Καθ’ όλη τη διάρκεια για την ολοκλήρωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας, μου στάθηκαν και με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, ορισμένοι άνθρωποι. Για το λόγο αυτό θα ήθελα με τη σειρά μου να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτρη Κουλοχέρη, για την ιδιαίτερη προσπάθεια που κατέβαλε για να πραγματοποιηθεί αυτή η εργασία καθώς και για την άψογη συνεργασία μου μαζί του, τον κύριο καθηγητή Θεόδωρο Κωστόπουλο, την Ελένη Χαλκιά και τον κύριο Ευάγγελο Μπεκιάρη.

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων

Λίστα Πινάκων

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την μελέτη καθώς και την ανάλυση της οδικής μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων, καθώς και το πώς η χρήση νέων τεχνολογιών υπεισέρχεται στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δημιουργίας ατυχήματος.

Ξεκινώντας με την παρουσίαση του “προβλήματος” που σχετίζεται με την μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, ανεξαρτήτως του μέσου μεταφοράς, καταλήγουμε ύστερα από ανάλυση των στατιστικών δεδομένων στη σημαντικότητα της οδικής μεταφοράς τέτοιων εμπορευμάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της οδικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, όπως είναι η επικινδυνότητα, η διακινδύνευση, καθώς και το κόστος ατυχήματος και γίνεται μια ανασκόπηση των μεθόδων εκτίμησής τους.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται οι τελικές συνέπειες των ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων στις οποίες και οφείλονται οι επιπτώσεις των θανάσιμων τραυματισμών του εκτιθέμενου πληθυσμού.

Επίσης γίνεται λεπτομερής αναφορά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας, συνεπώς και τη μείωση της επικινδυνότητας, κατά τη μεταφορά επικινδύνων φορτίων. Στις τεχνολογίες αυτές είναι εμφανής ο διαχωρισμός σε σχέση με το που επιδρά η κάθε μία από αυτές, στο όχημα, στην οδό, στην πλοήγηση, στο μεταφερόμενο φορτίο ή τέλος στον οδηγό.

Στα τελευταία κεφάλαια παρουσιάζονται οι πιο πρόσφατες δράσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο αφορά την οδική μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων και γίνεται μια ανασκόπηση της υπάρχουσας νομοθεσίας.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της παρούσης εργασίας.

Summary

The purpose of this thesis is the study of the danger goods transportation and the involvement of new technologies into this transportation chain in order to decrease the possibility of an accident occurrence.

Starting by demonstrating the “problem”, which is the danger goods road transportation and after analyzing available statistical data, we can identify the criticality of the danger goods road transportation.

Subsequently, some of the basic characteristics of the road transportation of danger goods are presented; such as the hazard, the risk and the accident cost, as well as the potential methods for their measurement.

In the next chapters the final consequences of all the danger goods accidents that may occur and are responsible for human injuries, are presented.

Additionally, there is an analytical presentation to the technologies that are used in order to increase the safe and reduce the risk in the danger goods transportation. The study of these technologies leads to their categorization according to the recipient such as the road, the vehicle, the rooting, the goods or the driver.

In the final chapters the latest actions that have been made by the European Union in the field of the danger goods transportation and a review of the relevant to the dangerous goods road transportation existing legislation, are presented.

Finally the conclusion and the suggestions for the road danger goods transportation problem are depicted in the last chapter.

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο, μεθοδολογία και δομή της εργασίας

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την οδική μεταφορά των επικινδύνων φορτίων και τις νέες τεχνολογίες που υπάρχουν για τη μείωση της επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά τους.

Για την επίτευξη του παραπάνω ακολουθήθηκαν τα εξής μεθοδολογικά βήματα:

- Έγινε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μελέτη της οδικής μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων, καθώς και των τυχών ατυχημάτων που συμβαίνουν σε αυτή και τις επιπτώσεις τους σε όλες τις συνιστώσες της μεταφοράς και σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.
- Έγινε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των συστημάτων σχεδιασμού της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων και των έξυπνων συστημάτων διαχείρισης έκτακτων περιστατικών με την εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα φορτία καθώς και των νέων τεχνολογιών που υποστηρίζουν τα συστήματα αυτά.
- Έγινε ανάλυση και αξιολόγηση των νέων τεχνολογιών που συνεισφέρουν στην βελτίωση της ασφαλούς λειτουργίας και επιτυχούς διαχείρισης των συμβάντων στο οδικό δίκτυο καθώς επίσης και των νέων τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για τη βοήθεια του οδηγού κατά τη διάρκεια της οδήγησης για την πρόληψη τροχαίων ατυχημάτων και ασφαλέστερης οδικής συμπεριφοράς.

Πιο αναλυτικά, στα κεφάλαια 1 και 2 δίνεται μια σφαιρική παρουσίαση της μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων. Γίνεται μια εισαγωγή για τα βασικά χαρακτηριστικά τις οδικής μεταφοράς των επικινδύνων φορτίων και πιο αναλυτικά παρουσιάζονται κάποια δεδομένα για τα ατυχήματα επικινδύνων φορτίων ανά μέσο μεταφοράς, παρουσιάζοντας την επικινδυνότητα της μεταφοράς αυτής, τους κινδύνους ατυχήματος, καθώς και τις επιπτώσεις και τις συνέπειες τέτοιων ατυχημάτων.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, όπως είναι η επικινδυνότητα και η διακινδύνευση, καθώς γίνεται και μια ανασκόπηση των μεθόδων εκτίμησής τους. Παρουσιάζονται λοιπόν η στατιστική ανάλυση ιστορικών δεδομένων, η μέθοδος ανάλυσης δένδρου σφαλμάτων και δένδρου αλληλουχίας γεγονότων, καθώς και η υποκειμενική εκτίμηση ειδικών με πολυετή σχετική επαγγελματική εμπειρία και συγκεκριμένη επιστημονική εξειδίκευση. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η χρήση του θεωρήματος Bayes καθώς και οι διάφορες επεκτάσεις του κόστους των ατυχημάτων αυτών.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι τελικές συνέπειες των ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων στις οποίες οφείλονται οι επιπτώσεις των θανάσιμων τραυματισμών του εκτιθέμενου πληθυσμού, αναλύονται τα σενάρια της διαρροής και διασποράς αέριας και υγρής φάσης και περιγράφονται οι διάφοροι τύποι φωτιών και εκρήξεων που μπορεί να προκύψουν, καθώς επίσης και οι τελικές τους επιπτώσεις.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μία αναφορά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας, συνεπώς και τη μείωση της επικινδυνότητας, κατά τη μεταφορά επικινδύνων φορτίων. Παρουσιάζεται επίσης στο σημείο αυτό μια ταξινόμηση των τεχνολογιών αυτών στην αλυσίδα διαχείρισης της ασφάλειας κατά τη μεταφορά των επικινδύνων φορτίων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι υπάρχουσες τεχνολογίες υποστήριξης του οδηγού, καθώς και η αλυσίδα διαχείρισης ασφαλείας της οδικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.

Στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται οι πιο πρόσφατες δράσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο αφορά στην οδική μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων καθώς και οι κατά τους συγγραφείς αναμενόμενες εξελίξεις στον τομέα των τεχνολογιών για την μείωση της επικινδυνότητας των μεταφορών των επικινδύνων φορτίων και γίνεται μια ανασκόπηση της υπάρχουσας νομοθεσίας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της παρούσης εργασίας. Ενώ, στη συνέχεια, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιείται στο κείμενο της παρούσας διπλωματικής για την τεκμηρίωση της επιστημονικής εγκυρότητας του περιεχομένου. Επιπλέον, δίνονται και ορισμένες χρήσιμες συνδέσεις στο διαδίκτυο.

1.2 Γενικά

1.2.1 Οδική μεταφορά με επικίνδυνα φορτία

Η παραγωγή και μεταφορά επικίνδυνων φορτίων ανήκουν στην κατηγορία των δραστηριοτήτων, που αν και θέτουν σε σοβαρό κίνδυνο ανθρώπους και περιβάλλον, αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την απρόσκοπτη λειτουργία βιομηχανικών δραστηριοτήτων ζωτικού οικονομικού ενδιαφέροντος. Πολλές καθημερινές δραστηριότητες στηρίζονται σε ουσίες και υλικά, που αν απελευθερωθούν και διαχυθούν στο περιβάλλον μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές και συχνά ανεπανόρθωτες καταστροφές.

Ως *επικίνδυνα φορτία* χαρακτηρίζονται οι ύλες και τα είδη από τα οποία μπορούν να προκληθούν κίνδυνοι για το περιβάλλον, το κοινωνικό σύνολο, τη ζωή και την υγεία ανθρώπων και ζώων, καθώς και για τη δημόσια τάξη και ασφάλεια. Οι κίνδυνοι αυτοί οφείλονται στη φύση, στις ιδιότητες ή στην κατάσταση γενικότερα των υλών αυτών (Καλυβιώτης & Κουλοχέρης, 1999) . Ο όρος *μεταφορά* αναφέρεται τόσο στη διαδικασία της μετακίνησης των επικίνδυνων φορτίων, όσο και στη προσωρινή παραμονή τους κατά τη διαχείριση της μεταφοράς. Δηλώνει επίσης, τις διαδικασίες προετοιμασίας και περάτωσης της διακίνησης δηλαδή τη συσκευασία, τη φόρτωση και την αποσυσκευασία. Ως *ατύχημα* κατά τη μεταφορά ενός επικίνδυνου φορτίου ορίζεται η απρόβλεπτη και ανεπιθύμητη διαρροή στο περιβάλλον του μεταφερόμενου υλικού κατά τη μεταφορά, φορτοεκφόρτωση ή και την προσωρινή αποθήκευσή του (Abkowitz & List, 1987).

Οι ουσίες αυτές οι οποίες χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα φορτία διασαφηνίζονται και κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις όπως φαίνεται στον Πίνακας 1 που ακολουθεί, με βάση τη συμφωνία ADR[*].

[*] **A**ccord European relatif au transport international des merchandises **d**angereuses par **r**oute (Ευρωπαϊκή Συμφωνία για την Ασφάλεια στις Διεθνείς Οδικές Μεταφορές Επικίνδυνων Φορτίων). Η Ελληνική Νομοθεσία έχει υιοθετήσει την συμφωνία **ADR** για τον έλεγχο των οχημάτων μεταφοράς

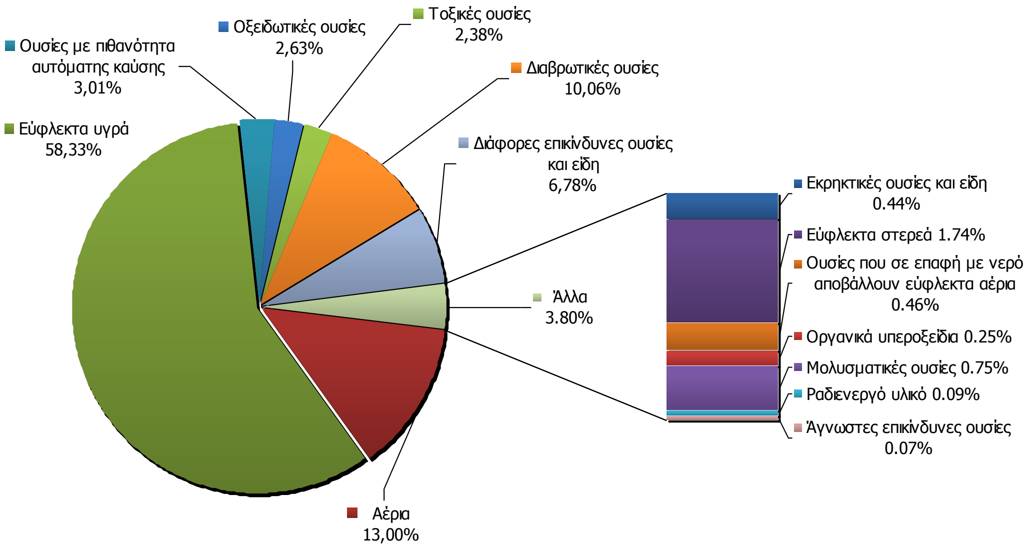
Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση επικινδύνων φορτίων με βάση τη συμφωνία ADR

Κλάση	Ουσία
1	Εκρηκτικές ουσίες και είδη
2	Αέρια
3	Εύφλεκτα υγρά
4.1	Εύφλεκτα στερεά, αυτενεργείς ουσίες και στερεά Απευαισθητοποιημένα εκρηκτικά
4.2	Ουσίες με πιθανότητα αυτόματης καύσης
4.3	Ουσίες που σε επαφή με νερό αποβάλλουν εύφλεκτα αέρια
5.1	Οξειδωτικές ουσίες
5.2	Οργανικά υπεροξείδια
6.1	Τοξικές ουσίες
6.2	Μολυσματικές ουσίες
7	Ραδιενεργό υλικό
8	Διαβρωτικές ουσίες
9	Διάφορες επικίνδυνες ουσίες και είδη

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι τα επικίνδυνα φορτία εντοπίζονται σε όλες τις μεταφορικές διαδικασίες μίας τυπικής αλυσίδας logistics. Τα γνωστότερα φορτία

επικινδύνων φορτίων μέσα από την Υπουργική Απόφαση (Υ.Α.) αρ. οικ. 47368/2522/4-8-04 (ΦΕΚ 1303/Β/04 - Συμφωνία ADR 2001).

που εμπίπτουν στην κατηγορία επικίνδυνα φορτία και διακινούνται στην Ευρώπη ομαδοποιούνται στο Διάγραμμα 1 (Eurostat, statistics in focus 66/2008).

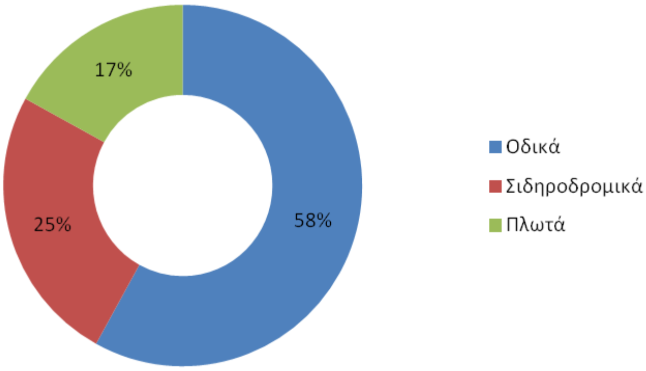


Διάγραμμα 1: Μεταφερόμενες ποσότητες επικινδύνων φορτίων με βάση τον τύπο του φορτίου στην Ευρώπη των 27 μαζί με την Νορβηγία και το Λίχνενσταϊν.

Η μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων μπορεί να γίνει με έναν από τους εξής τρόπους:

- Φορτηγό (οδική μεταφορά)
- Τραίνο (σιδηροδρομική μεταφορά)
- Πλοίο (θαλάσσια μεταφορά)
- Αεροπλάνο (αερομεταφορά)

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η κατανομή κατά μέσο των μεταφορών με επικίνδυνα φορτία.



Διάγραμμα 2: Κατανομή μεταφορών επικινδύνων φορτίων ανά μέσο.

Η διακίνηση των επικίνδυνων φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα σοβαρά ατυχήματα. Ακόμα και όταν οι μεταφερόμενες ποσότητες είναι μικρές, ο κίνδυνος εμφάνισης ατυχήματος μεγάλης έκτασης είναι υπαρκτός. Άλλωστε η ίδια η φύση της μεταφοράς επιβάλλει την κυκλοφορία των επικινδύνων φορτίων σε δημόσιο χώρο (δρόμο, λιμάνι ή αεροδρόμιο), μακριά από το ελεγχόμενο περιβάλλον μιας βιομηχανικής εγκατάστασης.

Τα ατυχήματα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς φορτίων καταγράφονται σε διάφορες βάσεις δεδομένων στην Ευρώπη αλλά και σε όλο τον κόσμο, σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Στην Ευρώπη οι βάσεις και οργανισμοί που καταγράφουν τέτοιου είδους δεδομένα είναι οι εξής:

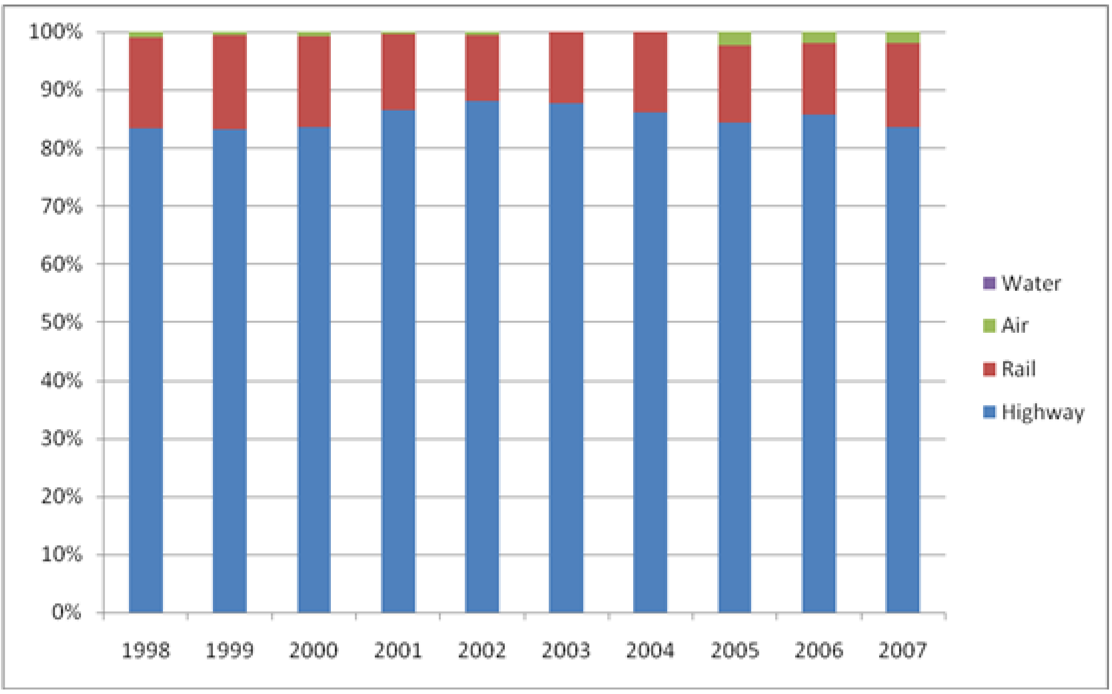
- CARE (Community Road Accident Database), (http://ec.europa.eu/transport/home/care/index_en.htm)
- EACS (European Accidents Causation Survey)
- ECMT (European Conference of the Ministers if Transport), (http://www.cemt.org/)
- ETAC (European Truck Accident Causation Study)
- Eurostat (Statistical Office of the European Community), (ec.europa.eu/eurostat)
- MARS (Major Accident Reporting System), (http://mahbsrv.jrc.it/mars/default.html)

- UNECE (United Nation Economic Commission for Europe, (www.unece.org)
- FACTS (Database for Accidents with Hazardous Materials, (www.factsonline.nl)
- ARIA (Analysis Research and Information on Accidents), (http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/barpi_1031.jsp)

Σε Παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν βάσεις δεδομένων που καταγράφουν στοιχεία αποκλειστικά για τα επικίνδυνα φορτία, ώστε να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για μελέτες αξιολόγησης της επικινδυνότητας και παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.

1.2.2 Ατυχήματα κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων

Μελετώντας τα ατυχήματα με εμπλοκή επικινδύνων φορτίων ανάλογα με το μέσο μεταφοράς, από τη βάση δεδομένων DGAIS (Dangerous Goods Accident Information System) του Καναδά, προκύπτει ότι 91% των ατυχημάτων αυτών προέκυψαν κατά την οδική μεταφορά (Button, N., Reilly, P.M., 2000). Αποτέλεσμα που είναι αναμενόμενο αφού σύμφωνα με την ίδια βάση δεδομένων, το 93% των μεταφορών επικινδύνων φορτίων γίνονται οδικώς. Βάση αντίστοιχης έρευνας στις ΗΠΑ, προκύπτει ότι 85% των ατυχημάτων με εμπλοκή επικινδύνων φορτίων γίνονται κατά την οδική μεταφορά, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3 (Hazardous Materials Information System, U.S. Department of Transportation).



Διάγραμμα 3: Ατυχήματα με επικίνδυνα φορτία με βάση το μέσο, έτη 1998-2007.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατανομή 9.797 συμβάντων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων ανά μέσο μεταφοράς, καθώς επίσης και ο αριθμός των τραυματισμών που προέκυψαν από τα παραπάνω ατυχήματα. Το μεγαλύτερο ποσοστό ατυχημάτων αφορά σε οδικά ατυχήματα (83,6%) και ακολουθούν τα σιδηροδρομικά ατυχήματα (11,1%) (ARIA, the Database of BARPI-bureau for analysis of industrial risks and pollutions, France).

Πίνακας 2: Κατανομή συμβάντων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων ανά μέσο μεταφοράς.

Μέσο Μεταφοράς	Συμβάντα		Τραυματισμοί*		Θανάσιμοι Τραυματισμοί	
	Αριθμός	Ποσοστό	Αριθμός	Ποσοστό	Αριθμός	Ποσοστό
Οδικώς	7.853	83%	1.511	75.2%	92	80.0%
Σιδηροδρομικώς	1.042	11.1%	271	13.5%	4	3.5%

* Συμπεριλαμβάνονται και οι θανάσιμοι τραυματισμοί.

Μέσο Μεταφοράς	**Συμβάντα**		**Τραυματισμοί***		**Θανάσιμοι Τραυματισμοί**	
	Αριθμός	Ποσοστό	Αριθμός	Ποσοστό	Αριθμός	Ποσοστό
Αεροπορικώς	143	1.5%	104	5.2%	18	15.7%
Μέσω Θάλασσας	230	2.4%	102	5.1%	1	0.9%
Μέσω σωληνώσεων	100	1.1%	12	0.6%	0	0
Συνδυασμένη μεταφορά	24	0.3%	8	0.4%	0	0
Σύνολο	9.797	100%	2.008	100%	115	100%

Βλέποντας τα παραπάνω είναι αναπόφευκτος ο προβληματισμός για τις επιπτώσεις των ατυχημάτων αυτών στο περιβάλλον, αλλά και στη δημόσια υγεία. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και από σχετικές έρευνες που έχουν επισημάνει ότι μεγαλύτερες επιπτώσεις υπάρχουν στα ατυχήματα με εμπλοκή επικινδύνων φορτίων που συμβαίνουν κατά την οδική μεταφορά, καθώς η οδός συχνά περνά μέσα από κατοικημένες περιοχές, κυρίως στις υπό ανάπτυξη χώρες (Khan & Abbasi, 1999). Η ασφάλεια των οδικών μεταφορών επικινδύνων φορτίων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ειδικά για κάποιες χώρες με έμφαση στις οδικές μεταφορές όπως είναι η Ιταλία, στην οποία το 80% όλων των μεταφορών γίνεται οδικώς.

Η μεταφορά των επικινδύνων φορτίων εμπεριέχει κινδύνους και πιθανότητες τραυματισμού όχι μόνο του οδηγού του οχήματος, αλλά και του πληθυσμού ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από τη διαδρομή του φορτηγού. Ο προαναφερόμενος πληθυσμός αποτελείται από τους «εκτός οδού» κατοίκους των παραπλεύρων του οδικού δικτύου περιοχών, αλλά και από τους «εντός οδού» οδηγούς και επιβάτες των λοιπόν, μετακινούμενων κοντά στο φορτηγό το οποίο μεταφέρει επικίνδυνο φορτίο, οχημάτων. Υπάρχουν μάλιστα περιπτώσεις, όπου η πρόκληση ατυχήματος δεν οφείλεται σε παραλείψεις που αφορούν αυστηρά το μεταφερόμενο φορτίο, αλλά στους συνήθεις κινδύνους της κυκλοφορίας.

Τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η οδική μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων καθώς και η ασφάλεια γύρω από αυτή, αποτελεί αντικείμενο μελέτης με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η παρούσα διπλωματική εργασία λοιπόν, θα ασχοληθεί με το θέμα αυτό, αναλύοντας τόσο τα αίτια εμφάνισης τέτοιων ατυχημάτων όσο και το ποιες είναι οι νέες τεχνολογίες που εφαρμόζονται κατά τη μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων και πώς αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή των ατυχημάτων.

2 Ανάλυση και διερεύνηση ατυχημάτων

Καθώς το ενδιαφέρον για την ασφαλή μεταφορά επικίνδυνων φορτίων αυξάνεται, οι εμπλεκόμενοι στο σχεδιασμό τόσο των μέτρων για την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων, διαπίστωσαν εξ' αρχής την ανάγκη ανάλυσης και διαμόρφωσης αποτελεσματικών πρακτικών και πολιτικών που πρέπει να εφαρμόζονται. Η αποτελεσματικότητα των ενεργειών τους λοιπόν εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων που θα έχουν στη διάθεση τους. Τα προγενέστερα ατυχήματα και συμβάντα κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων είναι η μοναδική πηγή τέτοιον δεδομένων, οπότε η σωστή ανάλυση και εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία.

Ο πρωταρχικός σκοπός της διερεύνησης ενός ατυχήματος είναι η ανάδειξη των πραγματικών αιτιών καθώς και της αλληλουχίας των γεγονότων που οδήγησαν στο ατύχημα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι αναγκαίες αλλαγές και ρυθμιστικές διατάξεις για την πρόληψη και αποτροπή επανάληψης παρόμοιων ατυχημάτων που οφείλονται στα ίδια ή και παρόμοια αίτια.

Οι βασικότερες μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την διερεύνηση προγενέστερων ατυχημάτων είναι:

- Θεώρηση στατιστικών συμπερασμάτων
- Μοντέλο δέντρου σφαλμάτων και δένδρου γεγονότων
- Υποκειμενικός υπολογισμός - Bayesian ανάλυση
- Χρήση GIS (Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών)

2.1 Βάσεις δεδομένων ατυχημάτων με επικίνδυνες ουσίες και Θεώρηση στατιστικών συμπερασμάτων

Η συλλογή δεδομένων ατυχημάτων που αφορούν στη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, με συστηματικό και άρτια σχεδιασμένο σύστημα καταγραφής, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την αξιόπιστη εκτίμηση των κινδύνων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Η ποιότητα των δεδομένων τις περισσότερες φορές δεν είναι η μέγιστη δυνατή για όλο το εύρος της πληροφορίας που συλλέγεται και καταγράφεται. Επιπρόσθετα, η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται από την αντίληψη του κινδύνου που έχει διαμορφώσει το κοινωνικό σύνολο στην περιοχή που έγινε το ατύχημα (Haastrup & Brockhoff, 1991).

Στις περισσότερες καταγραφές δεδομένων ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων υπάρχουν αβεβαιότητες σε αρκετά από τα επιμέρους δεδομένα, όπως φαίνεται και στον Πίνακας 3:. Οι αβεβαιότητες οφείλονται κυρίως στον οργανισμό που διαχειρίζεται τη βάση δεδομένων, ανεξάρτητα από την αξιοπιστία του. Δεν είναι λίγες οι φορές που ιδιαίτερα αξιόπιστοι οργανισμοί παρέχουν πληροφορίες χαμηλής ποιότητας. Συμπερασματικά, εγγενείς αβεβαιότητες θα υπάρχουν πάντα σε όλες τις αναλύσεις που βασίζονται σε καταγραφές στοιχείων ατυχημάτων από βάσεις δεδομένων.

Πίνακας 3: Παρατηρούμενες αβεβαιότητες βάσεων δεδομένων καταγραφής ατυχημάτων με επικίνδυνα φορτία.

Είδος πληροφορίας	Παρατηρούμενες αβεβαιότητες
Ημερομηνία και τόπος	Γενικά, η συγκεκριμένη πληροφορία υπάρχει σε όλες τις βάσεις δεδομένων. Ορισμένες αποκλίσεις παρατηρούνται στην ημέρα ή τη χρονολογία καταγραφής.
Περιγραφή του ατυχήματος	Περιπτώσεις αντιφάσεων και διαφορών έχουν βρεθεί, αλλά σε γενικές γραμμές όλες οι βάσεις δεδομένων συμφωνούν στο κύριο γεγονός.
Αριθμός θανάσιμων τραυματισμών	Διαφορές στον αριθμό των θανάτων.

Είδος πληροφορίας	Παρατηρούμενες αβεβαιότητες
Μεταφερόμενη ουσία	Χρησιμοποιείται πολύ συχνά η εμπορική ονομασία της ουσίας (διαφορετικές εμπορικές ονομασίες για την ίδια ουσία). Επίσης, σπάνια αναφέρεται η φυσική κατάσταση της μεταφερόμενης ουσίας (υγρό, στερεό ή αέριο).
Ποσότητα μεταφερόμενης ουσίας	Σε πολλές περιπτώσεις η πληροφορία αυτή δεν υπάρχει. Επίσης αρκετές φορές παρατηρείται διαφορά δύο και τριών τάξεων μεγέθους της καταγεγραμμένης ποσότητας, ενώ συχνά λείπουν και οι μονάδες μέτρησης της καταγραφής.

Στον Πίνακας 4: παρουσιάζονται βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν είτε ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται επικίνδυνες ουσίες, είτε οδικά ατυχήματα. Μεγάλο ποσοστό των καταγραφών αναφέρεται σε οδικά ατυχήματα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.

Πίνακας 4:Βάσεις δεδομένων καταγραφής ατυχημάτων με επικίνδυνα φορτία.

Βάσεις Δεδομένων		
Ακρώνυμο	Επεξήγηση	Υπεύθυνος Οργανισμός
MHIDAS	Major Hazard Incident Data	HSE AEA Technology (UK)
EnviDAS	Environmental Incident Database Servise	HSE AEA Technology (UK)
OECD	Database of Industrial Accidents	World Health Organization (WHO)
ERNS	Emergency Response Notification System	US Environmental Protection Agency (EPA)
AHE	Acute Hazardous Events Database	US Environmental Protection Agency (EPA)
ASHMIR	Australian System for Hazardous Materials Incident Reporting	National Occupation of Health & Safety Commission

Βάσεις Δεδομένων		
Ακρώνυμο	Επεξήγηση	Υπεύθυνος Οργανισμός
APELL	Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level	United Nation Environment Program (UNEP)
ARIP	Accident of Release Information	Environmental Protection Agency
CIRC	Chemical Incident Report Centre	Chemical Safety and Hazard Investigation Board
IRIS	Incident Reporting Information System	National Response Centre
PSID	Process Safety Incident Database	Centre for Chemical Process Safety (CCPS) of the AICHE
DGAIS	Dangerous Goods Accident Information System	Transport Canada
HMIR	Hazardous Materials Incident Report	Department of Transportation, USA
ORIS	Occurrence Report Information System	Ministry of Environment of Ontario, Canada
MTMD	Mission Transport des Matieres Dangereuses	France
ADS	Accident Data system	Ministry of Environment of Ontario, Canada
MARS	Master Accident Recors System	Washington State Department of Transportation, USA
ACIISTAT	Automobile Club D’Italia Istituto Nazionale di Statistica	Italy
TIFA	Trucks Involved in Fatal Accidents	Centre for National Truck Statistics – University of Michigan Transportation Research Institute, USA

Βάσεις Δεδομένων		
Ακρώνυμο	Επεξήγηση	Υπεύθυνος Οργανισμός
FARS	Fatality Analysis Reporting System	National Highway Traffic Safety Administration, USA
MCMIS	Motor Carrier Management Information System	National Highway Traffic Safety Administration, USA
	Hazardous Cargo Bulletin	Periodical
	Loss Prevention Bulletin	The Institute of Chemical Engineers, UK
FACTS	Failure and Accident Technical Information System	The Netherlands Organization, The Netherland
MARS	Major Accident Reporting System	Joint Research Centre Ispra, Italy
	Traffic Safety Committee of Insurance Companies	Road accident investigation teams, Finland
HSEES	Hazardous Substances Emergency Events Surveillance System	Agency for Toxic Substances and Disease Registry, USA
TIUS	Transportation Truck Inventory and Use Survey	Department of Commerce, USA
Ακρώνυμο	Επεξήγηση	Υπεύθυνος Οργανισμός
MHIDAS	Major Hazard Incident Data	HSE AEA Technology (UK)
EnviDAS	Environmental Incident Database Servise	HSE AEA Technology (UK)
OECD	Database of Industrial Accidents	World Health Organization (WHO)
ERNS	Emergency Response Notification System	US Environmental Protection Agency (EPA)
AHE	Acute Hazardous Events Database	US Environmental Protection Agency (EPA)

Βάσεις Δεδομένων		
Ακρώνυμο	Επεξήγηση	Υπεύθυνος Οργανισμός
ASHMIR	Australian System for Hazardous Materials Incident Reporting	National Occupation of Health & Safety Commission
APELL	Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level	United Nation Environment Program (UNEP)
ARIP	Accident of Release Information	Environmental Protection Agency

Η στατιστική ανάλυση δεδομένων ατυχημάτων βασίζεται στην παραδοχή ότι τα ατυχήματα είναι γεγονότα ανεξάρτητα μεταξύ τους, με σταθερή συχνότητα εμφάνισης, η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Η συμβολή των διαφορετικών αυτών παραγόντων ποσοτικοποιείται μέσα από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων από παλαιότερα ατυχήματα. Το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζεται έγκειται στο γεγονός ότι η πληρότητα αλλά και η αξιοπιστία (ποιότητα) των ιστορικών δεδομένων δεν είναι πάντα η απαιτούμενη, με αποτέλεσμα το πρόβλημα της ποσοτικοποίησης να ανάγεται σε πρόβλημα συλλογής δεδομένων και εξασφάλισης επαρκούς στατιστικού δείγματος. Η συλλογή και ανάλυση ιστορικών δεδομένων που αφορούν σε ατυχήματα με επικίνδυνα φορτία παρουσιάζει δύο δυσκολίες:

- Τα ατυχήματα αυτής της φύσεως είναι σπάνια και η δημιουργία ενός αξιόπιστου στατιστικού δείγματος απαιτεί συλλογή δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι υπάρχει ο κίνδυνος, οι εκτιμήσεις της πιθανότητας εμφάνισης ενός ατυχήματος να είναι ανακριβείς, επειδή αφενός δεν λαμβάνονται υπόψη οι τεχνολογικές εξελίξεις που σχετίζονται με την ασφάλεια των οχημάτων και αφετέρου δεν υπολογίζονται οι αυξανόμενες απαιτήσεις εκπαίδευσης του ανθρώπινου δυναμικού και η συσσώρευση της εμπειρίας του στην μεταφορά επικίνδυνων φορτίων.

- Είναι πολύ δύσκολο να υπάρξουν λεπτομερή στοιχεία και δεδομένα που να καλύπτουν διαφορετικούς τύπους συγκοινωνιακού δικτύου, περιβαλλοντικών ή άλλων ειδικών συνθηκών, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται παρακινδυνευμένη η χρήση δεδομένων που συλλέχθηκαν σε περιοχές με διαφορετικά τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά.

Παρ' όλα αυτά, η στατιστική ανάλυση αποτελεί μια καλή προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση της συχνότητας των ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, δεδομένου της έλλειψης οποιασδήποτε άλλης μεθοδολογίας, ή απαίτησης δυσανάλογης προσπάθειας για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από ποιοτικές μεθόδους.

Για παράδειγμα, από την ανάλυση 151 οδικών ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακας 5 η συντριπτική πλειοψηφία τους σε ποσοστό 81,5% συνέβη σε αυτοκινητοδρόμους. Παρατηρήθηκε ίδιο ποσοστό εμφάνισης ατυχημάτων (7,6%) σε διασταυρώσεις και στο λοιπό οδικό δίκτυο, ενώ υπήρχαν και ατυχήματα μέσα σε σήραγγες σε ποσοστό 3,3%. Από τα 5 συμβάντα που συνέβησαν σε σήραγγες, τα 4 οφείλονταν κυρίως σε οδικά ατυχήματα συγκρούσεων ή ανατροπής. Σε 3 από τα 5 συμβάντα υπήρχαν θανάσιμοι τραυματισμοί. Σε όλα τα ατυχήματα που είχαν ως συνέπεια φωτιά, η καταπολέμησή της ήταν πολύ δύσκολη εξαιτίας του καπνού μέσα στη σήραγγα και σε ορισμένες περιπτώσεις η φωτιά κράτησε αρκετές ημέρες (Oggero et al, 2006).

Πίνακας 5: Κατανομή 151 οδικών ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων ανά κατηγορία οδού .

Κατηγορία Οδού	Ποσοστό Ατυχημάτων
Αυτοκινητόδρομος	81.5%

Κατηγορία Οδού	Ποσοστό Ατυχημάτων
Διασταυρώσεις	7.6%
Λοιπό οδικό δίκτυο	7.6%
Σήραγγες	3.3%

Πολλοί μελετητές και ερευνητικές ομάδες έχοντας στο παρελθόν επεξεργαστεί μεγάλους όγκους δεδομένων οδικών ατυχημάτων όπως αυτά που αναφέραμε παραπάνω έχουν υπολογίσει δείκτες ατυχημάτων (αριθμός ατυχημάτων ανά εκατομμύρια διανυθέντων οχηματοχιλιομέτρων). Στον Πίνακας 6 παρουσιάζονται διάφοροι δείκτες για όλα τα είδη οχημάτων ανά κατηγορία οδού και περιοχής.

Πίνακας 6: Δείκτες ατυχημάτων (ατυχήματα ανά ένα εκατομμύριο οχηματοχιλιόμετρα) για όλα τα είδη οχημάτων ανά κατηγορία οδού και περιοχής.

Πηγή	Κατηγορία Οδού	Περιοχή	
		Αστική	Αγροτική
Πολιτείες της Καλιφόρνιας, του Ιλινόις και του Μίσιγκαν (Ashur et al, 1997; CCPS, 1995; NHI, 1996)	Δύο λωρίδων	5,38	1,36
	Πολλαπλών λωρίδων με νησίδα	8,65	2,79
	Πολλαπλών λωρίδων χωρίς νησίδα	7,75	1,34
	Ελεύθερη λεωφόρος	1,35	0,40
	Δρόμος μονής κατεύθυνσης	6,03	-
Statistics Canada (Verter & Kara, 2001)	Πολλαπλές λωρίδες με νησίδα	1,11	0,43
	Δρόμος με νησίδα	1,89	0,71
	Δρόμος χωρίς νησίδα	2,05	0,77
ACI – ISTAT (1996), Ιταλία (Bubbico et al, 1998)	Αυτοκινητόδρομος	-	0,24
	Αστικό δίκτυο	0,50	-

Πηγή	Κατηγορία Οδού	Περιοχή	
		Αστική	Αγροτική
Διεύθυνση τροχαίας του Μίσιγκαν (1974 – 1978) (CCPS, 1995)	Ελεύθερη λεωφόρος Εθνικές οδοί Αστικό δίκτυο	- - 5,13	0,9 3,12 -

Οι τιμές των δεικτών ατυχημάτων του Πίνακας 6, αφορούν όλα τα είδη οχημάτων, για διάφορες χώρες, αλλά και κατηγορίας οδού και περιοχής. Τόσο από δεδομένα για τις πολιτείες της Καλιφόρνιας, του Ιλινόις και του Μίσιγκαν, αλλά και από δεδομένα της Στατιστικής Υπηρεσίας του Καναδά όπου τα συστήματα συλλογής και καταγραφής οδικών ατυχημάτων περιλαμβάνουν την κατηγορία της οδού καθώς επίσης και την κατηγορία της περιοχής, υπολογίστηκαν οι δείκτες ατυχημάτων για όλα τα είδη οχημάτων ανά κατηγορία οδού και περιοχής. Παρατηρήθηκε ότι οι δείκτες ατυχημάτων είναι μικρότεροι στις αγροτικές περιοχές κυμαινόμενοι μεταξύ 0,40 και 2,79, απ' ότι στις αστικές περιοχές όπου κυμαίνονται μεταξύ 1,11 και 8,65. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε και στα δεδομένα της Στατιστικής Υπηρεσίας της Ιταλίας για το έτος 1996 και στα δεδομένα της τροχαίας του Μίσιγκαν κατά τη χρονική περίοδο 1974 – 1978. Η μέση τιμή του δείκτη ατυχημάτων στην Αμερική από δεδομένα ατυχημάτων κατά τα έτη 1966 – 1974 είναι 1,39, ενώ το 1986 υπολογίστηκε στα 4,69. Την ίδια χρονολογία στην Αγγλία ο δείκτης ατυχημάτων υπολογίστηκε στα 0,5.

Στον Πίνακας 7 παρουσιάζονται διάφορες τιμές δεικτών ατυχημάτων για φορτηγά οχήματα επικαθήμενα ή ρυμουλκά και ρυμουλκά μετά ρυμουλκούμενων, ανά κατηγορία οδού (Saccomanno et al, 1985).

Πίνακας 7: Δείκτες ατυχημάτων (ατυχήματα ανά εκατομμύρια οχηματοχιλιόμετρα) για φορτηγά οχήματα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.

Κατηγορία Οδού	Στεγνό Οδόστρωμα		Υγρό Οδόστρωμα	
	Ορατότητα		Ορατότητα	
	Καλή	Περιορισμένη	Καλή	Περιορισμένη
Αρτηρία <50km/h	3,715	3,957	1,816	0,957
Αρτηρία >50km/h	2,744	1,779	1,895	1,737
Αυτοκινητόδρομος <100km/h	0,876	1,672	0,956	0,531
Αυτοκινητόδρομος <100km/h	1,478	2,519	1,728	2,740
Δρόμοι με μεγάλη κλίση	2,215	5,218	2,580	8,279
Διασταυρώσεις	0,830	0,935	0,878	0,593

Από τους τρεις τελευταίους πίνακες παρατηρείτε ότι τα εύρη τιμών για τους δείκτες ατυχημάτων της γενικής κατηγορίας όλων των ειδών οχημάτων και των κατηγοριών των φορτηγών οχημάτων αλλά και ειδικότερα των φορτηγών οχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα, ενώ η μικρότερη από τη μεγαλύτερη τιμή έχουν διαφορά μιας τάξης μεγέθους (10).

Οι παράγοντες που συντελούν στην τελική διαμόρφωση της τιμής του δείκτη ατυχημάτων μπορεί να είναι είτε εγγενείς είτε εξωτερικοί. Μια μαθηματική προσέγγιση υπολογισμού του δείκτη ατυχημάτων κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη οι τέσσερις εγγενείς παράγοντες της καμπυλότητας της οδού, της κλίσης της οδού, του αριθμού των λωρίδων κυκλοφορίας και των κρίσιμων υποδομών, καθώς επίσης και οι δύο εξωτερικοί παράγοντες των μετεωρολογικών συνθηκών και του κυκλοφοριακού φόρτου, δίνεται από των παρακάτω τύπο (Fabiano et al, 2002):

$$\gamma_i = \gamma_0 \cdot \prod_{j=1}^{6} h_j$$

όπου:

γ_i: συχνότητα ατυχημάτων των στο τμήμα i της οδού για το οποίο και οι 6 εγγενείς και εξωτερικοί παράγοντες hj παραμένουν σταθεροί,

γ_0: μέση συχνότητα ατυχημάτων για το σύνολο του οδικού δικτύου,

h_j: εγγενείς και εξωτερικοί παράγοντες

Οι εγγενείς και εξωτερικοί παράγοντες αύξησης ή μείωσης της συχνότητας ατυχημάτων δίνονται στους παρακάτω πίνακες (Fabiano et al, 2002; Fabiano et al, 2005).

Πίνακας 8: Εγγενείς παράγοντες του οδικού δικτύου αύξησης ή μείωσης της συχνότητας ατυχημάτων.

Εγγενής Παράγοντας	h1	h2	h3	h4
ευθεία οδός	1			
οδός με καμπυλότητα (>200 μέτρα)	1,3			
οδός με καμπυλότητα (<200 μέτρα)	2,2			
ευθεία οδός		1		
οδός με κλίση (< 5%)		1,1		
οδός με κλίση (> 5%)		1,2		
οδός σε πλαγιά με κλίση (< 5%)		1,3		
οδός σε πλαγιά με κλίση (> 5%)		1,5		
δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση			1,8	
δύο λωρίδων και λωρίδα έκτακτης ανάγκης			1,2	
τριών λωρίδων και λωρίδα έκτακτης ανάγκης			0,8	

Εγγενής Παράγοντας	h1	h2	h3	h4
ανοιχτή οδός				1
σήραγγα				0,8
γέφυρα				1,2

Οι εγγενείς παράγοντες που συντελούν στη διαμόρφωση της τιμής της συχνότητας ατυχημάτων μπορούν να επιφέρουν συνολική μείωση μέχρι και 0,64 φορές (=1·1·0,8·0,8) και συνολική αύξηση μέχρι και 7,128 φορές (=2,2·1,5·1,8·1,2).

Πίνακας 9: Εξωτερικοί παράγοντες του οδικού δικτύου αύξησης ή μείωσης της συχνότητας ατυχημάτων.

Εξωτερικός Παράγοντας	h5	h6
Μετεωρολογικές συνθήκες		
ηλιοφάνεια	1	
βροχή/ ομίχλη	1,5	
χιόνι/ πάγος	2,5	
Κυκλοφοριακοί φόρτοι		
μικρός φόρτος < 500 οχήματα/ ώρα		0,8
μεσαίος φόρτος < 1250 οχήματα/ ώρα με < 125 φορτηγά/ ημέρα		1
υψηλός φόρτος > 1250 οχήματα/ ώρα		1,4
υψηλός φόρτος > 1250 οχήματα/ ώρα με >250 φορτηγά/ ημέρα		2,4

Οι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επιφέρουν συνολική μείωση στη μέση τιμή της συχνότητας των ατυχημάτων μέχρι και 0,8 φορές (=1·0,8) και συνολική αύξηση μέχρι και 6 φορές (=2,5·2,4). Η μέγιστη δυνατή μείωση όλων των εγγενών και εξωτερικών παραγόντων στη μέση τιμή της συχνότητας ατυχημάτων μπορεί να φτάσει μέχρι και 0,512 (=0,64·0,8), ενώ η μέγιστη αύξηση μέχρι και 42,768 (=7,128·6).

2.2 Μοντέλο δένδρου σφαλμάτων και δένδρου γεγονότων

Δένδρο σφαλμάτων: Ένα δένδρο σφαλμάτων (fault tree) είναι ένα διάγραμμα ροής το οποίο παριστά τη λογική αλληλουχία εκείνων των γεγονότων (βασικά γεγονότα) τα οποία είναι ικανά και αναγκαία να προκαλέσουν ένα συγκεκριμένο γεγονός (γεγονός κορυφής - top event). Το γεγονός κορυφής είναι συνήθως το κρίσιμο γεγονός σε ένα πιθανό σενάριο ατυχήματος όπως π.χ. έκρηξη ή έκχυση τοξικού υλικού. Ένα πλήρες δένδρο σφαλμάτων αποτελείται από τα βασικά γεγονότα τα οποία συνδέονται μέσω των ενδιάμεσων γεγονότων (Briscoe, 1977).

Κάτω από το γεγονός κορυφής και από κάθε ενδιάμεσο γεγονός υπάρχει μια "πύλη" που καθορίζει με ποια λογική συνδέονται τα γεγονότα μεταξύ τους. Οι πιο σημαντικές πύλες είναι οι πύλες "ΚΑΙ" και "ΕΙΤΕ". Η πύλη "ΚΑΙ" δίνει έξοδο αν όλες οι είσοδοι σε αυτήν ικανοποιούνται ταυτόχρονα. Η πύλη "ΕΙΤΕ" δίνει έξοδο αν τουλάχιστον μία από τις εισόδους σε αυτήν ικανοποιούνται.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας ενός γεγονότος εξόδου της πύλης "ΚΑΙ", όπου Α και Β δύο γεγονότα ενός δειγματικού χώρου, που δεν είναι ξένα μεταξύ τους, τότε ισχύει η σχέση:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - p(A \cap B).$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας ενός γεγονότος εξόδου της πύλης "ΕΙΤΕ", όπου Α και Β δύο ανεξάρτητα γεγονότα ενός δειγματικού χώρου, τότε ισχύει η σχέση:

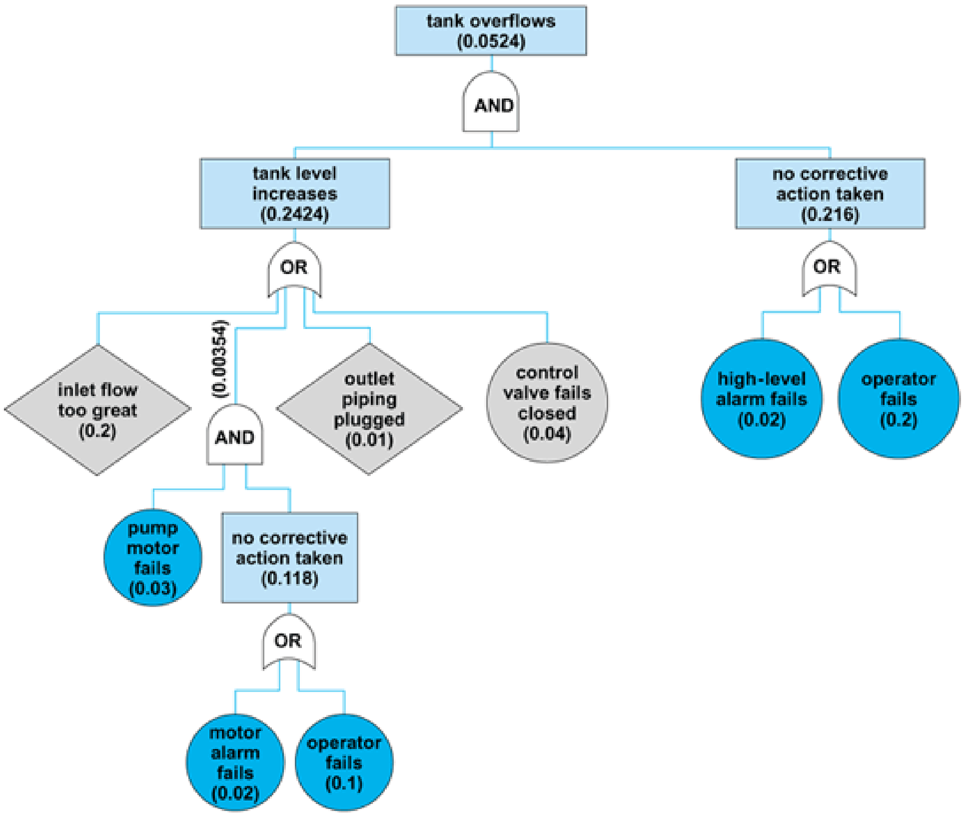
$$P(A \cap B) = P(A)P(B).$$

Εάν μάλιστα οι πιθανότητες P(A) και P(B) είναι πολύ μικρές, οπότε το γινόμενο P(A)P(B) μπορεί να παραληφθεί εντελώς, λαμβάνοντας εντέλει μια καλή προσέγγιση της πιθανότητας $P(A \cup B)$.

Η μέθοδος αυτή έχει τα εξής αδύνατα σημεία:

- Δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν όλα τα πιθανά γεγονότα και οι συνδυασμοί αυτών που προκαλούν το γεγονός κορυφής
- Η επιλογή των γεγονότων σε ένα δένδρο είναι υποκειμενική (μπορεί να υπάρχουν γεγονότα που δεν χρειάζονται ή το αντίθετο)
- Ανεπάρκεια δεδομένων αποτυχίας.

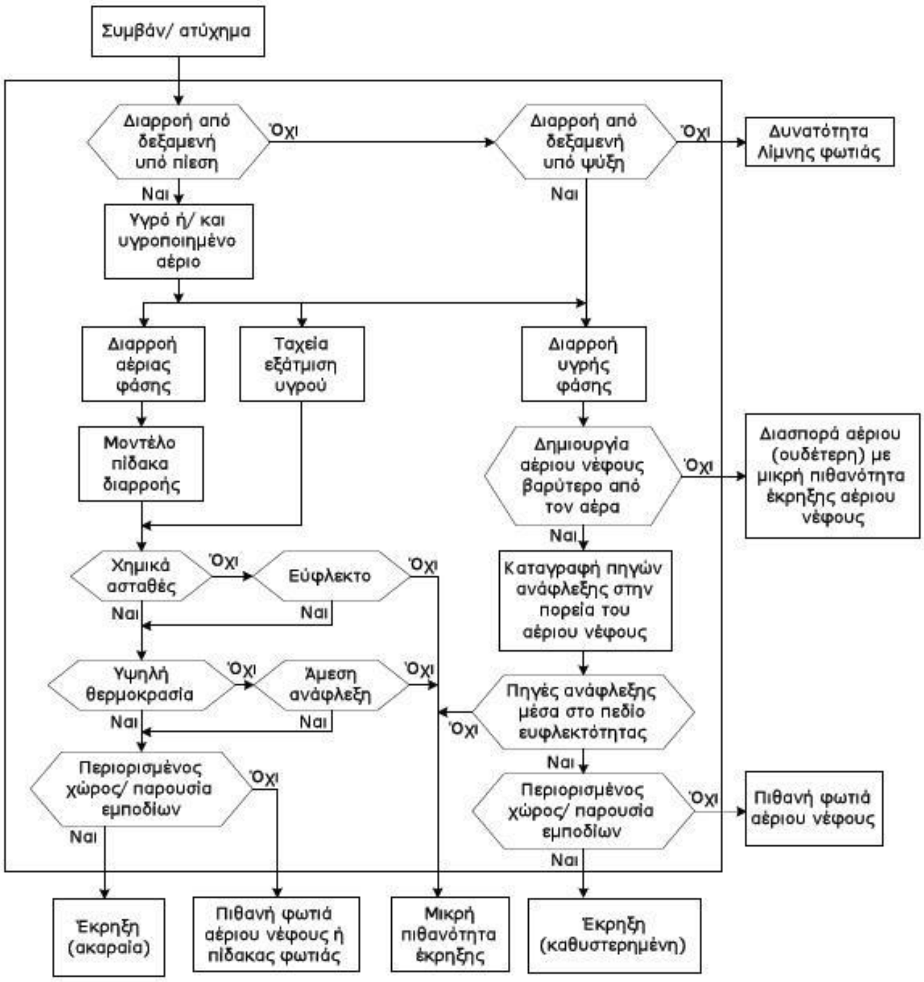
Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει ένα παράδειγμα δένδρου σφαλμάτων.



Εικόνα 1: Παράδειγμα δένδρου σφαλμάτων

Δένδρο γεγονότων: Ένα δένδρο γεγονότων είναι μια γραφική απεικόνιση όλων των δυνατών συνδυασμών μιας σειράς γεγονότων τα οποία μπορούν να συμβούν ως αποτέλεσμα ενός αρχικού γεγονότος σε μια εγκατάσταση (π.χ. διαρροή επικίνδυνου φορτίου). Δηλαδή, το δένδρο γεγονότων ξεκινά από το αρχικό γεγονός και αναπτύσσει σενάρια ή συνέπειες, βασιζόμενο στο αν η εγκατάσταση μπορεί να εκτελέσει επιτυχώς ή όχι αυτή τη λειτουργία. Για κάθε μονοπάτι του δένδρου καθορίζεται αν η δυνατή βλάβη, συνδυασμένη με τις συγκεκριμένες καταστάσεις των συστημάτων που περιλαμβάνονται στο μονοπάτι, οδηγούν σε επιτυχή απόκριση της εγκατάστασης ή σε ατύχημα, δηλ. σε παρουσία ανεπιθύμητου γεγονότος.

Ο υπολογισμός του δένδρου γεγονότων βασίζεται στην ίδια αρχή που υπολογίζεται και το δένδρο σφαλμάτων αλλά επιπροσθέτως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση των επιπτώσεων διάφορων εναλλακτικών δράσεων (ή μη δράσεων), συνεισφέροντας έτσι στην τεκμηρίωση των αποφάσεων που λαμβάνονται για την επίλυση του αρχικού γεγονότος.



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής για τον προσδιορισμό ορθολογιστικού σεναρίου (Koshy & Mallikarjunan, 1995).

Τόσο το δένδρο γεγονότων όσο και το δένδρο σφαλμάτων έχουν το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι μπορούν και παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να απαιτούν δεδομένα ανάλογα με αυτά των μεθόδων της στατιστικής ανάλυσης. Τα δεδομένα μπορεί να είναι είτε από ιστορικά στοιχεία (δείγματα που αφορούν σε βασικά γεγονότα), είτε από εργαστηριακές μετρήσεις. Επίσης έχουν τη δυνατότητα της συνολικής θεώρησης ενός συστήματος (όπως π.χ. είναι ένα σύστημα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων) και των παραγόντων του που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία.

2.3 Υποκειμενικός υπολογισμός

Ο υποκειμενικός υπολογισμός βασίζεται σε υποκειμενικές εκτιμήσεις εμπειρογνωμόνων των παραμέτρων της διακινδύνευσης και εφαρμόζεται όταν υπάρχει έλλειψη ιστορικών στοιχείων ή δεδομένων. Στις περιπτώσεις αυτές για να παρακαμφτεί το πρόβλημα έλλειψης στοιχείων, χρησιμοποιείται η τεχνογνωσία ειδικών (τόσο η θεωρητική τους όσο και η πρακτική τους γνώση) που σε συνδυασμό με τη θεώρηση των εξωτερικών παραγόντων του περιβάλλοντος, παράγουν εκτιμήσεις διακινδύνευσης.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ομάδα ειδικών με άρτια επιστημονικά θεωρητική κατάρτιση και πολυετή πρακτική εμπειρία, σε συνδυασμό με την θεώρηση των εξωτερικών παραγόντων του περιβάλλοντος του συστήματος, παράγουν τις απαιτούμενες υποθέσεις για την διεξαγωγή της εκτίμησης της επικινδυνότητας.

Μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται και αυτή σε περιπτώσεις ελλιπής συγκέντρωσης στοιχείων βασίζεται στο θεώρημα του Bayes και εκφράζει την πιθανότητα ότι ένα συγκεκριμένο ενδεχόμενο Ε έχει συμβεί αν γνωρίζουμε ότι το ενδεχόμενο Α έχει συμβεί, P(E/A).

Σχετική μελέτη διενήργησε ο Ευρωπαϊκός οργανισμός ESReDA (European Safety Reliability & Data Association) σχετικά με τις ομάδες εργασίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι οποίες διαθέτουν την απαιτούμενη θεωρητική και πρακτική εμπειρία για τη διενέργεια ερευνών των αιτιών ατυχημάτων στη βιομηχανία και τις μεταφορές. Απέστειλε 150 ερωτηματολόγια σε δημόσιες αρχές, οργανισμούς, εταιρείες και ερευνητικά κέντρα και συγκέντρωσε 50 απαντήσεις. Περίπου το 63% των απαντήσεων αφορούσαν τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων για όλους τους πιθανούς τρόπους μεταφοράς (οδική, σιδηροδρομική, εναέρια, θαλάσσια, ποτάμια, μέσω σωληνώσεων). Τα πεδία ενδιαφέροντος ήταν η μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, η παραγωγή και αποθήκευση επικίνδυνων ουσιών, και η παραγωγή ενέργειας (Roed-Larsen et al, 2004).

Οι στόχοι της έρευνας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- καταγραφή των μεθόδων διερεύνησης ατυχημάτων (σε ευρωπαϊκό, εθνικό και επιχειρησιακό επίπεδο),
- καταγραφή και παρουσίαση γενικών συστάσεων στους εμπλεκόμενους φορείς για την καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης των ατυχημάτων μέσα από τη χρήση μεθόδων διερεύνησης των ατυχημάτων,
- παρουσίαση συστάσεων στους εμπλεκόμενους φορείς σχετικά με την εφαρμογή των συμπερασμάτων από τη διερεύνηση των ατυχημάτων με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας,
- ανάπτυξη γενικών οδηγιών για τη διερεύνηση ατυχημάτων και την εφαρμογή των κατάλληλων συστάσεων.

Η διερεύνηση μεμονωμένων ατυχημάτων συντελεί στην ανάδειξη των πιθανών αιτιών και των γενεσιουργών γεγονότων που καθορίζουν την εξέλιξη του οδικού συμβάντος. Σε ένα οδικό ατύχημα μεταφοράς πυροκροτητών τον Οκτώβριο του 1994, σκοτώθηκαν 5 άτομα, ενώ άλλα 95 τραυματίστηκαν σοβαρά (Guoshun, 2000). Από την διερεύνηση του ατυχήματος προέκυψε ότι το συνολικό ύψος των συσκευασμένων φορτίων υπερέβαινε το μέγιστο επιτρεπόμενο, όπως αυτό οριοθετείται από τη νομοθεσία του κράτους όπου έγινε το ατύχημα και προέκυψε η αδυναμία επαρκών ελέγχων από τις αρμόδιες αρχές για την διαπίστωση της τήρησης των κανονισμών ασφαλείας κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. Σε ένα άλλο οδικό ατύχημα μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, η έκρηξη επήλθε ως αποτέλεσμα της έκθεσης του περιβλήματος της δεξαμενής σε άμεση φλόγα για 20 περίπου λεπτά (Planas-Cuchi). Η διερεύνηση του ατυχήματος έδειξε ότι η διάρρηξη του περιβλήματος οφειλόταν στην έκθεση θερμικής ακτινοβολίας έντασης τουλάχιστον 100kW/m^2 και αδυναμίας επαρκούς ψύξης της δεξαμενής. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η ολική διάρρηξη ενός δομικού εξαρτήματος κατασκευασμένο από χάλυβα επέρχεται έπειτα από έκθεση σε άμεση φλόγα έντασης $100kW/m^2$ για χρονική περίοδο 30 περίπου λεπτών (TNO, 1989), γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με την έκρηξη στην περιγραφή του προηγούμενου ατυχήματος.

Είναι λοιπόν γεγονός, ότι τα εργαστηριακά πειράματα αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Τα υγροποιημένα αέρια υπό πίεση μεταφέρονται σε υγρή μορφή μέσα σε κλειστές φιάλες υπό υψηλή πίεση. Σε περίπτωση ατυχήματος η αιφνίδια απώλεια του περιεχομένου της φιάλης προκαλεί ταχεία εξάτμιση του υγροποιημένου μεταφερόμενου αερίου και βίαιη απελευθέρωση ενέργειας με επακόλουθα δυσμενή αποτελέσματα. Ο βαθμός του κινδύνου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ποσότητα της ουσίας που διέρρευσε, ο ρυθμός διαρροής, οι φυσικοχημικές ιδιότητες της μεταφερόμενης ουσίας κατά τη στιγμή της διαρροής, η τοξικότητα και η ευφλεκτότητα του μίγματος της ουσίας και του αέρα μετά τη διαρροή. Από εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν (Stawczyk, 2003) για το προσδιορισμό των συνεπειών εξαιτίας της απώλειας του περιεχομένου φιαλών υγραερίου (προπανίου ή μίγματος προπανίου – βουτανίου) χωρητικότητας 5 και 11 κιλών, διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις επέρχεται το φαινόμενο της Έκρηξης Αναβράζοντος Υγρού Διαστελλόμενου Αερίου (BLEVE). Οι επιπτώσεις αυτού του είδους των εκρήξεων είναι η δημιουργία υπερπίεσης και η εκτόξευση θραυσμάτων της φιάλης. Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της αναπτυσσόμενης υπερπίεσης δεν αποτελούν άμεσο κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή, αλλά μπορεί να προκαλέσουν αρκετά σημαντικές υλικές ζημιές. Από την άλλη πλευρά, η εκτόξευση θραυσμάτων θεωρείται σημαντική απειλή και μπορεί να προκαλέσει θανάσιμους τραυματισμούς. Τα περισσότερα θραύσματα μετά τη διάρρηξη της φιάλης, εκτοξεύθηκαν σε απόσταση 100m, ενώ η μεγαλύτερη απόσταση που βρέθηκε θραύσμα της φιάλης ήταν τα 300m.

Ένα από τα βασικότερα δεδομένα για την διεξαγωγή της ποσοτικοποίησης των κινδύνων κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, αποτελεί η θεώρηση των αρχικών γεγονότων σε συνδυασμό με την πιθανότητα εμφάνισής τους. Μετά τη θεώρηση των αρχικών γεγονότων καθορίζεται η ακολουθία των γεγονότων με τη χρήση μεθοδολογικών εργαλείων, που καταλήγουν στον υπολογισμό των δυσμενών επιπτώσεων των θανάσιμων τραυματισμών.

Για την ποσοτικοποίηση των κινδύνων κατά την οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, η ερευνητική ομάδα Spadoni (Spadoni et al, 1995) βασίστηκε στις υποθέσεις αρχικών γεγονότων για τις ουσίες βενζίνη, υγραέριο, αμμωνία και χλώριο, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10: Περιγραφή αρχικών γεγονότων ατυχημάτων μεταφοράς βενζίνης, υγραερίου, αμμωνία και χλωρίου.

Μεταφερόμενη Ουσία	Αρχικό Γεγονός	Πιθανότητα
Βενζίνη	διαρροή από οπή 2 ιντσών	5%
	Καταστροφική απώλεια περιεχομένου Βενζίνη 10 τόνων	1%
	καταστροφική απώλεια περιεχομένου 20 τόνων	0,5%
Υγραέριο	διαρροή από οπή 2 ιντσών	0,5%
	καταστροφική απώλεια περιεχομένου 20 τόνων	0,05%
Αμμωνία	διαρροή από οπή 1 ίντσας	0,5%
	διαρροή από οπή 2 ιντσών	0,1%
	καταστροφική απώλεια περιεχομένου 20 τόνων	0,01%
Χλώριο	διαρροή από οπή 1 ίντσας	0,5%
	διαρροή από οπή 2 ιντσών	0,1%
	καταστροφική απώλεια περιεχομένου 20 τόνων	0,01%

Μια άλλη θεώρηση αρχικών γεγονότων στην ακολουθία της εξέλιξης για την εμφάνιση των τελικών συνεπειών για ατυχήματα που περιλαμβάνουν υγρά καύσιμα και υγραέριο παρουσιάζεται στον Πίνακας 11 (Lees, 1996). Το βυτιοφόρο όχημα μεταφοράς υγρών καυσίμων θεωρείται ότι χωρίζεται σε έξι (6) διαμερίσματα. Γίνονται οι υποθέσεις στιγμιαίας απώλειας του περιεχομένου του ενός, των δύο ή και των τριών διαμερισμάτων χωρητικότητας τεσσάρων (4) τόνων το καθένα, ενώ για ενδεχόμενη διαρροή συνεχούς ροής γίνεται η υπόθεση απώλειας περιεχομένου ενός μόνο διαμερίσματος από οπή διαμέτρου 100mm. Το βυτιοφόρο όχημα μεταφοράς υγραερίου θεωρείται ότι περιλαμβάνει ένα μόνο διαμέρισμα συνολικής χωρητικότητας δεκαπέντε (15) τόνων. Η υπόθεση στιγμιαίας απώλειας του περιεχομένου αναφέρεται σε όλη την ποσότητα, ενώ η υπόθεση διαρροής συνεχούς ροής περιλαμβάνει ρυθμούς διαρροής 2 και 32 kg/s.

Πίνακας 11: Αρχικά γεγονότα και συνέπειες ατυχημάτων μεταφοράς βενζίνης και υγραερίου.

<table>
<tr><th>Ουσία</th><th>Αρχικό γεγονός</th><th>Συνέπειες</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Βενζίνη</td><td>Καταστροφική απώλεια περιεχομένου ενός διαμερίσματος ποσότητας 4 τόνων</td><td rowspan="4">Λίμνη Φωτιάς</td></tr>
<tr><td>Καταστροφική απώλεια περιεχομένου δύο διαμερισμάτων ποσότητας 8 τόνων</td></tr>
<tr><td>Καταστροφική απώλεια περιεχομένου Τριών διαμερισμάτων ποσότητας 12 τόνων</td></tr>
<tr><td>Συνεχής διαρροή με ρυθμό 25 kg/s (από οπή διαμέτρου 100 mm)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Υγραέριο</td><td>Καταστροφική απώλεια περιεχομένου της συνολικής μεταφερόμενης ποσότητας 15 τόνων</td><td>Σφαίρα Φωτιάς,
Φωτιά Αέριου Νέφους,
Έκρηξη Αέριου Νέφους</td></tr>
<tr><td>Συνεχής διαρροή με ρυθμό 2 kg/s</td><td>Έκρηξη Αναβράζοντος</td></tr>
</table>

Ουσία	Αρχικό γεγονός	Συνέπειες
	Συνεχής διαρροή με ρυθμό 32 kg/s	Υγρού Διαστελλόμενου Αερίου, Πίδακας Φωτιάς, Φωτιά Αέριου Νέφους, Έκρηξη Αέριου Νέφους,

Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) (OECD, 2001; Ruffin et al, 2004) στις κατευθυντήριες οδηγίες για τη ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων μέσα από σήραγγες προτείνει την ανάλυση δεκατριών (13) τελικών σεναρίων που μπορεί να εμφανιστούν ως συνέπειες στην αλληλουχία γεγονότων ενός οδικού ατυχήματος, όπως αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά των προτεινόμενων σεναρίων από τον ΟΟΣΑ.

α/α	Περιγραφή	Ποσότητα	Μέγεθος Διάρρηξης (mm)	Ρυθμός διαρροής (kg/s)
1	Φωτιά ισχύος 20 MW σε φορτηγό		-	
2	Φωτιά ισχύος 100 MW σε φορτηγό		-	
3	BLEVE σε φορτίο φιαλών υγραερίου	50kg	-	
4	Λίμνη φωτιάς βενζίνης	28tn	100	20.6
5	Έκρηξη νέφους ατμών βενζίνης	28tn	100	20.6
6	Διαρροή αμμωνίας χύδην φορτίου	20tn	50	45

α/α	Περιγραφή	Ποσότητα	Μέγεθος Διάρρηξης (mm)	Ρυθμός διαρροής (kg/s)
7	BLEVE φορτίου χύδην υγραερίου	18tn	-	
8	Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην υγραερίου	18tn	50	36
9	Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην υγραερίου	18tn	50	36
10	Διαρροή χλωρίου χύδην φορτίου	20tn	50	36
11	Διαρροή ακρολεΐνης χύδην φορτίου	25tn	100	24.8
12	Διαρροή ακρολεΐνης σε κυλίνδρους	100tn	4	0.02
13	BLEVE διοξειδίου του άνθρακα σε χύδην φορτίο	20tn	-	-

Παρόμοια τελικά σενάρια συνεπειών στην αλληλουχία γεγονότων ενός οδικού ατυχήματος προτείνονται και από άλλους ερευνητές όπως φαίνεται στον Πίνακας 13 (Cassini, 1998) και αφορούν στην ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας κατά την οδική μεταφορά μέσω από το δίκτυο μεταφορών.

Πίνακας 13:Κύρια χαρακτηριστικά δέκα (10) σεναρίων ως αποτέλεσμα ατυχημάτων μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων.

α/α	Περιγραφή	Ποσότητα	Μέγεθος Διάρρηξης (mm)
1	Έκρηξη σε όχημα μεταφοράς εκρηκτικών ουσιών	15tn	-
2	BLEVE φορτίου χύδην υγραερίου	24tn	-

α/α	Περιγραφή	Ποσότητα	Μέγεθος Διάρρηξης (mm)
3	Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην υγραερίου	24tn	5
4	Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην υγραερίου	24tn	100
5	Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην υγραερίου	24tn	5
6	Πίδακας φωτιάς φορτίου χύδην υγραερίου	24tn	100
7	Έκρηξη νέφους ατμών φορτίου χύδην βενζίνης	30000lt	80
8	Λίμνη φωτιάς φορτίου χύδην βενζίνης	30000lt	80
9	Διαρροή αμμωνίας χύδην φορτίου	24tn	50
10	Φωτιά σε όχημα μεταφοράς NPK λιπασμών	20tn	-

3 Εκτίμηση επικινδυνότητας οδικής μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων

Στο κεφάλαιο αυτόν γίνεται μία ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σε θέματα που αφορούν στον σχεδιασμό της μεταφοράς των επικίνδυνων φορτίων και ειδικότερα στην εκτίμηση της επικινδυνότητας, των υπολογισμό των δεικτών διακινδύνευσης με σκοπό την αξιολόγηση και επιλογή, της ασφαλέστερης και καταλληλότερης διαδρομής.

Η εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας της μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων στο οδικό δίκτυο στηρίζεται στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας που καταγράφει και αναλύει ένα σύνολο παραγόντων, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και επηρεάζουν τη μεταφορά σε κάθε χρονική στιγμή.

Ενδεικτικά, αναφέρονται οι κυριότερες παράμετροι στις οποίες βασίζεται η μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας κατά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων:

- Αριθμός δρομολογίων.
- Συχνότητα ατυχημάτων
- Οδικά χαρακτηριστικά.
- Καιρικές συνθήκες.
- Πιθανά σενάρια επιπτώσεων (φωτιές, εκρήξεις).
- Πληθυσμιακή πυκνότητα.

Η λεπτομερής ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων σε όσο το δυνατόν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

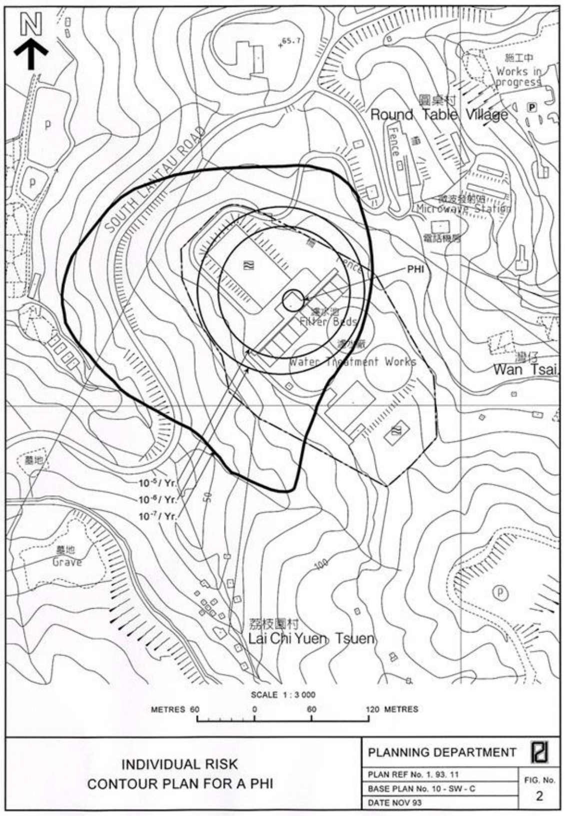
3.1 Ορισμός Διακινδύνευσης

Οι δύο βασικότεροι παράμετροι, οι οποίοι και λειτουργούν συμπληρωματικά η μια με την άλλη, όσο αφορά στη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με τη μεταφορά και διαχείριση των επικίνδυνων φορτίων είναι η διακινδύνευση και η επικινδυνότητα.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της επικινδυνότητας γίνεται με τους δείκτες της διακινδύνευσης. Με τον όρο διακινδύνευση ορίζεται το επίπεδο κινδύνου στο οποίο εκτίθενται ο άνθρωπος, το περιβάλλον και οι παρακείμενες περιουσίες κατά τη μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων και υπάρχουν δύο τύποι διακινδύνευσης για την αξιολόγηση των κινδύνων: ο δείκτης της Ατομικής διακινδύνευσης (Individual Risk) και ο δείκτης της Κοινωνικής διακινδύνευσης (Societal Risk).

Ατομική διακινδύνευση (IR) : ορίζεται η πιθανότητα ένα απροστάτευτο άτομο παραμένον σε συγκεκριμένο σημείο (x,y) αυτό, να υποστεί θανάσιμο τραυματισμό από ενδεχόμενο ατύχημα που θα συμβεί εξαιτίας της επικίνδυνης δραστηριότητας (Ale et al, 2002).

Η ατομική διακινδύνευση εξαρτάται από τη γεωγραφική τοποθεσία και παριστάνεται με ισοϋψείς καμπύλες πιθανότητας θανάσιμου τραυματισμού, πάνω σε ένα γεωγραφικό χάρτη γύρω από την επικίνδυνη δραστηριότητα. Η ατομική διακινδύνευση δεν είναι χαρακτηριστικό του πληθυσμού, αλλά μόνο της γεωγραφικής τοποθεσίας που γειτνιάζει με μια επικίνδυνη δραστηριότητα, για την οποία υπολογίζεται. Οι ισοϋψείς καμπύλες των πιθανοτήτων θανάσιμου τραυματισμού πάνω σε έναν γεωγραφικό χάρτη γύρω από μια επικίνδυνη δραστηριότητα, παρουσιάζουν το επίπεδο επικινδυνότητας της συγκεκριμένης περιοχής, ανεξάρτητα από την παρουσία οποιουδήποτε πληθυσμού στην περιοχή αυτή (Bottelberghs, 2000). Ένας τέτοιος χάρτης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3: Χάρτης αναπαράστασης ισοϋψών καμπυλών ατομικής διακινδύνευσης.

Ο δείκτης ατομικής διακινδύνευσης σε κάποιο σημείο ενός τμήματος s της διαδρομής, όπως στο παρακάτω σχήμα, βασίζεται στην ακόλουθη συνάρτηση

$$IR = f\,(T, a_v, l, f_a, p_j, P_k, P_w)$$

Όπου,

T: ο αριθμός δρομολογίων επικίνδυνου φορτίου ανά συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

a_v : το ποσοστό βυτιοφόρων ανά συνολικό αριθμό οχημάτων που κινούνται στο οδικό τμήμα s της διαδρομής.

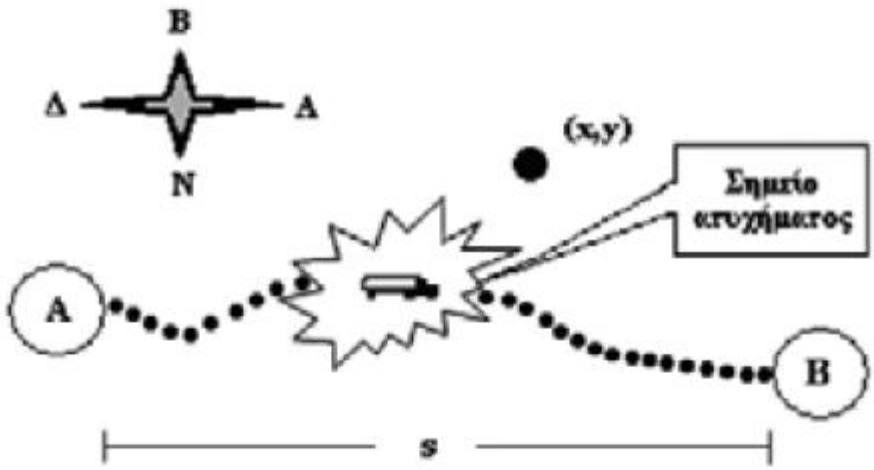
l: το μήκος του τμήματος s της διαδρομής.

f_a: η συχνότητα ατυχημάτων στο τμήμα s της διαδρομής.

p_j: τα χαρακτηριστικά της διαδρομής (μορφολογία οδοστρώματος, λωρίδες κυκλοφορίας, καιρικές συνθήκες, ύπαρξη γέφυρας ή σήραγγας).

P_k : η πιθανότητα σεναρίων φωτιάς, έκρηξης κ.λπ.

P_w: τα χαρακτηριστικά του ανέμου (διεύθυνση και ταχύτητα).



Εικόνα 4: Αναπαράσταση θέσης ατυχήματος(x,y) μεταξύ διαδρομής s.

<u>Κοινωνική Διακινδύνευση (SR):</u> ορίζεται ως η συχνότητα να υποστούν θανάσιμο τραυματισμό Ν ή περισσότερα άτομα, από ενδεχόμενο ατύχημα που θα συμβεί εξαιτίας της επικίνδυνης δραστηριότητας (Alle et al, 2002).

Κοινωνική διακινδύνευση ορίζεται η καμπύλη της αθροιστικής συχνότητας F των Ν ή περισσότερων θανάσιμων τραυματισμών, προς τον αριθμό Ν των θανάσιμων τραυματισμών. Η κοινωνική διακινδύνευση δεν εξαρτάται από την γεωγραφική τοποθεσία, αλλά είναι χαρακτηριστικό της επικίνδυνης δραστηριότητας και του πληθυσμού που εκτίθεται στους πιθανούς κινδύνους από τη συγκεκριμένη δραστηριότητα. Συνεπώς, εάν σε κάποια επικίνδυνη δραστηριότητα εκτίθεται μηδενικός πληθυσμός, τότε η κοινωνική διακινδύνευση είναι μηδενική, γεγονός που δεν ισχύει και για την ατομική διακινδύνευση (Bottelberghs, 2000).

Ο δείκτης της κοινωνικής διακινδύνευσης αποδίδεται ποσοτικά από τις ακόλουθες συναρτησιακές σχέσεις.

$$F_s = f\,(T, a_v, I, f_a, p_j, P_k)$$

Όπου,

F_s: η συχνότητα εμφάνισης του συμβάντος ενός ατυχήματος μεταφερόμενου επικίνδυνου φορτίου στο τμήμα s της διαδρομής.

P_k : η πιθανότητα εμφάνισης του συμβάντος εξαιτίας του ατυχήματος επικίνδυνου υλικού.

Οι θανάσιμοι τραυματισμοί δίνονται από τον τύπο

$$N_s = f\,(S_k, \Pi_s, P_{death})$$

Όπου,

N_s: ο αριθμός των θανάσιμων τραυματισμών εξαιτίας του συμβάντος.

S_k: οι μονάδες επιφάνειας της περιοχής που επηρεάζεται από το συμβάν.

Π_s: η πληθυσμιακή πυκνότητα στο σημείο του ατυχήματος.

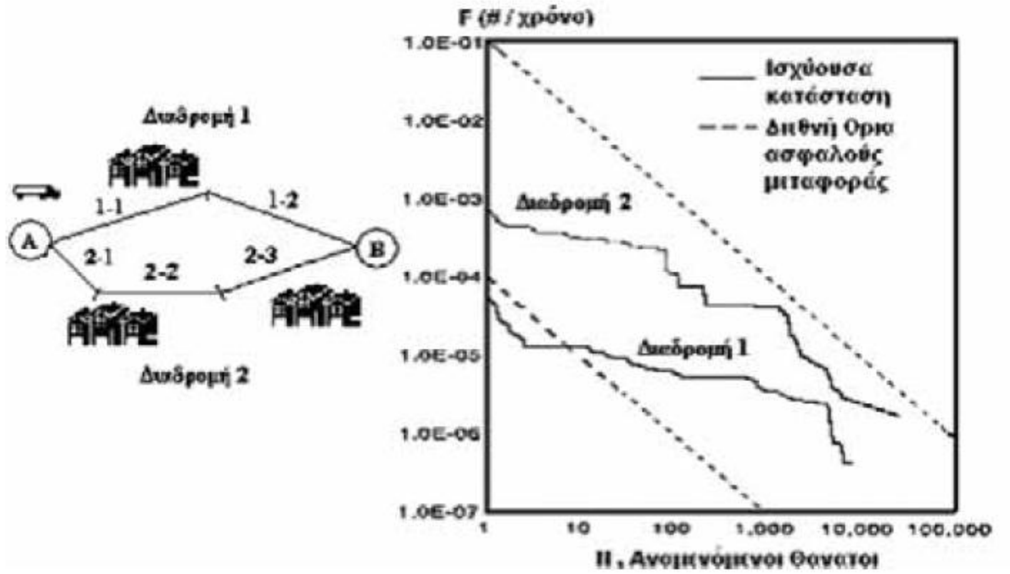
P_{death}: η πιθανότητα θανάσιμου τραυματισμού.

Για τον υπολογισμό της αθροιστικής πιθανότητας συχνότητας εμφάνισης κάθε συμβάντος ενός ατυχήματος για κάθε τμήμα διαδρομής, προστίθενται οι συχνότητες F_s για όλα τα πιθανά σενάρια του επικίνδυνου εμπορεύματος.

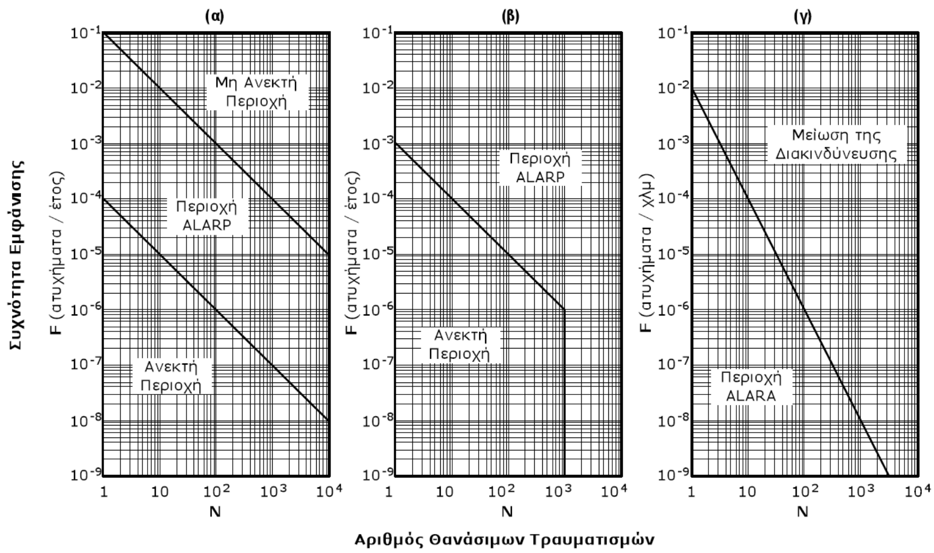
$$F= \Sigma\, F_s \quad \text{για κάθε } N_s \geq N$$

Η γραφική απεικόνιση της κοινωνικής διακινδύνευσης γίνεται με την καμπύλη F/N, η οποία αποτελεί τη συσχέτιση της συχνότητας F όλων των τελικών σεναρίων από ένα συγκεκριμένο κίνδυνο που προκαλούν N ή περισσότερους θανάσιμους τραυματισμούς, με τον αριθμό N των θανάσιμων τραυματισμών.

Τα λογαριθμικά διαγράμματα σχεδιασμού των καμπυλών F/N χωρίζονται σε τρεις περιοχές: στην περιοχή της *μη ανεκτής* επικινδυνότητας, στην περιοχή *ALARP (As Low As Reasonably Practicable)*, και στην περιοχή της *ανεκτής* επικινδυνότητας. Στην περίπτωση που όλη ή μέρος της καμπύλης F/N βρίσκεται στην περιοχή της μη ανεκτής επικινδυνότητας, απαγορεύεται η άσκηση της επικίνδυνης δραστηριότητας. Στην περίπτωση που όλη ή μέρος της καμπύλης F/N βρίσκεται στην περιοχή ALARP και η υπόλοιπη καμπύλη F/N βρίσκεται στην περιοχή της ανεκτής επικινδυνότητας, επιτρέπεται η άσκηση της επικίνδυνης δραστηριότητας εφόσον ληφθούν τα λογικά εφικτά μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας. Τέλος, όταν όλη η καμπύλη F/N βρίσκεται στην περιοχή της ανεκτής επικινδυνότητας, επιτρέπεται η άσκηση της επικίνδυνης δραστηριότητας χωρίς τη λήψη επιπλέον μέτρων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη F/N καθώς και τα γραμμικά όρια καμπυλών F/N που έχουν θεσπίσει η Αγγλία (ACDS, 1991) και η Ολλανδία (Ale et al, 2000; Bottelberghs, 2000) για την οδική μεταφορά επικίνδυνων φορτίων και το Χονγκ Κονγκ (Boult, 2000) για την οδική μεταφορά υγροποιημένων προϊόντων πετρελαίου (υγραέριο).



Εικόνα 5: Τυπική καμπύλη F/N για διαφορετικές διαδρομές.



Εικόνα 6: Γραμμικά όρια καμπυλών F/N (F: συχνότητα ατυχημάτων, N: αριθμός θανάσιμων τραυματισμών), α) Αγγλία, β) Χονγκ Κονγκ, γ) Ολλανδία.

3.2 Μοντέλα μεθόδων εκτίμησης επικινδυνότητας και λήψης αποφάσεων

Η έννοια της επικινδυνότητας συνδυάζει δύο βασικά και θεμελιώδη μεγέθη:

- τις ανεπιθύμητες συνέπειες.
- την αβεβαιότητα εμφάνισης των συνεπειών αυτών.

Η επικινδυνότητα αναφέρεται στο μέλλον όπου οι ανεπιθύμητες συνέπειες μπορεί να εκδηλωθούν αλλά με αβεβαιότητα εμφάνισης. Ο υπολογισμός της επικινδυνότητας είναι η ποσοτικοποίηση, η μέτρηση του μεγέθους των συνεπειών και της αβεβαιότητας εμφάνισής τους. Οι συνέπειες μπορεί να μετρηθούν με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η μέτρηση των επιπτώσεων στην υγεία, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των θανάσιμων τραυματισμών που προκαλούνται από κάποιο ατύχημα. Η αβεβαιότητα ποσοτικοποιήται ως πιθανότητα εμφάνισης. Συνήθως, η αβεβαιότητα εκφράζεται ως μια συνάρτηση αθροιστικής κατανομής, η οποία απεικονίζει τις πιθανότητες εμφάνισης των συνεπειών με μετρούμενες τιμές επιπτώσεων πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Η ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας έχει ως στόχο την εκτίμηση των ακόλουθων βασικών παραμέτρων:

- Τι μπορεί να αστοχήσει; Πόσο συχνά μπορεί να συμβεί η αστοχία;
- Ποιες είναι οι συνέπειες; Ποια είναι η πιθανότητα εμφάνισης των συνεπειών;

Συχνά η ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας αμφισβητείται λόγω της ανεπάρκειας σχετικών δεδομένων για τη υλοποίηση της. Για το λόγο αυτό, μια από τις βασικές αρχές της ανάλυσης της επικινδυνότητας είναι ο προσδιορισμός των πηγών αβεβαιότητας και η ποσοτικοποίηση τους μέσα από τη συστηματική και ενδελεχή εξέταση όλων των πιθανών πηγών αβεβαιότητας που αφορούν τόσο στη στοχαστική θεώρηση του προβλήματος, όσο και στην έλλειψη επαρκών δεδομένων. Η αποφυγή του προβλήματος δεν συνιστά την επίλυσή του και για το λόγο αυτό πρέπει να εκτιμηθούν οι πηγές αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό της συχνότητας των ατυχημάτων και της ποσοτικοποίησης των συνεπειών. Η εκτίμηση των κινδύνων έχει σκοπό την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που αφορούν στη διαχείριση των συγκεκριμένων κινδύνων.

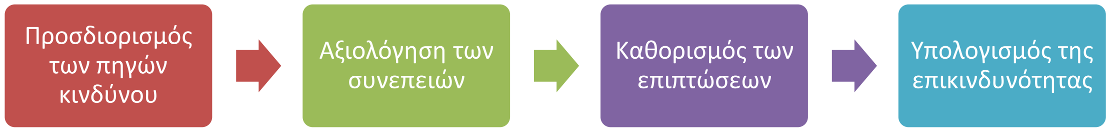
Οι περισσότερες αποφάσεις που αφορούν στους εμφανιζόμενους κινδύνους από τις νέες τεχνολογικές καινοτομίες ή και χρήσεις καινούργιων επικίνδυνων ουσιών, έχουν σκοπό τη μείωση της επικινδυνότητας ή αλλιώς την αύξηση των επιπέδων ασφάλειας. Η εκτίμηση και ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας παρέχει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο (μοντέλο) για τη λήψη αποφάσεων και αναδεικνύει εναλλακτικούς τρόπους και μέτρα για τη βελτίωση της ασφάλειας. Οι τρόποι και τα μέτρα αυτά χωρίζονται σε αυτά που επιδιώκουν τη μείωση της συχνότητας των ατυχημάτων και αυτά που συντελούν στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών από τα ατυχήματα. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα προληπτικά μέτρα, ενώ η δεύτερη κατηγορία τα κατασταλτικά μέτρα.

Για τη διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας και λήψης αποφάσεων έχουν οριστεί ορισμένα συγκεκριμένα μοντέλα τεσσάρων βημάτων τα οποία όλα βασίζονται στο γενικευμένο μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας των τεσσάρων βημάτων.

3.2.1 Στάδια εκτίμησης επικινδυνότητας

– **<u>Γενικευμένο μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας</u>**

Όλα τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα από τις επιστημονικές ομάδες που δραστηριοποιούνται σε διαφορετικά πεδία, έχουν ένα κοινό πλαίσιο στο οποίο εντάσσονται. Η πλήρης διαδικασία για την εκτίμηση της επικινδυνότητας αποτελείται από τέσσερα αλληλένδετα αλλά διακριτά μεταξύ τους στάδια που περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των πηγών κινδύνου, την αξιολόγηση των συνεπειών, τον καθορισμό των επιπτώσεων και τον υπολογισμό της επικινδυνότητας, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα (Covello et al, 1993).



Εικόνα 7: Απεικόνιση συσχετίσεων ανάλυσης και διαχείρισης της επικινδυνότητας.

Η ανάλυση της επικινδυνότητας περιλαμβάνει τα τρία πρώτα στάδια, τον εντοπισμό των πηγών κινδύνου, την εκτίμηση της επικινδυνότητας και την αξιολόγηση της επικινδυνότητας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το κάθε στάδιο χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της επικινδυνότητας από τους υπευθύνους λήψης αποφάσεων.

Τα τέσσερα στάδια της εκτίμησης της επικινδυνότητας περιλαμβάνουν:

- Προσδιορισμός των πηγών κινδύνου

Το στάδιο του προσδιορισμού των πηγών κινδύνου αναφέρεται στη περιγραφή ποσοτικοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης ενός βλαπτικού παράγοντα ως αποτέλεσμα της διαρροής του. Περιλαμβάνει: i) την περιγραφή του είδους, της ποσότητας, του χρόνου και της πιθανότητας διαρροής τοξικής ουσίας ή άλλου βλαπτικού παράγοντα, ii) την περιγραφή των αλλαγών στα παραπάνω μεγέθη που μπορούν να επιφέρουν διάφορες ενέργειες ή γεγονότα.

- Αξιολόγηση των συνεπειών

Το στάδιο της αξιολόγησης των συνεπειών αναφέρεται στην περιγραφή και τον προσδιορισμό των σχετικών συνθηκών και χαρακτηριστικών του πληθυσμού ή και του περιβάλλοντος που εκτίθεται στο βλαπτικό παράγοντα, ο οποίος διέρρευσε από την πηγή κινδύνου. Περιλαμβάνει: i) την περιγραφή της έντασης, της συχνότητας και της διάρκειας της έκθεσης του πληθυσμού, ii) τον τρόπο έκθεσης του πληθυσμού (π.χ. κατάποση, εισπνοή, τοπική απορρόφηση), iii) τον αριθμό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του πληθυσμού που εκτίθεται, iv) την περιγραφή οποιουδήποτε άλλου παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει την έκθεση του πληθυσμού.

- Καθορισμός των επιπτώσεων

Το στάδιο του καθορισμού των επιπτώσεων αναφέρεται στην περιγραφή και την ποσοτικοποίηση της συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης του πληθυσμού σε έναν βλαπτικό παράγοντα και των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία ή/ και στο περιβάλλον ως αποτέλεσμα της προαναφερόμενης έκθεσης. Περιλαμβάνει: i) τον προσδιορισμό των θανάσιμων τραυματισμών, των νόσων και των λοιπών τραυματισμών που υφίσταται ένας πληθυσμός, ο οποίος εκτίθεται σε έναν βλαπτικό παράγοντα, ii) τον προσδιορισμό των οικολογικών επιπτώσεων από την είσοδο και παραμονή ενός βλαπτικού παράγοντα στο περιβάλλον.

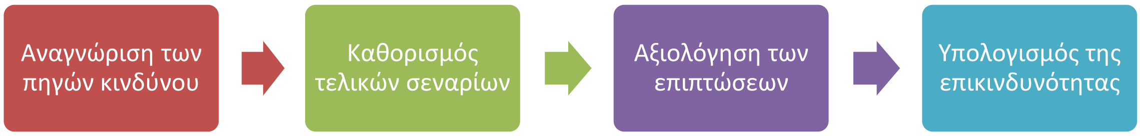
- Υπολογισμός της επικινδυνότητας

Το στάδιο του υπολογισμού της επικινδυνότητας αναφέρεται στη συσχέτιση και ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων του προσδιορισμού της διαρροής, της αξιολόγησης των συνεπειών και του καθορισμού των επιπτώσεων, από όπου προκύπτουν μετρήσιμα μεγέθη της επικινδυνότητας για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Προλαμβάνει: i) την εκτίμηση του αριθμού των ατόμων που υπέστησαν προβλήματα υγείας διαφόρων επιπέδων σοβαρότητας, ii) την εκτίμηση της φύσης και της έκτασης των επιβλαβών επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον, iii) την κατανομή των πιθανοτήτων και άλλων χαρακτηριστικών για την αποτύπωση της αβεβαιότητας στις προαναφερόμενες εκτιμήσεις.

– **<u>Μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας για βιομηχανικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης</u>**

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της επικινδυνότητας βάσει των απαιτήσεων της Οδηγίας 96/82/ΕΚ (ΣΕΕ, 1996) και των τροποποιήσεών της (ΣΕΕ, 2003), περιλαμβάνει τέσσερα στάδια όπως παρουσιάζονται στην εικόνα (Ale et al,

2000) και είναι η αναγνώριση των πηγών κινδύνου, ο καθορισμός των τελικών συνεπειών, η αξιολόγηση των επιπτώσεων και ο υπολογισμός της επικινδυνότητας.



Εικόνα 8: Στάδια εκτίμησης της επικινδυνότητας για βιομηχανικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης.

Τα στάδια της εκτίμησης της επικινδυνότητας αναλύονται στα εξής:

- Αναγνώριση των πηγών κινδύνου.

Το στάδιο της αναγνώρισης των πηγών κινδύνου αναφέρεται στην εξέταση όλων των πιθανών απειλών που μπορούν να προκύψουν και να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις για τον υπό εξέταση στόχο. Ο υπό εξέταση στόχος είναι συνήθως ο πληθυσμός, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να είναι γενικότερα το περιβάλλον ή ειδικότερα ο υδροφόρος ορίζοντας και τα επιφανειακά ύδατα.

- Καθορισμός τελικών σεναρίων.

Το στάδιο του καθορισμού των τελικών σεναρίων αναφέρεται στα τελικά σενάρια που προκύπτουν από την εμφάνιση του ανεπιθύμητου αρχικού συμβάντος διαρροής της επικίνδυνης χημικής ουσίας και την αλληλουχία των ενδιάμεσων γεγονότων.

- Αξιολόγηση των επιπτώσεων.

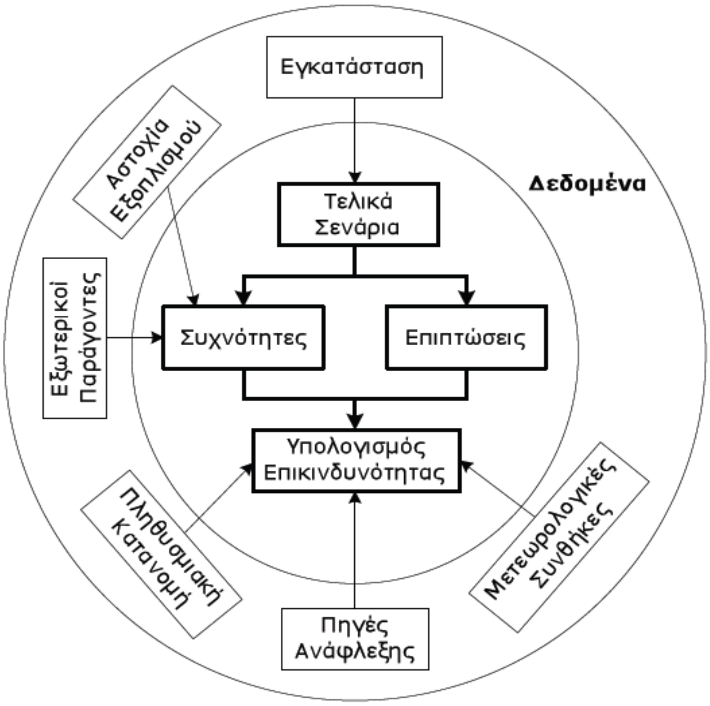
Το στάδιο της αξιολόγησης των επιπτώσεων αναφέρεται στις επιπτώσεις που προέρχονται από τα τελικά σενάρια. Γα τον υπολογισμό των επιπτώσεων από τις φυσικές συνέπειες των τελικών σεναρίων, απαιτούνται δεδομένα συσχέτισης της καταπόνησης των εκτιθέμενων στόχων με τις επιπτώσεις των τελικών σεναρίων. Οι εκτιθέμενοι στόχοι είναι κυρίως ο πληθυσμός, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εξετάζονται και άλλοι παράγοντες, όπως περιουσιακά στοιχεία που περιλαμβάνουν σπίτια και χώρους γραφείων, καθώς επίσης και το φυσικό περιβάλλον όπως τα επιφανειακά ύδατα και το οικοσύστημα. Η συσχέτιση δόσης των επιπτώσεων από τα τελικά σενάρια και της καταπόνησης του εκτιθέμενου πληθυσμού με αποτελέσματα θανάσιμων τραυματισμών μπορεί να έχει δύο μορφές: i) μια οριακή τιμή, κάτω από την οποία υφίσταται μηδενική καταπόνηση ο εκτιθέμενος πληθυσμός και πάνω από την οποία η καταπόνηση είναι ολοκληρωτική με αποτέλεσμα το θανάσιμο τραυματισμό του συνόλου του εκτιθέμενου πληθυσμού, ii) μια σχέση μεταξύ της δόσης ή της έκθεσης του πληθυσμού και του ποσοστού των θανάσιμων τραυματισμών.

- Υπολογισμός της επικινδυνότητας.

Όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και υπολογίστηκαν κατά τα προηγούμενα στάδια συνδυάζονται με τις αντίστοιχες πιθανότητες για τον πλήρη καθορισμό της επικινδυνότητας (Ale et al, 2000).

Τα ενδιάμεσα γεγονότα που εμφανίζονται στην αλληλουχία εμφάνισης γεγονότων για τον καθορισμό των τελικών σεναρίων, χαρακτηρίζονται από μια πιθανότητα εμφάνισης. Επιπρόσθετα, το αρχικό συμβάν χαρακτηρίζεται από μια συχνότητα εμφάνισης. Πολλαπλασιάζοντας τη συχνότητα εμφάνισης του αρχικού συμβάντος με τις πιθανότητες όλων των ενδιάμεσων γεγονότων στη αλληλουχία γεγονότων που συντελούν στη δημιουργία ενός τελικού σεναρίου, προκύπτει η συχνότητα εμφάνισης του σεναρίου αυτού. Η συχνότητα εμφάνισης του κάθε σεναρίου συνδυάζεται με τα αποτελέσματα υπολογισμού των θανάσιμων τραυματισμών που προκαλούν οι φυσικές συνέπειες του σεναρίου, χρησιμοποιώντας τα απαιτούμενα δεδομένα για τους υπολογισμούς όπως παρουσιάζονται στο σχήμα.

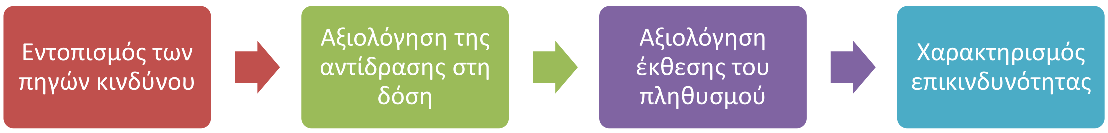
Τα τελικά ζεύγη τιμών των συχνοτήτων εμφάνισης τελικών σεναρίων και των επιπτώσεων των φυσικών συνεπειών από τα τελικά σενάρια, μετρούμενες σε θανάσιμους τραυματισμούς, συνδυάζονται κατάλληλα για τον υπολογισμό των διαφόρων δεικτών επικινδυνότητας.



Εικόνα 9: Δεδομένα για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας (Ale et al, 2000).

– **<u>Μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας σύμφωνα με την οδηγία της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ.</u>**

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ έχει θεσπίσει οδηγίες για την εκπόνηση των μελετών εκτίμησης της επικινδυνότητας. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας αποτελείται από τέσσερα στάδια, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα.



Εικόνα 10: Στάδια εκτίμησης της επικινδυνότητας σύμφωνα με την οδηγία της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ.