάστημα το μέγεθος του οποίου καθορίζεται από το χρήστη), εξαρτάται από την απόσταση

και τον κυκλοφοριακό φόρτο της διασύνδεσης των δυο τμημάτων. Ο κυκλοφοριακός φόρτος εξαρτάται από τη χωρητικότητα των δρόμων διασύνδεσης (μήκος, πλάτος), το είδος των οχημάτων που χρησιμοποιούνται και τον αριθμό αυτών που βρίσκονται εντός του γεωγραφικού τμήματος για το τρέχον χρονικό διάστημα. Εάν ένας κόμβος δεν συνδέεται με κάποιον, η συγκεκριμένη πιθανότητα μετάβασης θεωρείται ίση με μηδέν. Μέσα σε ένα χρονικό βήμα, μεταβάσεις από έναν κόμβο είναι δυνατές μόνο σε γεωγραφικά γειτνιάζοντες κόμβους. Επισημαίνεται ότι θεωρείται ότι η κίνηση γίνεται προς μια κατεύθυνση (καθορίζεται από το χρήστη με βάση το κριτήριο της απομάκρυνσης από τον κόμβο στον οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση στην οποία εκδηλώθηκε το ατύχημα) και ότι τα άτομα που κινούνται με τα οχήματα έχουν γνώση των διαφορετικών εναλλακτικών κατευθύνσεων προς τις οποίες μπορούν να κινηθούν.

Ο τρόπος ενσωμάτωσης των παραμέτρων του μοντέλου δίνει τη δυνατότητα ευέλικτης προσαρμογής του σε προβλήματα διαφορετικών χαρακτηριστικών. Βασικές παράμετροι του μοντέλου αφορούν:

- **Πληθυσμιακά δεδομένα.** Ο αρχικός πληθυσμός που βρίσκεται σε κάθε υποπεριοχή τη χρονική στιγμή μηδέν (έναρξη προσομοίωσης) αποτελεί ένα από τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Η αλλαγή των τιμών στις συγκεκριμένες παραμέτρους επιτρέπει την εξέταση διαφορετικών σεναρίων για διαφορετική πληθυσμιακή πυκνότητα (π.χ. μεταβολές στον πληθυσμό που εργάζεται και κατοικεί ή βρίσκεται στην περιοχή μια χρονική περίοδο, μεταβολές που αφορούν στην ώρα της ημέρας, στις καιρικές συνθήκες κ.λπ.). Οι υποπεριοχές στις οποίες θα εφαρμοστεί εκκένωση καθορίζονται με βάση την εναλλακτική στρατηγική απόκρισης, για την οποία ζητούμενο είναι η εκτίμηση των συνεπειών με βάση τα κριτήρια που εξετάζονται.
- **Γεωγραφικά χαρακτηριστικά** της περιοχής: μέγεθος περιοχής ενδιαφέροντος, μέγεθος - σχήμα κόμβων (γεωγραφικών τμημάτων στα οποία χωρίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος), διασύνδεση των γεωγραφικών τμημάτων μέσω του οδικού δικτύου (δυνατότητα σύνδεσης μεταξύ τμημάτων και κατεύθυνση μετακίνησης του πληθυσμού), δεδομένα χωρητικότητας και μήκους των δρόμων διασύνδεσης, πιθανά εμπόδια που μπορεί να περιορίζουν την κίνηση (π.χ. τεχνικά έργα) κ.ά. Οι συγκεκριμένες παράμετροι επιτρέπουν την ευέλικτη προσαρμογή του μοντέλου σε δίκτυα διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικές απαιτήσεις του χρήστη για τον επιθυμητό βαθμό λεπτομέρειας της καταγραφής της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού. Βεβαίως, όσο πιο λεπτομερές γίνεται το επίπεδο καταγραφής το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται σημαντικά.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την **κίνηση των οχημάτων**: μέση ταχύτητα μετακίνησης των οχημάτων, μέσο μήκος και χωρητικότητα των οχημάτων μεταφοράς (ανάλογα με το είδος τους, π.χ. πούλμαν, αυτοκίνητα), μέση απόσταση μεταξύ των οχημάτων κατά τη διάρκεια της κίνησης, καιρικές συνθήκες και κατάσταση του οδικού δικτύου που επηρεάζουν τη μέση ταχύτητα μετακίνησης κ.ά.

Αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι επίλυσης του μοντέλου. Στην πρώτη εκδοχή εκτιμώνται οι μέσες τιμές της χωρο-χρονικής κατανομής του πληθυσμού και οι επιπτώσεις στην υγεία βασίζονται στη μέση τιμή των δόσεων επικίνδυνων ουσιών. Στη δεύτερη εκδοχή

του μοντέλου που παρέχει μεγαλύτερο βαθμό λεπτομέρειας της κίνησης, με αντίστοιχα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, εκτιμάται το εύρος των δυνατών τιμών της χωρο-χρονικής πληθυσμιακής κατανομής και δίνεται έτσι η δυνατότητα εκτίμησης του εύρους των δυνατών τιμών των αναμενομένων δόσεων. Η πλέον λεπτομερής λύση βασίζεται στη μέθοδο *Monte Carlo*. Μέσω αυτής της εκδοχής του μοντέλου μπορούν να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι επιπτώσεις στον πληθυσμό λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές διαδρομές εκκένωσης που ακολουθούν τα άτομα που λαμβάνουν μέρος σε αυτή.

Το κριτήριο της *ελαχιστοποίησης του «κοινωνικοοικονομικού κόστους»* ικανοποιείται μέσω της προσέγγισης της ελαχιστοποίησης του αριθμού των ατόμων που συμμετέχουν στις διάφορες προστατευτικές δράσεις (εκκένωση, προστασία σε κτήρια διαφορετικού βαθμού προστασίας). Χρησιμοποιούνται εκφράσεις που καταλήγουν στον υπολογισμό μιας τιμής, συνδυάζοντας την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών μέσω συντελεστών «βαρύτητας» για κάθε επιμέρους δράση. Η μεθοδολογία επιτρέπει τη χρήση και άλλων προσεγγίσεων για την εκτίμηση αυτού του είδους των επιπτώσεων (χρησιμοποίηση και άλλων κριτηρίων όπως το οικονομικό κόστος, ξεχωριστή θεώρηση των ατόμων που λαμβάνουν μέρος σε κάθε μια δράση αντί της χρήσης των υποκειμενικών συντελεστών βαρύτητας), ωστόσο, όσο περισσότερα κριτήρια λαμβάνονται υπόψη, τόσο αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος.

Η μεθοδολογία για την εύρεση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων βασίζεται στη χρήση *πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων*, που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των κλασικών πολυκριτηριακών μεθόδων που είναι ευαίσθητες, για παράδειγμα, ως προς το μέγεθος και το σχήμα του «μετώπου» Pareto. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στις αρχές του αλγορίθμου *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA 2)* και παρέχει τη δυνατότητα:

- να αξιολογηθούν εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος που αντιστοιχούν σε συνδυασμούς πολιτικών απόκρισης σε υποπεριοχές της περιοχής ενδιαφέροντος που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, χωρίς την παραδοχή της ανεξαρτησίας των συνεπειών των δράσεων προστασίας που εφαρμόζονται σε διαφορετικές υποπεριοχές
- γρήγορης προσέγγισης του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων (ταυτόχρονη προσέγγιση πολλών μη-κυριαρχούμενων λύσεων σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, διατήρηση ποικιλίας στους πληθυσμούς «κωδικοποιημένων» λύσεων, εφαρμογή μεθόδου «ελιτισμού»)
- να αξιολογηθούν εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος που αντιστοιχούν σε συνδυασμούς πολιτικών στην ίδια υποπεριοχή (π.χ. σταδιακή εκκένωση, δηλ. η παραμονή εντός κτηρίων για ένα διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση)
- ευέλικτης προσαρμογής με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε προβλήματος και τους σχετικούς περιορισμούς που μπορεί ενδεικτικά να είναι γεωγραφικοί (που δεν επιτρέπουν την εφαρμογή κάποιων προστατευτικών πολιτικών), να σχετίζονται με τα υπάρχοντα μέσα μετακίνησης ή με τα υπάρχοντα κτήρια για παραμονή του πληθυσμού κ.ά.

Από την *ανάλυση ευαισθησίας* των παραμέτρων του μοντέλου εκκένωσης και του εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης της στρατηγικής απόκρισης σε περίπτωση ατυχήματος, όπως επίσης και από τις *περιπτωσιακές μελέτες* που παρουσιάζονται, αναδεικνύονται:

- ❑ Η σημαντική επίδραση στο χρόνο που απαιτείται για την εκκένωση μιας περιοχής και επακόλουθα στις επιπτώσεις του ατυχήματος στην υγεία του πληθυσμού, παραμέτρων όπως της πυκνότητας και της ανομοιομορφίας στην κατανομή του πληθυσμού, του χρόνου προειδοποίησης πριν το ατύχημα και των χαρακτηριστικών του οδικού δικτύου κ.ά.
- ❑ Η σημαντική επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης στις επιπτώσεις του ατυχήματος. Η πρακτική του προσδιορισμού πολιτικών απόκρισης σε περιπτώσεις τεχνολογικού ατυχήματος που βασίζεται μόνο στον καθορισμό ζωνών επικινδυνότητας με βάση την ένταση του φαινομένου που ακολουθεί το ατύχημα (πχ. συγκέντρωση τοξικής ουσίας, ένταση θερμικής ακτινοβολίας, υπερπίεση), μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποπροστασία του πληθυσμού.
- ❑ Ο υπολογισμός των αναμενόμενων δόσεων (τοξικές ή θερμικές) στον πληθυσμό με βάση τη μέση τιμή των πιθανών χωρο-χρονικών κατανομών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των συνεπειών η οποία οφείλεται στην έντονη μη-γραμμικότητα της σχέσης δόσης-συνέπειας στην υγεία. Η υιοθέτηση της πλέον αναλυτικής λύσης του μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης που βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo και εκτιμά τις επιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές, είναι αναγκαία σε αυτές τις περιπτώσεις για μια ακριβέστερη εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία του πληθυσμού. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ολόκληρη η πυκνότητα κατανομής πιθανότητας των αναμενόμενων δόσεων, αντί να υπολογίζεται απλά η μέση τιμή.
- ❑ Επιβεβαιώνεται ότι για να είναι αποτελεσματική η προστασία εντός κτηρίων πρέπει να τερματιστεί σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εξαρτώμενη από τον τύπο του ατυχήματος και το βαθμό προστασίας των κτηρίων.
- ❑ Η επίδραση των παραμέτρων του προβλήματος (λεπτομέρεια αναπαράστασης οδικού δικτύου, χρονικό βήμα καταγραφής, μέγεθος δικτύου, πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, είδος ατυχήματος) στο υπολογιστικό κόστος που συνεπάγεται κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

Συνοψίζοντας, *η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε συμβάλλει στον τομέα της έρευνας για τη λήψη αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης στα ακόλουθα:*

- ✓ Παρέχει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο αντιμετώπισης του προβλήματος λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση τεχνολογικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης όσον αφορά τις εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες, λαμβάνοντας υπόψη την πολυκριτηριακή φύση του προβλήματος.
- ✓ Η μεθοδολογία βασίζεται στις αρχές των εξελικτικών αλγορίθμων που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών πολυκριτηριακών

μεθόδων βελτιστοποίησης, ενώ παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων που αντιστοιχούν σε αλληλεπίδραση των επιμέρους πολιτικών που εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή της περιοχής ενδιαφέροντος.

- ✓ Πέρα από «κλασσικές» προστατευτικές δράσεις (π.χ. εκκένωση, προστασία σε κτήρια κ.λπ.), δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και άλλων εναλλακτικών πολιτικών (όπως για παράδειγμα η σταδιακή εκκένωση, δηλ. η παραμονή εντός κτηρίων για ένα διάστημα και στη συνέχεια εκκένωση).
- ✓ Το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της εκκένωσης Markov που παρουσιάζεται δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθούν οι συνέπειες του ατυχήματος λαμβάνοντας υπόψη τον κυκλοφοριακό φόρτο που δημιουργείται κατά τη διάρκεια αυτής και τη δυναμική φύση της επιλογής διαδρομής.
- ✓ Η πλέον αναλυτική εκδοχή του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης που βασίζεται στη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανομής των δόσεων επικίνδυνης ουσίας που λαμβάνει ο πληθυσμός που μετακινείται και κατά συνέπεια παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των συνεπειών ενός ατυχήματος στην ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη τις διαδρομές εκκένωσης.

Μελλοντική έρευνα

Η συνήθης πρακτική προσδιορισμού των πολιτικών απόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης βασίζεται στον ορισμό του «χειρότερου» σεναρίου. Μια πιο ορθολογική αντιμετώπιση συνίσταται στον προσδιορισμό μιας περιοχής δυνατών σεναρίων μεταβαλλόμενης σοβαρότητας και καθορισμό της σχετικής συχνότητας με την οποία κάθε ένα από αυτά αναμένεται. Η βέλτιστη πολιτική θα πρέπει να ορισθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνει υπόψη της τη μεταβλητότητα αυτή.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής βασίζεται στην αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος για συγκριμένα σενάρια ατυχημάτων. Ένα ενδιαφέρον πεδίο μελλοντικής έρευνας είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας.

Τέτοιου είδους αβεβαιότητα αφορά αφενός στο σχεδιασμό έκτακτης ανάγκης σε μια περιοχή που περιλαμβάνει εγκαταστάσεις που μπορεί να προκαλέσουν διαφορετικά είδη ατυχημάτων ή αλυσιδωτό ατύχημα (φαινόμενο «ντόμινο»), κάθε ένα εκ των οποίων με διαφορετική πιθανότητα εκδήλωσης, και αφετέρου, στην αντιμετώπιση εκτάκτων καταστάσεων σε «πραγματικό χρόνο», όπου η εξέλιξη κάθε ατυχήματος παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας.

Επιπλέον, ένα δεύτερο πεδίο μπορεί να είναι η περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση του χρόνου έναρξης της εκκένωσης μετά από το πρώτο διάστημα παραμονής εντός των κτηρίων. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής έχει θέσει τις βάσεις μιας τέτοιας προσέγγισης, ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση ευαισθησίας μιας σειράς παραμέτρων.

Το μοντέλο προσομοίωσης της εκκένωσης θεωρεί δεδομένο ότι όλα τα άτομα θα ακολουθήσουν την οδηγία εκκένωσης προς τον τελικό προορισμό που καθορίζεται με βάση το σχέδιο έκτακτης ανάγκης. Στην πραγματικότητα, μια σειρά υποκειμενικών παραγόντων (άγχος, πανικός, ελλιπής εκπαίδευση, επιθυμία μετάβασης στον τόπο όπου βρίσκονται συγγενείς κ.ά.), καθιστούν αβέβαιη την υλοποίηση της κατεύθυνσης εκκένωσης προς τον τελικό προορισμό.

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα των περιπτωσιακών μελετών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, αναδείχτηκε ότι η ανομοιομορφία της περιοχής (πληθυσμός, οδικό δίκτυο) μπορεί να οδηγήσει σε μη-κυριαρχουμενες λύσεις οι οποίες είναι εκτός της «κοινής λογικής» (π.χ. λύσεων που προβλέπουν την προστασία κάποιων περιοχών σε κτήρια, την ίδια στιγμή που άλλες περιοχές που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την εγκατάσταση πρόκειται να εκκενωθούν). Η ενσωμάτωση παραμέτρων που θα εκτιμούν το βαθμό αβεβαιότητας υλοποίησης στην πράξη των κατευθύνσεων που προκύπτουν από μια εναλλακτική στρατηγική απόκρισης και η προσθήκη σχετικών περιορισμών στο πρόβλημα, μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα μελλοντικό πεδίο έρευνας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επέκταση της μεθοδολογίας σε άλλα πεδία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που αφορούν στα τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης, όπως για παράδειγμα στον τομέα του σχεδιασμού χρήσεων γης, στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης για πυρηνικές εγκαταστάσεις, όπως επίσης και η εξέταση και άλλων κριτηρίων που αφορούν στις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π. 1: Τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης.

ΠΗΓΕΣ: (Γεωργιάδου 2001; Eckhoff 2005; EM-DAT 2011; ILO 1988; Lees 1996; Mannan 2005; OECD 2005; Pekalski 1997; UNEP 2001)

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
1911	Liverpool, Ην.Βασίλειο	Έκρηξη σκόνης		37	100	**
1912	San Antonio, Τέξας	Εσωτερική έκρηξη λέβητα	Ατμός	26	32	**
6/11/1916	La Satannaya, Βέλγιο	Έκρηξη (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1000	**	**
1917	Ashton, Ην.Βασίλειο	Χημικές εργασίες, έκρηξη	Εκρηκτικά	46	120	**
20/2/1917	Archangel, Ρωσία	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1500	**	**
23/6/1917	Bloeweg, Βέλγιο	Έκρηξη (εργοστάσιο πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	1000	**	**
6/8/1917	Henningsdorf, Γερμανία	Έκρηξη (εργοστάσιο πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	300	**	**
6/12/1917	Halifax, Nova Scotia	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1600 [†]	**	**
19/1/1917	Silvertown, Ην.Βασίλειο	Έκρηξη (εργοστάσιο πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	300 [†]	~426	**
3/8/1918	Hamont Sation, Βέλγιο	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1750	**	**
22/9/1918	Woellerdorf, Αυστρία	Έκρηξη (εργοστάσιο πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	382	**	**
21/9/1921	Orrau, Γερμανία	Έκρηξη	Νιτρικό αμμώνιο	561		**
25/5/1925	Perking, Κίνα	Έκρηξη (αποθήκη πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	300	**	**
10/2/1933	Neunkirchen, Γερμανία	Έκρηξη δεξαμενής	Αέριο πόλης	65	Πολλές εκατοντάδες	**
14/3/1934	La Libertad, Σαρβαδόρ	Έκρηξη (αποθήκη εκρηκτικών)	Εκρηκτικά	250	**	**
30/10/1935	Lanchow, Κίνα	Έκρηξη (αποθήκη πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	2000	**	**
24/12/1939	Zarnesti, Ρουμανία	Έκλυση από δεξαμενή αποθήκευσης	Χλώριο	~60		**
9/1/1941	Fort Smederovo, Γιουγκοσλαβία	Έκρηξη (αποθήκη πυρομαχικών)	Εκρηκτικά	1500	**	**
21/7/1942	Tossenderloo, Βέλγιο	Έκρηξη	Νιτρικό αμμώνιο	>100		**
1944	Cleveland, Ohio, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Μεθάνιο	136	77	**

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

* Σύμφωνα με τον (Lees 1996) ο συγκεκριμένος αριθμός θανάτων αναφέρεται από J.R. Nash (1976) "Darkest Hours", ωστόσο διαφορετικές πηγές αναφέρουν μεγαλύτερο αριθμό θανάτων (1800).

† Σύμφωνα με τον (Lees 1996) ο συγκεκριμένος αριθμός θανάτων αναφέρεται από J.R. Nash (1976) "Darkest Hours", ωστόσο διαφορετικές πηγές αναφέρουν μικρότερο αριθμό θανάτων (69).

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
14/4/1944	Bombay, Ινδία	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1376*	1800	**
17/7/1944	Port Chicago, Καναδάς	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	321	**	**
16/4/1947	Texas City, Τέξας	Έκρηξη (δύο πλοία)	Νιτρικό αμμώνιο	52	~3000	**
1948	Ludwigshafen, Δ.Γερμανία	Έκρηξη (τραίνο)	Διμεθυλαιθέρας	207	~3818	**
1950	Poza Rica, Μεξικό	Διαφυγή τοξικής ουσίας	Φωσγένιο	10		**
1952	Wilsum, Δ.Γερμανία	Διαφυγή τοξικής ουσίας	Χλώριο	7		**
1954	Bitburg, Δ.Γερμανία	Έκρηξη	Κηροζίνη	32	16	**
29/7/1956	Amarillo, Τέξας	Πύρινη σφαίρα σε δεξαμενές αποθήκευσης	Πετρέλαιο	20	>32	**
27/8/1956	Cali, Κολούμπια	Έκρηξη σε πλοίο (πυρομαχικά)	Εκρηκτικά	1200	**	**
22/5/1958	Signal Hill, ΗΠΑ	Πυρκαγιά δεξαμενής (φάρμα)	Πετρέλαιο	2	18	**
11/7/1959	Ube, Ιαπωνία	Έκρηξη σε εγκατάσταση αμμωνίας	Οξυγόνο	11	40	**
7/8/1965	London, Ην.Βασίλειο	Έκρηξη σκόνης σε εργοστάσιο αλεύρων	Αλεύρι	5	32	**
24/1/1966	Feyzin, Γαλλία	Δεξαμενές αποθήκευσης (BLEVE)	Προπάνιο	18	81	**
8/8/1967	Lake, Charles, ΗΠΑ*	Έκρηξη αερίου νέφους	Ισοβουτάνιο	7	13	**
2/1/1968	Pernis, Ολλανδία*	Έκρηξη αερίου νέφους	Πετρελαιοειδή	2	85	**
21/8/1968	Lievin, Γαλλία	Έκλυση από βυτιοφόρο	Αμμωνία	5	20	**
23/12/1969	Basle, Ελβετία	Εσωτερική έκρηξη αντιδραστήρα	Δινιτροχλωρο-νιλίνη	3	31	**
24/1/1970	Java, Ινδονησία	Πυρκαγιά δεξαμενών	Κηροζίνη	50		
8/4/1970	Osaka, Ιαπωνία	Έκρηξη σε υπόγεια διάβαση	Αέριο καύσιμο	79	425	
5/12/1970	Linden, ΗΠΑ*	Έκρηξη αερίου νέφους	C ₁₀ H ₈	-	40	**
17/12/1970	Agha Jari, Ιράν	Έκρηξη	Φυσικό αέριο	34	> 1	
1970	Stavanger, Νορβηγία	Έκρηξη σκόνης	Grain dust		Εγκαύματα σε εργαζόμενους	
11/1/1971	Κανάλι Μάγχης	Σύγκρουση πλοίων και έκρηξη	Πετροχημικά	29		
3/2/1971	Woodbine, ΗΠΑ	Έκρηξη	Μαγνήσιο	> 25	61	
26/6/1971	Czechowice, Πολωνία	Έκρηξη	Πετρέλαιο	33		

* Σύμφωνα με τον (Lees 1996) ο συγκεκριμένος αριθμός θανάτων αναφέρεται από J.R. Nash (1976) "Darkest Hours", ωστόσο διαφορετικές πηγές αναφέρουν μικρότερο αριθμό θανάτων (>350).

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
22/1/1972	St. Louis, ΗΠΑ	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Προπυλένιο	-	230	>100
30/3/1972	Duque de Caxias, Βραζιλία	Αστοχία διεργασίας	Υγραέριο	39	51	
6/4/1972	Doraville, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Βενζίνη	2	161	
1/7/1972	Chihuahua, Μεξικό	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Βουτάνιο	> 8	800	
2/10/1973	Staten Island, ΗΠΑ	Πυρκαγιά (δεξαμενή αποθήκευσης)	LNG	40		
29/8/1973	Djakarta, Ινδονησία	Πυρκαγιά, Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	52	24	>10
1973	Τσεχοσλοβακία	Έκρηξη	Αέριο καύσιμο	47		
1973	Gullaug Νορβηγία	Έκρηξη σκόνης	Σκόνη αλουμινίου	5	4	
31/1/1974	Allahabad, Ινδία	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Πυροτεχνήματα	42		
26/4/1974	Chicago, ΗΠΑ	Διαρροή (αποθήκη)	Πυρίτιο	1	300	
29/4/1974	Eagle Pass, ΗΠΑ	Οδική μεταφορά	Υγραέριο	17	34	
30/4/1974	Yokkaichi, Ιαπωνία	Μεταφόρτωση από πλοίο σε πλοίο	Χλώριο		521	
1/6/1974	Flixborough, Ηνωμένο Βασίλειο*	Έκρηξη	Κυκλοεξάνιο	28	104	3000
19/7/1974	Decatur, ΗΠΑ	Σιδηροδρομική Μεταφορά	Ισοβουτάνιο	7	349	
21/9/1974	Houston, ΗΠΑ	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Βουταδιένιο	1	235	1700
9/11/1974	Tokyo Bay, Ιαπωνία	Σύγκρουση και έκρηξη πλοίου	Νάφθα	33		
27/12/1974	Malaga, Ισπανία	Διαρροή	Χλώριο	4	129	
31/1/1975	Markus Hook, ΗΠΑ	Μεταφόρτωση από πλοίο σε πλοίο	Αργό πετρέλαιο, Φαινόλη	26	35	
10/2/1975	Antwerp, Βέλγιο*	Έκρηξη αερίου νέφους	Αιθυλένιο	6	13	**
16/6/1975	Heimstetten, Γερμανία	Πυρκαγιά αποθήκης	Οξείδιο του αζώτου			10000
14/12/1975	Καταρράκτες Νιαγάρα, ΗΠΑ	Έκρηξη	Χλώριο	4	176	
1975	Beek, Ολλανδία	Έκρηξη	Προπυλένιο	14	107	
3/1976	Deer Park, ΗΠΑ	Οδική Μεταφορά	Αμμωνία	5	200	
13/4/1976	Larua, Φινλανδία	Έκρηξη	Πυρίτιδα	43	>70	
11/5/1976	Houston, ΗΠΑ	Οδική μεταφορά	Αμμωνία	6	178	
10/7/1976	Seveso, Ιταλία*	Διαρροή στην ατμόσφαιρα	TCDD (Διοξίνη)		> 2000	730
12/1976	Carthagene, Κολομβία	Έκρηξη	Αμμωνία	30	30	

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
7/3/1976	Cuernavaca, Μεξικό	Διαρροή	Αμμωνία	2	500	2000
1976	Wislum, Αν.Γερμανία	Διαρροή τοξικών	Χλώριο	7		**
1977	Cartagena, Κολομβία	Διαρροή τοξικών	Αμμωνία	30	25	**
11/5/1977	Αβχαΐα, Σαουδική Αραβία*	Πυρκαγιά σε αγωγό	Αργό πετρέλαιο	-	-	**
19/6/1977	Pueble, Μεξικό	Διαρροή	Βινυλοχλωρίδιο	1	5	>10000
13/7/1977	Rockwood, ΗΠΑ	Οδική Μεταφορά	Υδροβρώμιο	1	30	>10000
7/10/1977	Michigan, ΗΠΑ	Διαρροή	Χλώριο		> 50	>13000
12/11/1977	Iri, Νότια Κορέα	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Δυναμίτης	57	1300	**
2/1978	Youngstown, ΗΠΑ	Διαρροή (σιδηροδρομική μεταφορά)	Χλώριο	8	138	**
15/4/1978	Αβχαΐα, Σαουδική Αραβία*	Πυρκαγιά (1) Έκρηξη αερίου νέφους (2)	Μεθάνιο (1) Υγραέριο (2)	-	-	**
30/5/1978	Texas City, ΗΠΑ*	Δοχείο αποθήκευσης, BLEVE	Υγραέριο	7	10	**
12/6/1978	Sendai, Ιαπωνία	Αποθήκευση	Αργό Πετρέλαιο	21	350	**
6/1978	Covington, ΗΠΑ	Διαρροή (αποθήκευση)	Χλώριο		240	**
7/7/1978	Manouba, Τυνησία	Έκρηξη	Νιτρικό αμμώνιο	3	150	**
11/7/1978	San Carlos, Ισπανία	Οδική μεταφορά	Προπυλένιο	216	200	**
15/7/1978	Xilatorpec, Μεξικό	Έκρηξη (οδική μεταφορά)	Αέριο καύσιμο	100	200	**
3/8/1978	Manfredonia, Ιταλία	Εργοστάσιο	Αμμωνία			10000
2/11/1978	Sanch. Magal., Μεξικό	Έκρηξη αγωγού	Αέριο καύσιμο	41	32	**
1978	Baltimore, ΗΠΑ	Διαρροή τοξικών	Sulfur dioxide		100	**
1978	Chicago, ΗΠΑ	Διαρροή τοξικών	Hydrogen sulphide	8	29	**
8/1/1979	Bantry Bay, Ιρλανδία	Έκρηξη σε πλοίο	Πετρέλαιο, Φυσικό αέριο	50		**
2/1979	Warsaw, Πολωνία	Διαρροή, Έκρηξη	Αέριο καύσιμο	49	77	**
28/3/1979	Three Mile Island, ΗΠΑ	Αστοχία αντιδραστήρα	Ραδιενεργά υλικά			200000
12/4/1979	Rawalpindi, Πακιστάν	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	>30	100	**
3/6/1979	Phangnaga, Ταϊλάνδη	Έκρηξη	Πετρέλαιο	50	15	**
5/7/1979	Memphis, ΗΠΑ	Έκρηξη	Μεθυλπα-ραθείο		150	>2000
20/7/1979	Καραϊβική θάλασσα, Τομπάνκο	Πυρκαγιά	Αργό πετρέλαιο	26		**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
1/10/1979	Λιμάνι Σούδας, Ελλάδα	Έκρηξη (μεταφόρτωση από ένα πλοίο σε άλλο)	Προπάνιο	7	140	**
1/11/1979	Missisauga, Καναδάς	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Χλώριο, Υγραέριο			226000
15/11/1979	Istanbul, Τουρκία	Έκρηξη σε πλοίο	Αργό πετρέλαιο	52	>2	**
-	Novosibirsk, Ε.Σ.Σ.Δ.	Εργοστάσιο	Χημικά	300		**
11/3/1980	Αφρική	Έκρηξη	Αργό πετρέλαιο	36		**
3/4/1980	Sommerville, ΗΠΑ	Σιδηροδρομική μεταφορά	Τριχλωριούχος φώσφορος		418	23000
21/4/1980	St. Joseph, ΗΠΑ	Έκρηξη σκόνης (αποθηκευτικός χώρος πλοίου)	Αλεύρι	1	4	**
3/5/1980	Mandir Asod, Ινδία	Έκρηξη σε εργοστάσιο	Εκρηκτικά	50		**
5/6/1980	Port Kelang, Μαλαισία	Πυρκαγιά	Χημικά	3	200	>3000
16/8/1980	Shizuoka, Ιαπωνία	Έκρηξη	Μεθάνιο	15	222	**
19/8/1980	Deh-Bros Org, Ιράν	Πυρκαγιά, έκρηξη	Δυναμίτης	80	45	**
16/11/1980	Bangkok, Ταϊλάνδη	Έκρηξη οπλισμού	Εκρηκτικά	54	353	**
24/11/1980	Danaciobasi, Τουρκία	Έκρηξη φιαλών	Βουτάνιο	107		**
29/11/1980	Ortuella, Ισπανία	Έκρηξη	Προπάνιο	51	90	**
1980	Alaska, ΗΠΑ	Πυρκαγιά σε αποβάθρα σιδηροδρομικού σταθμού	Πετρέλαιο	51		**
1980	Rome, Ιταλία	Σύγκρουση πλοίων	Πετρέλαιο	25	26	**
1981	Texas, ΗΠΑ	Έκρηξη σκόνης	Αλεύρι	9	30	**
13/2/1981	Louisville, ΗΠΑ*	Διαρροή, έκρηξη	Εξάνιο		4	>100
7/4/1981	Corpus Christi, ΗΠΑ	Έκρηξη σκόνης (ανελκυστήρας)	Αλεύρι	9	30	**
19/5/1981	Puerto Rico, ΗΠΑ	Διαρροή	Χλώριο		200	1500
1/6/1981	Geimar, ΗΠΑ	Έκλυση	Χλώριο		125	**
23/7/1981	Blythe, ΗΠΑ	Διαρροή (οδική μεταφορά)	Νιτρικό οξύ			15000
4/8/1981	Montanas, Μεξικό	Σιδηροδρομική μεταφορά	Χλώριο	28	1	5000
21/8/1981	San Francisco, ΗΠΑ	Οδική μεταφορά	Πυρίτιο		28	7000
25/8/1981	San Francisco, ΗΠΑ	Διαρροή αγωγού	Έλαιο λιπάνσεως			30000
5/3/1982	Melbourne, Αυστραλία	Μεταφορά	Βουταδιένιο		>1000	**
25/4/1982	Todi, Ιταλία	Έκρηξη	Αέριο καύσιμο	34	140	**
28/9/1982	Livingston, ΗΠΑ	Εκτροχιασμός και πυρκαγιά	Χημικά			3000

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
11/12/1982	Taft, ΗΠΑ	Έκρηξη	Ακρολεΐνη			20000
19/12/1982	Tasco, Βενεζουέλα	Έκρηξη δεξαμενής	Πετρέλαιο	>153	500	40000
22/12/1982	Vernon, ΗΠΑ	Διαρροή	Μεθυλακρύλιο		355	**
5/1983	Nile River, Αίγυπτος	Έκρηξη (μεταφορά)	Υγραέριο	317	44	**
7/5/1983	Istanbul, Τουρκία	Έκρηξη		42	50	**
31/8/1983	Pojuca, Βραζιλία	Πυρκαγιά, Έκρηξη	Βενζίνη	42	>100	>1000
29/9/1983	Dhulwari, Ινδία	Έκρηξη	Βενζίνη	41	>100	**
10/10/1983	Corinto, Νικαράγουα	Έκρηξη δεξαμενής	Πετρέλαιο		17	25000
3/11/1983	Dhurabari, Ινδία	Πυρκαγιά	Πετρέλαιο	76	>60	**
22/1/1984	Sauget, ΗΠΑ	Βιομηχανία	Τριχλωριούχος φώσφορος		125	**
25/2/1984	Cubatao, Βραζιλία	Έκρηξη αγωγού	Βενζίνη	89		2500
10/5/1984	Peabody, ΗΠΑ	Πυρκαγιά σε βυρσοδεψείο	Βενζόλιο	1	125	>100
23/7/1984	Romeoville, ΗΠΑ	Έκρηξη αερίου νέφους (στήλη απορρόφησης)	Προπάνιο	15	22	**
16/8/1984	Rio de Janeiro, Βραζιλία	Διαρροή, πυρκαγιά σε αποβάθρα σιδηροδρομικού σταθμού	Αέριο καύσιμο	36	19	**
3/9/1984	Omaha, ΗΠΑ	Διαρροή (αποθήκη)	Νιτρικό οξύ			10000
6/10/1984	Linden, ΗΠΑ	Υπερθέρμανση δεξαμενής	Μαλάθειο		161	**
30/10/1984	Djakarta, Ινδονησία	Πυρκαγιά	Πυρομαχικά	>14	>200	10
19/11/1984	St. J. Ixhuaterpec, Μεξικό	Έκρηξη αερίου νέφους, BLEVE (τερματικός σταθμός)	Υγραέριο	650	6400	>200000
3/12/1984	Bhopal, Ινδία*	Διαρροή	Ισοκυανικό μεθύλιο	3800*	11000 ^a	200000
17/12/1984	Matamoros, Μεξικό	Μεταφορά	Αμμωνία		182	3000
12/1984	Gahri Dhoda, Πακιστάν	Έκρηξη αγωγού	Αέριο καύσιμο	60		**
1984	Ρουμανία	Εργοστάσιο	Χημικά	100	100	**
1984	Denver, ΗΠΑ*	Διαρροή (αποθήκευση)	Βενζίνη			**
1984	Mexico City, Μεξικό	Πυρκαγιά - Έκρηξη (διανομή αερίου πόλης)	Υγραέριο	650	>6400	
21/1/1985	Linden, ΗΠΑ	Βιομηχανία	Νιτμεθοείτ		200	**
3/1985	Djakarta, Ινδονησία	Διαρροή (εργοστάσιο)	Αμμωνία		130	**

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

* Άλλες πηγές αναφέρουν ότι 20000 άνθρωποι πέθαναν και πάνω από 120000 αντιμετώπισαν προβλήματα υγείας (<http://bhopal.org/>).

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
1985	Santa Cruz, Μεξικό	Πυρκαγιά	Μεθάνιο	52		**
13/4/1985	Kenora, Καναδάς*	Οδική μεταφορά	PCB			**
19/5/1985	Priolo, Ιταλία	Διαρροή	Προπυλένιο			>20000
26/5/1985	Algeciras, Ισπανία	Μεταφόρτωση από πλοίο σε πλοίο	Πετρέλαιο	33	37	**
22/6/1985	Anahein, ΗΠΑ	Πυρκαγιά (αποθήκευση)	Φυτοφάρμακα		12	10000
26/2/1985	Coachella, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Φυτοφάρμακα		236	2000
16/7/1985	Cedar Rabids, ΗΠΑ	Αποχετεύσεις εργοστασίου	Χλωριούχο πολυβινύλιο		56	10000
15/8/1985	Institute, ΗΠΑ	Διαρροή	Aldricarboxime		430	3100
26/8/1985	South Charleston, ΗΠΑ	Διαρροή	Υδροχλώριο		135	**
9/1985	Tami Nadu, Ινδία	Μεταφορά	Βενζίνη	60		**
1/11/1985	Padaval, Ινδία	Πυρκαγιά	Βενζίνη	>43	82	**
4/12/1985	New Delhi, Ινδία	Διαρροή	Θεϊκό οξύ	1	340	>10
1985	Ινδία	-	Χλώριο	1	150	**
8/7/1986	Miamisburg, ΗΠΑ	Πυρκαγιά (σιδηροδρομική μεταφορά)	Φωσφορικό οξύ		400	40000
19/9/1986	Hemel Hempstead, Ην.Βασίλειο	Οδική μεταφορά	Οξείδιο του μολύβδου		150	**
25/12/1986	Cardenas, Μεξικό	Διαρροή (αγωγός)	Αέριο καύσιμο		2	>20000
1/11/1986	Basel, Ελβετία*	Πυρκαγιά αποθήκης	Χημικά			**
1986	Northville, ΗΠΑ	Διαρροή τερματικού σταθμού	Βενζίνη			**
1986	Naples, Ιταλία		Βενζίνη	5	150	2000
24/3/1987	Nanticoke, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Θεϊκό οξύ			18000
4/4/1987	Minot, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Παραθείο		20	10000
14/4/1987	Salt Lake City, ΗΠΑ	Διαρροή	Τριχλωροαιθυλ ένιο	1	6	30000
24/6/1987	Bhopal, Ινδία	Διαρροή	Αμμωνία			200000
7/7/1987	Annau, ΕΣΣΔ	Σιδηροδρομική μεταφορά	Χλώριο		200	**
17/7/1987	Herborn, Γερμανία*	Οδική μεταφορά	Βενζίνη	6	24	**
29/10/1987	Nantes, Γαλλία	Πυρκαγιά	Λιπάσματα		24	25000
30/10/1987	Texas City, ΗΠΑ	Αστοχία διεργασίας	Υδροφθορικό οξύ		225	4000
5/12/1987	La Corogne, Ισπανία	Πυρκαγιά	Νάτριο	23		20000
15/12/1987	Minatitlan, Μεξικό	Αστοχία διεργασίας	Ακρυλονιτρίλιο		>200	1000
21/12/1987	Alexandria, Αίγυπτος	Έκρηξη	Καπνογόνες βόμβες	8	142	>1000

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
1987	Shangsi, Κίνα	Εσφαλμένη χρήση	Λιπάσματα		1500	30000
1987	Guangxi Prov., Κίνα		Μεθυλική αλκοόλη	55	3600	**
1987	Harbin, Κίνα	Έκρηξη σκόνης	Linen flax	58	177	**
2/1/1988	Florefe, ΗΠΑ*	Διαρροή	Νιτρίλ			**
10/4/1988	Islamabad, Πακιστάν	Έκρηξη (αποθήκευση)	Εκρηκτικά	>100	3000	**
22/4/1988	Καναδάς (στη θάλασσα)	Έκρηξη (μεταφορά)	Βενζίνη	29		**
6/5/1988	Liu Pan Shui, Κίνα	Έκρηξη	Ανθρακαέριο	45	5	**
23/5/1988	Los Angeles, ΗΠΑ	Πυρκαγιά	Χημικά			11000
25/5/1988	Chihuahua, Μεξικό	Έκρηξη	Πετρέλαιο		7	15000
4/6/1988	Arzamas, ΕΣΣΔ	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Εκρηκτικά	73	230	90000
8/6/1988	Tours, Γαλλία	Πυρκαγιά	Χημικά		3	200000
15/6/1988	Genoa, Ιταλία	Έκρηξη	Υδρογόνο	3	2	15000
17/6/1988	Springfield, ΗΠΑ	Διαρροή, πυρκαγιά	Νάτριο		7	20000
23/6/1988	Monterrey, Μεξικό	Έκρηξη	Βενζίνη	4	15	10000
4/7/1988	Chakhounia, ΕΣΣΔ	Διαρροή (μεταφορά)	Φυτοφάρμακα			20000
6/7/1988	Piper Alpha, North Sea, Ην.Βασίλειο	Έκρηξη, πυρκαγιά πλατφόρμας	Πετρέλαιο, υγραέριο	167		**
23/8/1988	St. B.-le-Grand, Καναδάς	Πυρκαγιά	PCB			3800
23/9/1988	Sibanik, Γιουγκοσλαβία	Αστοχία διεργασίας, πυρκαγιά	Λιπάσματα			>60
4/10/1988	Sverdlovsk, ΕΣΣΔ	Έκρηξη (σιδηροδρομική μεταφορά)	Εκρηκτικά	5	1020	**
22/10/1988	Shanghai, Κίνα	Έκρηξη σε διυλιστήριο	Πετροχημικά	25	17	**
9/11/1988	Bombay, Ινδία	Πυρκαγιά σε διυλιστήριο	Πετρέλαιο	35	16	**
15/11/1988	West Bromwich, Ηνωμένο Βασίλειο	Διαρροή	Νιτρικό οξύ		22	50000
31/11/1988	Chittagong, Μπανγκλαντές	Έκρηξη	Εύφλεκτα αέρια	33		**
1/12/1988	Κίνα	Έκρηξη	Αέριο καύσιμο	45	23	**
11/12/1988	Mexico City, Μεξικό	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	62	87	**
22/12/1988	Jhurkully, Ινδία	Διαρροή	Διοξειδίο του Θείου		500	**
5/1/1989	Los Angeles, ΗΠΑ	Έκλυση	Χλώριο			11000
17/1/1989	Bhatinda, Ινδία	Διαρροή	Αμμωνία		500	**
19/1/1989	Henan, Κίνα	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	27	22	**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
20/3/1989	Ionava, ΕΣΣΔ	Έκρηξη, πυρκαγιά	Αμμωνία, λίπασμα (ΝΡΚ)	6	53	30000
5/5/1989	Britannia Chowk, Ινδία	Διαρροή	Χλώριο		200	**
4/6/1989	Acha Ufa, ΕΣΣΔ	Έκρηξη αγωγού	Αέριο καύσιμο	575	623	**
21/9/1989	Yurga, ΕΣΣΔ	Έκρηξη	Πυρομαχικά	1	3	20000
23/10/1989	Pasadena, ΗΠΑ	Έκρηξη	Αιθυλένιο	23	314	1300
16/11/1989	Garun Grash, Πακιστάν	Έκρηξη	Πυρομαχικά	40	>20	**
17/1/1990	Ahlsfeld, Γερμανία	Διαρροή από βυτιοφόρο	Χλώριο		>182	**
22/3/1990	Kaohsiung, Ταϊβάν	Πυκνό αέριο νέφος	Χλώριο			540
1/4/1990	Syndey, Αυστραλία	Πυρκαγιά, έκρηξη σε αποθήκη	BLEVE			10000
9/4/1990	Warren, ΗΠΑ*	Έκρηξη και πυρκαγιά	Βουτάνιο			**
16/4/1990	Patna (κοντά στη πόλη), Ινδία	Διαρροή (μεταφορά)	Αέριο καύσιμο	100	100	**
4/5/1990	Matanzas, Κούβα	Έκλυση, αέριο νέφος	Αμμωνία	3	374	>1000
29/5/1990	Ufa, ΕΣΣΔ	Έκλυση	Φαινόλη			400
22/6/1990	Ulsan, Κορέα	Διαρροή	Οξικό οξύ		36	>10000
7/1990	Lucknow, Ινδία	Διαρροή σε εργοστάσιο πάγου	Αέρια αμμωνία		200	**
5/7/1990	Channelview, ΗΠΑ*	Έκρηξη	Χημικά			**
22/7/1990	Ulsan, Κορέα	Έκρηξη	Βουτάνιο			>10000
25/7/1990	Birmingham, Ην.Βασίλειο	Πυρκαγιά, αέριο νέφος	Υδρογόνο, χλώριο, μεθανόλη κ.ά.		>60	70050
25/9/1990	Bangkok, Ταϊλάνδη	Ατύχημα σε μεταφορά	Υγραέριο	>51	>54	**
9/10/1990	Gateshead, Ην.Βασίλειο	Πυρκαγιά	Λιωμένο μέταλλο			10100
3/11/1990	Chalmette, ΗΠΑ*	Έκρηξη σε διυλιστήριο	Νέφος εύφλεκτου αερίου			**
5/11/1990	Nagothane, Ινδία*	Διαρροή	Αιθάνιο & προπάνιο	32	22	**
25/11/1990	Denver, ΗΠΑ*	Πυρκαγιά (αποθήκη καυσίμων αεροδρομίου)	Κηροζίνη			**
30/11/1990	Ras Tan., Σαουδική Αραβία*	Πυρκαγιά σε διυλιστήριο	Κηροζίνη και βενζίνη	1	2	**
9/1/1991	Terplitz, Τσεχοσλοβακία	Έκρηξη (αποθήκη πυρομαχικών)	Πυρομαχικά	20		**
12/1/1991	Port Arthur, ΗΠΑ*	Πυρκαγιά σε διυλιστήριο	Πετρέλαιο			**
14/2/1991	Daesan, Κορέα*	έκρηξη	Αέριο υδρογόνο		2	**
15/2/1991	Bangkok, Ταϊλάνδη	Ατύχημα σε μεταφορά	Δυναμίτης, πυροκροτητές	171	100	**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
3/3/1991	Lake Charles, ΗΠΑ*	Έκρηξη και πυρκαγιά	Πετρέλαιο	3	12	**
11/3/1991	Coatzacoaloas, Μεξικό*	Έκρηξη (πετροχημικά)	Χλώριο	2	122	**
10/4/1991	Livorno, Ιταλία	Ατύχημα σε μεταφορά	Νάφθα	141		**
13/4/1991	Sweeny, ΗΠΑ*	Έκρηξη σε διυλιστήριο	Πετρέλαιο		2	**
4/5/1991	Kaula Lumpur, Μαλαισία	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	41	61	**
4/5/1991	Cordoba, Μεξικό	Έκρηξη	Παραθείο		300	1500
6/5/1991	Henderson, ΗΠΑ*	Διαρροή σε εργοστάσιο	Χλώριο		55	15000
5/1991	Sterlington, ΗΠΑ*	Έκρηξη σε εργοστάσιο	Νιτρομεθάνιο	>8	>123	500
30/5/1991	Berre-L'Etang, Γαλλία*	Διαρροή (χημική εγκατάσταση)	Αιθυλένιο		4	**
30/5/1991	Dongguang, Κίνα*	Πυρκαγιά (βιομηχανία ενδυμάτων)		71		**
4/6/1991	Addis Ababa, Αιθιοπία	Έκρηξη	Πυρομαχικά	100	200	**
15/6/1991	Seclin, Γαλλία*	Πυρκαγιά (τεχνολογίες γραφείων)	Πλαστικά			**
20/6/1991	Dhaka, Μπανγκλαντές*	Έκρηξη	Αέρια αμμωνία	8	22	**
12/7/1991	Meenamralti, Ινδία	Έκρηξη (εργοστάσιο εκρηκτικών)	Πυροτεχνήματα	38		**
10/8/1991	Kaohsiung, Ταϊβάν	Έκλυση	Διοξείδιο του θείου		600	**
21/8/1991	Melbourne, Αυστραλία*	Πυρκαγιά σε αποθήκη χημικών	Φαινόλη, ακρυλονιτρίλιο			>1000
3/9/1991	Immingham, Ην.Βασίλειο	Αστοχία διεργασίας (Λιπάσματα)	Τοξικό νέφος χημικών		127	**
3/9/1991	Hamlet, ΗΠΑ	Έκρηξη σε αποθήκη	Χημικά	25	41	**
24/9/1991	Bangkok, Ταϊλάνδη	Έκρηξη	Αέριο καύσιμο		>63	**
9/1991	Shaxi, Κίνα	Πυρκαγιά, αέριο νέφος	Εντομοκτόνα	30	650	**
10/1991	New Bombay, Ινδία	Ατύχημα σε μεταφορά	Αέρια αμμωνία	1	150	**
10/1991	Lhudiana, Ινδία	Αγορά	Πυροτεχνήματα	>40		**
5/10/1991	Nyon, Ελβετία	Διαρροή (εργοστάσιο PVCs)	Χλώριο			12000
31/10/1991	Pyeongang, Κορέα	Έκρηξη	Δυναμίτης	>120		**
3/11/1991	Beaumont, ΗΠΑ*	Πυρκαγιά σε διυλιστήριο	Υδρογονάνθρακες			**
11/1991	Medran, Ινδία	Ατύχημα σε μεταφορά (διαρροή)	Εύφλεκτο υγρό	93	25	**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
12/1991	Calcutta, Ινδία	Διαρροή σε αγωγού	Χλώριο		200	**
5/12/1991	Richmond, ΗΠΑ	Ελαττωματική βαλβίδα	Εκπομπή σκόνης, κάπνα		300	**
10/12/1991	Gelsenkirch, Γερμανία*	Έκρηξη μετά από διαρροή αερίου	Προϊόντα διυλιστηρίου		8	**
29/12/1991	San Luis Potosi, Μεξικό	Έκλυση	Βουτάνιο		40	**
23/2/1992	Kwangju, Κορέα	Έκρηξη σε αποθήκη	Υγραέριο		16	20000
24/3/1992	Dakar, Σενεγάλη	Ατύχημα σε εργοστάσιο αράπικων φιστικιών	αμμωνία	>40	>300	**
22/4/1992	Guadalajara, Μεξικό*	Έκρηξη στους υπονόμους της πόλης		>206	>1500	500
29/4/1992	New Delhi, Ινδία	Έκρηξη (αποθήκη)	Χημικά	43	20	**
20/6/1992	Assawani, Λίβανος	Έκρηξη	Εκρηκτικά	30		**
20/6/1992	Al-Sanouani, Λιβύη	Έκρηξη σε εργοστάσιο	Πυροτεχνήματα	17	143	**
30/6/1992	Duluth, ΗΠΑ	Εκτροχιασμός	Βενζόλιο		20	80000
28/7/1992	Westlake, ΗΠΑ*	Έκρηξη (χημική βιομηχανία)	Αμμωνία		63	**
8/8/1992	Corlu, Τουρκία	Έκρηξη	Μεθάνιο	32	64	**
22/8/1992	Richmond, ΗΠΑ	Διαρροή	Νιτρικό οξύ		130	**
8/10/1992	Wilmington, ΗΠΑ*	Διαρροή (διυλιστήριο)	Υδρογονάνθρακας, υδρογόνο		16	**
16/10/1992	Sodegaura, Ιαπωνία*	Διαρροή και έκρηξη	Υδρογόνο	10	7	**
23/10/1992	Schkopau, Γερμανία	Έκλυση σε αποθήκη	Χλώριο		186	**
25/10/1992	Tharia, Ινδία	Έκρηξη, πυρκαγιά	Πυροτεχνήματα	>25	100	**
9/11/1992	Chateaufneuf.L., Γαλλία*	Διαρροή (διυλιστήριο)	Προπάνιο, βουτάνιο, νάφθα	6	1	**
7/1/1993	Chongju, Ν.Κορέα	Πυρκαγιά	Υγραέριο	27	50	**
9/2/1993	Cornille-L-Cav., Γαλλία*	Πυρκαγιά σε γαλακτοπωλείο	Πλαστικά			**
22/2/1993	Frankfurt, Γερμανία*	Διαρροή	ο-Nitroanisol		1	**
10/5/1993	Bangkok, Ταϊλάνδη	Πυρκαγιά σε εργοστάσιο παιχνιδιών	Πλαστικά	240	547	**
26/6/1993	Zhengzhou, Κίνα	Έκρηξη, πυρκαγιά	Χημικά	27	32	**
26/7/1993	Richmond, ΗΠΑ	Έκλυση	Θειικό οξύ		>6250	**
27/7/1993	Evry, Γαλλία*	Πυρκαγιά, Έκρηξη (εκτυπωτές)	Χημικά προϊόντα, χαρτί			**
2/8/1993	Baton Rouge, ΗΠΑ*	Διαρροή και πυρκαγιά	Υδρογονάνθρακας			**
4/8/1993	Remeios, Κολομβία	Έκλυση	Αργό πετρέλαιο	430		**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
6/8/1993	Shenzhen, Κίνα	Έκρηξη σε αποθήκη	Χημικά, αέριο καύσιμο	>12	168	**
20/8/1993	Limoges, Γαλλία*	Πυρκαγιά σε αποθήκη	Πλαστικά		2	**
24/8/1993	Mirande, Γαλλία*	Πυρκαγιά και έκρηξη	Πλαστικά			**
29/8/1993	Nanshankou, Κίνα	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	27	2	**
28/9/1993	Tejerias, Βενεζουέλα	Έκρηξη στους υπονόμους	Αέριο καύσιμο	53	35	**
11/10/1993	Baohe, Κίνα	Έκρηξη	Φυσικό αέριο	70		**
1/11/1993	Nam Khe, Βιετνάμ	Διαρροή, έκρηξη	Βενζίνη	47	48	**
4/11/1993	Nam Khe, Βιετνάμ	Διαρροή, έκρηξη (αγωγός)		39	62	**
19/11/1993	Kuoyong, Κίνα	Πυρκαγιά σε εργοστάσιο παιχνιδιών		81	19	**
25/11/1993	Dulin, Κίνα	Έκρηξη, πύρινη σφαίρα	Πυροτεχνήματα	26		**
26/11/1993	Shuangpai, Κίνα	Έκρηξη		61		**
24/1/1994	Noyelles-God, Γαλλία*	Έκρηξη	Ψευδάργυρος		9	**
17/2/1993	Ducey, Γαλλία*	Πυρκαγιά	Πολυουρεθάνη		7	**
8/3/1993	Zrich, Ελβετία*	Εκτροχιασμός τραίνου με εμπορεύματα	Βενζίνη		7	120
30/3/1994	Courbevoie, Γαλλία*	Διαρροή	Αέριο καύσιμο	1	59	**
7/5/1994	Kaohsiung, Ταϊβάν*	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)	Πλαστικά	1		**
27/5/1994	Belpre, ΗΠΑ*	Πυρκαγιά (χημική εγκατάσταση)	Στυρένιο	3		1000
17/6/1994	Zhuhai, Κίνα	Πυρκαγιά σε εργοστάσιο υφαντουργίας		76	150	20 miss.
24/7/1994	Pembroke, Ην.Βασίλειο*	Έκρηξη σε διυλιστήριο		26		**
26/7/1994	Inchon, Κορέα	Έκρηξη	1-hydroxy benzo triazol	6	39	>10000
2/8/1994	Guangix, Κίνα	Έκρηξη (αποθήκη)	Δυναμίτιδα, εκρηκτικά	73	99	**
23/8/1994	Balanod, Γαλλία*	Πυρκαγιά (εργοστάσιο κρέατος)	Χημικά			**
10/1994	Thane District, Ινδία	Ατύχημα σε μεταφορά	Αέριο χλώριο	4	298	**
4/10/1994	Madhya-Pradesh, Ινδία	Έκρηξη (αποθήκη)	Βαρελότα	30	100	**
11/1994	Dronka, Durunka, Αίγυπτος	Ανάφλεξη	Φλεγόμενο πετρέλαιο	≅410		**
4/11/1994	Onitsha, Νιγηρία	Πυρκαγιά (οδική μεταφορά)	Καύσιμο πετρέλαιο	60		**
13/11/1994	New Delhi, Ινδία	Πυρκαγιά σε αποθήκη χημικών	Τοξικό νέφος (χημικά)		500	**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
7/12/1994	Seoul, Κορέα	Έκρηξη στο κέντρο της πόλης	Υδροποιημένο φυσικό αέριο	7	50	>10000
14/12/1994	Palmeira, Μοζαμβίκη	Ατύχημα σε μεταφορά	Αέριο καύσιμο	36		**
28/12/1994	Βενεζουέλα	Έκρηξη σε αγωγό		50	10	**
12/3/1995	Madras, Ινδία	Ατύχημα σε μεταφορά	Καύσιμο	~ 100	23	**
28/4/1995	Taegu, Κορέα	Κατασκευή στο μετρό	Υγραέριο	101	140	>10000
14/5/1995	Gerardmer, Γαλλία*	Πυρκαγιά σε εργοστάσιο υφαντουργίας	Χρώματα		7	**
15/7/1995	Annecy, Γαλλία*	Έκρηξη και πυρκαγιά	Χημικά προϊόντα		4	**
15/7/1995	Astara, Ιράν	Διαρροή	Χλώριο	3	200	**
16/7/1995	Boqueiro, Βραζιλία	Έκρηξη σε αποθήκη	Πυρομαχικά	100		**
24/7/1995	Blotzheim, Γαλλία*	Πυρκαγιά	Πλαστικά		1	**
10/9/1995	Ελβετία*	Πυρκαγιά (βιομηχανία ρολογιών)	Λιπαντικό			**
24/10/1995	Cilacap, Ινδονησία*	Πυρκαγιά, έκρηξη σε διωλιστήριο	Αέριο καύσιμο			**
27/1/1995	Σλοβακία	Έκρηξη σε αγωγό		11	200	**
3/11/1995	Rio Tercero, Αργεντινή	Έκρηξη σε εγκατάσταση	Πυρομαχικά	13		>10000
8/11/1995	Kingston, Τζαμάικα*	Έκρηξη και πυρκαγιά	Χημικά προϊόντα			**
12/1995	Maharashtra, Ινδία	Ατύχημα σε μεταφορά	Αέρια αμμωνία		2000	**
24/12/1995	Dreux, Γαλλία*	Πυρκαγιά (εργοστάσιο εξοπλισμού αυτοκινήτου)	Τριχλωροαιθυλένιο		3	**
1/1/1996	Guizhou, Κίνα	Μολυσμένο πόσιμο νερό	Χημικά προϊόντα		407	**
11/1/1996	Toyatti, Ρωσία*	Έκρηξη σε χημική εγκατάσταση	Χημικά προϊόντα			**
31/1/1996	Shaoyang, Κίνα	Έκρηξη σε αποθήκη	Εκρηκτικά	125	400	**
15/2/1996	Kabul, Αφγανιστάν	Έκρηξη (αποθήκη πυρομαχικών)	Πυρομαχικά	60	>125	**
17/2/1996	Varna, Βουλγαρία	Διαρροή	Ντήζελ		200	**
20/2/1996	Mexico City, Μεξικό	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)	Μερκαπτάνη		>125	>100
14/5/1996	Aden, Υεμένη	Έκρηξη	Πυρομαχικά	38	>100	**
29/6/1996	Piya, Κίνα	Έκρηξη σε εργοστάσιο		36	52	**
16/7/1996	Αϊτή	Μολυσμένο φάρμακο		>60		**
19/7/1996	Togo	Ατύχημα σε οδική μεταφορά		40		**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
6/8/1996	Heilliecourt, Γαλλία*	Πυρκαγιά σε αποθήκη αγροχημικών προϊόντων	Χλωρικό άλας νατρίου			**
30/12/1996	Aiskew, Hv. Βασιλείο	Έκρηξη (αποθήκευση)	Βενζίνη		201	**
1/1997	Mumbai, Ινδία*	Τελική διαχείριση/διακίνηση μη συσκευασμένων εμπορευμάτων	Θείο			**
26/1/1997	Martinez, ΗΠΑ*	Πυρκαγιά και έκρηξη	Υδρογονάνθρακες	1	60	**
19/2/1997	Khabarovsk, Ρωσία	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)	Χλώριο	1	217	**
1/1/1997	Bhopal, Ινδία	Διαρροή (μεταφορά)	Αμμωνία		400	**
8/3/1997	Annezin, Γαλλία*	Πυρκαγιά	Πλαστικά			**
1/4/1997	Acajutla, Σαλβαδόρ	Εργοστάσιο απορρυπαντικών	Χλώριο		400	>100
22/6/1997	Deer park, ΗΠΑ	Έκρηξη αερίου νέφους	Υδρογονάνθρακες		1	**
4/7/1997	Quito, Εκουαδόρ	Έκρηξη σε αποθήκη	Πυρομαχικά	3	187	**
14/9/1997	Wishakhartnam, Ινδία	Πυρκαγιά σε διυλιστήριο		34	31	150000
20/9/1997	Jin Jiang, Κίνα	Πυρκαγιά σε εργοστάσιο παπουτσιών		32	4	**
25/10/1997	Stanger, Ν.Αφρική	Ατύχημα σε μεταφορά	Πετρέλαιο	34	2	**
2/11/1997	St. Nicolas d.P., Γαλλία*	Πυρκαγιά (βιομηχανία κρεάτων)	Πλαστικά			**
29/12/1997	Cadoxton, Hv.Βασιλείο	Χημική διαρροή (spill)	Μονομερές βινυλοχλωρίδιο		1000	**
24/1/1998	Peking, Κίνα	Ατύχημα σε μεταφορά, έκρηξη	Πυροτεχνήματα	40	100	**
14/2/1998	Yaoundi, Καμερούν	Ατύχημα σε μεταφορά	Προϊόντα πετρελαίου	220	130	**
1998	Longford, Victoria, Αυστραλία	Έκρηξη - Φωτιά		2		**
1998	Idjerhe, Niger Delta, Νιγηρία	Έκρηξη σε αγωγό μεταφοράς	Καύσιμα	> 500		**
23/10/1989	Pasadena, Τέξας	Έκρηξη (εργοστάσιο πολυαιθυλενίου)	Ισοβουτάνιο	23	≅103	**
3/6/1989	Ufa, ΕΣΔΔ	Έκρηξη σε αγωγό	LNG	645	≅500	**
24/9/1990	Bangkok, Ταϊλάνδη	Έκρηξη σε βυτιοφόρο	LPG	68	>100	**
6/11/1990	Nagothane, Ινδία	Έκρηξη (εργοστάσιο αιθυλενίου)	Αιθάνιο, προπάνιο	31		**
9/1/1991	Teplitz, Τσεχοσλοβακία	Έκρηξη	Πυρομαχικά	20		**

* Αναφέρεται σε ατυχήματα που προκάλεσαν ζημιές σε τρίτους πάνω από 10 εκ. \$.

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
22/7/1991	Guadalajara, Μεξικό	Διαρροή	Αμμωνία		30000	**
16/10/1992	Sodegaura, Ιαπωνία	Έκρηξη σε διυλιστήριο	Υδρογόνο	10	7	**
27/5/1994	Belpre, ΗΠΑ	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)		3	1700	**
2/11/1994	Dronka, Αίγυπτος	Πυρκαγιά (αποθήκευση καυσίμων)	Καύσιμα αεροδρομίου	≈410		**
21/8/1995	Preston, Ην.Βασίλειο	Διαρροή	Βενζίνη		260	**
27/10/1995	Ανατολική Σλοβακία	Έκρηξη σε αγωγό μεταφοράς	**	11	200	**
17/2/1996	Varna, Βουλγαρία	Έκθεση σε επικίνδυνες ουσίες	Νιτρίδι		200	**
20/2/1996	Mexico City, Μεξικό	Έκρηξη σε χημική εγκατάσταση	**		225	**
4/1/1997	Acajutla, Ελ Σαλβαδόρ	Διαρροή αερίου	Χλώριο		500	
19/2/1997	Krasnoïarsk, Ρωσία	Πυρκαγιά σε χημική εγκατάσταση	**	1	217	**
29/12/1997	Cardoxton, Ην.Βασίλειο	Έκλυση επικίνδυνης ουσίας	Μονομερές βινυλολωρίδιο		1000	**
28/10/1998	Santa Catalina, Μεξικό	Διαρροή	Βενζίνη		10000	**
5/4/1999	Belmullet, Ιρλανδία	Πυρκαγιά	**		700	**
26/9/1999	Celaya, Μεξικό	Έκρηξη (εργοστάσιο πυροτεχνημάτων)	Εκρηκτικά	59	300	**
2000	Enschede, Ολλανδία	Φωτιά - έκρηξη	Πυροτεχνήματα	22	≈ 1.000	**
21/5/2001	Ludwigshafen, Γερμανία	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)			130	**
21/9/2001	Toulouse, Γαλλία	Φωτιά - έκρηξη	Νιτρικό αμμώνιο	30	≈ 2.240 τραυματίες, > 5.000 ψυχολογική υποστήριξη	**
2001	Katpadi, Tamil Nadu, Ινδία	Έκρηξη σε εργοστάσιο εκρηκτικών	Δυναμίτης	25	3	**
29/1/2003	Kinston, ΗΠΑ	Έκρηξη (εργοστάσιο φαρμάκων)		4	9	**
15/6/2004	Fuzhou, Κίνα	Διαρροή αερίου	Φωσγένιο	1	300	**
4/11/2004	Kolding, Δανία	Έκρηξη σε εργοστάσιο πυροτεχνημάτων	Πυροτεχνήματα	1	2072	**
23/3/2005	Τέξας, ΗΠΑ	Φωτιά, έκρηξη	Διυλιστήριο	15	170	**

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

ΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟ ΠΡΟΪΟΝ	ΘΑΝΑΤΟΙ	ΤΡΑΥΜ/ΕΣ ή ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΑΝ	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΤΟΜΩΝ
29/3/2005	Huainan, Κίνα	Διαρροή αερίου	Χλώριο	27	285	**
13/11/2005	Jilin province, Κίνα	Έκρηξη (πετροχημικό εργοστάσιο)		5	10070	**
11/12/2005	Bancefield, Ην.Βασίλειο	Πυρκαγιά (δεξαμενές καυσίμων)	Πετρελαιοειδή		43	**
2006	Καναδάς (BP)	Έκρηξη αγωγού				**
16/4/2007	Xifeng, Κίνα	Διαρροή	Διοξείδιο του θείου		300	**
23/10/2007	Campeche, Μεξικό	Διαρροή (πλατφόρμα πετρελαίου)	Πετρέλαιο	23	63	**
26/3/2008	Near Turpan, Κίνα	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	30	2	**
10/8/2008	Toronto, Καναδάς	Έκρηξη	Υγραέριο	2	12518	**
16/8/2008	Monchengladbach, Γερμανία	Διαρροή αερίου			107	**
2009	Τοσκάνη	Έκρηξη (μεταφορά με τρένο)	Υγραέριο			**
21/6/2009	Fengyang, Κίνα	Έκρηξη		16	44	
15/7/2009	Liuyang, Κίνα	Έκρηξη (χημική εγκατάσταση)		2	108	**
20/4/2010	Κόλπος Μεξικού, Μεξικό	Έκρηξη (Περιβαλλοντική ρύπανση)	Πετρέλαιο	11	17	**
7/6/2010	Τέξας, ΗΠΑ	Έκρηξη		13		**
28/7/2010	Nankin, Κίνα	Έκρηξη αγωγού	Αέριο	13	300	**
16/8/2010	Near Yichun, Κίνα	Έκρηξη	Πυροτεχνήματα	19	153	**
9/9/2010	San Bruno, ΗΠΑ	Έκρηξη		13	135	**
4/10/2010	Ajka, Veszprem, Ουγγαρία	Διαρροή επικίνδυνων ουσιών	Τοξικές ουσίες	9	7120	**
19/12/2010	San Martin, Μεξικό	Έκρηξη (αγωγός μεταφοράς)	**	27	52	**
26/1/2011	Sarinata, Κολομβία	Έκρηξη		21		**

** Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη.

Πίνακας Π. 2: Τεχνολογικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης με επιπτώσεις στο περιβάλλον.

ΠΗΓΗ: (Christou 2000)

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
15/12/74 Hattiesburg Mississippi ΗΠΑ	Υπερχείλιση του ποταμού λυμάτων	Πεντα-χλωροφενόλη	Άγνωστη	Άγνωστη	Ποταμός και λίμνη	Θάνατος πολλών ψαριών	Μόλυνση των ψαριών για τουλάχιστον 6 μήνες	PCP ανιχνεύονταν 18 μήνες μετά τη μόλυνση
21/7/75 Strongstown Pensylvania ΗΠΑ	Διαρροή εντομοκτόνου από ιδιωτική εγκατάσταση	Chlordane, Hystachlor, Dieldrin, Aldrin	9.5 λίτρα από το εντομοκτόνο σε 900 λίτρα νερό	Δεν είναι καταγεγραμμένο	Ποταμός και έδαφος	Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί στο «πέραςμα» του ποταμού πέθαναν		3 μήνες
23/7/82 Βόρεια Σουηδία	Καταστροφή κοντέινερ	Πεντα-χλωροφενόλη, 2,3,4,6,-	3 κυβικά μέτρα διαλύματος νερού με 0.8% Fungicide	Άγνωστη	Ποταμοί και λίμνες 15 χιλ/μετρα από την πηγή	Μόλυνση των ψαριών (όχι θάνατοι)	Άγνωστες, μετά από 6 μήνες ανιχνεύονταν PCP στους οργανισμούς	Πιθανόν μερικούς μήνες
15/9/85 Ντρογκομπίχ Ουκρανία ΕΣΣΔ	Κατάρρευση τοιχοποιίας χώρου αποθήκευσης λυμάτων λόγω υπερφόρτωσης	Καλιούχο άλας (σκόνη)		Δεν δηλώθηκε	Ποταμός και αγροτική έκταση	2000 τόνοι ψάρια πέθαναν, μόλυνση νερού και εδαφών		Μικρή
1/11/86 Σουέζερχαλ Ελβετία	Φωτιά σε αποθήκη εντομοκτόνων, το νερό της πυρόσβεσης εισήλθε στο ποταμό	Εντομοκτόνα Οργανο-φωσφορικά με βάση μόλυβδο και ψευδάργυρος	6-22 τόνοι	680 τόνοι	Ατμόσφαιρα - έδαφος και ποταμός	Μαζική καταστροφή της ζωής στο Ρήνο 400 χιλιόμετρα από την πηγή	Μείωση του πληθυσμού των ψαριών για χρόνια	Μετά από 1 χρόνο οι περισσότεροι οργανισμοί και ψάρια επανήλθαν

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
4/12/86 Ποτάμι της Σαβάνας Georgia ΗΠΑ	Διαρροή πετρελαίου από άγνωστη αιτία	Πετρέλαιο	1700 τόνοι	Άγνωστη	Καλλιέργειες στις όχθες του ποταμού	Κάλυψη των καλλιεργειών και πουλιών με πετρέλαιο	Δεν δηλώθηκαν	1/2-1 χρόνο
8/10/87 Isla Desolacion Στενό του Μαγγελάνου	Προσάραξη πλοίου	Ελαφρύ ακατέργαστο πετρέλαιο και καύσιμο πετρέλαιο	6000 κυβικά μέτρα και 533 κ.μ.	70348,8 κ.μ από αργό πετρέλαιο	Θαλάσσια και παραθαλάσσια περιοχή	Μόλυνση στα φύκια και μικρή σε γλάρους	Πολύ περιορισμένη	6 μήνες για τις μικρές περιοχές
2/1/88 Floeffe Πενσυλβάνια ΗΠΑ	Κατάρρευση δεξαμενής πετρελαίου	Πετρέλαιο	12500 τόνοι	3,8 εκατομμύρια γαλόνια	Ποτάμια και παρακείμενο πόσιμο νερό	2000-4000 πουλιά πέθαναν	Δεν υπάρχουν στοιχεία	Δεν υπάρχουν στοιχεία
8/6/88 Auzour En Tourain Γαλλία	Έκρηξη και φωτιά, είσοδος νερού πυρόσβεσης στο νερό	Φαινόλες, Τουολένιο, Βαρέα μέταλλα			Ποταμοί και υπόγειο νερό	15-20 τόνοι ψάρια και πουλιά πέθαναν		
22/8/88 Gueugnon Γαλλία	Διαρροή από λάθος κατά το άδειασμα δεξαμενής	Νιτρικό οξύ	500 λίτρα		Ποταμός	500 κιλά ψάρια πέθαναν		
22/12/88 Grays Harbour Wasington ΗΠΑ	Αστοχία σε φορτηγό πλοίο	Πετρέλαιο	730 τόνοι	70000 bbl	Θάλασσα και παραθαλάσσια περιοχή	8000 πουλιά πέθαναν		6 μήνες
10/10/88 Dampniat Γαλλία	Διαρροή από τεχνικό ή ανθρώπινο λάθος	Lindane, Penta-chlorophenate	40 κιλά		14 χιλιόμετρα	15 τόνοι ψάρια πέθαναν		

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
20/3/89 Saint Andre de Majencoules Γαλλία	Οδική μεταφορά, Ανθρώπινο σφάλμα	Πετρέλαιο καύσιμο	20000 λίτρα	20000 λίτρα	Ποταμός	Θάνατος ψαριών		Μικρή
28/3/89 Vierzon Γαλλία	Οδική μεταφορά, διαρροή κατά τη φόρτωση	Πετρέλαιο	8000 λίτρα		Ποταμός	Θάνατος ψαριών		
2/1/90 Arthur Kill Waterway ΗΠΑ	Διαρροή από αγωγό κάτω από το νερό	Πετρέλαιο	1800 τόνοι		Νησιά και παράλια νησιών	600 πουλιά πέθαναν και 100 μολύνθηκαν	Καμμία	1 έτος
3/12/90 Chanvay Γαλλία	Πυρκαγιά, εκτροχιασμός τρένου	Καύσιμοι υδρογονάνθρακες	Περίπου 234 κυβικά μέτρα	Περίπου 1760 κυβικά μέτρα	Έδαφος και υπόγειο νερό	Έδαφος και υπόγειο νερό		
8/4/90 Martelange Esch Λοξεμβούργ.	Οδική μεταφορά	Monochloroacetic acid	7 τόνοι	22 τόνοι	Ποταμοί και πηγάδια	Μόλυνση του πόσιμου νερού και θάνατος 12 τόνων ψαριών		
21/1/95 QUBEC Καναδάς	Εκτροχιασμός τρένου	Σουλφουρικό οξύ	234 κυβικά μέτρα		Ποταμός και λίμνη	Οι υδρόβιοι οργανισμοί στη λίμνη πέθαναν	Η γέννηση ορισμένων ειδών ίσως επηρεαστεί	Η λίμνη αποκλείστηκε για αποκατάσταση για 8 χρόνια και ο ποταμός για 5 χρόνια

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
19/8/94 Rho Ιταλία	Απελευθέρωση πετροχημικών από διαρροή στο χώρο που υπήρχε το σύστημα εκτόξευσης της πυρόσβεσης το οποίο ενώνεται με τη δεξαμενή των πετροχημικών	Acetone cyanohydrin (2- Methylactonitrile 2-Hydroxy-2 methyl-propionitrile alfa-hydroxyisobutyronitrile	298 τόνοι		Υπόγειο νερό	Μόλυνση του νερού κυρίως στο επίπεδο των 6-8 μέτρων	Έλεγχος της μόλυνσης καθημερινά από 25 πηγάδια	
4/9/95 Ποταμός Erre Γαλλία	Απελευθέρωση εντομοκτόνων από αποθήκη λόγω ανθρώπινου λάθους στη διαδικασία	Εντομοκτόνο	Άγνωστη		Ποταμός	Μόλυνση του ποταμού σε ακτίνα 12 χιλ., ορισμένα είδη ψαριών και υδρόβιων ειδών πέθαναν		
28/2/96 Ρότερνταμ Νορβηγία	Μεγάλη πυρκαγιά σε αποθήκη κοντά σε λιμάνι, μόλυνση του νερού από το νερό της πυρόσβεσης που περιείχε χημικά	Calcium hydrochlorite, Trichloreisocyanic acid	Άγνωστη		Ποταμός και θάλασσα	Σημαντική μόλυνση του νερού και διαταραχή της καθημερινής ζωής της γύρω περιοχής		
6/8/96 Ποταμός Meurthe Γαλλία	Πυρκαγιά και έκρηξη σε αποθήκη, μόλυνση των φυσικών υδάτων από το νερό της βροχής και της πυρόσβεσης	Εντομοκτόνα και φυτοφάρμακα	200 κυβικά μέτρα νερό πυρόσβεσης απελευθερώθηκαν		Ποταμός	1.6 τόνοι πεθασμένα ψάρια, η κολύμβηση, η χρήση νερού και το ψάρεμα στον ποταμό απαγορεύτηκε, αύξηση της ροής του νερού από μία παρακείμενη λίμνη βοήθησε στην αποκατάσταση της μόλυνσης		

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
5/4/97 Courantd Mimizan Γαλλία	Απελευθέρωση 21 κυβικών μέτρων χλωρίνης στο νερό λόγω βλάβης σε αγωγό	Διάλυμα 50 βαθμών από χλωριούχο νάτριο	21 κυβικά μέτρα		Ποταμός	Όλη η χλωρίδα και πανίδα 14 χιλιομέτρα κατά μήκος του ποταμού Courantde Mimizan καταστράφηκε		
2/9/97 Ποταμός Meurthe Γαλλία	Ένα φορτηγό για μολυσμένο νερό φορτώθηκε από λάθος με επικίνδυνες ουσίες, η εταιρεία που ανέλαβε να αντικαταστήσει το φορτίο έριξε τα χημικά στην υδρορροή	ethoxylated Alkylphenol και τα προϊόντα του όταν έρθει σε επαφή με το νερό			Ποταμός	Ο ποταμός μολύνθηκε σε ακτίνα 15 χιλ. και πέθαναν ψάρια (1 τόνος)		
16/7/98 Γαλλία	Λάθος του συστήματος επεξεργασίας λυμάτων με αποτέλεσμα το μολυσμένο νερό να εισέλθει σε ποταμό, ανθρώπινο λάθος και ανεπάρκεια του ελέγχου			Ποταμός	Μόλυνση του ποταμού και θάνατος ψαριών	Το κόστος της αποκατάστασης του ποταμού είναι άγνωστο		
28/7/98 Γαλλία	Υπερφόρτωση πλοίου και υπερχειλίση του φράγματος λόγω ανθρώπινου λάθους, εκροή στον ποταμό από την υδρορροή	Χλωρίνη	Άγνωστη		Ποταμός	Ένας ποταμός μολύνθηκε σε μήκος 1.5 χιλ. και ένας άλλος σε μήκος 4 χιλ., τα ψάρια πέθαναν		

Τόπος - Χρόνος	Αιτία ατυχήματος	Εμπλεκόμενη ουσία	Ποσότητα που Απελευθερώθηκε στο περιβάλλον	Αποθηκευμένη ποσότητα	Οικοσύστημα που επηρεάστηκε	Βραχυχρόνιες συνέπειες	Μακροχρόνιες συνέπειες	Διάρκεια αποκατάστασης
24/3/89 Prince William Αλάσκα ΗΠΑ (Exxon Valdez)	Διαρροή ακατέργαστου πετρελαίου κατά την εγκατάσταση υπόγειας δεξαμενής, υποψία για ανθρώπινη αμέλεια	Ακατέργαστο πετρέλαιο	11 εκατομμύρια γαλόνια - 37,400 τόνοι		Θάλασσα και ακτή	Η μόλυνση σε 1090 μίλια ακτής σκότωσε μεγάλο αριθμό άγριων ζώων (πουλιά και ψάρια) και το πλακτόν της περιοχής καταστράφηκε, κόστος καθαρισμού \$1.2 δις		Πολλά χρόνια
31/5/98 Ποταμός Enns. Styer Αυστρία	Διαρροή πετρελαίου θέρμανσης από δεξαμενή 1000 κυβικών μέτρων για το σύστημα θέρμανσης, η διαρροή έγινε κατά τη διάρκεια ελέγχου	Πετρέλαιο	70 κυβικά μέτρα	700 κυβικά μέτρα	Ποταμός	Μόλυνση σε απόσταση 34 χιλ., 9 εβδομάδες μετά τη διαρροή τα πηγάδια του πόσιμου νερού περιείχαν υδρογονάνθρακες		
31/3/2000 Baia Mare Ρουμανία	Μεγάλη χιονοστιβάδα κατέστρεψε μία λίμνη λυμάτων στο ορυχείο χρυσού Asurgul, τα λύματα που περιείχαν κυάνιο εισήλθαν στον ποταμό Tisza και από εκεί στο Δούναβη	Λύματα που περιείχαν κυάνιο			Ποταμός	Μόλυνση με κυάνιο των ποταμών Tisza, Danube και πολύ σοβαρές καταστροφές στο οικοσύστημα		

Πίνακας Π.3: Κατονομαζόμενες Ουσίες & Οριακές Ποσότητες (οδηγία Seveso II, ΚΥΑ 12044/613/2007).

ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΗ ΟΥΣΙΑ	Οριακές ποσότητες επικίνδυνης ουσίας (σε τόνους)	
	Στήλη 2	Στήλη 3
Νιτρικό αμμώνιο (βλ. σημείωση 1)	5000	10000
Νιτρικό αμμώνιο (βλ. σημείωση 2)	1250	5000
Νιτρικό αμμώνιο (βλ. σημείωση 3)	350	2500
Νιτρικό αμμώνιο (βλ. σημείωση 4)	10	50
Νιτρικό κάλιο (βλ. σημείωση 5)	5000	10000
Νικτρικό κάλιο (βλ. σημείωση 6)	1250	5000
Πεντοξειδίο του αρσενικού, αρσενικό οξύ (V) και αρσενικά άλατα	1	2
Τριοξειδίο του αρσενικού, αρσενικόδες (III) και άλατά του		0,1
Βρώμιο	20	100
Χλώριο	10	25
Ενώσεις του νικελίου υπό μορφή εισπνεύσιμων κόνεων (μονοξειδίο του νικελίου, διοξειδίο του νικελίου, θειούχο νικέλιο, διθειούχο τρινικέλιο, τριοξειδίο του δινικελίου)		1
Αιθυλενοϊμίνη	10	20
Φθόριο	10	20
Φορμαλδεΐδη (συγκέντρωση $\geq 90\%$)	5	50
Υδρογόνο	5	50
Υδροχλώριο (υγροποιημένο αέριο)	25	250
Αλκυλομολυβδιακές ενώσεις	5	50
Υγροποιημένα αέρια εξαιρετικά εύφλεκτα (συμπεριλαμβανομένου του υγραερίου) και φυσικό αέριο	50	200
Ακετυλένιο	5	50
Αιθυλενοξειδίο	5	50
Προπυλενοξειδίο	5	50
Μεθανόλη	500	5000
4-4-μεθυλενο-δισ-(2-χλωροανιλίνη) και/ή άλατά της υπό μορφή σκόνης		0,01
Ισοκυανικός μεθυλεστέρας		0,15
Οξυγόνο	200	2000
Δισκυανικό τολουένιο	10	100
Διχλωροκαρβονούλιο (φωσγένιο)	0,3	0,75
Αρσίνη	0,2	1
Φωσφίνη	0,2	1
Διχλωριούχο θείο	1	1
Τριοξειδίο του θείου	15	75
Πολυχλωροδιβενζοφουράνια, πολυχλωροδιβενζοδιοξίνες (συμπεριλαμβανομένης της TCDD), εκφρασμένα σε ισοδύναμα TCDD		0,001
Τα ακόλουθα ΚΑΡΚΙΝΟΓΟΝΑ: 4-Αμινοδιφαινύλιο ή/και τα άλατά του, βενζοτριχλωρίδιο, βενζιδίνη ή/και τα άλατά της, δισ (χλωρομεθύλ) αιθέρας, χλωρομεθυλομεθυλαιθέρας, 1,2-διβρωμοαιθάνιο, θειικό διαιθύλιο, θειικό διμεθύλιο, διμεθυλοκαρβαμοϋλοχλωρίδιο, 1,2-διβρωμο.3.χλωροπροπάνιο, 1,2-διμεθυλδραζίνη, διμεθυλονιτροζομίνη, εξαμεθυλοφωσφορικό τριαμίδιο, υδραζίνη, 2-ναφθυλαμίνη ή/και τα άλατά της, 4-νιτροδιφαινύλιο, 1,3-προπανοσουλτόνη	0,5	2
Πετρελαϊκά προϊόντα: α) βενζίνη και νάφθα, β) κηροζίνη (συμπεριλαμβανομένων των καύσιμων αεριοθεωρούμενων), γ) πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (συμπεριλαμβανομένου του καυσίμου ντήζελ, του πετρελαίου θέρμανσης και των μειγμάτων πετρελαίων εσωτερικής καύσης)	2500	25000

Σημειώσεις

(1) Νιτρικό αμμώνιο (5000/10000): λιπάσματα ικανά για αυτοσυντηρούμενη αποσύνθεση. Ισχύει για σύνθετα λιπάσματα με βάση το νιτρικό αμμώνιο (ένα σύνθετο λίπασμα περιέχει νιτρικό αμμώνιο και φωσφορικά άλατα ή/ και ανθρακικό κάλιο), στα οποία η περιεκτικότητα σε άζωτο που προκύπτει από το νιτρικό αμμώνιο είναι:

- μεταξύ 15,75%¹⁵ και 24,5%¹⁶ κατά βάρος, και με συνολικά καύσιμα/οργανικά υλικά, είτε όχι άνω του 0,4%, είτε που πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος II της οδηγίας 80/876(ΕΟΚ),
 - 15,75%¹¹ κατά βάρος ή λιγότερο και με απεριόριστα καύσιμα υλικά,
- και τα οποία είναι ικανά για αυτοσυντηρούμενη αποσύνθεση σύμφωνα με τη δοκιμή της σκάφης των ΗΕ (βλ. συστάσεις των Ηνωμένων Εθνών περί μεταφοράς επικινδύνων εμπορευμάτων: εγχειρίδιο δοκιμών και κριτηρίων μέρος III εδάφιο 38.2).

(2). Νιτρικό αμμώνιο (1250/5000): τύπος χαρακτηρισμού λιπάσματος.

Ισχύει για απλά λιπάσματα με βάση το νιτρικό αμμώνιο, καθώς και τα σύνθετα λιπάσματα με βάση το νιτρικό αμμώνιο, στα οποία η περιεκτικότητα σε άζωτο που προκύπτει από το νιτρικό αμμώνιο είναι:

- μεγαλύτερη του 24,5% κατά βάρος, πλην των μειγμάτων νιτρικού αμμωνίου με δολομίτη, ασβεστόλιθο ή/και ανθρακικό ασβέστιο καθαρότητας τουλάχιστον 90%,
 - μεγαλύτερη του 15,75% κατά βάρος, προκειμένου για μείγματα νιτρικού και θεικού αμμωνίου,
 - μεγαλύτερη του 28%¹⁷ κατά βάρος, προκειμένου για μείγματα νιτρικού αμμωνίου με δολομίτη, ασβεστόλιθο ή/ και ανθρακικό ασβέστιο καθαρότητας τουλάχιστον 90%,
- και που πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος II της οδηγίας 80/876/ΕΟΚ.

(3). Νιτρικό αμμώνιο (350/2 500): τεχνική ποιότητα.

Ισχύει για το νιτρικό αμμώνιο και τα παρασκευάσματα νιτρικού αμμωνίου στα οποία η περιεκτικότητα σε άζωτο που προκύπτει από το νιτρικό αμμώνιο είναι:

- μεταξύ 24,5% και 28% κατά βάρος και τα οποία περιέχουν το πολύ 0,4% καύσιμες ουσίες,
- μεγαλύτερη του 28% κατά βάρος και τα οποία περιέχουν το πολύ 0,2% καύσιμες ουσίες,
- υδατικά διαλύματα νιτρικού αμμωνίου στα οποία η συγκέντρωση νιτρικού αμμωνίου είναι άνω του 80% κατά βάρος.

(4). Νιτρικό αμμώνιο (10/50): υλικό «εκτός προδιαγραφών» και λιπάσματα που δεν ανταποκρίνονται επιτυχώς στη δοκιμή εκρηκτικότητας.

Ισχύει για:

- τα υλικά που έχουν απορριφθεί κατά τη διαδικασία κατασκευής και για το νιτρικό αμμώνιο και τα παρασκευάσματα νιτρικού αμμωνίου, τα απλά λιπάσματα με βάση το νιτρικό αμμώνιο και τα σύνθετα λιπάσματα με βάση το νιτρικό αμμώνιο που αναφέρονται στις σημειώσεις 2 και 3, τα οποία επιστρέφονται ή έχουν επιστραφεί από τον τελικό χρήστη στον κατασκευαστή, σε εγκατάσταση προσωρινής αποθήκευσης ή επανεπεξεργασίας προκειμένου να υποβληθούν και πάλι σε διεργασίες, ανακύκλωση ή επεξεργασία για την ασφαλή τους χρησιμοποίηση, επειδή δεν πληρούν πλέον τις προδιαγραφές των σημειώσεων 2 και 3,
- λιπάσματα που αναφέρονται στη σημείωση 1, πρώτη περίπτωση και στη σημείωση 2, τα οποία δεν πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος II της οδηγίας 80/876/ΕΟΚ.

(5). Νιτρικό κάλιο (5.000/10.000): σύνθετα λιπάσματα με βάση το νιτρικό κάλιο, τα οποία περιέχουν νιτρικό κάλιο υπό μορφή βόλων/ κόκκων.

(6). Νιτρικό κάλιο (1250/5000): σύνθετα λιπάσματα με βάση το νιτρικό κάλιο, τα οποία περιέχουν νιτρικό κάλιο σε κρυσταλλική μορφή.

(7). Πολυχλωροδιβενζοφουράνια και πολυχλωροδιβενζοδιοξίνες. Οι ποσότητες πολυχλωροδιβενζοφουράνιων και πολυχλωροδιβενζοδιοξινών υπολογίζονται με τους ακόλουθους σταθμιστικούς συντελεστές.

¹⁵ Αντιστοιχεί σε 45% νιτρικό αμμώνιο.

¹⁶ Αντιστοιχεί σε 70% νιτρικό αμμώνιο.

¹⁷ Αντιστοιχεί σε 80% νιτρικό αμμώνιο.

Διεθνείς συντελεστές ισοδύναμης τοξικότητας (ITEF) για τις υπόψη χημικές ουσίες (NATO/CCMS)			
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0,1
1,2,3,7,8-PeDD	0,5	2,3,4,7,8-PeCDF	0,5
		1,2,3,7,8-PeCDF	0,05
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1		
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1
		1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1
OCDD	0,001	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01
		OCDF	0,01

(T . τετρα, P . πεντα, Hx . εξα, Hp . επτα, O . οκτα)

Πίνακας Π. 4: Κατηγορίες ουσιών και παρασκευασμάτων που δεν κατονομάζονται συγκεκριμένα στο Μέρος 1 & Οριακές ποσότητες (οδηγία Seveso II, ΚΥΑ 12044/613/2007).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	Οριακές ποσότητες επικίνδυνης ουσίας (σε τόνους)	
	Στήλη 2	Στήλη 3
1. ΠΟΛΥ ΤΟΞΙΚΕΣ	5	20
2. ΤΟΞΙΚΕΣ	50	200
3. ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΕΣ	50	200
4. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ (βλ. σημείωση 2) (όταν η ουσία, το παρασκεύασμα ή το αντικείμενο εμπίπτει στη διαίρεση 1.4 της μεθόδου ταξινόμησης UN/ADR)	50	200
5. ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ (βλ. σημείωση 2) (όταν η ουσία, το παρασκεύασμα ή το αντικείμενο εμπίπτει σε μια από τις διαίρεσεις 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6 ή την ένδειξη κινδύνου R2 ή R3 της μεθόδου ταξινόμησης UN/ADR)	10	50
6. ΕΥΦΛΕΚΤΕΣ (όταν η ουσία ή το παρασκεύασμα εμπίπτει στον ορισμό της σημείωσης 3 στοιχείο (α))	5000	50000
7 ^α . ΠΟΛΥ ΕΥΦΛΕΚΤΕΣ (όταν η ουσία ή το παρασκεύασμα εμπίπτει στον ορισμό της σημείωσης 3 στοιχείο (β) σημείο 1)	50	200
7 ^β . ΠΟΛΥ ΕΥΦΛΕΚΤΑ ΥΓΡΑ (όταν η ουσία ή το παρασκεύασμα εμπίπτει στον ορισμό της σημείωσης 3 στοιχείο (β) σημείο 2)	5000	50000
8. ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΕΥΦΛΕΚΤΕΣ (όταν η ουσία ή το παρασκεύασμα εμπίπτει στον ορισμό της σημείωσης 3 στοιχείο (γ))	10	50
9. ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: R50: "Πολύ τοξική για τους υδρόβιους οργανισμούς (συμπεριλαμβανομένης της R50/53)" R51/53: "Τοξική για υδρόβιους οργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει μακροπρόθεσμα ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον"	100 200	200 500
10. ΚΑΘΕ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ που δεν καλύπτεται από τις ανωτέρω, σε συνδυασμό με τις ακόλουθες ενδείξεις κινδύνου: R14: "Αντιδρά βίαια με το νερό" (συμπεριλαμβάνονται R14/15) R29 "Η επαφή με το νερό απελευθερώνει τοξικά αέρια"	100 50	500 200

Σημειώσεις

(1). Οι ουσίες και τα παρασκευάσματα ταξινομούνται σύμφωνα με τις ακόλουθες οδηγίες και τη μέχρι σήμερα προσαρμογή τους στην τεχνική πρόοδο:

- ❖ οδηγία 67/548/ΕΟΚ του Συμβουλίου, της 27ης Ιουνίου 1967, περί προσεγγίσεως των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων που αφορούν στην ταξινόμηση, συσκευασία και επισήμανση των επικινδύνων ουσιών
- ❖ οδηγία 1999/45/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 31ης Μαΐου 1999, για την προσέγγιση των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των κρατών μελών που αφορούν την ταξινόμηση, συσκευασία και επισήμανση των επικίνδυνων παρασκευασμάτων.

Στην περίπτωση ουσιών και παρασκευασμάτων που δεν έχουν ταξινομηθεί ως επικίνδυνα με βάση κάποια από τις ανωτέρω οδηγίες, π.χ. αποβλήτων, αλλά που εντούτοις υπάρχουν ή ενδέχεται να υπάρχουν σε μια μονάδα και που εμφανίζουν, ή ενδέχεται να εμφανίσουν, υπό τις συνθήκες που επικρατούν στη μονάδα, ισοδύναμες ιδιότητες όσον αφορά την πιθανότητα πρόκλησης μεγάλων ατυχημάτων, τηρούνται οι διαδικασίες για προσωρινή ταξινόμηση σύμφωνα με το σχετικό άρθρο της ενδεδειγμένης οδηγίας.

Στην περίπτωση ουσιών και παρασκευασμάτων με ιδιότητες που επιτρέπουν ταξινόμηση σε περισσότερες της μιας κατηγορίες, για τους σκοπούς της ΚΥΑ 12044/613/2007 ισχύουν οι μικρότερες οριακές τιμές. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή του κανόνα στη σημείωση 4, η χρησιμοποιούμενη εγκεκριμένη ποσότητα είναι πάντα αυτή η οποία αντιστοιχεί στη σχετική ταξινόμηση. Για τους σκοπούς της οδηγίας για τα BAME, η Επιτροπή εκπονεί και ενημερώνει κατάλογο ουσιών που έχουν ταξινομηθεί στις ανωτέρω κατηγορίες βάσει εναρμονισμένης απόφασης σύμφωνα με την οδηγία 67/548/ΕΟΚ.

(2). Ως «εκρηκτικό» νοείται:

- κάθε ουσία ή παρασκεύασμα που δημιουργεί τον κίνδυνο έκρηξης λόγω κρούσης, τριβής, φλόγας ή άλλων πηγών ανάφλεξης (ένδειξη κινδύνου R 2),
- κάθε ουσία ή παρασκεύασμα που δημιουργεί ιδιαίτερα υψηλό κίνδυνο έκρηξης λόγω κρούσης, τριβής, φλόγας ή άλλων πηγών ανάφλεξης (ένδειξη κινδύνου R 3),
- κάθε ουσία, παρασκεύασμα ή αντικείμενο που ταξινομείται στην κατηγορία 1 της ευρωπαϊκής συμφωνίας για τη διεθνή οδική μεταφορά επικινδύνων εμπορευμάτων (μέθοδος ταξινόμησης UN/ADR), η οποία συνάφθηκε στις 30 Σεπτεμβρίου 1957 όπως τροποποιήθηκε και όπως μεταφέρθηκε από την οδηγία 94/55/ΕΚ του Συμβουλίου, της 21ης Νοεμβρίου 1994, για την προσέγγιση των νομοθεσιών των κρατών μελών σχετικά με τις οδικές μεταφορές επικινδύνων εμπορευμάτων.

Ο ορισμός αυτός καλύπτει και τις πυροτεχνικές ουσίες οι οποίες ορίζονται ως ουσίες (ή μείγματα ουσιών) που προορίζονται να παράγουν θερμότητα, φως, ήχο, αέριο ή καπνό ή συνδυασμό των αποτελεσμάτων αυτών μέσω εξώθερμων αυτοσυντηρούμενων χημικών αντιδράσεων.

Όταν μια ουσία ή ένα παρασκεύασμα ταξινομούνται και με τη μέθοδο UN/ADR και με την ένδειξη κινδύνου R 2 ή R 3, η ταξινόμηση κατά UN/ADR υπερισχύει των ενδείξεων κινδύνου.

Οι ουσίες και τα αντικείμενα της κατηγορίας 1 ταξινομούνται σε οποιαδήποτε από τις διαιρέσεις κινδύνου 1.1 έως 1.6 σύμφωνα με τη μέθοδο ταξινόμησης UN/ADR. Οι διαιρέσεις έχουν ως εξής:

- Διαίρεση 1.1: «Ουσίες και αντικείμενα που ενέχουν κίνδυνο μαζικής έκρηξης (ως μαζική έκρηξη ορίζεται η έκρηξη η οποία επηρεάζει ουσιαστικά αυτοστιγμεί σχεδόν το σύνολο της γόμωσης)».
- Διαίρεση 1.2: «Ουσίες και αντικείμενα τα οποία ενέχουν κίνδυνο εκτόξευσης χωρίς να ενέχουν κίνδυνο μαζικής έκρηξης».
- Διαίρεση 1.3: «Ουσίες και αντικείμενα που ενέχουν κίνδυνο πυρκαγιάς και είτε περιορισμένο κίνδυνο έκρηξης, είτε ήσσονος σημασίας κίνδυνο εκτόξευσης είτε αμφοτέρους, όχι όμως κίνδυνο μαζικής έκρηξης: α) των οποίων η καύση έχει ως αποτέλεσμα την ακτινοβολία σημαντικής θερμότητας, ή β) τα οποία καίγονται το ένα μετά το άλλο με περιορισμένες εκρήξεις ή εκτοξεύσεις ή με αμφοτέρα τα ως άνω φαινόμενα».
- Διαίρεση 1.4: «Ουσίες και αντικείμενα τα οποία ενέχουν περιορισμένο κίνδυνο σε περίπτωση ανάφλεξης ή έναρξης ανάφλεξης κατά τη μεταφορά. Τα αποτελέσματα ως επί το πλείστον περιορίζονται στο επίπεδο της συσκευασίας και δεν αναμένεται εκτόξευση θραυσμάτων σημαντικού μεγέθους ή σε μεγάλη απόσταση. Εξωτερική φλόγα δεν προκαλεί, ουσιαστικά αυτοστιγμεί έκρηξη ολόκληρου του περιεχομένου της συσκευασίας».
- Διαίρεση 1.5: «Πολύ αδρανείς ουσίες που ενέχουν κίνδυνο μαζικής έκρηξης, αλλά είναι τόσο αδρανείς ώστε η πιθανότητα έναρξης του φαινομένου ή μετάβασης από την καύση στην έκρηξη υπό φυσιολογικές συνθήκες μεταφοράς να είναι πολύ χαμηλή. Ως στοιχειώδης απαίτηση θεωρείται η μη έκρηξη τους κατά τη δοκιμασία εξωτερικής φλόγας».
- Διαίρεση 1.6: «Εξαιρετικά αδρανή αντικείμενα που δεν ενέχουν κίνδυνο μαζικής έκρηξης. Τα αντικείμενα αυτά περιλαμβάνουν μόνον ιδιαίτερα αδρανείς εκρηκτικές ουσίες και συνεπάγονται αμελητέα πιθανότητα συμπτωματικής έναρξης ή διάδοσης των εν λόγω φαινομένων. Ο κίνδυνος περιορίζεται στην έκρηξη ενός και μόνον αντικειμένου».

Περιλαμβάνονται στον παρόντα ορισμό εκρηκτικές ή πυροτεχνικές ουσίες ή παρασκευάσματα που περιέχονται σε αντικείμενα. Σε περιπτώσεις αντικειμένων που περιέχουν εκρηκτικές ή πυροτεχνικές ουσίες ή παρασκεύασμα, εάν είναι γνωστή η ποσότητα της ουσίας ή παρασκευάσματος που περιέχονται στο αντικείμενο, λαμβάνεται υπόψη η εν λόγω ποσότητα. Εάν η ποσότητα είναι άγνωστη, αντιμετωπίζεται ως εκρηκτικό ολόκληρο το αντικείμενο.

(3). Ως “εύφλεκτες”, “πολύ εύφλεκτες” και “εξαιρετικά εύφλεκτες” ουσίες (κατηγορίες 6, 7, 8) νοούνται:

α) εύφλεκτα υγρά: ουσίες και παρασκευάσματα που έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο από 21°C και μικρότερο ή ίσο προς 55°C (φράση κινδύνου R 10) και συντηρούν την καύση

β) πολύ εύφλεκτα υγρά:

- ουσίες και παρασκευάσματα που μπορεί να θερμανθούν και, τελικά, να αναφλεγούν σε επαφή με τον αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς παροχή ενέργειας (φράση κινδύνου R 17),
- ουσίες που έχουν σημείο ανάφλεξης χαμηλότερο από 55°C και που παραμένουν σε υγρή κατάσταση υπό πίεση, στις περιπτώσεις όπου ιδιαίτερες συνθήκες επεξεργασίας, όπως υψηλή πίεση και υψηλή θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσουν κινδύνους μεγάλου ατυχήματος,
- ουσίες και παρασκευάσματα με σημείο ανάφλεξης κατώτερο από 21°C και που δεν είναι εξαιρετικά εύφλεκτες (φράση κινδύνου R 11, δεύτερη περίπτωση),

γ) εξαιρετικά εύφλεκτα αέρια και υγρά:

- υγρές ουσίες και παρασκευάσματα που έχουν σημείο ανάφλεξης μικρότερο από 0°C και των οποίων το σημείο βρασμού (ή, στην περίπτωση κλίμακας θερμοκρασιών βρασμού, το αρχικό σημείο βρασμού) είναι, υπό κανονική πίεση, μικρότερο ή ίσο προς 35°C, (φράση κινδύνου R12 πρώτη περίπτωση),
- αέρια τα οποία είναι εύφλεκτα όταν έρθουν σε επαφή με τον αέρα σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος (φράση κινδύνου R12, δεύτερη περίπτωση) και τα οποία βρίσκονται σε αέρια ή υπερκρίσιμη κατάσταση,
- εύφλεκτες και ιδιαίτερα εύφλεκτες υγρές ουσίες και παρασκευάσματα που διατηρούνται σε θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο βρασμού τους.

(4). Εάν σε μια μονάδα δεν υπάρχει επιμέρους ουσία ή παρασκεύασμα σε ποσότητα ίση ή μεγαλύτερη των αντίστοιχων οριακών ποσοτήτων, εφαρμόζεται ο ακόλουθος κανόνας προκειμένου να προσδιορισθεί κατά πόσο η μονάδα καλύπτεται από τις αντίστοιχες απαιτήσεις της ΚΥΑ 12044/613/2007.

Η ΚΥΑ 12044/613/2007 εφαρμόζεται όταν το άθροισμα $q1/Qu1 + q2/Qu2 + q3/Qu3 + q4/Qu4 + q5/Qu5 + \dots$ είναι μεγαλύτερο από ή ίσο προς 1, όπου $q_x = \eta$ ποσότητα της επικίνδυνης ουσίας x (ή της κατηγορίας των επικίνδυνων ουσιών) που εμπίπτει στα μέρη 1 ή 2 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακες 1,2 αντίστοιχα, και $Qu_x = \eta$ αντίστοιχη εγκεκριμένη ποσότητα για την ουσία ή την κατηγορία x της στήλης 3 των μερών 1 ή 2 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακες 1,2 αντίστοιχα).

Η ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακες 1,2 αντίστοιχα), πλην των προβλέψεων σχετικά με τη μελέτη ασφάλειας, τα σχέδια έκτακτης ανάγκης, τις πληροφορίες για τα μέτρα ασφάλειας και την ενημέρωση κοινού, εφαρμόζεται όταν το άθροισμα $q1/QL1 + q2/QL2 + q3/QL3 + q4/QL4 + q5/QL5 + \dots$ είναι μεγαλύτερο από ή ίσο προς 1, όπου $q_x = \eta$ ποσότητα της επικίνδυνης ουσίας x (ή της κατηγορίας των επικινδύνων ουσιών) που εμπίπτει στα μέρη 1 ή 2 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακες 1,2 αντίστοιχα, και $QL_x = \eta$ αντίστοιχη εγκεκριμένη ποσότητα για την ουσία ή την κατηγορία x της στήλης 2 των μερών 1 ή 2 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακες 1,2 αντίστοιχα). Ο κανόνας αυτός χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των συνολικών κινδύνων που σχετίζονται με την τοξικότητα, την αναφλεξιμότητα και την οικοτοξικότητα. Κατά συνέπεια, πρέπει να εφαρμόζεται τρεις φορές:

α) για την προσθήκη των ουσιών και παρασκευασμάτων που κατονομάζονται στο μέρος 1 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακας 1) και ταξινομούνται ως τοξικά ή πολύ τοξικά, από κοινού με τις ουσίες και παρασκευάσματα που εμπίπτουν στις κατηγορίες 1 ή 2,

β) για την προσθήκη των ουσιών και παρασκευασμάτων που κατονομάζονται στο μέρος 1 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακας 1) και ταξινομούνται ως οξειδωτικά, εκρηκτικά, εύφλεκτα, πολύ εύφλεκτα ή εξαιρετικά εύφλεκτα, από κοινού με τις ουσίες και παρασκευάσματα που εμπίπτουν στις κατηγορίες 3, 4, 5, 6, 7α, 7β ή 8,

γ) για την προσθήκη των ουσιών και παρασκευασμάτων που κατονομάζονται στο μέρος 1 της ΚΥΑ 12044/613/2007 (πίνακας 1) και ταξινομούνται ως επικίνδυνα για το περιβάλλον [R 50 (συμπεριλαμβανομένου του R 50/53) ή R 51/53], από κοινού με τις ουσίες και παρασκευάσματα που ανήκουν στις κατηγορίες 9 σημείο i) ή 9 σημείο ii).

Οι σχετικές διατάξεις της ΚΥΑ 12044/613/2007 εφαρμόζονται όταν οποιοδήποτε από τα ως άνω αθροίσματα α), β) ή γ) είναι μεγαλύτερο από ή ίσο προς 1.



Σχήμα Π. 1: Βιομηχανικές εγκαταστάσεις που υπάγονται στην οδηγία Seveso II (άνω όριο ● και κάτω όριο ●).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abbasi,T. and S.A.Abbasi. 2007. "The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management." *Journal of Hazardous Materials*. 141:489-519.
2. Abdolhamidzadeh,B., T.Abbasi, D.Rashtchian, and S.A.Abbasi. 2011. "Domino effect in process-industry accidents - An inventory of past events and identification of some patterns." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 24:575-593.
3. Acquilla,S., R.Bertell, V.R.Dhara, and G.Tognoni. 2007. "Aftermath of the world's worst chemical disaster: Bhopal, December 1984." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 18:268-273.
4. Afandizadeh,S., A.Jahangiri, and N.Kalantari. 2000. "Determination of the optimal network configuration for emergency evacuation by simulated annealing algorithm." *Environmental Science And Sustainability*.65-71.
5. Alfa,A.S. 1995. "Modelling traffic queues at a signalized intersection with vehicle-actuated control and Markovian Arrival Processes." *Computers & Mathematics with Applications*. 30:105-119.
6. Alsnih,R. and P.Stopher. 2004. "Review of Procedures Associated with Devising Emergency Evacuation Plans." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1865:89-97.
7. API. Guide for pressure relieving and depressing systems, API Recommended Practice 521. 2nd Edition. 1982. Washington D.C., American Petroleum Institute.
8. Argonne National Laboratory. Temporary Shelter-In-Place as Protection Against a Release of Airborne Hazardous Material: Report of a Literature Search, Report prepared for the Federal Emergency Management Agency Preparedness. 2001. USA, Argonne National Laboratory, Report prepared by the Decision and Information Sciences Division for the Federal Emergency Management Agency. Training and Exercises Directorate.
9. Bakuli,D.L. and J.MacGregor Smith. 1996. "Resource allocation in state-dependent emergency evacuation networks." *European Journal of Operational Research*. 89:543-555.
10. Barrett,B., B.Ran, and R.Pillai. 2000. "Developing a Dynamic Traffic Management Modeling Framework for Hurricane Evacuation." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1733:115-121.
11. Behling,U.H. and J.E.Hildebrand. Radiation and health effects. A report on the TMI-2 Accident and Related Health Studies. 1986. Middletown, Pennsylvania, USA, JPU Nuclear Corporation.
12. Bennett,B., M.Repacholi, and Z.Carr. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. 2006. Geneva, World Health Organization.
13. Bertazzi,P.A., I.Bernucci, G.Brambilla, D.Consonni, and A.C.Pesatori. 1998. "The Seveso studies on early and long-term effects of dioxin exposure: A review." *Environmental Health Perspectives*. 106:625-633.

14. Bjornhagen,V., T.Messner, and H.Brandstrom. Explosion at the Fireworks Warehouse in the Netherlands in 2000. 2006. Prehospital and Disaster Medicine, KAMEDO Report No. 82.
15. Broadribb,M.P. 2006. "Lessons from Texas City A Case History." *As presented at the American Institute of Chemical Engineers 40th Annual Loss Prevention Symposium and Center for Chemical Process Safety 21st Annual International Conference, Loss Prevention Bulletin.* Orlando, Florida.3-12.
16. Broughton,E. 2005. "The Bhopal disaster and its aftermath: a review." *Environmental Health.* 4:1-6.
17. Cardis,E. 2006. "Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years on." *Journal of Radiological Protection.* 26:127.
18. Carey,M. and M.McCartney. 2004. "An exit-flow model used in dynamic traffic assignment." *Computers & Operations Research.* 31:1583-1602.
19. Carol,S., J.A.Vilchez, and J.Casal. 2002. "Study of the severity of industrial accidents with hazardous substances by historical analysis." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 15:517-524.
20. Casal,J. 2008. "Preface." In C.Joaquim, editor, *Industrial Safety Series Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants.* Elsevier. VII-VIII.
21. Casavant,D. Emergency preparedness for facilities, A guide to safety planning and business continuity. 2003. Maryland, USA, Government Institutes.
22. CCPS. Guidelines for evaluating the characteristics of vapour cloud explosions, flash fires and BLEVEs. 1994. New York, CCPS - Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
23. Chan,W.R. Assessing the Effectiveness of Shelter-in-Place as an Emergency Response to Large-Scale Outdoor Chemical Releases. 2006. PhD Thesis, Berkley, Engineering - Civil and Environmental Engineering, University of California.
24. Charnes,A. and W.W.Cooper. 1961. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming.* Wiley. New York.
25. Chen,P.H. and F.Feng. 2009. "A fast flow control algorithm for real-time emergency evacuation in large indoor areas." *Fire Safety Journal.* 44:732-740.
26. Chen,X. and F.B.Zhan. 2005. "Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies." *84th TRB Annual meeting.* Transportation Research Board (TRB). Washington D.C.
27. Cheng,Y.H., C.Shih, S.C.Jiang, and T.L.Weng. 2008. "Development of accident dose consequences simulation software for nuclear emergency response applications." *Annals of Nuclear Energy.* 35:917-926.
28. Chin-Ping Chang,E. Traffic simulation for effective emergency evacuation. EDCPC.ORNL. 03/2003. 2003. Oak Ridge National Laboratory.
29. Christolis,M. and N.C.Markatos. 2008. "Technological Accidents and the Directive Seveso II." *Tomorrow in risk - natural and technological disasters in Greece and Europe.* Gutemberg.

30. Christolis, M., E. Georgiadou, G. Sideris, and N.C. Markatos. 2008. "Major accidents involving hazardous materials: occupational safety risk assessment." *4th International Conference of Working On Safety. Net*. Crete, Greece.
31. Christou, M.D. Substances dangerous for the environment in the context of Council Directive 96/82/EC. 2000. Report by Technical Working Group 7, European Commission, Joint Research Centre.
32. Coello Coello, C.A. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques. *Knowledge and Information Systems* 1[3], 269-308. 1999.
33. Coello Coello, C.A. 2011. "Fundamentals of Evolutionary Multiobjective Optimization." *Intelligent Systems*. CRC Press. 1-11.
34. Coello Coello, C.A., G.B. Lamont, and D.A.V. Veldhuizen. 2007. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer. New York.
35. Conklin, C. and J. Edwards. 2000. "Selection of protective action guides for nuclear incidents." *Journal of Hazardous Materials*. 75:131-144.
36. Contini, S., F. Bellezza, M.D. Christou, and C. Kirchsteiger. 2000. "The use of geographic information systems in major accident risk assessment and management." *Journal of Hazardous Materials*. 78:223-245.
37. Council Directive 2003/105/EC. Council Directive 2003/105/EC amending Council Directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. 2003. Official J. Eur. Communities.
38. Council Directive 96/82/EC. C Council Directive 96/82/Eof 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. 1996. Official J. Eur. Communities.
39. Cova, T.J. and J.P. Johnson. 2002. "Microsimulation of neighborhood evacuations in the urban - wildland interface." *Environment and Planning A*. 34:2211-2229.
40. Cova, T.J. and J.P. Johnson. 2003. "A network flow model for lane-based evacuation routing." *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 37:579-604.
41. Crick, M., T. McKenna, E. Buglova, G. Winkler, and R. Martincic. 2004. "Emergency management in the early phase." *Radiation Protection Dosimetry*. 109:7-17.
42. Datta, D., K. Deb, K.M. Fonseca, F. Lobo, and P. Condado. Multi-objective evolutionary algorithm for land-use management problem. 2006. KanGAL Report number 2006005.
43. Daugherty, M.L., A.P. Watson, and T. Vo-Dinh. 1992. "Currently available permeability and breakthrough data characterizing chemical warfare agents and their simulants in civilian protective clothing mater." *Journal of Hazardous Materials*. 30:243-267.
44. de Silva, F.N. Providing spatial decision support for evacuation planning: a challenge in integrating technologies. *Disaster Prev and Management* 10[1], 11-20. 2001.
45. Deb, K. 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Wiley. New York.
46. Dechy, N., T. Bourdeaux, N. Ayrault, M.A. Kordek, and J.C. Le Coze. 2004. "First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster, 21st September 2001, AZF plant, France." *Journal of Hazardous Materials*. 111:131-138.

47. Dunn,T. Nuclear accident report faulted. 2002. From: <http://www.disasternews.net/news/article.php?articleid=3037>.
48. Eckhardt,R. 1987. "Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo Method." *Los Alamos Science*. Special Issue:131-143.
49. Eckhoff,R.K. 1997. *Dust explosions in the process industries*. 2nd Edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Butterworth - Heinemann. Oxford.
50. Eckhoff,R.K. 2005. *Explosion hazards in the process industries*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
51. EM-DAT. EM-DAT: The International Disaster Database - Disasters List. <http://www.emdat.be/disaster-list>. 2011.
52. EPA. Acute Exposure Guideline Levels (AEGs). US Environmental Protection Agency. 2011.
53. EPA. Manual of protective action guides and protective actions for nuclear incidents. 1991. Washington DC, US Environmental Protection Agency, EPA 400-R-92-001, US Environmental Protection Agency.
54. European Agency for Safety and Health at Work. A European Campaign on Safe Maintenance - Healthy Workplaces Campaign 2010 - 2011. 2011.
55. European Commision. Chemical Accidents (Seveso II) - Prevention, Preparedness and Response. 2011.
56. Fabiano,B., F.Curr³, A.P.Reverberi, and R.Pastorino. 2005. "Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 18:403-413.
57. Fahy,R.F. 1991. "EXIT 89: an evacuation model for high-rise buildings." In B.L.G.Cox and Elsevier Science, editors.
58. Farahmand,K. 1997. "Application Of Simulation Modeling To Emergency Population Evacuation."1181-1188.
59. Feng,C.-M. and C.-C.Wen. 2005. "A bi-level programming model for allocating private and emergency vehicle flows in seismic disaster areas." *East Asia Soc for Transp Studies*.1408-1423.
60. Ferner,R.E. 1993. "Chemical disasters." *Pharmacology & Therapeutics*. 58:157-171.
61. Field,R.W. 2005. "Three Mile Island epidemiologic radiation dose assessment revisited: 25 years after the accident." *Radiation Protection Dosimetry*. 113:214-217.
62. Franzese,O. and D.Xiong. 2001. "Maintaining large scale emergency evacuation traffic networks using remote sensing and GIS." *GIS-T 2001: Geographic Information Systems for Transportation Symposium*. Virginia.
63. Franzese,O. and J.Sorensen. 2004. "Fast deployable system for consequence management: the emergency evacuation component." *Intelligent Transportation Systems Safety and Security Conf*. Miami Beach Florida.
64. French,S. 1996. "Multi-attribute decision support in the event of a nuclear accident." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 5:39-57.

65. Fu,H. Development of dynamic travel demand models for hurricane evacuation. 2004. Louisiana, Louisiana State University.
66. Fullerton,C.S., R.J.Ursano, and L.Wang. 2004. "Acute Stress Disorder, Posttraumatic Stress Disorder, and Depression in Disaster or Rescue Workers." *American Journal of Psychiatry*. 161:1370-1376.
67. Galea,E.R. and J.M.Perez Galparsoro. 1994. "A computer-based simulation model for the prediction of evacuation from mass-transport vehicles." *Fire Safety Journal*. 22:341-366.
68. Geldermann,J., V.Bertsch, M.Treitz, S.French, K.N.Papamichail, and R.P.HSmSISinen. 2009. "Multi-criteria decision support and evaluation of strategies for nuclear remediation management." *Omega*. 37:238-251.
69. Gen,M. and R.Cheng. 2000. *Genetic algorithms and engineering optimization*. John Wiley & Sons, Inc. Canada.
70. Georgiadou,P.S., I.A.Papazoglou, C.T.Kiranoudis, and N.C.Markatos. 2007. "Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites." *Reliability Engineering & System Safety*. 92:1388-1402.
71. Georgiadou,P.S., I.A.Papazoglou, C.T.Kiranoudis, and N.C.Markatos. 2010. "Multi-objective evolutionary emergency response optimization for major accidents." *Journal of Hazardous Materials*. 178:792-803.
72. Georgiadou,P.S., I.A.Papazoglou, C.T.Kiranoudis, and N.C.Markatos. 2004. "Emergency response optimization for major hazard industrial sites." In Spitzer C., Schmocker U., and Dang V.N., editors, *International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM7 -ESREL '04)*. Berlin, Germany.128-133.
73. Giannakoglou,K.C., D.T.Tsahalis, J.Periaux, K.D.Papailiou, and T.Fogarty. 2001. "Evolutionary methods for design, optimization and control." *EUROGEN 2001 Conference*. Athens, Greece.
74. Giannakoglou,K.C., D.T.Tsahalis, J.Periaux, K.D.Papailiou, and T.Fogarty. 2002. "Evolutionary methods for design, optimization and control." *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)*. Barcelona, Spain.
75. Ginnis,A.I., K.V.Kostas, C.G.Politis, and P.D.Kaklis. 2010. "VELOS: A VR platform for ship-evacuation analysis." *Computer-Aided Design*. 42:1045-1058.
76. Glickman,T.S. and A.M.Ujihara. 1990. "Deciding between in-place protection and evacuation in toxic vapor cloud emergencies." *Journal of Hazardous Materials*. 23:57-72.
77. Godoy,S.M., A.S.M.Santa Cruz, and N.J.Scenna. 2007. "STRRAP system--A software for hazardous materials risk assessment and safe distances calculation." *Reliability Engineering & System Safety*. 92:847-857.
78. Goldblatt,R. 2004. "Evacuation planning: a key part of emergency planning." *83rd TRB Annual meeting, Transportation Research Board (TRB)*. Washington.
79. Govaerts,P. 2004. "Using plant status data for off-site emergency management: technical and political aspects." *Radiation Protection Dosimetry*. 109:31-33.
80. Hamalainen,R.P., M.R.K.Lindstedt, and K.Sinkko. 2000. "Multiattribute Risk Analysis in Nuclear Emergency Management." *Risk Analysis*. 20:455-468.

81. Hatch, M.C., S. Wallenstein, J. Beyea, J.W. Nieves, and M. Susser. Cancer Rates after the Three Mile Island Nuclear Accident and Proximity of Residence to the Plant. *American Journal of Public Health* 81, 719-724. 1991.
82. Hazelton, M.L. 2002. "Day-to-day variation in Markovian traffic assignment models." *Transportation Research Part B: Methodological*. 36:637-648.
83. Hedemann-Jensen, P. 2004. "Protective actions in the late phase GAΦ intervention criteria and decision-making." *Radiation Protection Dosimetry*. 109:45-51.
84. Hobeika, A.G. and B. Jamei. 1985. "MASSVAC: a model calculating evacuation times under natural disasters." *Emergency Planning, Simulation Series*. 15:23-28.
85. Hobeika, A.G. and C. Kim. 1998. "Comparison of Traffic Assignments in Evacuation Modeling." *IEEE Transactions On Engineering Management*. 45:192-198.
86. Howard, R.A. 1971. *Dynamic probabilistic systems*. John Wiley. New York.
87. HSE. A guide to the Control for major accidents hazards regulations 1999. 1999a. UK, HSE - Health and Safety Executive, Crown copyright.
88. HSE. Emergency planning for major accidents, Control for major accidents hazards regulations 1999. 1999b. UK, HSE - Health and Safety Executive, Crown copyright.
89. Hu, C. and D.J. Raymond. 2004. "Lessons learned from hazardous chemical incidents--Louisiana Hazardous Substances Emergency Events Surveillance (HSEES) system." *Journal of Hazardous Materials*. 115:33-38.
90. Hu, P. Integrated solutions for secure transportation: a concept. 2004. Los Angeles, Oak Ridge National Laboratory, Tulane Engineering Forum New Orleans.
91. IAEA. Generic assessment procedures for determining protective actions during a reactor accident. 1997. Vienna, Austria, IAEA - International Atomic Energy Agency.
92. IAEA. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. 1996. Vienna, IAEA - International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency Safety Series No. 115.
93. IAEA. Manual for first responders to a radiological emergency. 2006. Vienna, IAEA - International Atomic Energy Agency, IAEA-EPR-First Responders, IAEA.
94. IAEA. Overview of Nuclear Emergency Preparedness and Response, Iodine Prophylaxis. IAEA - International Atomic Energy Agency. 2011.
95. IAEA. Planning and Preparing for Emergency Response to Transport Accidents Involving Radioactive Material Safety Guide. 2002a. Vienna, IAEA - International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Standards Series No. TS-G-1.2 (ST-3), International Atomic Energy Agency.
96. IAEA. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Safety Requirements. 2002b. Vienna, IAEA - International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency Safety Standards Series No. GS-R-2, International Atomic Energy Agency.
97. IAEA. Security in the Transport of Radioactive Material. 2008. Vienna, IAEA - International Atomic Energy Agency, IAEA Nuclear Security Series No. 9, IAEA.

98. Ikeda, Y., G.E.G. Beroggi, and W.A. Wallace. 2010. "Supporting multi-group emergency management with multimedia." *Safety Science*. 30:223-234.
99. ILO. Major Hazard Control - A practical guide. 1988. ILO - International Labour Organization, Geneva, Switzerland.
100. Ishigami, T., K. Kobayashi, M. Umemoto, and T. Matsunaga. 2004. "A simplified simulation method for selecting the most effective off-site protective action." *Reliability Engineering & System Safety*. 86:61-74.
101. Ivanov, E.P., G.V. Tolochko, L.P. Shuvaeva, V.E. Ivanov, R.F. Iaroshevich, S. Becker, E. Nekolla, and A.M. Kellerer. 1998. "Infant leukemia in Belarus after the Chernobyl accident." *Radiation and Environmental Biophysics*. 37:53-55.
102. Ivanov, V.K., M.A. Maksioutov, A.F. Tsyb, A.I. Gorski, S.Y. Chekin, K.A. Tumanov, and V.V. Kashcheev. 2007. "Radiological health effects 20 years after the Chernobyl accident: Data of the National Radiation and Epidemiological Registry." *International Congress Series*. 1299:39-45.
103. Jain, R. and J.M. Smith. 1997. "Modeling vehicular traffic flow using M/G/C/C state dependent queuing models." *Transp Science*. 31:324-336.
104. Jamei, B. Transportation actions to reduce highway evacuation times under natural disasters. 1984. Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University.
105. Joseph, G., M. Kaszniak, and L. Long. 2007. "Lessons after Bhopal: CSB a catalyst for change." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 18:537-548.
106. Keeney, R.L. and H. Raiffa. Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs. 1993. Cambridge & New York, Cambridge University Press.
107. Ketchell, N., Webber, and D.M. 1993. "The EGRESS code for human movement and behavior in emergency evacuations." Elsevier Applied Science. Amsterdam.
108. Khan, F.I. and S.A. Abbasi. 1999. "Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 12:361-378.
109. Kiker, G.A., T.S. Bridges, A. Varghese, P.T. Seager, and I. Linkov. 2005. "Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making." *Integrated Environmental Assessment and Management*. 1:95-108.
110. Kiranoudis, C.T., N.C. Markatos, K.G. Zografos, and I. Ziomas. 1999. "An operational centre for managing major chemical industrial accidents." *European Conference Seveso 2000*.
111. Kiranoudis, C.T., S.P. Kourniotis, M. Christolis, N.C. Markatos, K.G. Zografos, I.M. Giannouli, K.N. Androutopoulos, I. Ziomas, E. Kosmidis, P. Simeonidis, and N. Poupkou. 2002. "An operational centre for managing major chemical industrial accidents." *Journal of Hazardous Materials*. 89:141-161.
112. Kirchsteiger, Ch. 1999. "Trends in accidents, disasters and risk sources in Europe." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 12:7-17.
113. Kirchsteiger, Ch. 2006. "Current practices for risk zoning around nuclear power plants in comparison to other industry sectors." *Journal of Hazardous Materials*. 136:392-397.

114. Kirchsteiger,Ch., Michalis D., Papadakis, and Georgios A. 1998. "Risk assessment and management in the context of the seveso II directive." In M.D.C.Christian Kirchsteiger, editor, *Industrial Safety Series Risk assessment and management in the context of the seveso II directive*. Elsevier.
115. Kletz,T.A. 2001. *Learning from accidents in industry*. Butterworth - Heinemann. Oxford.
116. Kletz,T.A. 2006. "Accident investigation: Keep asking "why?"" *Journal of Hazardous Materials*. 130:69-75.
117. Kongsomsaksakul,S., C.Yang, and A.Chen. 2005. "Shelter location-allocation model for flood evacuation planning." *Journal of the East Asia Soc for Transp Studies*. 6:4237-4252.
118. Koopmans,T.C. 1951. *Activity Analysis of Production and Allocation*. John Wiley and Sons. New York.
119. Koza R.J., Bennett III F.H, Andre D., and Keane M.A. 1999. *Genetic programming III, Darwinian Invention and problem Solving*. Morgan Kaufmann Publishers.
120. Lan,C.J. and G.A.Davis. 1999. "Real-time estimation of turning movement proportions from partial counts on urban networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 7:305-327.
121. Lee,D., H.Kim, J.H.Park, and B.J.Park. 2003. "The current status and future issues in human evacuation from ships." *Safety Science*. 41:861-876.
122. Lees,F.P. 1996. *Loss prevention in the process industries*. Butteworth - Heinemann. Oxford.
123. Levy,J.K. and K.Taji. 2007. "Group decision support for hazards planning and emergency management: A Group Analytic Network Process (GANP) approach." *Mathematical and Computer Modelling*. 46:906-917.
124. Lindell,M.K. 2000. "An overview of protective action decision-making for a nuclear power plant emergency." *Journal of Hazardous Materials*. 75:113-129.
125. Lu,Q., Y.Huang, and S.Shekhar. 2003. "Evacuation planning: a capacity constrained routing approach." In M.R.Z.D.D.C.S.J.M.T.Chen H, editor, *First NSF/NIJ Symposium on Intelligence and Security Informatics*. Springer. USA.111-125.
126. Malcom,C. 1996. "Nuclear and radiation safety: guidance for emergency response." *International Atomic Energey Agency Bulletin*. 38:23-27.
127. Mannan,M.S. and D.L.Kilpatrick. 2000. "The pros and cons of shelter-in-place." *Process Safety Progress*. 19:210-218.
128. Mannan,S. 2005. "Lee's loss prevention in the process industries." *Hazard identification, assessment and control*. 3.
129. Markatos,N.C., C.Christolis, and C.Argyropoulos. 2009. "Mathematical modeling of toxic pollutants dispersion from large tank fires and assessment of acute effects for fire fighters." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52:4021-4030.
130. Marseguerra,M. and E.Zio. 2002. *Basics of the Monte Carlo method with application to system reliability*. LiLoLe - Verlag GmbH. Hagen.

131. Marseguerra,M., E.Zio, and L.Podofillini. 2004. "A multiobjective genetic algorithm approach to the optimization of the technical specifications of a nuclear safety system." *Reliability Engineering & System Safety*. 84:87-99.
132. Matthews,K.B., S.Craw, S.Elder, A.R.Sibbald, and I.MacKenzie. 2000. "Applying genetic algorithms to multiobjective land use planning." In Morgan Kaufmann, editor, *Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO 2000)*.613-620.
133. Mazzini,M., M.Barlettani, S.Contini, and olta G. 2001. "HARIA-2. A computer supported approach to emergency planning, analysis and response." *Eur Saf Reliab Int Conf (ESREL 2001)*. Torino, Italy.
134. McKenna,T.J. 2000. "Protective action recommendations based upon plant conditions." *Journal of Hazardous Materials*. 75:145-164.
135. Mei,B. Development of trip generation models of hurricane evacuation. 2002. China, Southeast University.
136. Michaels,RA. 1999. "Emergency planning and the acute toxic potency of inhaled ammonia." *Environ Health Perspectives*. 107:617-627.
137. Miettinen,K. 1999. *Nonlinear multiobjective optimization*. Kluwer Academic Publishers. Boston, Massachusetts.
138. Mitani,S., M.Fujita, K.Nakata, and T.Shirakawa. 2006. "Impact of post-traumatic stress disorder and job-related stress on burnout: A study of fire service workers." *Journal of Emergency Medicine*. 31:7-11.
139. Mitchison,N. and G.A.Papadakis. 1999. "Safety management systems under Seveso II: Implementation and assessment." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 12:43-51.
140. Mocarelli,P. 2001. "Seveso: a teaching story." *Chemosphere*. 43:391-402.
141. Moeller,M., T.Urbaniak, and A.Desrosiers. CLEAR (calculated logical evacuation and response): a generic transportation network model for the calculation of evacuation time estimates. 1981. Washington D.C., Nuclear Regulatory Commission by Pacific Northwest Laboratory. NUREG/CR-2504.
142. Musselman,V.C. Emergency planning and community right-to-know. 1989. Van Nostrand Reinhold, USA, An implementer's guide to SARA title III.
143. Mustajoki,J., R.P.HSmSISinen, and K.Sinkko. 2007. "Interactive computer support in decision conferencing: Two cases on off-site nuclear emergency management." *Decision Support Systems*. 42:2247-2260.
144. Narzisi,G., V.Mysore, and B.Mishra. 2006. "Multi-Objective Evolutionary Optimization of Agent-based Models: An Application to Emergency Response Planning." In B.Kovalerchuk, editor, *The IASTED International Conference on Computational Intelligence (CI 2006)*.
145. Nivolianitou,Z., M.Konstandinidou, and C.Michalis. 2006. "Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS)." *Journal of Hazardous Materials*. 137:1-7.
146. OECD. Environment directorate joint meeting of the chemicals committee and the working party on chemicals, pesticides and biotechnology, *OECD series on chemical accidents*,

Number 14 report of the OECD workshop on lessons learned from chemical accidents and incidents. Organisation for Economic Co-operation and Development. 2005.

147. OECD. OECD Series on Chemical Accidents Number 7, Report of the Special Session on Environmental Consequences of Chemical Accidents. 2000. Paris, France.
148. O'Mahony, M.T., D.Doolan, A.O'Sullivan, and M.Hession. 2008. "Emergency planning and the Control of Major Accident Hazards (COMAH/Seveso II) Directive: An approach to determine the public safety zone for toxic cloud releases." *Journal of Hazardous Materials*. 154:355-365.
149. Ortuzar, J.D. and L.G.Willumsen. 1994. *Modeling transport*. John Wiley & Sons.
150. Papamichail, K.N. and S.French. 2000. "Decision support in nuclear emergencies." *Journal of Hazardous Materials*. 71:321-342.
151. Papamichail, K.N. and S.French. 2005. "Design and evaluation of an intelligent decision support system for nuclear emergencies." *Decision Support Systems*. 41:84-111.
152. Papazoglou, I.A. and J.G.Kollas. 1997. "Establishing protective long measures after severe nuclear accidents using multiple criteria." *Health Phy.Soc.* 72:676-692.
153. Papazoglou, I.A. and M.Christou. 1997. "A decision support system for the emergency response to major nuclear accidents." *Nucl Technology*. 118:97-121.
154. Papazoglou, I.A., G.S.Bonanos, Z.S.Nivolianitou, N.J.Duijm, and B.Rasmussen. 2000. "Supporting decision makers in land use planning around chemical sites. Case study: expansion of an oil refinery." *Journal of Hazardous Materials*. 71:343-373.
155. Papazoglou, I.A., O.Aneziris, G.S.Bonanos, and M.Christou. 1996. "SOCRATES: A Computerized Tool Kit for the Quantification of the Risk from Accidental Releases of Toxic and/of Flammable Substances." *Integrated Regional Health and Environmental Risk Assessment and Safety Management (Special Issue), published in the Int.J.Environment and Pollution*. 6.
156. Papazoglou, I.A., Z.Nivolianitou, O.Aneziris, and M.Christou. 1992. "Probabilistic safety analysis in chemical installations." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 5:181-191.
157. Pareto, V. 1896. *Cours d'Economie Politique*. Lausanne.
158. Parisi, D.R. and C.O.Dorso. 2007. "Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 385:343-355.
159. Pauwels, N., F.Hardeman, and K.Soudan. 1999. "Radiological Protective Measures in Highly Industrialized Areas: Do the Existing Intervention Levels Apply?" *Health Physics*. 77:646-653.
160. Pekalski, A.A. Review of preventive and protective systems for explosion risk in the process industry. 1997. TU Delf.
161. Pesatori, A.C., A.Baccarelli, D.Consonni, A.Lania, P.Beck-Peccoz, P.A.Bertazzi, and A.Spada. 2008. "Aryl hydrocarbon receptor-interacting protein and pituitary adenomas: a population-based study on subjects exposed to dioxin after the Seveso, Italy, accident." *European Journal of Endocrinology*. 159:699-703.

162. Petridou,E., D.Trichopoulos, N.Dessypris, V.Flytzani, S.Haidas, M.Kalmanti, D.Kolioukas, H.Kosmidis, F.Piperopoulou, and F.Tzortzatos. 1996. "Infant leukaemia after in utero exposure to radiation from Chernobyl." *Nature*. 382:352-353.
163. Pey,A., P.Lerena, G.Suter, and J.Campos. 2009. "Main differences on European regulations in the frame of the Seveso Directive." *Process Safety and Environmental Protection*. 87:53-58.
164. Pidd,M., F.N.de Silva, and R.W.Eglese. 1996. "A simulation model for emergency evacuation." *European Journal of Operational Research*. 90:413-419.
165. Porikli,F. and L.Xiaokun. 2004. "Traffic congestion estimation using HMM models without vehicle tracking." *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE*.188-193.
166. Ramondetta,M. and A.Reposi. Seveso 20 years after - From dioxin to the Oak Wood. 1998. Milano, Fondazione Lombardia per l'Ambiente.
167. Rogers,G. and R.D.Shar. Protective action evaluator for chemical emergencies ©: A User's Manual (MS-DOS® Version 1.0), ORNL/TM-11594. 1990. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
168. Rogers,G., A.Watson, J.Sorensen, R.Sharp, and S.Carnes. Evaluating protective actions for chemical agent emergencies. ORNL-6615, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge. 1990. Tennessee.
169. Ron,E., J.Lubin, R.E.Shore, K.Mabuchi, B.Modan, and L.M.Pottern. 1995. "Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies." *Radiation Research*. 141:259-277.
170. Rosemberg,R.S. *Simulation of genetic populations with biochemical properties*. 1967. Ann Harbor, Michigan, PhD thesis, University of Michigan.
171. Roy,B. 1968. "Classement et choix en prisence de points de vue multiples: La methode ELECTRE." *Revue Francaise d'Informatique et de RechercheOprationnelle*. 8:57-75.
172. Saadatesresht,M., A.Mansourian, and M.Taleai. 2009. "Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach." *European Journal of Operational Research*. 198:305-314.
173. Saijo,Y., T.Ueno, and Y.Hashimoto. 2008. "Twenty-four-hour shift work, depressive symptoms, and job dissatisfaction among Japanese firefighters." *American Journal of Industrial Medicine*. 51:380-391.
174. Santos,G. and B.E.Aguirre. 2004. "A Critical Review Of Emergency Evacuation Simulation Models." In R.D.Peacock and E.D.Kuligowski, editors, *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies*.27-52.
175. Sattayhatewa,P. and B.Ran. 2000. "Developing a dynamic traffic management model for nuclear power plant evacuation." *79th TRB Annual meeting, Transportation Research Board (TRB)*. Washington DC.
176. Sayyady,F. and S.D.Eksioglu. 2010. "Optimizing the use of public transit system during no-notice evacuation of urban areas." *Computers and Industrial Engineering*. 59:488-495.
177. Schaffer,J.D. 1985. "Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms." *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*. Lawrence Erlbaum.93-100.

178. Schenker-Wicki,A. 1997. "The Swiss Decision Support System: State of the Art and Experiences." *Radiation Protection Dosimetry*. 73:119-122.
179. Sebos,I., A.Progiou, P.Symeonidis, and I.Ziomas. 2010. "Land-use planning in the vicinity of major accident hazard installations in Greece." *Journal of Hazardous Materials*. 179:901-910.
180. Sheffi,Y., H.Mahmassani, and W.B.Powell. 1982. "A transportation network evacuation model." *Transportation Research Part A: General*. 16:209-218.
181. Sheu,J.B., Y.H.Chou, and A.Chen. 2004. "Stochastic modeling and real-time prediction of incident effects on surface street traffic congestion." *Applied Mathematical Modelling*. 28:445-468.
182. Sinkko,K., R.P.H+vm+vl+vinen, and R.H+vnninen. 2004. "Experiences in methods to involve key players in planning protective actions in the case of a nuclear accident." *Radiation Protection Dosimetry*. 109:127-132.
183. Sinuany-Stern,Z. and E.Stern. 1993. "Simulating the evacuation of a small city: the effects of traffic factors." *Socio-Economic Planning Sciences*. 27:97-108.
184. Sisiopiku,V., S.Jones, A.Sullivan, S.Patharkar, and X.Tang. Regional traffic simulation for emergency preparedness. 2004. UTCA Report 03226, Department of Civil and Environmental Engineering, University Transportation Center for Alabama (UTCA).
185. Smit,M.J.H. 1993. "Systems to forecast the dispersion of chemical clouds." *Workshop about chemical risks*.
186. So,S.K. and C.F.Daganzo. 2010. "Managing evacuation routes." *Transportation Research Part B: Methodological*. 44:514-520.
187. Sohier,A. A European Manual for 'Off-site Emergency Planning and Response to Nuclear Accidents'. 2002. Prepared for: The European Commission Directorate-General Environment Contract SUBV/00/277065, SCK-CEN Report R-3594.
188. Song,R., S.He, and L.Zhang. 2009. "Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations." *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 9:154-160.
189. Song,S., Z.Yang, W.Yang, and M.Zhang. 2010. "Research on multi-objective decision model based on location-allocation analysis during emergency traffic evacuation."106-109.
190. Sorensen,J.H., B.L.Shumpert, and B.M.Vogt. 2004. "Planning for protective action decision making: evacuate or shelter-in-place." *Journal of Hazardous Materials*. 109:1-11.
191. Sorensen,J.H., S.A.Carnes, and G.O.Rogers. 1992. "An approach for deriving emergency planning zones for chemical munitions emergencies." *Journal of Hazardous Materials*. 30:223-242.
192. Southworth,F. Regional evacuation modeling: a state-of-the-art review. 1991. Tennessee, ORNL/TM-11740, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
193. Stepanov,A. and J.M.Smith. 2009. "Multi-objective evacuation routing in transportation networks." *European Journal of Operational Research*. 198:435-446.
194. Sun,C. and B.de Vries. 2009. "Automated human choice extraction for evacuation route prediction." *Automation in Construction*. 18:751-761.

195. Tanaka,S., M.Kuwahara, T.Yoshii, R.Horiguchi, and H.Akahane. 1998. "Estimation of travel demand and network simulators to evaluate traffic management schemes in disaster." *INCEDE-NCEER Center-to-Center Project Workshop in Earthquake Engineering - Frontiers in Transport Systems*.
196. Thompson,P.A. and E.W.Marchant. 1995. "A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations." *Fire Safety Journal*. 24:131-148.
197. TNO. Methods for determining the possible damage to people and subjects resulting from the releases of hazardous materials (Green book). 1992. The Netherlands, TNO,Committee for the Prevention of Disasters, CPR 16E.
198. TNO. Methods for the calculation of the physical effects resulting from the releases of hazardous materials (Yellow book). 1997. The Netherlands, TNO,Committee for the Prevention of Disasters, CPR 14E, (latest version).
199. Trainor,M.T., P.Ridgway, R.W.Macbeth, A.Jill Wilday, and H.F.Balmforth. 2006. "Substance prioritisation for the development of EU Acute Exposure Toxicity Thresholds (AETLs)." *Journal of Hazardous Materials*. 133:16-23.
200. Tu,H., G.Tamminga, H.Drolenga, J.De Wit, and W.Van Der Berg. 2010. "Evacuation plan of the city of Almere: Simulating the impact of driving behavior on evacuation clearance time."67-75.
201. Tufekci,S. 1995. "An integrated emergency management decision support system for hurricane emergencies." *Safety Science*. 20:39-48.
202. Tufekci,S. and T.M.Kisko. 1991. "Regional Evacuation Modeling System (REMS): A decision support system for emergency area evacuations." *Computers & Industrial Engineering*. 21:89-93.
203. Tweedie,S.W., J.R.Rowland, S.J.Walsh, R.P.Rhoten, and P.I.Hagle. 1986. "A methodology for estimating emergency evacuation times." *The Social Science Journal*. 23:189-204.
204. UNEP. APELL - List of selected accidents (*OECD, MHIDAS, TNO, SEI, UBA-Handbuch Stoerfaelle, SIGMA, Press Reports, UNEP, BARPI*). 2001.
205. UNEP. Disasters Database. 2011.
206. Uno,K. and K.Kashiyama. 2008. "Development of Simulation System for the Disaster Evacuation Based on Multi-Agent Model Using GIS." *Tsinghua Science & Technology*. 13:348-353.
207. Urbanik,T. 2000. "Evacuation time estimates for nuclear power plants." *Journal of Hazardous Materials*. 75:165-180.
208. Vanderpooten,D. 2000. "An introduction to the Outranking approach and Electre methods." *7th Summer School on MCDM*.
209. Venart,J.E.S. 2007. "Flixborough: A final footnote." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 20:621-643.
210. Vince,I. 2008. *Major accidents to the environment - a practical guide to the Seveso II directive and Comah regulations*. Butterworth - Heinemann. Oxford.

211. Viti,F. and H.van Zuylen. 2005. "Markov mesoscopic simulation model of overflow queues at multilane signalized intersections." *Joint Conf - 10th EWGT Meeting & 16th Mini-EURO Conf*.
212. Vykhovanets,E.V., V.P.Chernyshov, I.I.Slukvin, Y.G.Antipkin, A.N.Vasyuk, H.F.Klimenko, and K.W.Strauss. 1997. "131I Dose-Dependent Thyroid Autoimmune Disorders in Children Living around Chernobyl." *Clinical Immunology and Immunopathology*. 84:251-259.
213. Walter,R.J. Local emergency planning committee guidebook, Understanding the EPA Risk management program rule. 1998. New York, USA, Center for Chemical Process Safety (CCPS), American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
214. Wein,L.M., Y.hoi, and S.Denuit. 2010. "Analyzing Evacuation Versus Shelter-in-Place Strategies After a Terrorist Nuclear Detonation." *Risk Analysis*. 30:1315-1327.
215. Wettig,J.r., S.Porter, and C.Kirchsteiger. 1999. "Major industrial accidents regulation in the European Union." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 12:19-28.
216. WHO - World Health Organization. Assessing the health consequences of major chemical incidents - epidemiological approaches. European series; No.79, 1-4. 1997. WHO regional publications.
217. WHO. Assessing the health consequences of major chemical incidents - epidemiological approaches. European series; No.79, 1-4. 1997. World Health Organization. WHO regional publications.
218. WHO. Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents - Update 1999. World Health Organisation. 1999. Geneva.
219. Wilson,A. 1970. *Entropy in urban and regional modeling*. Pion. London.
220. Wilson,D.J. and B.Morrison. 2000. "Ordering shelter or evacuation during an outdoor toxic gas release incident: the C.A.F.C. decision flow chart." *Fire-Rescue Canada 2000, Annual Meeting of the Canadian Association of Fire Chiefs*.
221. Wing,S., D.Richardson, D.Armstrong, and D.Crawford-Brown. 1997. "A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant: The collision of evidence and assumptions." *Environmental Health Perspectives*. 105:52-57.
222. Wisner,B. and J.Adams. Environmental health in emergencies and disasters, a practical guide. 2002. Geneva, Switzerland, World Health Organization.
223. Wood,M. and S.Duffield. 2001. "Pyrotechnic and Explosive Substances and the Seveso II Directive." *Seminar Proceedings: 27 September 2000 - European Commission, Joint Research Centre and French Ministry of the Environment*. (Ispra, Italy) - European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
224. Wood,M., A.Pichard, U.Gundert-Remy, C.de Rooij, and S.M.Tissot. 2006. "The AETL methodology as a potential solution to current challenges associated with the development and use of acute exposure levels in Seveso II applications." *Journal of Hazardous Materials*. 133:8-15.
225. Wood,M.H. 2009. "The Seveso II experience in the application of generic substance criteria to identify major hazard sites." *Journal of Hazardous Materials*. 171:16-28.
226. World Bank. Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. 1985. Washington.

227. Wu,Z., G.Jiang, C.Zhang, and Y.-Y.Tang. 2010. "Traffic organization method for emergency evacuation based on information centrality." *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on*.92-96.
228. Xie,C. and M.A.Turnquist. 2011. "Lane-based evacuation network optimization: An integrated Lagrangian relaxation and tabu search approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 19:40-63.
229. Xie,C., D.Y.Lin, and S.Travis Waller. 2010. "A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 46:295-316.
230. Yuan,Y. and W.Dingwei. 2007. "Multi-Objective Path Selection Model and Algorithm for Emergency Evacuation." *Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on*.340-344.
231. Zarboutis,N. and N.Marmaras. 2007. "Design of formative evacuation plans using agent-based simulation." *Safety Science*. 45:920-940.
232. Zhan,Y., S.Lo, and K.Yuen. 2010. "GIS Based Urban Emergency Decision Support Model." *Management and Service Science (MASS), 2010 International Conference on*.1-4.
233. Zheng,X. and M.Liu. 2010. "Forecasting model for pedestrian distribution under emergency evacuation." *Reliability Engineering and System Safety*. 95:1186-1192.
234. Ziomas,I.C., P.N.Tzoumaka, C.Fiorentinti, A.Romano, and M.Locatelli. Lessons Learnt from Emergencies after Accidents in Greece and in Italy Involving Dangerous Substances. EUR 15767 EN (1994). 1994.
235. Zitzler,E. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications. 1999. Zurich, Swiss Federal Institute of Technology.
236. Zitzler,E., M.Laumanns, and L.Thiele. SPEA2: improving the strength pareto evolutionary algorithm. Technical Report 103. 2001. Zurich, TIK, Swiss Federal Institute of Technology.
237. Zografos,K.G. and K.N.Androutsopoulos. 2008. "A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 16:684-703.
238. Zong,X., S.Xiong, Z.Fang, and Q.Li. Multi-objective optimization for massive pedestrian evacuation using ant colony algorithm. 6145 LNCS[PART 1], 636-642. 2010. Beijing. 1st International Conference on Advances in Swarm Intelligence, ICSI 2010. 12-6-2010.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αδαμίδης, Π. Εξελικτικοί αλγόριθμοι. 1999.
2. Ανεζήρη, Ο. Αξιοπιστία χημικών συστημάτων - Δυναμική και πιθανοτική ανάλυση. 1999a. Αθήνα, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ.
3. Ανεζήρη, Ο. 1999b. "Ποσοτική εκτίμηση επικινδυνότητας βιομηχανικών εγκαταστάσεων." *Προστασία του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική δραστηριότητα - Πρόληψη βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης*. ΕΛΙΝΥΑΕ. Αθήνα.
4. Αργυρόπουλος, Χ.Δ. Προσομοίωση διασποράς τοξικών ρύπων και εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιές σε δεξαμενές καυσίμων για την εφαρμογή της οδηγίας Seveso II. 2006. Αθήνα, Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
5. ΓΓΠΠ. Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας. 2011.
6. Γεωργιάδου, Ε. Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης - Μεθοδολογικός & Πληροφοριακός Οδηγός. 2001. Αθήνα, ΕΛΙΝΥΑΕ.
7. Γεωργιάδου, Ε. 2003. "Μεθοδολογικά και οργανωτικά προβλήματα για τη συνδυασμένη εφαρμογή της οδηγίας Seveso και της νομοθεσίας για την υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων." *Διημερίδα ΤΕΕ: «Διαχείριση Επικινδυνότητας - Η εφαρμογή των Οδηγιών Seveso I & II στη χώρα μας»*.
8. Γεωργιάδου, Π. 2010. "Κίνδυνοι για την ασφάλεια και την υγεία των πυροσβεστών." *Υγιεινή & Ασφάλεια της Εργασίας*. 41:12-18,27.
9. ΕΕΑΕ. Ελληνική Εταιρεία Ατομικής Ενέργειας. 2011.
10. ΕΛΙΝΥΑΕ. Εκτίμηση συνεπειών από μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα, στο «Προστασία του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική δραστηριότητα - Πρόληψη βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης». 1999. Αθήνα, ΕΛΙΝΥΑΕ - Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας.
11. ΕΛΙΝΥΑΕ. Μεταφορές επικίνδυνων εμπορευμάτων. 2007. Αθήνα.
12. ΕΜΠ. Ανάλυση λειτουργιών διαχείρισης βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης, Ενδιάμεση Έκθεση στα πλαίσια των έργων "Δημιουργία Επιχειρησιακού Κέντρου Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης για το Θριάσιο και το Πέραμα" & "Ανάπτυξη του Γενικού ΣΑΤΑΜΕ του Θριασίου Πεδίου". 1998. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χ-Μ, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.
13. ΕΜΠ. Αξιολόγηση Μελετών Ασφαλείας - Εγκαταστάσεις Φυτοφαρμάκων. 1996.
14. ΕΜΠ. Παραδοτέο έργου "Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (ΣΑΤΑΜΕ) στο Θριάσιο Πεδίο". 1999. Αθήνα, ΕΜΠ-Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.
15. Κουϊκόγλου, Β.Σ. Προσομείωση - Σημειώσεις μαθήματος. Πολυτεχνείο Κρήτης. 2002.
16. Κουρνώτης, Ε. Ανάλυση επικινδυνότητας βιομηχανικών ατυχημάτων - ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων διαχείρισης κρίσεων. 2001. Αθήνα, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).

17. Κρητικού, Μ. Βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας αμοιβών ενός συστήματος ανθρώπινου δυναμικού με τη χρήση τεχνικών Goal Programming. 2009. Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών.
18. Λοϊζος, Ζ.Γ. 1996. *Πυρηνική Χημεία - Πυρηνική Χημική Τεχνολογία*. ΕΜΠ. Αθήνα.
19. Λυκοθανάσης, Σ. Γενετικοί αλγόριθμοι και εφαρμογές. 2001. Πάτρα 2001, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας.
20. Λυκοθανάσης, Σ. & Ε.Γεωργόπουλος. Νευρωνικά Δίκτυα και Γενετικοί Αλγόριθμοι. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πρόγραμμα Σπουδών Εκπαίδευσης από Απόσταση Πάτρα. 1999.
21. Λυμπερόπουλος, Γ. Στοχαστικά πρότυπα επιχειρησιακής έρευνας. Σημειώσεις. 2007. Βόλος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας.
22. Μακρόπουλος, Χ. & Α.Ευστρατιάδης. Γενετικοί αλγόριθμοι. ΕΜΠ. 2011.
23. Μαρκάτος, Ν.Χ. 1999. "Επιχειρησιακό κέντρο αντιμετώπισης βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης." *Ημερίδα ΤΕΕ: «Επικινδυνότητα Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων»*.
24. Μουζάκης, Γ. 2011. "Η νέα οδηγία Seveso III."
25. Μουκριώτη, Β. 2005. "Έκρηξη σε διυλιστήριο του Τέξας." *26η Σύσκεψη Διυλιστηρίων, MOTOR OIL*.
26. Νιβολιανίτου, Ζ. 1999. "Εκτίμηση συνεπειών από μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα." In ΕΛΙΝΥΑΕ, editor, *Προστασία του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική δραστηριότητα - Πρόληψη βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης*.
27. Παπαδόπουλος, Μ. & Ε.Γεωργιάδου. 1999. "Η Γραπτή εκτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου (ΠΔ 17/96) σαν εργαλείο ελέγχου της επικινδυνότητας βιομηχανικών εγκαταστάσεων - Δυνατότητες και Προβλήματα." *Ημερίδα ΤΕΕ "Επικινδυνότητα Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων"*.
28. Παπάζογλου, Ι.Α. Εγχειρίδιο "Ποσοτική εκτίμηση επικινδυνότητας". 1999a. Αθήνα, *Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων & Βιομηχανικής Ασφάλειας - ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"*.
29. Παπάζογλου, Ι.Α. 1999b. "Ποσοτικός καθορισμός επικινδυνότητας και ορθολογική διαχείριση της ασφάλειας βιομηχανικών εγκαταστάσεων." *Ημερίδα ΤΕΕ: «Επικινδυνότητα Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων»*.
30. Παπάζογλου, Ι.Α. & Ι.Γιακουμάτος. Εγχειρίδιο αξιολόγησης μελέτης ασφαλείας εγκαταστάσεων των ΚΥΑ 18187/272/88 και 77119/4607/93. 1998. Αθήνα, ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ".
31. Παπακωνσταντίνου, Ξ. Μαρκοβιανές διαδικασίες αποφάσεων - Ανάλυση Αποφάσεων. 1990. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
32. Ράπτης, Σ.Ν. Υβριδικές γενετικές, ασαφείς και νευρωνικές τεχνικές στη βελτιστοποίηση, τη μοντελοποίηση και τη λήψη αποφάσεων. 2001. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
33. Ρήγας, Φ. 2005. *Βιομηχανική Ασφάλεια*. εκδ. Παπασωτηρίου. Αθήνα.
34. Ρηγόπουλος, Γ.Α. Ολοκληρωμένη μεθοδολογία και πληροφοριακό σύστημα υποστήριξης ομαδικών αποφάσεων ταξινόμησης με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης - Εφαρμογή

- στον τραπεζικό τομέα. 2008. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.
35. Σακκαλής,Γρ. 2007. "Αντιμετώπιση μεγάλων βιομηχανικών ατυχημάτων." *Πρακτικά Ημερίδας Υπουργείου Απασχόλησης*.
 36. Σκλαβούνος,Σ. Διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε χημικές εγκαταστάσεις. 2006. Αθήνα, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
 37. Σταθοπούλου,Ε. Ελάχιστα γεννητικά δένδρα με πολλαπλά κριτήρια. 2005. Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής.
 38. Εμμανουηλίδης,Γ.Ι. Συγκριτική αξιολόγηση δυναμικών και στατικών μοντέλων κίνησης και αδυναμίες της διαδικασίας τεσσάρων βημάτων στην αξιολόγηση δικτύων. 2008. Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή.
 39. Τσαντάς,Ν.Δ. & Π.-Χ.Γ.Βασιλείου. 2000. *Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα*. ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη.
 40. Χρήστου,Μ. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση σοβαρών ατυχημάτων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις - Πολυσταδιακή λήψη αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας. 1993. Αθήνα, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ.