

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

**Μέθοδοι βελτιστοποίησης καταμερισμού πόρων για
ελαχιστοποίηση επικινδυνότητας αστοχίας δικτύων**

Υπό
ΜΑΡΙΑ Μ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΥ

Εισηγητική Διδακτορικής Διατριβής
Υποβλήθηκε στα εξής μέλη της τριμελούς επιτροπής:

Δρ. Ζηλιασκόπουλος Αθανάσιος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος, Καθηγητής
Δρ. Ιακώβου Ελευθέριος, Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ
ΜΑΡΤΙΟΣ

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή – Ορισμός Προβλήματος.....	3
1.1	Εισαγωγή	3
1.2	Διατύπωση του προβλήματος	5
1.3	Στόχοι.....	11
1.4	Ανασκόπηση της διδακτορικής διατριβής	13
2.	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	14
2.1	Εισαγωγή	14
2.2	Μέθοδοι εκτίμησης της επικινδυνότητας των δικτύων μεταφοράς.....	14
2.2.1	Ποιοτικές προσεγγίσεις.....	17
2.2.2	Ποσοτικές προσεγγίσεις.....	20
2.2.3	Υβριδικές προσεγγίσεις	24
2.3	Μέθοδοι διαχείρισης και εκτίμησης της επικινδυνότητας των σιδηροδρομικών δικτύων	29
2.3.1	Μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας σε ισόπεδες διαβάσεις	42
2.4	Μοντέλα Ανάλυσης Δεδομένων Ατυχημάτων	45
2.4.1	Μοντέλα μέτρησης δεδομένων (count data models)	45
2.4.1.1.	Μοντέλο παλινδρόμησης Poisson.....	45
2.4.1.2.	Μοντέλο αρνητικής διωνυμικής παλινδρόμησης (NB)	47
2.4.1.3.	Μοντέλο παλινδρόμησης ZIP	48
2.4.1.4.	Σύγκριση των μοντέλων Poisson, NB, ZIP	50
2.4.2	Μοντέλο Κατηγορικών Δεδομένων (<i>Categorical data</i>).....	53
2.5	Μέθοδοι Υπολογισμού Εκτίμησης Επιπτώσεων	58
2.6	Μέθοδοι ανάλυσης Κόστους - Οφέλους.....	62
2.7	Συμπεράσματα	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67

1. Εισαγωγή – Ορισμός Προβλήματος

1.1 Εισαγωγή

Τη τελευταία δεκαετία, τα δίκτυα διανομής και μεταφοράς, όπως είναι το σιδηροδρομικό δίκτυο, το οδικό δίκτυο, οι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου, έχουν επεκταθεί στις περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η ασφάλεια αποτελεί σημαντική παράμετρος για τη λειτουργία τους διότι τα δίκτυα αυτά συχνά διασχίζουν πυκνοκατοικημένες πόλεις, βιομηχανικές περιοχές, αγροτικές καλλιέργειες καθώς και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Συνεπώς, υπάρχουν διάφοροι κίνδυνοι, όπως οι φυσικές καταστροφές, οι δραστηριότητες τρίτων, τα ελαττώματα των υλικών και τα ανθρώπινα λάθη που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία στα δίκτυα μεταφοράς. Ενώ λοιπόν η ανάγκη για την ύπαρξη και λειτουργία των δικτύων αυτών καθώς και είναι αδιαμφισβήτητη, υπάρχουν σημαντικές ανησυχίες για τον κίνδυνο που απορρέει από την πιθανή αστοχία τους και τις συνέπειες που θα έχει στους επιβάτες, στους πολίτες, στο περιβάλλον και στις κρίσιμες υποδομές σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο.

Ειδικότερα, το σιδηροδρομικό σύστημα έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας που έχει σημειωθεί στα υπολογιστικά εργαλεία, στα συστήματα ελέγχου και στα ηλεκτρονικά μέσα. Όσο η τεχνολογία για τις αμαξοστοιχίες ταχείας κυκλοφορίας και τα προηγμένα συστήματα είναι διαθέσιμα, τόσο η ανάγκη για ασφάλεια του δικτύου αυξάνεται. Για να μειωθούν οι κίνδυνοι αστοχίας του συστήματος και για να διασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου, η Ευρώπη έκανε προσπάθειες εδώ και πολλά χρόνια για να αναπτύξει και να επικαιροποιήσει τα σχετικά πρότυπα ασφαλείας η εφαρμογή των οποίων όμως απαιτεί σημαντικά κεφάλαια επενδύσεων. Ωστόσο τα ατυχήματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο δε μπορούν να αγνοηθούν και για αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην αποδοτική και οικονομική διαχείριση των δικτύων.

Αν και διάφοροι μέθοδοι και έννοιες για την εκτίμηση της επικινδυνότητας έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, η ακρίβειά των ποσοτικών μετρήσεών τους είναι ελλιπής και έχει περιθώρια βελτίωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι απαιτούνται κάποιες προϋποθέσεις για να αναλυθούν οι δείκτες επικινδυνότητας του σιδηροδρομικού συστήματος και για να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία της εκτίμησης επικινδυνότητας θα πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες αυτές.

Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες που έχουν αναπτυγμένα σιδηροδρομικά δίκτυα θεωρούν την έννοια της επικινδυνότητας σημαντική και την αναλύουν ώστε να

διασφαλίσουν ένα αποδεκτό επίπεδο επικινδυνότητας και συμμορφώνονται με τη νομοθεσία. Αρχικά η πιθανότητα να συμβεί ένα ατύχημα θεωρείται τυχαίο γεγονός και ενώ η εκτίμηση επικινδυνότητας εφαρμόζεται στην καθημερινότητα, ο ορισμός και η έννοια της είναι ακόμη ασαφής για να οριστεί επακριβώς. Ο Wharton (1992) θεωρεί την επικινδυνότητα ως παράγωγο της συχνότητας ατυχημάτων και των επιπτώσεων της αστοχίας. Ο Gratt (1987) θεωρεί την επικινδυνότητα ως παράγωγο της πιθανότητας και των συνεπειών ενώ ο Lowrance (1976) ως μέτρο της δριμύτητας (*severity*) και της πιθανότητας. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως ο συνδυασμός δύο βασικών παραμέτρων: της πιθανότητας να συμβεί ένα ατύχημα και των επιπτώσεων του:

$$\text{Επικινδυνότητα} = (\text{Πιθανότητα να συμβεί}) \times (\text{Επιπτώσεις})$$

Επίσης η εκτίμηση επικινδυνότητας ατυχημάτων είναι μετρήσιμη και το επίπεδο επικινδυνότητας επηρεάζεται από δύο παραμέτρους όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επειδή όμως ο μελλοντικός ρυθμός ατυχημάτων είναι αβέβαιος και η πιθανές απώλειες είναι άγνωστες, η διαχείριση επικινδυνότητας στοχεύει στη μείωση της πιθανότητας να συμβεί το ατύχημα ή/και του επιπέδου σοβαρότητας του ατυχήματος. Για περιγραφεί επομένως το επίπεδο ασφάλειας οι δείκτες επικινδυνότητας θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν ώστε να διαχωριστεί η διαφορά μεταξύ των αντικειμενικών στόχων και των προσδοκιών και να ελεγχθεί το επίπεδο επικινδυνότητας αποδοτικά.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στο πρόβλημα της εκτίμησης και διαχείρισης της επικινδυνότητας των δικτύων και αποσκοπεί στην ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης κατανομής των διαθέσιμων πόρων και μέσων για την μείωση της επικινδυνότητας αστοχίας του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Η διαχείριση της επικινδυνότητας συνεπάγεται την αξιολόγηση των πηγών κινδύνου αλλά και της τρωτότητας της περιοχής στην οποία εστιάζουμε καθώς και το σχεδιασμό στρατηγικών και διαδικασιών για τον περιορισμό του κινδύνου αστοχίας του δικτύου σε ένα αποδεκτό επίπεδο χωρίς να παραβιάζονται οι οικονομικοί περιορισμοί.

Ειδικότερα προτείνεται μια μέθοδος όπου τα επίπεδα επικινδυνότητας και τα οφέλη των αντιμέτρων αναλύονται εξολοκλήρου. Τα οφέλη και τα κόστη εκτιμούνται και δίνεται η δυνατότητα στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να κάνει αλλαγές ανάμεσα στις επιλογές. Αυτό επιτυγχάνεται με το συνδυασμό κριτηρίων επικινδυνότητας με την εφαρμογή της ανάλυσης κόστους – οφέλους (*cost-benefit*

analysis). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επίδραση των αντιμέτρων να συγκρίνεται με άλλες επιπτώσεις και η κατανομή της επικινδυνότητας να γίνεται ελεγχόμενη.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων για ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας μερικές από τις οποίες περιγράφονται στην διατριβή. Παραδείγματα θα δοθούν τόσο για τις στατιστικές μεθόδους και για τις τεχνικές εκτίμησης επικινδυνότητας. Συχνά δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθούν όλες οι επιπτώσεις, όπως στην περίπτωση των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων. Η ποιοτική περιγραφή τους μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε συνδυασμό με την ποσοτική μέτρηση των επιπτώσεων που είναι εφικτή. Έτσι θα δημιουργηθεί μια ευρεία εικόνα που θα βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να εκτιμήσουν τις επιλογές τους.

Διάφορες μέθοδοι ποιοτικές, ποσοτικές και ημι-ποσοτικές μεθόδους εκτίμησης της επικινδυνότητας, καθώς και μέθοδοι ανάλυσης κόστους – οφέλους οι οποίες έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σε παγκόσμια κλίμακα θα αναλυθούν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν επίσης την ανάλυση τρωτότητας και κινδύνου και τον υπολογισμό των ατομικών και κοινωνικών κινδύνων.

Επίσης θα προσδιοριστούν οι παράμετροι κινδύνου και τρωτότητας των δικτύων μεταφοράς, θα ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις μιας πιθανής αστοχίας του δικτύου και θα τεθούν προτεραιότητες στην επιλογή των αντιμέτρων εφαρμόζοντας την μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας που θα αναπτυχθεί ώστε να επιλεγούν οι βέλτιστες διαδικασίες αντιμετώπισης και πρόβλεψης χωρίς να παραβιάζονται οι οικονομικοί περιορισμοί και μεγιστοποιώντας το όφελος από την εφαρμογή των αντιμέτρων, δηλαδή τη μείωση του δείκτη επικινδυνότητας, εφαρμόζοντας την ανάλυση κόστους – οφέλους. Το προτεινόμενο μοντέλο θα εφαρμοστεί σε επιλεγμένο δίκτυο μεταφοράς και διανομής και θα γίνει η υπολογιστική του τεκμηρίωση. Συγκεκριμένα θα εφαρμοστεί στο εθνικό σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδος.

1.2 Διατύπωση του προβλήματος

Η μεταφορά πόρων, επικίνδυνων υλικών, προϊόντων και επιβατών μέσω σιδηροδρομικών δικτύων θεωρείται μια αρκετά ασφαλή μέθοδος, ωστόσο τα ιστορικά δεδομένα απέδειξαν ότι ατυχήματα εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα, της ελλιπούς ή κακής συντήρησης, της αστοχία τροχαίου υλικού, της ελλιπούς εκπαίδευση και άλλων παραγόντων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στον ανθρώπινο παράγοντα, στο περιβάλλον, στις υποδομές και

στην οικονομική δραστηριότητα της περιοχής και της εταιρίας δικτύων και διανομών. Διάφοροι οικονομικοί παράγοντες, όπως οι διαχειριστές των συστημάτων διανομής, οι ασφαλιστικές εταιρίες, οι κατασκευαστές συστημάτων ελέγχου και ασφαλείας, οι φορείς πολιτικής προστασίας και το κοινό, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην εκτίμηση και διαχείριση του τεχνολογικού κινδύνου σε δίκτυα διανομής και μεταφοράς.

Στην Ευρώπη, έχουν δημιουργηθεί διάφορα πρότυπα τυποποίησης για να διασφαλίσουν την ασφάλεια της λειτουργίας των σιδηροδρομικών συστημάτων. Η τεχνολογία και οι διαδικασίες έχουν ήδη εισαχθεί για να μειώσουν τα επίπεδα επικινδυνότητας τους. Ωστόσο είναι ακόμη δύσκολο να εκτιμηθεί το λογισμικό εκτίμησης επικινδυνότητας του σιδηροδρομικού συστήματος διότι τα πρότυπα ποσοτικής εκτίμησης παραμένουν ασαφή.

Συγκεκριμένα στα σύγχρονα σιδηροδρομικά συστήματα για τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους έχουν εισαχθεί διάφορα μέτρα ασφαλείας που βασίζονται στα παραπάνω Ευρωπαϊκά πρότυπα για να διασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία του. Όμως η πολυπλοκότητα του σιδηροδρομικού συστήματος μεταφοράς σε πραγματικές συνθήκες από μόνη της αυξάνει την πιθανότητα να συμβεί κάποιο ατύχημα. Η λύση σε αυτά τα προβλήματα προς το παρόν τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε πρακτικό επίπεδο δεν έχει δοθεί σε ολοκληρωμένη και πλήρης μορφή και χαίρει περιθώρια βελτίωσης.

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ του κινδύνου (*Hazard*) και της επικινδυνότητας (*Risk*) διότι η τελευταία είναι ευμετάβλητη χωρίς να επηρεάζει άμεσα τον κίνδυνο. Ο κίνδυνος είναι χαρακτηριστικό ή σύνολο χαρακτηριστικών που απειλούν την ακεραιότητα του δικτύου και κατηγοριοποιούνται ως εξής: μηχανισμοί αστοχίας χρονικά εξαρτώμενοι και τυχαίοι μηχανισμοί αστοχίας. Η εκτίμηση επικινδυνότητας υπολογίζει τους δείκτες απόδοσης βασιζόμενη σε επεξηγηματικούς δείκτες και αναλυτικές σχέσεις ή άμεσα σύμφωνα με τις εκτιμήσεις εμπειρογνομόνων και ο δείκτης επικινδυνότητας που προκύπτει χρησιμοποιείται ως συγκριτικό μέτρο ασφαλείας.

Γενικά, η εκτίμηση επικινδυνότητας (*Risk Assessment*) αναφέρεται ως διαδικασία μέτρησης και το μοντέλο επικινδυνότητας ως εργαλείο μέτρησης. Η επικινδυνότητα που συνδέεται με την αστοχία του δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από την «πιθανότητα αστοχίας» αλλά και από την «τρωτότητα και τις συνέπειες αστοχίας» για όλα τα πιθανά σενάρια. Όσο αφορά τις επιπτώσεις αστοχίας, οι σημαντικότερες συνδέονται

με την δημόσια υγεία και την ασφάλεια (τραυματισμοί και θάνατοι), τις ζημιές σε εγκαταστάσεις του δικτύου και σε υποδομές συμπεριλαμβανομένου τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και την οικονομική επίπτωση στη δραστηριότητα της εταιρίας διαχείρισης δικτύου.

Το δίκτυο διανομής και μεταφοράς επιβατών, προϊόντων και επικίνδυνων φορτίων είναι στη πραγματικότητα ένα πολύπλοκο και σύνθετο σύστημα που πρέπει να λειτουργεί συνδυασμένα για να επιτευχθεί η ασφαλής μεταφορά επιβατών και φορτίων από μια τοποθεσία σε μία άλλη. Η περιοχή του κινδύνου, αναφορικά με το μέγεθος της καταστροφής, εξαρτάται από διάφορους παραμέτρους όπως το είδος της αστοχίας του δικτύου, το χρόνο της ανάφλεξης στην περίπτωση μεταφοράς εύφλεκτων υλικών, τις περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές συνθήκες στο σημείο αστοχίας, η λειτουργία των συστημάτων επικοινωνίας και ασφαλείας. Ο προσδιορισμός των ζωνών κινδύνου και ο υπολογισμός του ατομικού και κοινωνικού κινδύνου, η επιλογή των προληπτικών μέτρων καθώς και των μέτρων αντιμετώπισης θα γίνει μέσα από διαδικασία της διαχείρισης επικινδυνότητας. Επίσης η αστοχία του δικτύου μπορεί να είναι χρονικά ανεξάρτητη, όπως η ζημιά από τρίτους, οι σεισμοί, η αστοχία τροχαίου υλικού. Για αυτό, οι ρυθμιστικοί φορείς και οι διαχειριστές του δικτύου εστιάζονται στην βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας του δικτύου.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, η ανάγκη για ολοκληρωμένη διαχείριση επικινδυνότητας των δικτύων μεταφοράς και διανομής αυξάνεται συνεχώς και πολλές εταιρίες διαχείρισης και ελέγχου αυτών των εταιριών εφαρμόζουν υπολογιστικές μεθόδους ως εργαλείο για την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Η βασικότερη δραστηριότητα ωστόσο, πριν την εφαρμογή του μοντέλου διαχείρισης, είναι ο ορισμός του συστήματος και ο προσδιορισμός των μηχανισμών αστοχίας του δικτύου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι σύγχρονες μέθοδοι διαχείρισης της επικινδυνότητας και οι αναλύσεις κόστους οφέλους που εφαρμόζονται δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως τα πραγματικά κόστη. Επειδή είναι δύσκολο να αναθέσεις οικονομικά μεγέθη σε όλα τα οφέλη και τις αξίες, η νομοθεσία οριοθετεί ότι οι φορείς θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τα ποιοτικά και ποσοτικά οφέλη και κόστη όταν κάνουν ανάλυση κόστους – οφέλους. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά πιθανά οφέλη για αυτούς τους κανονισμούς που είναι κυρίως ποιοτικοί παρά ποσοτικοί. Η μέθοδος της ανάλυσης κόστους – οφέλους που θα αναπτυχθεί κατά την εκπόνηση της διατριβής, θα εστιάζει στα πιθανά ποσοτικά οφέλη, που θα δηλώνουν τη μείωση του δείκτη επικινδυνότητας

και κατ' επέκταση στη μείωση των επιπτώσεων στον άνθρωπο, το περιβάλλον, τις υποδομές και την οικονομική δραστηριότητα, και στα ποσοτικά κόστη, που περιλαμβάνουν το κόστος των αντιμέτρων.

Οι πιο δημοφιλής μέθοδοι εκτίμησης επικινδυνότητας που εφαρμόζονται σήμερα είναι τα μοντέλα πινάκων (*index models*) ή παρόμοιες τεχνικές βαθμολόγησης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, αριθμητικές τιμές (βαθμολογίες) ανατίθενται σε σημαντικές συνθήκες και δραστηριότητες που συμβαίνουν στο σύστημα δικτύου και επηρεάζουν τους δείκτες επικινδυνότητας είτε αρνητικά είτε θετικά. Τα βάρη (*weight*) ανατίθενται σε κάθε παράμετρο του ρίσκου. Το σχετικό βάρος αντιπροσωπεύει τη επίδραση του στοιχείου στην εκτίμηση επικινδυνότητας και βασίζεται σε στατιστικά στοιχεία, όταν είναι διαθέσιμα, και σε κρίσεις εμπειρογνομόνων όπου τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα. Κάθε τμήμα του δικτύου βαθμολογείται σύμφωνα με τη «συμπεριφορά» του σε όλες τις συνθήκες και βάσει των αποτελεσμάτων δίνεται προτεραιότητα σε εργασίες επιδιόρθωσης, σε επιθεωρήσεις και άλλες δράσεις μείωσης της επικινδυνότητας.

Συγκεκριμένα, διάφοροι μέθοδοι, ποιοτικοί, ποσοτικοί και ημι-ποσοτικοί, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται για την εκτίμηση της επικινδυνότητας δικτύων. Οι Ποιοτικές προσεγγίσεις πινακοποίησης των δεικτών επικινδυνότητας βαθμολογούν υποκειμενικά τους παράγοντες που επηρεάζουν τη πιθανότητα αστοχίας του δικτύου και τις επιπτώσεις του¹. Οι βαθμολογίες αυτές συνδυάζονται μέσω απλών σχέσεων και συνθέτουν το πίνακα που αντιπροσωπεύει το επίπεδο της επικινδυνότητας. Οι ποιοτικές μέθοδοι είναι αρκετά υποκειμενικές και δεν παρέχουν καμία ένδειξη της συσχέτισης της επικινδυνότητας με ένα συγκεκριμένο στοιχείο και καμία καθοδήγηση όσο αφορά τη λήψη δράσεων για μείωση του επιπέδου της επικινδυνότητας.

Για την ανάλυση του κινδύνου αστοχίας σιδηροδρομικών δικτύων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες που διαφοροποιούνται για κάθε προσέγγιση και διατύπωση, όπως τα δέντρα απόφασης (*event trees*), τα δέντρα αστοχίας (*fault trees*), η ανάλυση “what-if” και η Μελέτη Κινδύνου και Λειτουργικότητας (**HAZOP; Hazard and Operability Studies**). Η **HAZOP** είναι μια τεχνική που εξετάζει όλα τα πιθανά σενάρια αστοχίας εισάγοντας λέξεις κλειδιά σε μια δομημένη μορφοποίηση. Τα σενάρια και οι πιθανές επιπτώσεις προσδιορίζονται, αλλά συνήθως οι πιθανότητες

¹ Muhlbauer, 1992; Cagno *et al.*, 2000; Dey & Gupta, 2001

εμφάνισης ατυχήματος δεν ποσοτικοποιούνται. Η αυστηρότητα της μεθόδου διασφαλίζει ότι όλες οι πιθανότητες διερευνούνται από την ομάδα. Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί, τα αποτελέσματά της είναι λεπτομερή αλλά η τεχνική είναι χρονοβόρα και κοστίζει σε ανθρωποώρες που αυξάνονται ενίοτε. Οι μελέτες HAZOP και FMEA (*fault modes and effects analysis*) είναι ιδιαίτερος χρήσιμα εργαλεία για την εκτίμηση επικινδυνότητας σε πολυσύνθετες εγκαταστάσεις και υποδομές όπως είναι τα σιδηροδρομικά δίκτυα και οι δεξαμενές.

Οι σύγχρονες μέθοδοι ποσοτικής εκτίμησης επικινδυνότητας (*quantitative risk assessment*) επικεντρώνονται σε μία πλευρά των επιπτώσεων της αστοχίας. Μελέτες που έχουν δημοσιευτεί εστιάζονται είτε στο υπολογισμό της θνησιμότητας ή των οικονομικών απωλειών². Η περιβαλλοντική υποβάθμιση, η ασφάλεια του ανθρώπινου παράγοντα, το ύψος των ζημιών που θα υποστούν υποδομές και εγκαταστάσεις όπως και το ρίσκο στις οικονομικές δραστηριότητες δεν έχουν διερευνηθεί αρκετά. Ένας άλλος περιορισμός των προσεγγίσεων αυτών είναι ότι τυπικά ο υπολογισμός του δείκτη επικινδυνότητας βασίζεται κυρίως σε ιστορικά δεδομένα των ποσοστών αστοχίας.

Συνοψίζοντας, η ποσοτική εκτίμηση επικινδυνότητας (*Quantitative Risk Assessment (QRA)*) προσπαθεί να ξεπεράσει τα μειονεκτήματα της ποιοτικής εκτίμησης. Οι πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις που έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς από διάφορους ερευνητές είναι Risk rankings, Risk Factors, Probabilistic Risk Assessment (PRA), και Hierarchical Holographic Modeling (HHM). Οι μέθοδοι αυτοί προσπαθούν να εκτιμήσουν αριθμητικά τις συχνότητες εμφάνισης γεγονότων ή τις πιθανότητες για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που σχετίζονται με συγκεκριμένες, μετρήσιμες συνέπειες και να καθορίσουν το επίπεδο της επικινδυνότητας βασιζόμενοι σε άμεσες εκτιμήσεις της πιθανότητας και/ή των συνεπειών αστοχίας. Για παράδειγμα, η επικινδυνότητα θνησιμότητας από ένα ατύχημα που θα σημειωθεί σε σιδηροδρομικό δίκτυο μπορεί να εκφραστεί ως η ετήσια πιθανότητα να συμβεί θανατηφόρο ατύχημα. Αυτή αποτελεί τη βάση της ανάλυσης της ατομικής (*Individual Risk*) και της κοινωνικής επικινδυνότητας (*Social Risk*).

Οι υβριδικές προσεγγίσεις (συνδυασμός ποιοτικών-ποσοτικών, ημι-ποσοτικές (*semi-quantitative*)) αποτελούν ένα εργαλείο που εφαρμόζεται για το σχεδιασμό των

² Concord, 1993; Nessim & Stephens, 1995; Pandey, 1998

προγραμμάτων προγραμματισμού συντήρησης για τη βέλτιστη κατανομή πόρων και την καλύτερη διαχείριση του συστήματος. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούν ημι-ποσοτικά μοντέλα για την εκτίμηση των συνεπειών και για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας. Παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι η μέθοδος *BP-risk* που βοηθάει στην μείωση του κόστους για τη εκτίμηση επικινδυνότητας και θεωρεί ότι είναι αποδοτικό να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο τα συστήματα ή μεμονωμένα μηχανήματα αλλά και αλληλεπίδραση ανθρώπου – μηχανικών συστημάτων κατά την διαδικασία αξιολόγησης.

Τα βασικά πλεονεκτήματα από την ποσοτικοποίηση του δείκτη επικινδυνότητας παρέχουν μια επαρκή κατανόηση της αστοχίας, των συνεπειών και των γεγονότων, που είναι δύσκολο να εξηγηθούν από μια ποιοτική προσέγγιση. Επιπλέον είναι πιο εύκολο να κατανοήσουμε την συνολική διαδικασία ώστε να ληφθεί η κατάλληλη απόφαση και να κατανεμηθούν οι πόροι, σύμφωνα με τα ποσοτικά δεδομένα σε σχέση με τις ποιοτικές εκτιμήσεις.

Όσο αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση επικινδυνότητας, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των σύνθετων δικτύων διανομής και μεταφοράς, υπάρχει αβεβαιότητα που είναι απαραίτητο να διερευνηθεί. Πολλοί παράγοντες συνάδουν σε αυτό το γεγονός συμπεριλαμβανομένου την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας και την παγκόσμια οικονομία. Η πιο δημοφιλής μέθοδο διερεύνησης της αβεβαιότητας είναι οι πιθανοτικές προσεγγίσεις, όπως είναι η προσομοίωση Monte Carlo και οι προσεγγίσεις Bayesian, που μοντελοποιούν τον βαθμό επικινδυνότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής θα γίνει μια σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης επικινδυνότητας αστοχίας δίκτυα μεταφοράς και τα αποτελέσματα της θα παρέχουν μια ευρύτερη προοπτική της μεθόδου εκτίμησης και διαχείρισης κινδύνων.

Επίσης οι προτεραιότητες αντιμετώπισης προβλημάτων πάντα θα πρέπει να ιεραρχούνται και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων να καταλήγουν στα διαθέσιμα αντίμετρα για την ασφάλεια και να αποφασίζουν μεταξύ διαφόρων σχεδίων ασφαλείας. Είναι προφανές ότι δεν είναι εφικτό να ληφθούν όλα τα αντίμετρα ασφαλείας λόγω κόστους και εφαρμογής, όμως το αίσθημα της κοινωνίας δεν αποδέχεται το υψηλό δείκτη κινδύνου στα μέσα δημόσιας μεταφοράς και για αυτό υπάρχει μια συνεχή έρευνα για ασφαλέστερες λειτουργίες. Αυτό απαιτεί μια γενική προσέγγιση ανάλυσης της ασφαλείας στο σιδηροδρομικό δίκτυο. Υπάρχει επομένως η ανάγκη για διαδικασίες και μοντέλα που συνδυάζουν τα θέματα ασφαλείας και τη

μείωση των επιπτώσεων των ατυχημάτων σε διάφορους τομείς που οδηγούν σε οικονομικές επιλογές που μειώνουν την επικινδυνότητα.

Στη παρούσα διατριβή περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι που αναλύουν την ασφάλεια ενός δικτύου και παρουσιάζει ένα μοντέλο κόστους – οφέλους που ιεραρχεί τα πιθανά αντίμετρα σύμφωνα με το κόστος και την επίδρασή τους στους δείκτες επικινδυνότητας.

1.3 Στόχοι

Το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι αρχικά η ανάπτυξη μιας γενικής μεθοδολογίας αξιολόγησης και διαχείρισης της επικινδυνότητας αστοχίας των δικτύων διανομής και μεταφοράς εξαιτίας διαφόρων παραγόντων και σε επόμενο στάδιο την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων αστοχίας του δικτύου σε τέσσερις βασικούς τομείς: ανθρώπινος παράγοντας, περιβάλλον, υποδομές και οικονομική δραστηριότητα της περιοχής. Ο κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου κόστους – οφέλους που θα στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της αστοχίας και στην βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων που θα διατεθούν για την καλύτερη διαχείριση των δικτύων.

Συγκεκριμένα, για την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες ενέργειες:

1. Ανάπτυξη μια γενικής μεθοδολογίας διαχείρισης της επικινδυνότητας για την αξιολόγηση της τρωτότητας των δικτύων δεδομένου ότι έχει συμβεί μια καταστροφή που μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τον υπολογισμό δύο στοιχείων της επικινδυνότητας:
 - Τον κίνδυνο (H): Υπολογισμός της πιθανότητας να συμβεί μια καταστροφή (φυσική ή τεχνολογική) με τέτοια χαρακτηριστικά και ένταση που μπορεί να προκαλέσει αστοχία διαφόρων στοιχείων του δικτύου.
 - Την τρωτότητα (V/H) του δικτύου (η πιθανότητα αστοχίας) δεδομένου ότι η καταστροφή έχει συμβεί (σύμφωνα με την ανάλυση κινδύνου).
2. Ανάπτυξη νέων θεωρητικών μοντέλων ανάλυσης της τρωτότητας του δικτύου και ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της αστοχίας λειτουργίας του (π.χ. αστοχία τροχαίου υλικού, ανθρώπινο λάθος κ.α.) σε τέσσερα συστήματα:
 - Άνθρωποι
 - Περιβάλλον
 - Υποδομές

- Οικονομική δραστηριότητα της περιοχής
3. Σχεδιασμός και ανάπτυξης αριθμητικού μοντέλου που θα βασίζεται στον Μικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό και θα στοχεύει στην βέλτιστη κατανομή των πόρων σε δράσεις αντιμετώπισης ώστε να:
- Μεγιστοποιηθεί το όφελος (μείωση του επιπέδου επικινδυνότητας) δεδομένου των περιορισμών σε οικονομικούς πόρους
 - Λήψη απόφασης σχετικά με την εφαρμογή συγκεκριμένης δράσης, εφαρμόζοντας συγκριτική αξιολόγηση προτεραιοτήτων για όλες τις δράσεις αντιμετώπισης
 - Επιλογή των περισσότερο παραγωγικών ομάδων δράσεων με το μεγαλύτερο ποσοστό οφέλους-κόστους χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί.
4. Εφαρμογή του μοντέλου σε επιλεγμένο δίκτυο μεταφοράς και για συγκεκριμένα σενάρια και η αριθμητική αξιολόγησή του.

Οι φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων ενδιαφέρονται κυρίως για το κόστος πρόληψης και αντιμετώπισης της αστοχίας των δικτύων. Εφόσον εκτιμηθεί το κόστος για κάθε εναλλακτικό μέτρο αντιμετώπισης, το επόμενο βήμα θα είναι να προσδιοριστούν τα πιθανά οφέλη που απορρέουν για κάθε σύστημα – άνθρωπος, περιβάλλον, υποδομές και οικονομική δραστηριότητα. Τα οφέλη, στην περίπτωση του δικτύου, θα υπολογίζονται από τη μείωση των επιπτώσεων σε κάθε σύστημα και κατ' επέκταση στο δείκτη επικινδυνότητας πριν και μετά την εφαρμογή των επιλεγμένων αντιμέτρων. Το μοντέλο ανάλυσης οφέλους - κόστους θα εφαρμοστεί και τα αποτελέσματά του θα αποτελέσουν τις κατευθυντήριες γραμμές για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε μια σειρά από ενέργειες μετριασμού των επιπτώσεων σε αρκετά ρεαλιστικές καταστάσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται:

- Η μεγιστοποίηση του οφέλους, δηλαδή της μείωσης του επιπέδου επικινδυνότητας, δεδομένου των διαθέσιμων πόρων
- Η βέλτιστη λήψη απόφασης αναφορικά με το αν πρέπει ή όχι να επιλεγεί η συγκεκριμένη δραστηριότητα, συγκριτικά με την ιεράρχηση όλων αυτών των δραστηριοτήτων
- Η επιλογή του αποδοτικότερου συνόλου δραστηριοτήτων με το μεγαλύτερο όφελος, χωρίς να παραβιάζεται ο διαθέσιμος προϋπολογισμός.

Η μέθοδος αυτή θα βασιστεί σε θεμελιώδεις μεθοδολογίες Επιχειρησιακής Έρευνας και η πρωτοτυπία της έγκειται στο γεγονός ότι της συνδυάζει με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει ένα δυναμικό και ευέλικτο αναλυτικό εργαλείο, με ποσοτικά αποτελέσματα στους διαχειριστές των δικτύων για την οργάνωση και τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων και του κόστους των εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης της επικινδυνότητας αστοχίας.

Οι σύγχρονες μέθοδοι που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό των βέλτιστων στρατηγικών αντιμετώπισης και μετριασμού της αστοχίας αναμένουμε να βελτιωθούν σημαντικά διότι το μαθηματικό μοντέλο που θα αναπτύξουμε για την βέλτιστη κατανομή των πόρων θα είναι ένα μικτό ακέραιο μαθηματικό πρόγραμμα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με τις υφιστάμενες προσεγγίσεων είναι ότι διασφαλίζεται το γεγονός ότι η επένδυση για την πρόληψη και τη διαχείριση των κινδύνων θα αυξηθεί χωρίς να παραβιάζονται οι οικονομικοί περιορισμοί. Η προσέγγιση αυτή θα περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία: τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένων των εναλλακτικών επιλογών και τους πιθανούς χρήστες, το άμεσο κόστος των εναλλακτικών λύσεων άμβλυνσης, την επίδραση της εφαρμογής των αντιμέτρων στο δείκτη επικινδυνότητας και την επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων που θα ικανοποιούν τους οικονομικούς περιορισμούς.

1.4 Ανασκόπηση της διδακτορικής διατριβής

Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2) γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αναφέρεται σε μοντέλα και μεθόδους εκτίμησης και διαχείρισης της αστοχίας σε δίκτυα διανομής και μεταφοράς. Επίσης γίνεται ταξινόμηση των ποιοτικών, ποσοτικών και ημι-ποσοτικών μεθόδων και αξιολόγηση των μοντέλων και μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση κόστους – οφέλους των εναλλακτικών στρατηγικών αντιμετώπισης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται

Στο Κεφάλαιο 4

Στο Κεφάλαιο 5

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται στη διαχείριση και εκτίμηση επικινδυνότητας των δικτύων διανομής και μεταφοράς. Αρχικά γίνεται ανασκόπηση και αξιολόγηση των κύριων μεθοδολογιών εκτίμησης του τεχνολογικού κινδύνου. Η σχετική βιβλιογραφία περιλαμβάνει τα βήματα που ακολουθούνται στις προσεγγίσεις αυτές, οι οποίες κατηγοριοποιούνται κυρίως σε ποιοτικά, ποσοτικά και υβριδικά μοντέλα που υπολογίζουν κυρίως την πιθανότητα αστοχίας ενός δικτύου μεταφοράς και ειδικότερα σε σιδηροδρομικά δίκτυα αλλά και το μέγεθος των επιπτώσεων της σε διάφορους τομείς της κοινωνικής και οικονομικής δραστηριότητας της αστοχία στη λειτουργία του δικτύου και της περιβάλλουσας περιοχής. Επίσης περιγράφονται οι τεχνικές ανάλυσης δεδομένων ατυχημάτων σε δίκτυα μεταφοράς που στοχεύουν στον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης διάφορων κατηγοριών ατυχημάτων στο δίκτυο. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή των μοντέλων ανάλυσης κόστους οφέλους που εφαρμόζονται σε διάφορα συστήματα για την βέλτιστη κατανομή πόρων με στόχο τη μείωση της επικινδυνότητας αστοχίας τους.

2.2 Μέθοδοι εκτίμησης της επικινδυνότητας των δικτύων μεταφοράς

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση επικινδυνότητας, που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς, πολλές από τις οποίες συμπεριλαμβάνουν ερωτηματολόγια, συζητήσεις με υπευθύνους λήψεων αποφάσεων μέσα στον οργανισμό, με διάφορους ειδικούς συμβούλους. Ο στόχος αυτών των μεθόδων είναι να διερευνήσουν κάθε πιθανό συνδυασμό των παραμέτρων που δύνανται να οδηγήσουν σε ατυχήματα ή σε συμβάντα με ανεπιθύμητες επιπτώσεις. Επομένως προσδιορίζουν και περιγράφουν τους άγνωστους μέχρι πρότινος αλλά και πιθανούς κινδύνους και την πιθανή αλυσίδα γεγονότων που θα οδηγήσουν σε ατύχημα ή αστοχία του συστήματος. Ωστόσο τα προβλήματα που περιγράφονται δε θα πρέπει να αφορούν μόνο τις μεμονωμένες αστοχίες, όπως η αστοχία ενός τροχού ή άλλοι μηχανολογικοί παράγοντες αλλά θα πρέπει να περιλαμβάνονται και άλλοι παράμετροι όπως ο ανθρώπινος παράγοντας.

Γενικότερα η επικινδυνότητα (**Risk**) ορίζεται συνήθως ως η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός που μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα στο περιβάλλοντα

χώρο. Με τον ορισμό αυτό, η επικινδυνότητα αυξάνεται όταν είτε η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός αυξάνει ή όταν το μέγεθος των πιθανών απωλειών αυξάνει. Η μεταφορά επιβατών και προϊόντων μέσω σιδηροδρομικού δικτύου θεωρείται επικίνδυνη διότι η πιθανότητα να συμβεί ένα ατύχημα στο δίκτυο προκαλώντας σοβαρούς τραυματισμούς ή θανάτους ή ακόμη και απελευθερώνοντας επικίνδυνα και εύφλεκτα υλικά κατά τη μεταφορά τους προκαλώντας καταστροφές στο περιβάλλοντα χώρο, είναι υπαρκτή.

Επίσης στη πλειονότητα των επιστημονικών άρθρων η επικινδυνότητα αναφέρεται ως ένα μέτρο της ανθρώπινης απώλειας και μεταφράζεται σε δύο ποσότητες: στην πιθανότητα αστοχίας της λειτουργίας του δικτύου εξαιτίας διάφορων παραμέτρων και στον αριθμό των θανάτων. Επίσης αναφέρουν ότι οι επιπτώσεις μιας καταστροφής ή ενός ατυχήματος εξαρτώνται από τους παραμέτρους που θέτουμε στο σενάριο όπως το είδος της σιδηροδρομική γραμμής, η κατάσταση του μηχανοδηγού, οι μετεωρολογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες στον τόπο του ατυχήματος. Εξαιτίας αυτών των παραμέτρων, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της επικινδυνότητας θα διαφέρει ανάλογα με τις υποθέσεις που έχουν γίνει στο σενάριο του ατυχήματος. Ο αυξημένος αριθμός των υπολογισμών είναι μερικές φορές αναπόφευκτος λόγω των διαφορετικών σεναρίων και την κατανομή των πηγών κινδύνου κατά μήκος του δικτύου.

Επιπλέον η εκτίμηση της επικινδυνότητας θεωρείται μια βασική και συστηματική διαδικασία για την αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης και τις συνέπειες της ανθρώπινης δραστηριότητας σε συστήματα που είναι τρωτά σε κινδύνους αστοχίας (van Duijne & Schouten, 2008) και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για το σχεδιασμό στρατηγικών ασφαλείας για ένα οργανισμό ή εταιρία. Η ποικιλομορφία που συναντάται στις τεχνικές ανάλυσης επικινδυνότητας είναι τόσο ευρεία με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά κατάλληλα εργαλεία για την ολοκλήρωση της (Reniers et al., 2005; Rouvroye & van den Bliet, 2002). Γενικότερα η επικινδυνότητα μπορεί να θεωρηθεί ως μια μετρήσιμη ποσότητα που υπολογίζεται μαθηματικά αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα ατυχημάτων (Marhavidas & Koulouriotis, 2008; Marhavidas, Koulouriotis, & Voulgaridou, 2009).

Ο κοινά αποδεκτός ορισμός της επικινδυνότητας εκφράζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Επικινδυνότητα} = (\text{πιθανότητα να συμβεί το γεγονός}) \times (\text{συνέπειες})$$

$$Risk = (event\ likelihood) \times (event\ consequence)$$

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι γνωστότερες μέθοδοι εκτίμησης επικινδυνότητας που διακρίνονται σε ομάδες ανάλογα με το τύπο της ανάλυσης που πραγματοποιούν: 1. Τεχνολογικά συστήματα, 2. λειτουργική επικινδυνότητα και 3. Ανθρώπινη αξιοπιστία.

Πίνακας 1 Μέθοδοι Εκτίμησης Επικινδυνότητας ανά τύπο ανάλυσης³

Μεθοδολογία	Περιγραφή
<i>Τεχνολογικά συστήματα</i>	
Δενδρική Ανάλυση Αιτιών (<i>Fault tree analysis – FTA</i>)	Ανάλυση των αιτιών ενός συγκεκριμένου συμβάντος
Δενδρική Ανάλυση Συμβάντων (Event tree analysis – ETA)	Ανάλυση των εναλλακτικών επιπτώσεων για ένα συγκεκριμένο συμβάν
Failure modes and effects analysis – FMEA	Ανάλυση των αστοχιών σε τεχνικά στοιχεία του συστήματος
Hazard and operability study – HAZOP	Ανάλυση πιθανών δεικτών επικινδυνότητας/ διαταραχή των διαδικασιών
Maximum credible accident – MCA	Ανάλυση της χειρότερης περίπτωσης πιθανών επιπτώσεων ενός ατυχήματος
<i>Λειτουργική επικινδυνότητα</i>	
Management oversight and risk tree – MORT	Σύγκριση των οργανωτικών απαιτήσεων με τον πραγματικό οργανισμό
Διοικητική Ανάλυση Ασφάλειας (<i>Administrative safety analysis</i>)	Οι συνθήκες οργάνωσης και διοίκησης αξιολογούνται σύμφωνα με μια πρότυπη φόρμα
<i>Ανθρώπινη αξιοπιστία</i>	
Αξιολόγηση της ασφάλειας στην εργασία (<i>Work safety analysis</i>)	Ανάλυση των εργασιακών συνθηκών
Action error analysis – AEA	Ανάλυση των επικίνδυνων αποκλίσεων από

³ Lindberg, Thedéen et al., 1993

	τις προκαθορισμένες διαδικασίες λειτουργίας
Human reliability analysis – HRA	Ανάλυση της ανθρώπινης τάσης να δράσει λανθασμένα κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων εργασιών

Γενικότερα τα πρώτα τρία βήματα που ακολουθούνται στην αξιολόγηση του επιπέδου ασφαλείας είναι ποιοτικά. Συγκεκριμένα, η περιγραφή του συστήματος, ο προσδιορισμός των κινδύνων και των γενικών αιτιών και η μοντελοποίηση των δεικτών επικινδυνότητας είναι ποιοτική. Σε πολλές περιπτώσεις μια αρχική ανάλυση μπορεί να είναι ικανοποιητική και τα μέτρα να προσδιοριστούν χωρίς τη χρήση ποσοτικών μεθόδων. Σε άλλες περιπτώσεις μια λεπτομερή ανάλυση κινδύνου απαιτείται. Αυτή περιλαμβάνει ποσοτικές μεθόδους για την εκτίμηση των ρυθμών ατυχημάτων. Σε άλλες περιπτώσεις τα δεδομένα επαρκούν για μια ενδεικτική στατιστική ανάλυση και υπάρχει περίπτωση τα δεδομένα να γενικευτούν έτσι ώστε να δώσουν μια επαγωγική ανάλυση.

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι μέθοδοι εκτίμησης και ανάλυσης της επικινδυνότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις (3) βασικές κατηγορίες: (α) Ποιοτικά, (2) Ποσοτικά και (3) Υβριδικά (ποιοτικά-ποσοτικά, Ημι-ποσοτικά), οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Οι ποιοτικές μέθοδοι βασίζονται σε διαδικασίες αναλυτικής εκτίμησης και σε στην εμπειρογνωμοσύνη των ειδικών σε θέματα ασφαλείας. Σύμφωνα με τα ποσοτικά μοντέλα, η επικινδυνότητα θεωρείται ως μια ποσότητα που υπολογίζεται μαθηματικά ως συνάρτηση των πραγματικών δεδομένων ατυχημάτων. Οι υβριδικές μέθοδοι είναι αρκετά πολύπλοκοι εξαιτίας του ad hoc χαρακτήρα τους που προλαμβάνουν την υπερ-παραμετροποίηση του προβλήματος.

2.2.1 Ποιοτικές προσεγγίσεις

Οι ποιοτικές προσεγγίσεις εστιάζονται κυρίως στις συνέπειες ή εκτιμούν την πιθανότητα να συμβεί και τις συνέπειες της αστοχίας σε σχετικούς όρους, όπως η υψηλή, μεσαία και χαμηλή. Επίσης συνδυάζουν την πιθανότητα και το μέγεθος των συνεπειών εφαρμόζοντας αριθμητικές μεθόδους βαθμολόγησης για να εξάγουν το δείκτη επικινδυνότητας για διαφορετικά τμήματα των σιδηροδρομικών γραμμών κατά μήκος της διαδρομής του δικτύου. Οι διαχειριστές των δικτύων ενίοτε χρησιμοποιούν αυτές τις μεθόδους για να καθορίσουν τις προτεραιότητες για την

αποκατάσταση, την επισκευή, την επιθεώρηση και τον έλεγχο συγκεκριμένων τμημάτων του δικτύου. Οι μέθοδοι αυτές καθορίζουν μια σειρά από παράγοντες κινδύνου, κάθε μία εκ των οποίων ανατίθεται μια αριθμητική τιμή. Οι παράμετροι συνδυάζονται μαθηματικά, συνήθως αθροιστικά, και δίνουν μια αριθμητική τιμή για κάθε προκαθορισμένο μήκος τμήματος του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, τα τμήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν και να βαθμολογηθούν ανάλογα με σχετικό δείκτη επικινδυνότητας και το μέγεθος της αστοχίας.

Επιπλέον, οι ποιοτικές προσεγγίσεις βασίζονται στην άποψη και την εμπειρία των διαχειριστών των δικτύων. Τα βασικά μειονεκτήματα της χρήσης των προσεγγίσεων αυτών είναι ο βαθμός υποκειμενικότητας κατά τη διάρκεια του έργου, η διαφοροποίηση των ανθρώπινων αποφάσεων και η έλλειψη τυποποιημένων προσεγγίσεων. Διάφορες προσεγγίσεις πρότεινε ο Charman (1998), όπως η τεχνική Delphi και ονομαστική ομαδοποίησης (*nominal group*) για την ελαχιστοποίηση της μεροληψίας (*biasing*), αλλά και πάλι οι προσεγγίσεις αυτές δεν μειώνουν το βαθμό της υποκειμενικότητας. Επίσης, είναι συγκρίσιμα οικονομικά μεγέθη, εφαρμόζονται εύκολα, αλλά δεν εξάγουν ποσοτικές εκτιμήσεις ή σχετική αναλογία για τη επικινδυνότητα που εντοπίζεται.

Για την διαχείριση της επικινδυνότητας το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των κινδύνων. Ως κίνδυνος (*Hazard*) θεωρείται η πηγή μιας πιθανής αστοχίας ή κατάστασης που δύναται να έχει ως αποτέλεσμα επιπτώσεις στο σύστημα που μελετάται. Επομένως μέσα από την ανάλυση του κινδύνου μπορεί να περιγραφούν οι κίνδυνοι, οι αιτίες και οι συνέπειες εμφάνισής τους δημιουργώντας ένα αρχείο καταγραφής τους. Στην βιβλιογραφία περιγράφονται διάφορα εργαλεία και τεχνικές ανάλυσης κινδύνου, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Η Ανασκόπηση του Κινδύνου (*Hazard Review*) αποτελεί μια ποιοτική αναθεώρηση των εγκαταστάσεων για να προσδιοριστούν οι πιθανοί κίνδυνοι αστοχίας. Ουσιαστικά ανατρέχει σε προηγούμενες αναφορές εκτίμησης επικινδυνότητας, σε ιστορικό ατυχημάτων, την προηγούμενη εμπειρία, τα πρότυπα λειτουργίας και τις πρακτικές που εφαρμόζονται.

Μια άλλη ποιοτική μέθοδος, η Προκαταρκτική Ανάλυση Κινδύνου (*Preliminary Hazard Analysis, PHA*) στοχεύει στην καταγραφή των πιθανών κινδύνων αστοχίας του συστήματος και θα πρέπει να εφαρμόζεται στα πρώτα στάδια της εκτίμησης επικινδυνότητας του συστήματος και συγκεκριμένα στο στάδιο του σχεδιασμού εάν είναι δυνατό. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της θεωρίας αλυσίδας αιτίας ενός

ατυχήματος (*accident causation chain theory*). Στη περίπτωση εμφάνισης ενός επικίνδυνου συμβάντος συνδυάζοντας τη συχνότητα και τη πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων και ανάλογα με την σοβαρότητα των συνεπειών να υπολογιστεί η συχνότητα όλων των κατηγοριών ατυχημάτων.

Οι ποιοτικές προσεγγίσεις των δεικτών επικινδυνότητας αναθέτουν υποκειμενικές αριθμητικές τιμές σε διάφορους παράγοντες που θεωρείται ότι επηρεάζουν την διαμόρφωση της πιθανότητας αστοχίας και την ένταση των συνεπειών της. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές συνδυάζονται για να εξάγουν ένα δείκτη επικινδυνότητας. Βάση των δεικτών γίνεται ιεράρχηση των διαφόρων παραμέτρων που συντελούν στην αύξηση της πιθανότητας να αστοχήσει το σύστημα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι μεροληπτικά και δεν δίνουν καμία ένδειξη της σύνδεσης της επικινδυνότητας με κάθε παράμετρο κινδύνου και τρωτότητας ώστε να είναι ξεκάθαρο αν απαιτείται να ληφθούν αντίμετρα.

Η μέθοδος ερωτηματολογίων (*Checklist*) αποτελεί μια συστηματική εκτίμηση των προϋπαρχόντων κριτηρίων με τη μορφή μίας ή περισσοτέρων λίστες ελέγχου. Οι λίστες αυτές περιέχουν ερωτήσεις σχετικά με την λειτουργία, την οργάνωση, την συντήρηση και άλλους τομείς που αφορούν την ασφάλεια των εγκαταστάσεων και αποτελεί την απλούστερη μέθοδο για τον προσδιορισμό πηγών κινδύνου. Παρά το πλεονέκτημά της αυτό, η τεχνική παρουσιάζει δύο σημαντικούς περιορισμούς: α) η ανάλυση βασίζεται αποκλειστικά στη δομή του ερωτηματολογίου με το οποίο γίνεται προσπάθεια εντοπισμού πιθανών προβλημάτων, με αποτέλεσμα να αγνοούνται σημαντικά προβλήματα γιατί δεν έχουν περιληφθεί στο ερωτηματολόγιο και β) Παρέχει μόνο ποιοτικές και όχι ποσοτικές πληροφορίες. (Arvanitogeorgos, 1999; Ayyub, 2003; Harms-Ringdahl, 2001; Reniers et al., 2005).

Η τεχνική *what-if-analysis* χρησιμοποιεί ευρέως, χαλαρά δομημένες ερωτήσεις για να υποθέσει πιθανές διαταραχές που μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα ή σε χαμηλή απόδοση του συστήματος. Επίσης καθορίζει ποιες καταστάσεις μπορεί να προκαλέσουν αστοχία του συστήματος και αξιολογεί τις επιπτώσεις τους (Ayyub, 2003; Reniers et al., 2005).

Οι αναφορές ασφαλείας (*safety audits*) είναι διαδικασίες με τις οποίες τα λειτουργικά προγράμματα ασφαλείας μιας εγκατάστασης, διαδικασίας ή εργοστασίου επιθεωρείται. Προσδιορίζονται η κατάσταση των μηχανημάτων ή οι διαδικασίες λειτουργίας που μπορεί να προκαλέσουν σε καταστροφή περιουσίας/ υποδομών ή σε

περιβαλλοντική επιβάρυνση (Ayyub, 2003). Τα αποτελέσματα των αναφορών θα πρέπει να είναι σε μορφή συστάσεων και προτάσεων σε λογικά πλαίσια σχετικά με την βελτίωση των διαδικασιών ασφαλείας (Harms-Ringdahl, 2001).

Η *Sequentially Timed Event Plotting (STEP)* παρέχει μια πολύτιμη επισκόπηση του χρόνου και της σειράς των γεγονότων/ δράσεων που οδήγησαν στο ατύχημα. Οι βασικές αρχές της τεχνικής αυτής είναι το εναρκτήριο γεγονός του ατυχήματος που προκλήθηκε λόγω κάποιας συνθήκης ή μεταβολής που διατάραξε το σύστημα, οι παράμετροι που παρενέβησαν στον έλεγχο του συστήματος (Hendrick & Benner, 1987; Kontogiannis, Leopoulos, & Marmaras, 2000).

Η μέθοδος HAZOP (Hazard and Operability Study) είναι μια ποιοτική μέθοδος που εφαρμόζεται σε διάφορες κατηγορίες βιομηχανιών για να διερευνηθούν τα αίτια και οι συνέπειες των αποκλίσεων από την ομαλή λειτουργία, να προσδιορίσουν τους κινδύνους και τα προβλήματα λειτουργικότητας. Αποτελεί μια τυπική μεθοδολογία προσδιορισμού και καταγραφής κινδύνων βάση ενός υποθετικού σεναρίου και βασίζεται στο γεγονός ότι οι κίνδυνοι που εμφανίζονται σε μια εγκατάσταση, οφείλονται σε παρεκκλίσεις από την κανονική λειτουργία της (Baysari, McIntosh, & Wilson, 2008; Hong, Lee, Shin, Nam, & Kong, 2009; Khan & Abbasi, 1997; Reniers et al., 2005; Yang & Yang, 2005).

2.2.2 Ποσοτικές προσεγγίσεις

Η ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας (*Quantitative Risk Assessment, QRA*) στοχεύει στην αποφυγή των μειονεκτημάτων της ποιοτικής αξιολόγησης. Η κατηγοριοποίηση της επικινδυνότητας (*Risk ranking*), η παραγοντοποίηση της επικινδυνότητας (*Risk Factors*), η πιθανολογική εκτίμηση επικινδυνότητας (*PRA*), και η ιεραρχική μοντελοποίηση (*HHM*) είναι οι πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στο παρελθόν στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι ποσοτικές προσεγγίσεις στοχεύουν στην ποσοτική εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης ενός συμβάντος ή της πιθανότητας εκδήλωσής ενός ατυχήματος σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, που συνδέονται με συγκεκριμένες και μετρήσιμες επιπτώσεις, ώστε να καθοριστεί το επίπεδο της επικινδυνότητας. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι η επικινδυνότητα θνησιμότητας εξαιτίας ενός ατυχήματος σε σιδηροδρομικό δίκτυο μπορεί να εκφραστεί ως η ετήσια πιθανότητα να σημειωθεί ένα θάνατος. Η έκφραση αυτή αποτελεί και τον ορισμό της ατομικής και κοινωνικής επικινδυνότητας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της ποσοτικοποίησης της επικινδυνότητας είναι η καλύτερη κατανόηση της αστοχίας, των συνεπειών και των γεγονότων, τα οποία είναι δύσκολο να αποδοθούν μέσα από μια ποιοτική προσέγγιση. Επιπλέον, είναι πιο εύκολο η κατανόηση της συνολικής διεργασίας της αστοχίας, να ληφθεί η βέλτιστη απόφαση και να κατανεμηθούν οι διαθέσιμοι πόροι με βάση ποσοτικά και όχι ποιοτικά δεδομένα.

Οι σύγχρονες ποσοτικές προσεγγίσεις εκτίμησης της επικινδυνότητας εστιάζουν σε μία μόνο διάσταση των συνεπειών που απορρέουν από την αστοχία. Οι δημοσιευμένες μελέτες διερευνούν είτε με κίνδυνο απώλειας της ζωής ή οικονομικών απωλειών⁴, χωρίς να εστιάζουν επαρκώς στην περιβαλλοντική υποβάθμιση, της διασφάλιση της δημόσιας υγείας και τις ζημιές στις υποδομές. Ένας άλλος περιορισμός της ποσοτικής προσέγγισης είναι ότι τα αποτελέσματά της βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα αστοχίας των δικτύων. Οι διαθέσιμες βάσεις των ιστορικών δεδομένων συνήθως δεν επιτρέπουν την παραμετροποίηση των δεδομένων αστοχίας ανάλογα με τη συνεισφορά τους στη μεταβολή του δείκτη επικινδυνότητας. Στη περίπτωση που η διεργασία αυτή είναι δυνατή, ο όγκος των δεδομένων να είναι πολύ περιορισμένος, επειδή η αστοχίες δεν συμβαίνουν συχνά. Οι πιθανότητες αστοχίας βασίζονται σε δημόσια δεδομένα, ως εκ τούτου δεν είναι αρκετά συγκεκριμένα ώστε να συνδέουν άμεσα την δεδομένη αστοχία με ένα συγκεκριμένο παράγοντα κινδύνου ή τρωτότητας.

Οι πιο διαδεδομένες ποσοτικές προσεγγίσεις που συναντούμε στην παγκόσμια βιβλιογραφία είναι οι παρακάτω:

A. Βαθμολόγηση της Επικινδυνότητας (Risk Ranking)

Η τεχνική βαθμολόγησης της επικινδυνότητας θεωρείται ένα εύχρηστο και αποδοτικό εργαλείο για να ταξινομηθεί το επίπεδο της επικινδυνότητας αστοχίας δικτύου. Σε αυτή την προσέγγιση, τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν αντιστοιχίζονται σε καίριες προϋποθέσεις και σε δραστηριότητες που επικρατούν στο δίκτυο μεταφοράς και αυξάνουν ή μειώνουν τον βαθμό επικινδυνότητας. Ο πίνακας Ανάλυσης - Απόφασης είναι μια από τις απλοποιημένη μορφοποίηση της αξιολόγησης επικινδυνότητας. Βαθμολογεί το επίπεδο ανάλογα με πιθανότητα να συμβεί αστοχία και με τις πιθανές συνέπειες και τις κατατάσσει σε μια ποιοτική κλίμακα (υψηλή, μέση ή χαμηλή) ή σε μια αριθμητικής κλίμακα (π.χ. από 1 έως 5).

⁴ Hill (1992); Concord (1993); Nessim et al. (1995); Pandey (1998); Nessim et al. (2000)

Κάθε παράμετρος κινδύνου αποτελεί ένα κελί του πίνακα ανάλογα με την πιθανότητα να συμβεί και να έχει σημαντικές επιπτώσεις και ανεβαίνει ψηλά στην λίστα προτεραιοτήτων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να βασιστεί σε ποιοτικά δεδομένα ή σε ποσοτικά στοιχεία. Επίσης δεν μπορεί να εξετάσει όλους του σχετικούς παράγοντες και τις σχέσεις τους, αλλά διαιρεί το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις, την πιθανότητα να συμβεί και τις συνέπειες, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να εξεταστούν μεμονωμένα.

Ο Florig, et al. (2001) ανέπτυξε μια μέθοδο όπου οι εμπειρογνώμονες έχουν την δυνατότητα να κατηγοριοποιήσουν τους παραμέτρους επικινδυνότητας κινδύνου οι οποίοι είναι αναγκαίο να αξιολογηθούν. Η μέθοδος αυτή αποτελείται από πέντε στάδια προσέγγιση και ξεκινά με την επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού και κατηγοριοποίησης των παραγόντων κινδύνου και τρωτότητας που θα πρέπει να αναλυθούν. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία μιας συνολικής λίστας των δεικτών. Στη συνέχεια, οι συμμετέχοντες βαθμολογούν και ταξινομούν τους δείκτες βάση της λίστας αυτής. Το τελικό στάδιο είναι η περιγραφή και η καταχώρηση των αποτελεσμάτων.

Η μέθοδος *DMRA* (*Decision Matrix Risk Assessment*) είναι μια συστηματική προσέγγιση εκτίμησης της επικινδυνότητας, η οποία αποτελείται από τη μέτρηση και την ταξινόμηση των δεικτών επικινδυνότητας και βασίζεται σε μια τεκμηριωμένη αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης ατυχήματος ή αστοχίας και των συνεπειών με κλιμάκωση της σοβαρότητάς τους (Henselwood & Phillips, 2006; Haimes, 2009; Reniers et al., 2005; Woodruff, 2005). Ο συνδυασμός επιπτώσεων/ σοβαρότητας και πιθανότητας παράγουν την εκτίμηση επικινδυνότητας ή αλλιώς τη βαθμολόγηση της επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο: $R = S \times P$. Όπου S είναι η σοβαρότητα, P η πιθανότητα εμφάνισης και R το μέτρο επικινδυνότητας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των μοντέλων βαθμολόγησης της επικινδυνότητας συνοψίζονται ως εξής:

- Παρέχουν άμεση απάντηση
- Είναι μια ανάλυση χαμηλού κόστους
- Υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των μοντέλων και η εισαγωγή νέων δεδομένων

- Αποτελεί εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων σχετικά με την κατανομή των πόρων
- Προσδιορίζουν και βαθμολογούν τα εναλλακτικά αντίμετρα

Η Παραγοντοποίηση της επικινδυνότητας (*Risk factorization*) είναι μια μέθοδος όπου οι ειδικοί προσδιορίζουν τους δείκτες επικινδυνότητας, αναθέτουν βαθμούς βαρύτητας σε αυτούς και υπολογίζουν τη συνολική βαθμολογία των δεικτών επικινδυνότητας. Βάση αυτών των βαθμολογιών, η διαχείριση ορίζει τις προτεραιότητες για να κατανείμει τους διαθέσιμους πόρους και τα σχεδιάσει τα συστήματα ελέγχου. Πρόκειται λοιπόν για μια σταθμισμένη μέθοδο που επιτυγχάνει την εξισορρόπηση των μέτρων ασφαλείας που αφορούν την εφαρμογή τους σε διάφορους τομείς όπως το φυσικό περιβάλλον και ο οικονομικός τομέας. Αυτό επιτυγχάνεται διότι είναι ένα εργαλείο που μπορεί και συγκρίνει διαφορετικούς δείκτες επικινδυνότητας, όπως το οικονομικό κόστους και το κόστος απώλειας ανθρώπινης ζωής αφού και οι δύο παράμετροι μπορούν να εκφραστούν σε χρηματικούς όρους (Suddle, 2009, Suddle & Waarts, 2003)

Επιπλέον πρόκειται για μια μεθοδολογία βήμα – προς – βήμα (step-by-step) η οποία ποσοτικοποιεί τους δείκτες επικινδυνότητας. Επίσης ο υπολογισμός των παραγόντων επικινδυνότητας είναι η πιο οικονομική και αποδοτική μεθοδολογία για το προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επικινδυνότητας. Η μεθοδολογία αυτή θεωρείται από τα πιο ισχυρά εργαλεία λήψης αποφάσεων για να προσδιορίσει και να ιεραρχήσει τους παράγοντες επικινδυνότητας από τον χαμηλότερο στο υψηλότερο, αλλά το μεγαλύτερο μειονέκτημα του συστήματος είναι η υποκειμενικότητα της μεθόδου.

Η μέθοδος PRA θεωρείται μια από τις πολυσύνθετες και πολύπλοκες μορφοποιήσεις της αξιολόγησης επικινδυνότητας. Η μέθοδος αυτή είναι μια αυστηρά μαθηματική και στατιστική τεχνική που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ποσοστά αστοχίας, και σε δενδρικές αναλύσεις συμβάντων και αστοχίας. Τα εναρκτήρια συμβάντα, όπως η αστοχία του τροχαίου υλικού και η δυσλειτουργία του συστήματος ασφάλειας απεικονίζεται σε ένα δενδρικό διάγραμμα με όλες τις πιθανές συνέπειες και ορίζονται οι αντίστοιχες πιθανότητες σε κάθε κλαδί του δένδρου. Οι αστοχίες απεικονίζονται με κατεύθυνση από τα τελικά αποτελέσματα προς το εναρκτήριο συμβάν. Και σε αυτή τη περίπτωση υπολογίζονται οι πιθανότητες για κάθε κλάδο. Ο υπολογισμός των τελικών πιθανοτήτων προκύπτει από την εκτίμηση της πιθανότητας για μεμονωμένα συμβάντα.

Η μέθοδος PRA θεωρείται υψηλού κόστους λόγω του όγκου δεδομένων που εισάγει αλλά είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των απολύτων τιμών της επικινδυνότητας που εκφράζονται ως θνησιμότητα, τραυματισμοί, βλάβες σε υποδομές για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην πυρηνική, χημική και η αεροδιαστημική βιομηχανία και στη βιομηχανία παραγωγής πετροχημικών ουσιών.

Η μέθοδος Quantitative Assessment of Domino Scenarios (QADS) θεωρεί ότι η επίδραση ντόμινο είναι ένα ατύχημα κατά το οποίο ένα εναρκτήριο γεγονός διαδίδεται σε μία κοντινή εγκατάσταση προκαλώντας ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα γεγονότα που έχουν ως αποτέλεσμα σε συνέπειες πιο σοβαρές από εκείνες του αρχικού συμβάντος. Η κλιμάκωση του συμβάντος οφείλεται κυρίως στη ζημιά που προκάλεσε σε κάποιο υλικό το αρχικό γεγονός (Cozzani, Antonioni, & Spadoni, 2006).

Ο Haimes (1981) ξεκίνησε την έρευνα στον πεδίο της Hierarchical Holographic Modeling (HHM) εστιάζοντας ιεράρχηση των θεσμικών, διοικητικών, οργανωτικών ή λειτουργικών δομών της λήψης αποφάσεων. Οι Kaplan et al. (2001) πρότειναν ότι η HHM αν και θεωρείται μια γενική μέθοδο εντοπισμού της επικινδυνότητας, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως μία από τις μεθόδους της Θεωρίας της Κατασκευής Σεναρίων. Η μέθοδος HHM είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την μοντελοποίηση πολύπλοκων και μεγάλης κλίμακας συστημάτων. Οι Haimes, et al. (2002) πρότειναν ότι με την εφαρμογή της HHM μπορούν να δομηθούν συνολικά σενάρια μεγάλης κλίμακας. Για να αντιμετωπίσει το μεγάλο σύνολο δεδομένων, υιοθετήθηκε μια συστηματική διαδικασία φιλτραρίσματος και κατάταξης των σεναρίων που θεωρούνται αναγκαία για την αξιολόγηση των αντιμέτρων.

2.2.3 Υβριδικές προσεγγίσεις

Οι υβριδικές ή ημι-ποσοτικές προσεγγίσεις (συνδυασμός ποιοτικών και ποσοτικών) εφαρμόστηκαν αρχικά στον σχεδιασμό προγραμμάτων συντήρησης, κατανέμοντας τα διαθέσιμα μέσα και πόρους ώστε να διασφαλιστεί η καλή λειτουργία των συστημάτων. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιευμένα πλήθος άρθρων που εστιάζουν στην βελτιστοποίηση της συντήρησης με τη εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων⁵. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε όλη τη Μαρκοβιανά μοντέλα ή στο κύκλο ζωής των μηχανημάτων.

⁵ Montgomery et al. (2000), Khan (2003a, 2003b), Willcocks (2003), Dey (2004)

Ο Dziubinski (et al.,2006) ανέπτυξε μια μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας των δικτύων μεταφοράς επικίνδυνων ουσιών με αγωγούς μεγάλου μήκους συνδυάζοντας ποιοτικές προσεγγίσεις (ανάλυση ιστορικών δεδομένων, σύστημα βαθμολόγησης) και ποσοτικές τεχνικές εκτίμησης της ασφάλειας των αγωγών. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια λεπτομερή ανάλυση της επικινδυνότητας που συνδέεται με συγκεκριμένους παραμέτρους κινδύνου που εφαρμόζει ποσοτικά μοντέλα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει μια σειρά από αναλύσεις και υπολογισμούς που στοχεύουν στο προσδιορισμό των κύριων παραγόντων κινδύνου αστοχίας και τις πιθανές τους συνέπειες, λαμβάνοντας υπόψη την ατομική και κοινωνική επικινδυνότητα.

Ο Kirkwood (et al. 2006) εισήγαγε μια στρατηγική συντήρησης και επιδιόρθωσης ενός δικτύου εφαρμόζοντας σχετική εκτίμηση της επικινδυνότητας. Το μοντέλο που ανέπτυξε εισάγει ποιοτικά δεδομένα που υπολογίζει δείκτες επικινδυνότητας για κάθε τμήμα του αγωγού που συνδέονται και εξάγονται ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της επικινδυνότητας. Η επικινδυνότητα ορίζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης κινδύνου που μπορεί να προκαλέσει αστοχία και το μέγεθος των συνεπειών του. Η συνολική πιθανότητα αστοχίας (P_f) ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους πιθανοτήτων των παραμέτρων και με την διαίρεση των επιμέρους μηχανισμών αστοχίας που επιτρέπει στο μοντέλο να εντοπίσει την επίδραση του κάθε μηχανισμού στο συνολικό δίκτυο. Επιπλέον, οι συνέπειες αστοχίας ορίζονται ως βλάβη ή το κόστος αστοχίας του δικτύου και εκφράζεται ως το σύνολο όλων των παραγόντων των επιπτώσεων στον άνθρωπο, τις υποδομές, την διακοπή λειτουργίας και την περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Η μεθοδολογία Practical Risk Assessment Methodology⁶ (PRAM) είναι μια ανάλυση αιτίας – αποτελέσματος που υποστηρίζεται από την δενδρική ανάλυση συμβάντων και από τη στατιστική ανάλυση διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων από το RAIRS (FRA's Railroad Accident/Incident Reporting System). Αρχικά υπολογίζονται οι πιθανότητες εμφάνισης ατυχήματος και οι συνέπειες για κάθε κίνδυνο. Στη συνέχεια υπολογίζονται η αθροιστική επικινδυνότητα ως συνολικά κόστη ατυχημάτων ανά train-mile για το αρχικό σενάριο και το προτεινόμενο σύστημα. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί την ανάπτυξη λεπτομερών μοντέλων ή αριθμητικών

⁶ A Practical Risk Assessment Methodology for Safety-Critical Train Control SystemS, US Department of Transportation Federal Railroad Administration, **RR 09-17 September 2009**

προσομοιώσεων για να παράγουν στατιστικές πιθανότητες για διάφορες σειρές γεγονότων.

Η δενδρική ανάλυση (*Fault-tree*) όπως και η ανάλυση συμβάντων (*event-tree*) εντοπίζουν τη σειρά των γεγονότων αντίστροφα με σημείο εκκίνησης την αστοχία ενός συστήματος και την απεικονίζουν σε ένα δενδρικό διάγραμμα. Σε ένα δένδρο συμβάντων, η διαδικασία ξεκινά από ένα γεγονός και προχωράει μπροστά υποδεικνύοντας όλα τα πιθανά μετέπειτα γεγονότα για να καθορίσει πιθανές αστοχίες. Οι πιθανότητες ορίζονται για κάθε κλαδί και συνδυάζονται για να καταλήξουν σε ένα σύνολο πιθανοτήτων γεγονότων.

Η ανάλυση *FTA* είναι μια απαγωγική μέθοδο και αποτελεί εργαλείο για τον προσδιορισμό των αιτιών και το συνδυασμό τους που οδηγούν σε ένα επικίνδυνο συμβάν. Τα δένδρα σφαλμάτων απεικονίζονται γραφικά με συγκεκριμένα σύμβολα. Η δομή του ξεκινά με ένα επικίνδυνο συμβάν και έχει ως σκοπό να μοντελοποιήσει τις αιτίες του συμβάντος. Το επικίνδυνο συμβάν αποκαλείται «εναρκτήριο συμβάν». Μέσα από διάφορες λογικές επιλογές το εναρκτήριο συμβάν συνδέεται με διαφορετικές πιθανές αστοχίες σε μεσαίο επίπεδο. Στο τέλος του δένδρου είναι οι κύριες εναρκτήριες αιτίες στις οποίες ανατίθενται πιθανότητες⁷ (Ayyub, 2003; Haimes, 2009; Harms-Ringdahl, 2001; Kontogiannis et al., 2000; Reniers et al., 2005; Vesely, Goldberg, Roberts, & Haasl, 1981; Yuhua & Datao, 2005).

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές ποσοτικής ανάλυσης ενός *FTA*. Κάθε δένδρο μπορεί να περιγραφεί ως μια ομάδα εφαρμόζοντας τη φόρμουλα Boolean. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση σύμφωνα με κάποιους κανόνες που ακολουθούν την άλγεβρα Boolean. Η επιλογή OR εκφράζεται σε μαθηματικούς όρους με την ένωση των δύο συμβάντων και μπορούν να αντικατασταθούν με το + στην άλγεβρα Boolean⁸.

Η Δενδρική ανάλυση Συμβάντων (*ETA*) είναι μια επαγωγική μέθοδος που επιτρέπει μια δομημένη περιγραφή των πιθανών επιπτώσεων ενός ατυχήματος. Έχει ως στόχο να περιγράψει τα πιθανά σενάρια που ακολουθούν το εναρκτήριο συμβάν και να υπολογίσει τις πιθανότητες των πιθανών επιπτώσεων. Τα δένδρα αποτελούνται από ένα αριθμό συμβόλων που περιγράφουν την αλυσίδα των συμβάντων σε χρονολογική σειρά. Τα κλαδιά στους κόμβους αστοχίας/επιτυχίας τυπικά εξαρτώνται

⁷ Five rules for fault tree construction Vesely, Goldberg et al., 1981, Andrews and Moss, 1993, p. 154- 156

⁸ *Fault Tree Handbook* Vesely, Goldberg et al., 1981, p. VII-2. See also Ang and Tang, 1975, chapter 2

από το αν τα συστήματα ασφαλείας λειτούργησαν ή όχι. Για παράδειγμα ο εκτροχιασμός μιας επιβατικής αμαξοστοιχίας έχει διάφορες επιπτώσεις ανάλογα με το αν οι επισκευές ανατράπηκαν, αν υπήρξε πυρκαγιά κ.α. Επομένως με τη μέθοδο αυτή περιγράφονται όλα τα πιθανά σενάρια και υπολογίζονται οι πιθανότητές τους (Ayyub, 2003; Beim & Hobbs, 1997; Hong et al., 2009).

Οι μεθοδολογίες *Human Error Analysis Techniques, HEAT*, ή *Human Factor Event Analysis, HFEA* έχουν ως στόχο την ανάλυση της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε διάφορες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα τα ανθρώπινα λάθη έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικό παράμετρο που μπορεί να προκαλέσει σοβαρά συμβάντα ή ατυχήματα στο εργασιακό περιβάλλον και όχι μόνο. Η συστηματική θεώρηση του ανθρώπινου παράγοντα στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση των πολύπλοκων συστημάτων βοηθάει στην βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας και στην αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος (Attwood, Khan, & Veitch, 2006a; Baysari et al, 2008; Hollywell, 1996; Kontogiannis, 1999; Kontogiannis & Malakis, 2009). Επίσης οι συνθήκες εργασίας, οι ικανότητες, η πολυπλοκότητα των εργασιών, το άγχος και άλλοι παράγοντες αποτελούν μια ομάδα παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφοράς των φορέων εκμετάλλευσης του συστήματος. Η ομάδα αυτή ονομάζεται Παράμετροι Διαμόρφωσης της Απόδοσης (*Performance Shaping Factors, PSF*) (Kim & Jung, 2003) και αφορούν όλους τους τομείς που σχετίζονται με την εργασία και επιδρούν στην απόδοση των εμπλεκομένων και χρησιμοποιείται στις τεχνικές HEAT (Kirwan, 1994). Οι Bellamy, Geyer, & Wilkinson (2008), Cilingir & Mackhieh (1998) και Doytchev & Szwillus (2008) εισήγαγαν μια σειρά μεθόδων για την ανάλυση του ανθρώπινου σφάλματος, όπως είναι η ATHEANA (A Technique for Human Error Analysis), CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method), HEART (Human Error Analysis and Reduction Technique), HEIST (Human Error Identification in System Tools), THERP (Technique for Human Error Rate Prediction). Στόχος των παραπάνω μοντέλων είναι ο εντοπισμός των αιτιών για την λανθασμένη ανθρώπινη συμπεριφορά, των παραμέτρων που επιδρούν στην ανθρώπινη απόδοση και τη πιθανότητα να συμβούν λάθη.

Συνοψίζοντας οι υβριδικές τεχνικές επιτρέπουν μια σχετική κατάταξη της επικινδυνότητας, αλλά δεν παρέχουν αξιολογήσεις των έργων ή συστημάτων μεγάλης κλίμακας που αποτελούνται από επιμέρους συστήματα.

Πίνακας 2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων διαχείρισης και εκτίμησης της επικινδυνότητας αστοχίας ενός συστήματος

	Εκτίμηση Επικινδυνότητας		
	Ποιοτικές Μέθοδοι	Ποσοτικές Μέθοδοι	Υβριδικές Μέθοδοι
Haas (1977)			
Chapman (1979)			
Haimes (1981)		+	
Chapman (1988)	+		
Eschenroeder et al. (1988)			
Hill (1992)		+	
Muhlbauer (1992)	+	+	
Concord (1993)		+	
Nessim et al. (1995)		+	
Pate-Cornell (1995)			
Webler et al. (1995)		+	
Lotsberg et al. (1998)		+	
Pandey (1998)		+	
Faber et. al (1999)		+	
Brown et al. (2000)		+	
Cagno et al. (2000)	+		
Faber et al. (2000)		+	
Morgan et al. (2000)		+	
Montgomery et al. (2000)			+
Nessim et al. (2000)		+	
Straub et al. (2000)		+	
Dey et al. (2001)	+		
Florig et al. (2001)		+	
Greenland (2001)			
Kaplan et al. (2001)		+	
Miller et al. (2001)			
Binkowithz et al. (2002)			
Haimes (2002)		+	
Montgomery et al. (2002)		+	
Pate-Cornell (2002)			
Faber et al. (2003)		+	
Jo et al. (2003)			
Khan et al. (2003a, 2003b)			+
Khan et al. (2004)			+
Markowski (2003)		+	

Willcocks et al. (2003)			+
Dey (2004)			+
Kiefner et al. (2004)			
Jo (2005)		+	
Henselwood et al. (2005)		+	
Dziubinski (2006)			+
Kirkwood et al. (2006)			+
Khan et al. (2006)			+

2.3 Μέθοδοι διαχείρισης και εκτίμησης της επικινδυνότητας των σιδηροδρομικών δικτύων

Η διαχείριση της επικινδυνότητας ορίζεται ως η διαδικασία αξιολόγησης της επικινδυνότητας και το σχεδιασμό στρατηγικών και διαδικασιών για την άμβλυνση των παραμέτρων κινδύνου και τρωτότητας που εντοπίστηκαν. Διάφοροι μέθοδοι έχουν προταθεί για την ανάπτυξη λύσεων στο πρόβλημα της διαχείρισης της επικινδυνότητας. Οι βασικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται και συνδυάζονται κατά τη διαχείριση της επικινδυνότητας είναι τα ποιοτικά και ποσοτικά μοντέλα.

Επίσης η εκτίμηση επικινδυνότητας αποτελεί τον πυρήνα της διαχείρισης της, της διαδικασίας δηλαδή αξιολόγησης των κινδύνων και της κατανομής των πόρων έτσι ώστε να μειώνεται το επίπεδο επικινδυνότητας ικανοποιώντας τους οικονομικούς περιορισμούς. Από τις τρεις φάσεις της διαδικασίας επικινδυνότητας, δηλαδή τον εντοπισμό του παραμέτρων, της αξιολόγηση τους, και ο μετριασμός της εξαρτάται άμεσα από την ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας που εντάσσεται στην εκτίμηση της επικινδυνότητας.

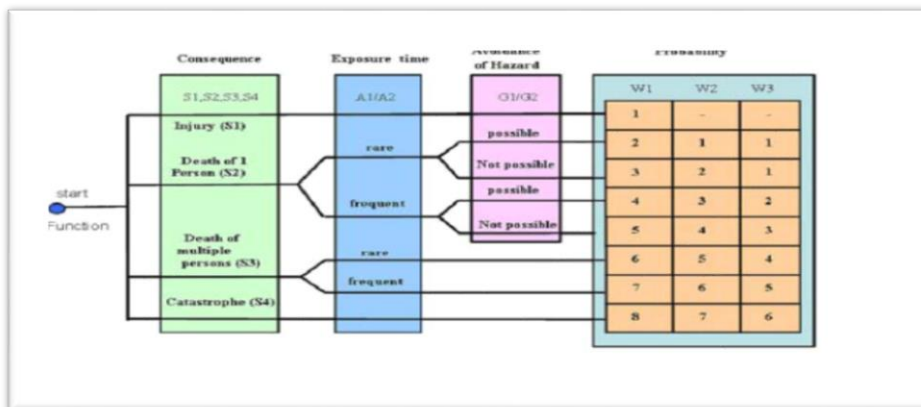
Συγκεκριμένα οι βασικές τεχνικές που συναντώνται στην βιβλιογραφία για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ατυχημάτων σε σιδηροδρομικό δίκτυο είναι: ο Πίνακας Επικινδυνότητας (Risk Matrix), το Γράφημα Επικινδυνότητας (Risk Graph), η Ταξινόμηση Προτεραιότητας της Επικινδυνότητας (Risk Priority Number, RPN: από το υψηλότερο στο χαμηλότερο επίπεδο επικινδυνότητας), και το BP- Risk.

Η μέθοδος *Risk Matrix* οργανώνει τη συχνότητα και τη σοβαρότητα του κινδύνου σε ένα πίνακα και καθορίζει το επίπεδο επικινδυνότητας. Ανάλογα με το επίπεδο καθορίζεται εάν η επικινδυνότητα είναι ανεκτή ή αν θα πρέπει να ληφθούν μέτρα ασφαλείας για την μείωση της επικινδυνότητας σε χαμηλότερα επίπεδα. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ένα εύχρηστο εργαλείο αλλά υπάρχει περίπτωση να παραληφθούν σημαντικοί παράμετροι και να υπεραξιολογηθεί το επίπεδο επικινδυνότητας.

	Negligible	Marginal	Critical	Catastrophic
Frequent	II	I	I	I
Probable	III	II	I	I
Occasional	III	III	II	I
Remote	IV	IV	III	II
Improbable	IV	IV	III	III
Incredible	IV	IV	IV	IV
I	Intolerable			
II	Undesirable			
III	Tolerable			
IV	Negligible			

Εικόνα 2.3.1 Παράδειγμα Πίνακα Επικινδυνότητας (Risk Matrix)

Η μέθοδος Risk Graph περιλαμβάνει τέσσερις (4) παραμέτρους: Συνέπειες, χρόνος έκθεσης, αποφυγή κινδύνου και πιθανότητα, για να καθορίσει το επίπεδο ασφαλείας του δικτύου. Οι τεχνικές και τα εργαλεία μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο ασφαλείας και τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλυθούν τα προβλήματα στο σύστημα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κατά κόρον για την εκτίμηση επικινδυνότητας στο European Train Control System. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ευκολία στη χρήση της, το μικρό κόστος και η εφαρμογή της σε διάφορα επίπεδα λειτουργίας του συστήματος. Τα βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι οι παράμετροι περιγράφονται προφορικά, η αποδοχή του επιπέδου επικινδυνότητας είναι ασαφής και ο χρόνος έκθεσης στο κίνδυνο είναι ανακριβής.



Εικόνα 2.3.2 Παράδειγμα της Μεθόδου Γραφήματος Επικινδυνότητας (Risk Graph)

Η μέθοδος RPN, γνωστή και ως FMECA εφαρμόζεται κυρίως στην ανάπτυξη λογισμικού. Θεωρείται μια σχετικά απλή μέθοδο, με δυνατότητα σύγκρισης των επιπέδων επικινδυνότητας και με σχετικά μικρό χρόνο ανάλυσης και αξιολόγησης. Δεν επιτρέπει όμως τον καθορισμό ορίων στην επικινδυνότητα, ο χρόνος έκθεσης στο κίνδυνο δεν συνυπολογίζεται και ο ρυθμός ανίχνευσης της αστοχίας είναι ανακριβής και διαφορούμενος.

Η μέθοδος BP – Risk, η οποία αναπτύχθηκε από το Γερμανικό Σιδηροδρομικό Δίκτυο για το σύστημα σηματοδότησης του σιδηροδρομικού δικτύου έχει ως στόχο την αξιολόγηση των επιδράσεων της λειτουργίας του κάθε επιμέρους συστήματος στο συνολικό σύστημα όταν συμβεί μια αστοχία. Η αρχή για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο ακριβής ορισμός του συστήματος που περιγράφει όλα τα επιμέρους στοιχεία και τις λειτουργίες διεπαφής. Οι λειτουργίες του συστήματος θεωρείται ότι προκύπτουν από την αμοιβαία αλληλεπίδραση ανθρώπου – τεχνολογίας. Επιπλέον επιμέρους κίνδυνοι είναι δυνατό να προστεθούν στις συναρτήσεις του συστήματος και μπορούμε να υποθέσουμε ότι η συνολική επικινδυνότητα είναι μικρότερη από το άθροισμα των επιμέρους κινδύνων: $R \leq \sum_{i=1}^n R_i$.

Η ανάλυση των κινδύνων στην ασφάλεια και των αντιμέτρων στο σιδηροδρομικό δίκτυο είναι απαιτητική διαδικασία και αποτελεί μια διεργασία συνεχής άντλησης δεδομένων. Η πιθανότητα να συμβούν ατυχήματα ήταν παραδοσιακά η βασική αρχή στην εκτίμηση επικινδυνότητας. Τα ατυχήματα σε σιδηροδρομικά δίκτυα θα συμβούν και είναι φυσικό να αναζητηθούν τα αίτια τους. Επομένως τα ατυχήματα θα συνεχίσουν να αποτελούν τη βάση για το προσδιορισμό του προβλήματος. Ειδικά στη περίπτωση εμφάνισης απίθανων ατυχημάτων με ιδιαίτερες επιπτώσεις. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του ατυχήματος στη Λέρουμ, Σουηδία όπου ο συνδυασμός πίεσης, χρόνου και λανθασμένης επιθεώρησης των εργασιών συντήρησης οδήγησε σε μοιραία σύγκρουση δύο επιβατικών αμαξοστοιχιών.

Οι στατιστικές μεθοδολογίες εφαρμόζονται στον τομέα των μεταφορών για να εκτιμήσουν το ρυθμό ατυχημάτων (*rates*) και τις επιπτώσεις εφαρμόζοντας διάφορα μέτρα. Η χρήση των στατιστικών μεθόδων είναι συχνή στον τομέα των οδικών μεταφορών όπου κάθε χρόνο σημειώνεται ένα υψηλός αριθμός ατυχημάτων και είναι εφικτό να υπολογιστούν αξιόπιστες εκτιμήσεις των ρυθμών ατυχημάτων και οι μέση εκτίμηση επιπτώσεων. Όσο αφορά το σιδηροδρομικό δίκτυο η εφαρμογή στατιστικών εργαλείων έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα που είναι η έλλειψη δεδομένων. Με εξαίρεση τα ατυχήματα σε ανισόπεδες διαβάσεις, ο αριθμός ατυχημάτων είναι

μικρός, γεγονός που δυσκολεύει την αξιόπιστη εκτίμηση του ρυθμού θνησιμότητας ανά έτος. Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα αποτελεί η λεπτομερής αναφορά ατυχημάτων και η εισαγωγή αυτών των δεδομένων για στατιστική ανάλυση.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός των εννοιών: ρυθμός ατυχημάτων και αναμενόμενες επιπτώσεις μόλις συμβεί το ατύχημα. Ο ρυθμός ατυχημάτων μπορεί να εκφραστεί ως ο αριθμός των ατυχημάτων για δεδομένη μονάδα μέτρησης. Στον τομέα μεταφορών ως μονάδα μέτρησης θεωρείται η απόσταση που διανύεται από το όχημα, για παράδειγμα είναι ο αριθμός των ατυχημάτων ανά δισεκατομμύρια χιλιόμετρα που διανύει το τραίνο. Οι επιπτώσεις μπορούν να υπολογιστούν με τον αριθμό των θανάτων ή τραυματισμών ανά ατύχημα.

Μια βασική αρχή λειτουργίας του σιδηροδρομικού συστήματος είναι η αλληλεξάρτηση των διάφορων κινήσεων των αμαξοστοιχιών. Η συνάντηση των αμαξοστοιχιών σε μονή σιδηροδρομική τροχιά, οι συνδέσεις των οχημάτων για τους επιβάτες σε μεγαλύτερους σταθμούς, τα προγράμματα των μηχανοδηγών και η διαφορά των ταχυτήτων των αμαξοστοιχιών αποτελούν παραδείγματα των παραμέτρων που συνδυάζονται στα δρομολόγια των αμαξοστοιχιών. Οι πιθανοτικές κατανομές εμφάνισης ατυχημάτων δεν είναι εύκολο να αποτυπωθούν στο σιδηροδρομικό δίκτυο όπως συμβαίνει στη περίπτωση του οδικού δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι αλλαγές στην υποδομή, το τροχαίο υλικό ή στους κανονισμούς ασφαλείας αποτελεί πρόκληση για να προσδιοριστούν και να αναλυθούν οι συνέπειες αυτής της αλλαγής και τα απαιτούμενα δεδομένα για μια εις βάθος ανάλυση ίσως να μην είναι διαθέσιμα. Οι προσομοιώσεις ίσως απαιτηθούν για να προσδιοριστούν η επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου.

Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί μοντέλα διαχείρισης της επικινδυνότητας. Ο Miller (et al. 2001) ανέπτυξε μια προσέγγιση που σκιαγραφεί τις διάφορες συνιστώσες της επικινδυνότητας, περιγράφει τις στρατηγικές για την αντιμετώπιση της, και προτείνει ένα δυναμικό μοντέλο για τη διαχείριση της που εφαρμόζεται σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας. Επίσης κατηγοριοποιεί τα επίπεδα επικινδυνότητας αναφορικά με ότι αφορά την ολοκλήρωση του έργου και τους νομοθετικούς περιορισμούς. Επίσης πρότείνει τέσσερις βασικές τεχνικές διαχείρισης επικινδυνότητας: (1) διαμόρφωση του προβλήματος και μετριάσμός του, (2) κατανομή και ανταλλαγή πόρων, (3) ρυθμιστικές και νομοθετικές αρχές (4) η διαφοροποίηση των στρατηγικών αντιμετώπισης με την εφαρμογή της θεωρίας χαρτοφυλακίου (*portfolio*).

Ο Chapman (1979), πρότεινε την εφαρμογή τεχνικών SCERT (Synergistic Contingency Evaluation and Response Techniques), οι οποίες παρέχουν μια συστηματική προσέγγιση για τον προγραμματισμό και την οικονομική αξιολόγηση των μεγάλων έργων που είναι ευάλωτα σε καιρίους κινδύνους. Η τεχνική SCERT αποτελείται από τέσσερις φάσεις: διαμόρφωση προβλήματος, μορφοποίηση, παραμετροποίηση, χειρισμός και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ο Muttram (2002), περιγράφει ένα αμερόληπτο και επιστημονικό μοντέλο που αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων που αναπτύχθηκαν πρόσφατα για την βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Το μοντέλο εφαρμόζει την FTA και τις τεχνικές αιτίας – συνέπειας για να προβλέψει τα επίπεδα επικινδυνότητας που παραμένουν μετά την εφαρμογή αντιμέτρων και βασίζεται σε καταγεγραμμένα δεδομένα απόδοσης σε θέματα ασφάλειας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιούνται για να ανανεωθεί η λίστα των δεικτών επικινδυνότητας στην οποία βασίζεται η εταιρία διαχείρισης σιδηροδρόμων στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το μοντέλο επίσης έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει μέτρο ελέγχου για την επίδραση των προτεινόμενων μέτρων ασφαλείας στα επίπεδα επικινδυνότητας.

Οι Park και Wang (et. Al. 2009) ανέπτυξαν μοντέλα εκτίμησης της επικινδυνότητας να συμβούν ατυχήματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο, τα οποία βασίστηκαν στις μεθόδους ασφαλείας που προτείνονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σε αυτή τη δημοσίευση παρουσίασαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στο δίκτυο της Κορέας και συνέκριναν την απόδοση των αποτελεσμάτων στην ασφάλεια του σιδηροδρομικού δικτύου σε σχέση με συγκεκριμένους παράγοντες κινδύνου, όπως είναι η αντίδραση των επιβατών, του κοινού, των εργαζομένων και η συμπεριφορά του τροχαίου υλικού. Επίσης προτείνουν εμπειρικές καμπύλες θνησιμότητας (*FN curves*) για να αξιολογήσουν τα επίπεδα της συχνότητας και της σοβαρότητας των θανατηφόρων σιδηροδρομικών ατυχημάτων.

Οι An M. Huang S. και Baker C J (2007), παρουσίασαν μια συστηματική μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας εφαρμόζοντας τη fuzzy reasoning προσέγγιση και την fuzzy analytical hierarchy διαδικασία λήψης αποφάσεων. Για την περιγραφή της συχνότητας εμφάνισης, της σοβαρότητας των συνεπειών, του δείκτη σημαντικότητας και του επιπέδου επικινδυνότητας εισήγαγαν ποιοτικούς δείκτες. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει τη δυνατότητα αξιολόγησης τόσο των ποιοτικών όσο και των ποσοτικών δεδομένων καθώς και της πληροφορίας που συνδέεται με την λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης

περιγράφονται σε ποσοστιαία μορφή, δηλαδή οι βαθμοί επικινδυνότητας και οι κατηγορίες επικινδυνότητας ανά επίπεδο.

Ο Yoon (et. Al. 2009), περιέγραψε ένα ποσοτικό εργαλείο ανάλυσης του κινδύνου, στη περίπτωση πυρκαγιάς σε τούνελ, από όπου διέρχεται το σιδηροδρομικό δίκτυο. Διάφορα σενάρια κατασκευάστηκαν με την χρήση της ETA και στη συνέχεια υπολογίστηκε η συχνότητα εμφάνισης και οι συνέπειες (θάνατοι) για κάθε σενάριο. Για να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα των παραμέτρων που επηρεάζουν τον αριθμό των θανάτων σε κάθε περίπτωση, εφάρμοσαν την προσομοίωση Monte Carlo.

Οι Robert T. Anderson (et al. 2004) απέδειξαν ότι απαιτείται μια πιο λεπτομερή στατιστική ανάλυση του ρυθμού ατυχημάτων, από αυτή που μέχρι σήμερα εφαρμόζεται για την ανάλυση επικινδυνότητας όσο αφορά τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν τη μέθοδο στατιστικής ανάλυσης με την οποία προσδιορίζουν την πιθανότητα να εμπλακούν σε κάποιο ατύχημα οι εμπορευματικές αμαξοστοιχίες σε κύρια σιδηροδρομική γραμμή. Επιμέρους τμήματα της ανάλυσης επικινδυνότητας για τη μεταφορά επικίνδυνων υλικών μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου περιλαμβάνει: α) την εκτίμηση της πιθανότητας ότι η αμαξοστοιχία θα έχει κάποιο ατύχημα, β) την δεσμευμένη πιθανότητα ότι η αμαξοστοιχία που μεταφέρει τα επικίνδυνα υλικά θα εκτροχιαστεί και θα εκτεθεί σε κίνδυνο και γ) την δεσμευμένη πιθανότητα ότι το εκτροχιασμένο όχημα θα απελευθερώσει το επικίνδυνο φορτίο του.

Οι Barkan (et. al. 2003) περιγράφουν τις σύγχρονες μεθόδους που εφαρμόζονται για την ακριβή ανάλυση των δεδομένων για την εκτίμηση της επικινδυνότητας των επικίνδυνων φορτίων. Επισημαίνεται ότι οι μέθοδοι αυτοί είναι απαραίτητοι από τη στιγμή που τα ατυχήματα στο σιδηροδρομικό δίκτυο και τα ποσοστά απελευθέρωσης των επικίνδυνων φορτίων έχουν μειωθεί σε τόσο χαμηλό επίπεδο με αποτέλεσμα οι δυνατότητες για τη βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας να έχουν μειωθεί αρκετά. Επίσης η δημοσίευση εξετάζει τα δεδομένα εκτροχιασμών για να προσδιορίσουν τις συνθήκες που είναι πιο πιθανό να έχουν ως αποτέλεσμα ένα ατύχημα απελευθέρωσης επικίνδυνων φορτίων και στοχεύει στον εντοπισμό παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα απόδοσης.

Στην αναφορά τους οι Lindberg και Olsson το 1993 μελέτησαν την πραγματική εφαρμογή και την απόδοση των εφαρμοζόμενων μεθόδων ανάλυσης επικινδυνότητας στο σιδηροδρομικό δίκτυο (Lindberg and Olsson, 1991). Παρατήρησαν λοιπόν ότι εκτός από την ανάλυση σε ισόπεδες διαβάσεις και τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, οι μέθοδοι αυτοί δεν χρησιμοποιούνται συχνά για το συγκεκριμένο δίκτυο. Τα ήδη

μειωμένα επίπεδα επικινδυνότητας για τους επιβάτες θεωρήθηκαν ως η εξήγηση για αυτή τους το συμπέρασμα. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η σημαντικότερη ένσταση υπέρ των μεθόδων εκτίμησης της επικινδυνότητας στο σιδηροδρομικό δίκτυο είναι ότι δίνεται η δυνατότητα στους υπευθύνους λήψης αποφάσεων να αντιμετωπίσουν τους δείκτες επικινδυνότητας και την αβεβαιότητα με ένα πιο συστηματικό και συνεχή τρόπο.

Η Railtrack ήταν μια ομάδα εταιριών που ήταν ιδιοκτήτες σιδηροδρομικών γραμμών, σηματοδότησης, σήραγγες, γέφυρες, και ισόπεδες διαβάσεις καθώς και άλλες υποδομές του σιδηροδρομικού δικτύου εκτός από μερικούς σιδηροδρομικούς σταθμούς της Μεγάλης Βρετανίας από την ίδρυσή το 1994 έως το 2002. Η Railtrack ανέπτυξε ένα μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας και το εφάρμοσε στο σιδηροδρομικό Βρετανικό δίκτυο εφαρμόζοντας δενδρική ανάλυση σφαλμάτων και συμβάντων (*FTA και ETA*) που αφορούσαν εκτροχιασμούς, συγκρούσεις και πυρκαγιές, περιγράφοντας με αυτή τη μέθοδο τους δείκτες επικινδυνότητας για όλο το δίκτυο. Επίσης στην μέθοδο αυτή εφαρμόζεται η ισοδυναμία για τους θανάτους όπου ***10 σοβαροί τραυματισμοί ή 200 περιστατικά ελαφρών τραυματισμών ισοδυναμούν με 1 θάνατο.***

Επίσης η Railtrack (1999) ανέπτυξε ένα εργαλείο ανάλυσης και απεικόνισης των κόμβων. Είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης που αναλύει τους δείκτες επικινδυνότητας σε διάφορα επίπεδα σιδηροδρομικών κόμβων προσομοιώνοντας τις λειτουργίες κίνησης της αμαξοστοιχίας. Δεν είναι μοντέλο δικτύου με την παραδοσιακή έννοια και δε μπορεί να εφαρμοστεί για ανάλυση χωρητικότητας ή υπολογισμούς χρονοδιαγράμματος. Το μοντέλο υπολογίζει τους δείκτες επικινδυνότητας σύμφωνα με τα μοτίβα της σιδηροδρομικής υπηρεσίας, τις διαφορές μεταξύ των αμαξοστοιχιών, τη θέση σήμανσης, και τη ταχύτητα. Υπολογίζει τους πιθανούς δείκτες επικινδυνότητας από συγκρούσεις και δε λαμβάνει υπόψη τους εκτροχιασμούς.

Οι Symons και Dennis (2000)⁹ ανέπτυξαν μια μέθοδος, στόχος της οποίας είναι να εκτιμήσει την επικινδυνότητα, να προσδιορίσει τους κινδύνους, τις αστοχίες και την συμμετοχή τους στους δείκτες επικινδυνότητας καθώς και να βελτιώσει την ανάλυση των μέτρων ασφαλείας. Ο αριθμός των επιβατών και οι ταχύτητες των αμαξοστοιχιών συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο μαζί με δευτερεύουσες επιπτώσεις όπως πυρκαγιές,

⁹ Symons and Dennis, 2000, p. 2

συγκρούσεις με υποδομές δίπλα στις γραμμές, εμπόδια ή αμαξοστοιχίες στις παρακείμενες ράγες. Το μοντέλο ποσοτικοποιεί την επικινδυνότητα για τις ακόλουθες κατηγορίες εμπλεκομένων: α) Επιβάτες σε αμαξοστοιχίες και σταθμούς β) Οι υπάλληλοι στις αμαξοστοιχίες, στους σταθμούς και εργαζόμενοι στις σιδηροδρομικές γραμμές γ) πολίτες, δηλαδή τα άτομα που διέρχονται από τις σιδηροδρομικές γραμμές στις ισόπεδες διαβάσεις καθώς και τους παραβάτες που μπαίνουν στις ράγες χωρίς εξουσιοδότηση.

Ο Evans (2002) για να μοντελοποιήσει το ρυθμό ατυχημάτων σε δίκτυο πρότεινε ένα μοντέλο όπου λείναι ο ρυθμός ατυχημάτων που εκφράζεται ως αριθμός των ατυχημάτων ανά δεσεκατομμύρια χιλιομετρικών της αμαξοστοιχίας. Στο μοντέλο τολθεωρείται συνάρτηση του χρόνου και εκφράζεται ως $\lambda(t) = a \cdot e^{\beta \cdot t}$, όπου a είναι το **intercept** δίνοντας το ρυθμό ατυχημάτων το έτος 0 και β ο συντελεστής δεδομένου την ετήσια αναλογική μεταβολή στο ρυθμό ατυχημάτων¹⁰. Επίσης είναι εφικτό να εφαρμοστεί το μοντέλο όπου $\lambda(t) = a \cdot \beta^t$. Σε αυτή τη περίπτωση η εκτίμηση του β η τιμή του θα πρέπει να είναι <1 ώστε να υπάρχει μειωτική κλίση (**decreasing trend**). Στο δημοσίευμα του Evans γίνεται μια ενδιαφέρουσα σύγκριση με το προσδοκώμενο αριθμό θανάτων ανά έτος που υπολογίζεται από το μοντέλο εκτίμησης της επικινδυνότητας Railtrack. Υπάρχει ένσταση ότι όσο αφορά την χαμηλή συχνότητα ατυχημάτων με σοβαρές επιπτώσεις μπορεί να συμβούν και ότι οποιαδήποτε στατιστική εκτίμηση που βασίζεται στα ιστορικά δεδομένα θα υποβαθμίσει το επίπεδο επικινδυνότητας διότι αυτές οι κατηγορίες ατυχημάτων συμβαίνουν τόσο τυχαία και δεν έχουν σημειωθεί κατά την περίοδο που καλύπτουν τα δεδομένα.

Οι Pate-Cornell et al. (1995, 2002) ανέπτυξαν μεθόδους διαχείρισης της επικινδυνότητας επεκτείνοντας το Bayesian Μοντέλο, το οποίο υπολογίζει την τρέχουσα πιθανότητα εκδήλωσης ενός συμβάντος δεδομένου την πιθανότητα πριν να συμβεί. Επιπλέον, οι Greenland (2001) και Linville (2001) συνδύασαν την Bayesian μοντέλο με την προσομοίωση Monte Carlo για την ανάπτυξη ενός μοντέλου λήψης αποφάσεων.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί¹¹ διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν τη προσομοίωση Monte Carlo σε διάφορα προβλήματα που αφορούν τη διαχείριση της επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια μέθοδος για επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς χρησιμοποιώντας γενικευμένες τιμές σε

¹⁰ Evans, 2002, p. 4

¹¹ Eschenroeder, et al. (1988), Haas (1997), και Binkowitz et al. (2002)

συγκεκριμένες κατανομές πιθανοτήτων για αυτό και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη πιθανοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας (*PRA*). Η σχεδίαση της επιτρέπει τη εισαγωγή της παραγοντοποίησης αλλά και του βαθμού αβεβαιότητας που συνδέονται με τις παραμέτρους της μεθόδου *PRA*. Το εργαλείο αντλεί τυχαίες μεταβλητές τις κατανομές πιθανοτήτων καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση επικινδυνότητα. Για παράδειγμα για την μοντελοποίηση των εκτροχιασμών, ένας αριθμός παραμέτρων δίνει τα δεδομένα για τους υπολογισμούς. Μια παραδοσιακή ανάλυση εφαρμόζει σημειακές εκτιμήσεις διαφορετικών πιθανοτήτων. Αντί όμως για αυτή οι παράμετροι μπορούν να αντικατασταθούν από κατανομές πιθανοτήτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σημειακή εκτίμηση της συχνότητας εκτροχιασμών λόγω αστοχιών στις σιδηροδρομικές τροχιές μπορεί να αντικατασταθεί από την κατανομή Poisson με την αναμενόμενη τιμή 3.4×10^{-6} . Για κάθε υπολογισμό η τιμή επιλέγεται τυχαία σε κάθε παράμετρο. Η τιμή των αποτελεσμάτων υπολογίζεται και καταγράφεται. Στην επόμενη επανάληψη νέες τιμές προκύπτουν για τις παραμέτρους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων και σε κάθε μία η τιμή του αποτελέσματος καταγράφεται. Το μειονέκτημα της προσομοίωσης Monte Carlo είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη του επιπτώσεις μιας αστοχίας που δεν εκφράζεται σε ποσοτικούς όρους και επομένως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρωταρχικό κριτήριο για σε θέματα λήψης απόφασης που αφορά ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Μερικές φορές είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα σε στατιστικές κατανομές πιθανοτήτων ώστε να γίνει μια πιο ακριβή περιγραφή των δεικτών επικινδυνότητας σε ατυχήματα. Για παράδειγμα στο σιδηροδρομικό δίκτυο ο αριθμός των θανάτων ανά ατύχημα αποτελεί ασύμμετρο μοτίβο όπου το πιο πιθανό αποτέλεσμα είναι ένας ή περισσότεροι θάνατοι αλλά με μικρή πιθανότητα να συμβεί ατύχημα με υψηλή θνησιμότητα. Μια θεωρητική κατανομή πιθανοτήτων περιγράφει καλύτερα την επικινδυνότητα.

Σύμφωνα με τους Evans and Verlander (1996)¹² για να εισαχθούν εμπειρικά δεδομένα σε θεωρητική κατανομή πιθανοτήτων θα πρέπει να γίνουν τα επόμενα βήματα: 1. Λήψη υποθέσεων για συγκεκριμένες κατανομές, 2. Εάν το πρώτο βήμα δεν είναι εφικτό τότε θα πρέπει να γίνει ανάλυση των πιθανών τιμών των παραμέτρων και να περιοριστεί ανάλογα η αναθεώρηση των κατανομών, 3. Να

¹² Evans and Verlander, 1996, p. 185

επιλεχθεί μία ή παραπάνω θεωρητικές κατανομές με κατάλληλο πεδίο τιμών, 4. Να εκτιμηθούν οι παράμετροι των κατανομών, 5. Να επιλεχθεί μια από τις κατανομές αναθεώρησης που προκύπτει από τον έλεγχο καλής προσαρμογής από το chisquare test ή από κάποιο άλλο μοντέλο. Η διαδικασία αυτή απλοποιείται με τη χρήση στατιστικών πακέτων όπως είναι το SPSS.

Μια άλλη επιλογή είναι η μοντελοποίηση σε μοντέλα παλινδρόμησης (*regression models*). Τα μοντέλα αυτά μπορεί να είναι γραμμικά, εκθετικά ή κάποιας άλλης μορφής. Ο αριθμός ατυχημάτων για παράδειγμα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Υπάρχει μια συνεχή ροπή προς ασφαλέστερα σιδηροδρομικά δίκτυα, πολλά μέτρα ασφαλείας έχουν εφαρμοστεί και σε μερικές χώρες συστήματα αυτόματου ελέγχου έχουν εγκατασταθεί. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σίγουρα τον αριθμό ατυχημάτων ανά έτος. Επιπλέον η θνησιμότητα ανά ατύχημα μπορεί επίσης να έχει μεταβληθεί, για παράδειγμα περισσότερο αξιόπιστα τροχαία υλικά έχουν δημιουργηθεί και το παλιό υλικό έχει αντικατασταθεί. Για την περιγραφή αυτών των τάσεων μπορούν να εφαρμοστούν στατιστικά μοντέλα.

Ο Saccomanno et al. (2004) εφάρμοσε το μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας για να εκτιμήσει το επίπεδο σοβαρότητας στα σημεία διασταύρωσης σιδηροδρομικού και οδικού άξονα. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από δύο στοιχεία πρόβλεψης: τη συχνότητα σύγκρουσης και τις επιπτώσεις μιας σύγκρουσης. Οι μαθηματικές εκφράσεις της συχνότητας πρόβλεψης Poisson και αρνητικής διωνυμικής (NB) αναπτύχθηκε για τις διαβάσεις με τρεις κατηγορίες μηχανικών προειδοποίησης. Το μοντέλο NB, αποδείχθηκε ότι είναι κατάλληλο για τα δεδομένα συχνότητας συγκρούσεων. Μια σταθμισμένη βαθμολόγηση των επιπτώσεων εισήχθη για να παρουσιάσει το επίπεδο επικινδυνότητας των συνδυασμένων συγκρούσεων. Οι βαθμολογίες βασίστηκαν σε ασφαλιστικές αποζημιώσεις και το μοντέλο NB εφαρμόστηκε για το μοντέλο εκτίμησης επιπτώσεων των συγκρούσεων.

Οι Miranda-Moreno et al. (2005) διερεύνησαν την σχετική απόδοση τριών μοντέλων: του παραδοσιακού αρνητικού διωνυμικού μοντέλου (*negative binomial model*), του ετερογενούς αρνητικού διωνυμικού μοντέλου (*heterogeneous negative binomial model*), και του λογαριθμοκανονικού μοντέλου Poisson (Poisson Log normal). Συγκεκριμένα η μελέτη αυτή εστίασε στην επίπτωση που έχει η επιλογή δυο εναλλακτικών προγενέστερων κατανομών και την επίδραση της μεταβλητότητας στην διασπορά των παραμέτρων στο αποτέλεσμα της ανάλυσης. Για κάθε μοντέλο δύο

εναλλακτικοί δείκτες εκτίμησης ατυχημάτων υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας το μέσο υπό συνθήκες τόσο με την οριακή όσο και με την μεταγενέστερη κατανομή.

Ο Lambert (1992) εφάρμοσε το μοντέλο παλινδρόμησης zero-inflated Poisson (ZIP) για να υπολογίσει τις ατέλειες στην κατασκευή. Υποθέτει ότι με πιθανότητα p η μόνη πιθανή δυνατότητα να μην υπάρχουν ατέλειες είναι 0 και με πιθανότητα $(1 - p)$ αντιστοιχεί σε τυχαία παράμετρος Poisson. Σύμφωνα όμως με την κατανομή Poisson όταν ευθυγραμμιστεί μπορεί να εμφανίσουν ανωμαλίες. Τόσο η πιθανότητα p να πετύχουμε το τέλειο, η κατάσταση 0 των ατελειών και η μέση τιμή των ατελειών στην ελλιπή κατάσταση εξαρτάται από τους παραμέτρους.

Σε κάθε περίπτωση τα μοντέλα παλινδρόμησης ZIP είναι εύκολο να προσαρμοστούν. Η μέγιστη πιθανότητα εκτίμησης είναι κανονική σε μεγάλα δείγματα και τα διαστήματα εμπιστοσύνης μπορούν να κατασκευασθούν μετατρέποντας τις δοκιμές στην αναλογία πιθανότητας ή εφαρμόζοντας την ακριβή κανονικοποίηση. Οι προσομοιώσεις προτείνουν ότι τα διαστήματα εμπιστοσύνης που βασίζονται στο λόγο πιθανότητας είναι πιο αξιόπιστες. Επίσης τα μοντέλα παλινδρόμησης ZIP δεν είναι εύκολο να ερμηνευτούν αλλά οδηγούν σε πιο εξευγενισμένα αποτελέσματα στην ανάλυση δεδομένων. Επομένως τα μοντέλα αυτά όχι μόνο περιγράφουν σε ποιες συνθήκες εμφανίζεται η χαμηλότερη μέση τιμή των αστοχιών αλλά και η αιτία που τις προκαλεί.

Όταν ο αριθμός των μηδενικών συμβάντων είναι υψηλός τα μοντέλα παλινδρόμησης Poisson και αρνητική διωνυμική δεν μπορούν να εφαρμοστούν (Shankar et al., 1997). Για το λόγο αυτό το μοντέλο παλινδρόμησης ZIP είναι προτιμότερο για μοντελοποίηση τέτοιων δεδομένων. Το ZIP υποθέτει ότι το σύστημα έχει δύο καταστάσεις. Μηδενικά ατυχήματα που σημαίνει ότι το σύστημα είναι ασφαλές και στα μη μηδενικά ατυχήματα που σημαίνει ότι η πιθανότητα να συμβεί ατύχημα ακολουθεί κάποια κατανομή όπως η Poisson ή η μηδενική διωνυμική. Όταν τα δεδομένα έχουν πολλές μηδενικές περιπτώσεις τότε τα μοντέλα είναι μεροληπτικά.

Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό ο Lambert (1992) πρότεινε τη zero-inflated Poisson για να ανιχνεύσει τις αστοχίες στη βιομηχανία. Απέδειξε ότι η πιθανότητα μιας τέλειας κατάστασης και η μέση τιμή της επηρεάζονται από διάφορους παραμέτρους. Άλλοι ερευνητές όπως ο Mullahy (1986), King (1989), Land et. Al. (1996), Long (1997), Zorn (1998) θεωρούν ότι η ZIP είναι η πιο κατάλληλη για να μοντελοποιήσει τα δεδομένα με υπερβολικά μηδενικά συμβάντα.

Οι Evans και Verlander (1996)¹³ βρήκαν μια θεωρητική κατανομή πιθανοτήτων εμφάνισης ατυχημάτων σε σιδηροδρομικό δίκτυο όπου λειτουργούν αυτόματα τα συστήματα ασφαλείας των αμαξοστοιχιών (*ATP – automatic systems for train protection*). Η κατανομή ονομάζεται λογαριθμική σειρά (*logarithmic series distribution*) και έχει μακριά «ουρά» στα δεξιά και για αυτό επιτρέπει την αποτύπωση των ατυχημάτων με μεγαλύτερο αριθμό θανάτων από αυτούς που έχουν συμβεί μέχρι στιγμής. Επομένως η εκτιμώμενη μέση τιμή των θανάτων ανά έτος δε θα επηρεαστεί ακόμα και αν ένα ατύχημα μεγαλύτερης κλίμακας συμπεριλαμβανόταν στο δείγμα. Επίσης υπολόγισαν τις αποκαλούμενες ισοδυναμίες θνησιμότητας (*fatality-equivalents*), που βασίζονται στον αριθμό των τραυματισμών πολλαπλασιαζόμενοι με τον ίδιο συντελεστή που σταθμίζει τη ζημιά που προκαλείται από ένα σοβαρό τραυματισμό σε αντίθεση με το θάνατο. Ο αναμενόμενος αριθμός σοβαρών τραυματισμών πολλαπλασιάζονται με τον παράγοντα που προστίθεται στο αναμενόμενο αριθμό θανάτων και το άθροισμα είναι οι *καμπύλες θνησιμότητας*.

Οι παράμετροι στην κατανομή μπορούν να εκτιμηθούν με διαφορετικές μεθόδους, κυρίως με την Maximum Likelihood Estimators (MLE). Ωστόσο εφαρμόζονται και άλλες τεχνικές αρκετά αποδοτικές για να υπολογιστεί πόσο καλά μια κατανομή ταιριάζει με τα δεδομένα. Το GOF (Goodness-of-Fit test) είναι ένα στατιστικό τεστ για το πόσο καλά τα δεδομένα υποστηρίζουν την υπόθεση στην κατανομή του πληθυσμού ή της τυχαίας μεταβλητής¹⁴. Παραδείγματα του GOF είναι τα Chi-squared test, Kolmogorov-Sminov (K-S) και Anderson-Darling (A-D). Αυτές οι στατιστικές τεχνικές ελέγχου συνήθως υπολογίζονται με εργαλεία όπως το SPSS.

Συγκεκριμένα η τεχνική ελέγχου Chi-squared μετράει πόσο καλά μια αναμενόμενη συχνότητα μιας **fitted** κατανομής αποδίδει την παρατηρούμενη συχνότητα στα δεδομένα. Τα δεδομένα χωρίζονται σε ομάδες, όπως στο ιστόγραμμα, και οι συχνότητες κάθε κατηγορίας υπολογίζεται. Στη συνέχεια συγκρίνονται με τις συχνότητες που παρουσιάζονται στην **fitted** κατανομής. τεχνική ελέγχου Chi-squared στατιστικά υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Όπου: O_i : είναι η παρατηρούμενη συχνότητα της ομάδας I και

¹³ Evans and Verlander, 1996, p. 187

¹⁴ Aczel, 1996, p. 669

E_i είναι η προσδοκώμενη συχνότητα των τιμών από την κατανομή πιθανοτήτων που falls in στην ομάδα I

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσο πιο σύντομο είναι το στατιστικό τεστ τόσο καλύτερη είναι η απόδοση των δεδομένων στην κατανομή. Το μειονέκτημα είναι ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τον αριθμό των ομάδων που επιλέχθηκαν. Το τεστ μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα αν μεταβληθεί ο αριθμός των ομάδων και ενδείκνυται για τις διακριτές μεταβλητές αλλά και για τις συνεχείς κατανομές πιθανοτήτων.

Πίνακας 2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων εκτίμησης της επικινδυνότητας ενός σιδηροδρομικού δικτύου

	Εκτίμηση Επικινδυνότητας		
	Ποιοτικές Μέθοδοι	Ποσοτικές Μέθοδοι	Υβριδικές Μέθοδοι
Chapman (1979)	+		
Pate-Cornell et al. (1995, 2002)		+	
Evans και Verlander (1996)		+	
Symons και Dennis (2000)		+	
Diamantidis, Zuccarelli, & Westhäuser (2000)			+
Miller et al. (2001)	+		
Greenland (2001)		+	
Linville (2001)		+	
Vanderhaegen (2001)			+
Muttram (2002)			+
Sacomanno et al. (2004)		+	
Washington & Oh (2006)		+	
Oh, Washington, & Nam, (2006)		+	
Sawalha & Sayed (2006)		+	
Reinach & Viale, (2006)	+		
Zio, Marella, & Podofilini (2007)		+	
An M. Huang S. και Baker C J (2007)		+	
Glickman & Erkut, (2007)			+
Rådbo, Svedung, & Andersson (2008)			+
Vernez & Vuille (2009)		+	
Lee, Jin, & Ji, (2009)		+	
Baysari, Caponecchia, McIntosh, & Wilson (2009)	+	+	
Ye, Pendyala, Washington, Konduri, & Oh (2009)		+	
El-Basyouny & Sayed, (2009)		+	

Park και Wang (et. Al. 2009)	+	+	
Yoon (et. Al. 2009)			+

2.3.1 Μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας σε ισόπεδες διαβάσεις

Ο Wong (1975) εφάρμοσε την μαθηματική ανάλυση, η οποία συγκεντρώνει πολλούς διαφορετικούς παραμέτρους της ισόπεδης διάβασης για να εξάγει μια σειρά από εξισώσεις. Ο ίδιος επέλεξε μια τελική εξίσωση για να αξιολογήσει τις επενδύσεις και το όφελος του εργαλείου πρόβλεψη ατυχημάτων. Στη συγκεκριμένη έρευνα εφαρμόστηκε η πρόγραμμα ανάλυσης παλινδρόμησης το οποίο ανέπτυξε και επέλεξε τις μεταβλητές, όπως το μέσο όρο της ημερήσιας χιλιομετρικής απόστασης των τρένων, τον αριθμό των ισόπεδων διαβάσεων, τον ετήσιο αριθμό ατυχημάτων, την ιδιοκτησία των οχημάτων και τον πληθυσμό, για να αξιολογήσει τους αριθμούς ατυχημάτων στο μέλλον. Το εργαλείο αυτό εφαρμόστηκε από την κυβέρνηση να διαμορφώσει τη βάση του προϋπολογισμού.

Ο Hou (1980) δημιούργησε 867 κατηγορίες ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις από το 1974 ως το 1979 και εφάρμοσε τις μεθόδους μέτρησης των μοντέλων μειονεκτημάτων των αμαξοστοιχιών για να εξηγήσει τον τύπο του ατυχήματος. Εκτός την έρευνα κατά την οποία εφάρμοσε «την ανάλυση του κόστους απωλειών σε ζωές και περιουσία» και «την ανάλυση κόστους – οφέλους» στράφηκε και προς τα μοντέλα μετρήσεων για να δημιουργήσει τα πρότυπα ασφάλειας για την εκτίμηση επικινδυνότητας των ισόπεδων διαβάσεων. Ο στόχος του ήταν να δημιουργήσει μια μέθοδο αξιολόγησης για να αποφασίσει το βαθμό των ισόπεδων διαβάσεων που απαιτούνται για να μειώσει τον αριθμό ατυχημάτων.

Ο Shariari προσπάθησε να εφαρμόσει τη μέθοδος δενδρική ανάλυση σφαλμάτων (FTA) για να διερευνήσει τα ατυχήματα σε ισόπεδες διαβάσεις (Shariari, 1991). Βασιζόμενος σε στατιστικά για 126 ισόπεδες διαβάσεις στη δυτική περιοχή της Σουηδίας κατά τη περίοδο 5 ετών, παράμετροι όπως η συμπεριφορά των οδηγών, τα αμάξια, η κατάσταση των υποδομών και του περιβάλλοντος μοντελοποιήθηκαν. Ο Shariari κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές ανάλυσης FTA μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία μοντελοποίησης των ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις αλλά πρότεινε ότι μια πιο εκτεταμένη και συγχρονισμένη αναφορά ατυχημάτων θα βοηθούσε στην αξιοπιστία του βαθμού ανάλυσης των αιτιών και επιπτώσεων¹⁵.

¹⁵ Shariari, 1991, p. 75-59

Οι Lin και Jhou (1996) ανέλυσαν τις κατηγορίες ατυχημάτων και το τύπο των ισόπεδων διαβάσεων από το 1989 μέχρι το 1993 και σύγκριναν τις διαφορετικές κατηγορίες των ισόπεδων διαβάσεων, των ατυχημάτων, της ηλικίας των οδηγών, του οχήματος και των καιρικών συνθηκών. Κατέληξαν ότι το υψηλότερο ποσοστό ατυχημάτων (76,33%) ανήκει στη κατηγορία 3 των ισόπεδων διαβάσεων ανεξάρτητα από την ηλικία και το όχημα. Επίσης η έρευνα συγκρίνει την πιθανότητα ατυχήματος και το ποσοστό θνησιμότητας στην Αμερική και την Ιαπωνία. Προτείνει ότι το σχέδιο βελτίωσης των ισόπεδων διαβάσεων μπορεί να είναι τρισδιάστατο – μηχανικά μέσα, εκπαίδευση και σχεδιασμός – και να γίνουν συγκεκριμένες βραχυπρόθεσμες προτάσεις.

Ο Tsai (2006) δημιούργησε ένα μοντέλο εκτίμησης επικινδυνότητας στις ισόπεδες διαβάσεις το οποίο δεν αξιολογεί μόνο την πιθανότητα ατυχημάτων και την επικινδυνότητα αλλά υπολογίζει τους δείκτες επικινδυνότητας που επηρεάζουν την πιθανότητα να συμβεί το ατύχημα. Η μελέτη χρησιμοποιεί τα δεδομένα της βελτίωσης των ισόπεδων διαβάσεων που εξέδωσε ο Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών το 1998 και περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις ισόπεδες διαβάσεις στις σιδηροδρομικές τροχιές όπως δεδομένα ατυχημάτων από το 1995 έως το 1997. Επίσης βασίστηκε στα διαθέσιμα δεδομένα για να δημιουργήσει μια ομάδα μοντέλων εκτίμησης επικινδυνότητας ατυχημάτων όπως είναι το μοντέλο συχνότητας ατυχημάτων, το μοντέλο εκτίμησης της σοβαρότητας και το μοντέλο επικινδυνότητας.

Ο Huang (2006) θεωρεί το 70% των ισόπεδων διαβάσεων της κύριας γραμμής ως εμπόδια και κατασκεύασε τα μοντέλα παλινδρόμησης της Poisson και της Αρνητικής διωνυμικής εισάγοντας 603 ατυχήματα σε ισόπεδες διαβάσεις από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο 2004, το 1997 να διαμορφώσει τη σχέση μεταξύ "των παραμέτρων ισόπεδων διαβάσεων" και "τη συχνότητα ατυχημάτων και την κατηγορία". Οι κυριότεροι παράγοντες που οι οποίες επηρεάζουν το ατύχημα σε ισόπεδη διάβαση είναι το «πλάτος διάβασης» και "το σχήμα T της διασταύρωσης κοντά σε ισόπεδες διαβάσεις "και" των αριθμό των αμαξοστοιχιών".

Ο Yang (2007) ανέπτυξε διάφορες μεθόδους που μπορούν να εφαρμοστούν για να αναλύσουν και να προβλέψουν τα ατυχήματα σε ισόπεδες διαβάσεις. Οι τεχνικές αυτές δεν προβλέπουν μόνο τη συχνότητα ατυχημάτων αλλά προσδιορίζουν τα στοιχεία επικινδυνότητας στις ισόπεδες διαβάσεις. Η μελέτη ανέπτυξε « το μοντέλο απαρίθμησης των ατυχημάτων σε διαβάσεις» και «το μοντέλο επιπτώσεων των

ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις» καθώς και το μοντέλο «των συνεπειών ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις που έχουν συμβεί». Τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά ακριβή μέσα από ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο και υλικοτεχνικής (logistic) παλινδρόμησης. Οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν τα ατυχήματα σε ισόπεδες διαβάσεις είναι ο αριθμός των αμαξοστοιχιών και η μέση ημερήσια κυκλοφορία.

Πίνακας 2.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων εκτίμησης επικινδυνότητας σε ισόπεδες διαβάσεις

	<i>Μεθοδολογία</i>	<i>Περιγραφή</i>
Wong (1975)	1. Μαθηματική ανάλυση 2. Παλινδρόμηση	1. Ανάπτυξη εξίσωσης εκτίμησης της επένδυσης και το όφελος του εργαλείου πρόβλεψης των ατυχημάτων 2. Με την παλινδρόμηση προβλέπει τον μελλοντικό αριθμό ατυχημάτων
Hou (1980)	1. Υπολογιστική μέθοδος 2. Ανάλυση του κόστους απωλειών σε ζωές και υποδομές 3. Ανάλυση κόστους - οφέλους	Μέθοδος αξιολόγησης για την επιλογή του επιπέδου των ισόπεδων διαβάσεων: 1. Εφαρμογή μεθόδου μέτρησης των μοντέλων μειονεκτημάτων των αμαξοστοιχιών για να εξηγήσει τη κατηγορία του ατυχήματος 2. Δημιουργία του προτύπου ασφαλείας για την εκτίμηση των ισόπεδων διαβάσεων
Lin and Jhou (1996)		1. Ανάλυση των κατηγοριών ατυχημάτων και των παραμέτρων των ισόπεδων διαβάσεων 2. Σύγκριση διαφορετικών τύπων ισόπεδων διαβάσεων, ατυχημάτων, ηλικίας οδηγών οχημάτων και καιρικών συνθηκών
Tang (2006)	Προσομοίωση	Αναγνωρίζει τις αιτίες των ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις
Tsai (2006)	Μοντέλο υπολογισμού δεδομένων	Ανάπτυξη του μοντέλου επικινδυνότητας στις ισόπεδες διαβάσεις: 1. Πρόβλεψη πιθανότητας ατυχημάτων και επικινδυνότητας 2. Προσδιορίζει τους παραμέτρους επικινδυνότητας που επηρεάζει τη συχνότητα εμφάνισης των ατυχημάτων
Huang (2006)	1. Παλινδρόμηση Poisson 2. Αρνητική Διωνυμική παλινδρόμησης	Μοντελοποιεί τη σχέση μεταξύ των κατηγοριών των ισόπεδων διαβάσεων και της κατηγορίας ατυχημάτων και συχνότητας εμφάνισης
Yang (2007)	1. Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο 2. Υλικοτεχνική παλινδρόμηση (logistic)	1. Ανάλυση και πρόβλεψη των ατυχημάτων στις ισόπεδες διαβάσεις 2. Προσδιορισμός των πιθανών παραμέτρων

2.4 Μοντέλα Ανάλυσης Δεδομένων Ατυχημάτων

Για την ανάλυση των ατυχημάτων, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τα μοντέλα παλινδρόμησης Poisson και αρνητικό διωνυμικό (Negative binominal) για να αξιολογήσουν τη συχνότητα των ατυχημάτων. Επειδή η συχνότητα ατυχημάτων είναι διακριτή και μη αρνητική στη πραγματικότητα, η παλινδρόμηση Poisson είναι περισσότερο κατάλληλη από τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ωστόσο τα δεδομένα μπορεί να διεσπαρμένα περισσότερο από ότι πρέπει (*overdispersed*), δηλαδή η μεταβλητή να υπερβαίνει τη μέση τιμή. Ανάλογα εάν η εκτίμηση που προκύπτει με την εφαρμογή του μοντέλου Poisson είναι μεροληπτική, ενώ το αρνητικό διωνυμικό μοντέλο είναι πιο κατάλληλο. Όταν η τιμή μηδέν στα δεδομένα υπερβαίνουν την προσδοκία μας τότε τα παραπάνω μοντέλα δεν είναι κατάλληλα.

Από την άλλη το μοντέλο παλινδρόμησης ZIP (zero inflated Poisson regression) υπερτερεί αφού υποθέτει ότι υπάρχει διπλή κατάσταση στο σύστημα. Η μια κατάσταση είναι η μηδενική και η άλλη είναι η μη μηδενική. Η πρώτη είναι η ασφαλής κατάσταση αφού δεν έχουν σημειωθεί ατυχήματα ενώ η δεύτερη ακολουθεί ένα συγκεκριμένο τύπο κατανομής όπως η Poisson. Όταν το σύνολο των δεδομένων παρουσιάζει επιπλέον «μηδενικά» τότε τα μοντέλα Poisson και αρνητικά διωνυμικά μπορεί να παρέχουν μεροληπτικές εκτιμήσεις.

2.4.1 Μοντέλα μέτρησης δεδομένων (count data models)

2.4.1.1. Μοντέλο παλινδρόμησης Poisson

Το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson (Poisson regression model) είναι ένα μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης και εφαρμόζεται κυρίως για τα υπολογιστικά δεδομένα (count data). Για παράδειγμα θεωρούμε ότι ένα σύνολο n οδικά τμήματα μιας συγκεκριμένης κατηγορίας οδικού δικτύου, όπως η εθνική οδός. Έστω Y_i μια τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στον αριθμό των οχημάτων που εμπλέκονται σε ατυχήματα στο οδικό τμήμα i κατά την περίοδο ενός έτους, όπου $i = 0, 1, 2, \dots, n$. Επιπλέον ο πραγματικός αριθμός που παρατηρήθηκε Y_i κατά την χρονική περίοδο συμβολίζεται ως y_i , όπου $y_i = 0, 1, 2, 3, \dots$ και $i = 1, 2, \dots, n$. Εδώ η εξαρτημένη μεταβλητή Y είναι ακέραιος μη αρνητικός αριθμός και ακολουθεί την κατανομή Poisson. Η συνάρτηση κατανομής πυκνότητας (the probability density function) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P(Y_i = y_i) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^{y_i}}{y_i!}, \quad y_i = 0, 1, 2, \dots, n$$

Όπου:

Y_i : ο αριθμός ατυχημάτων στην i^{th} καταγραφή

λ_i : ο αναμενόμενος αριθμός ατυχημάτων στην i^{th} καταγραφή, που είναι η παράμετρος του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson

Επειδή το λ_i πρέπει να είναι θετικό, η συνάρτηση συσχέτισης εξηγεί της σχέση μεταξύ της αναμενόμενης τιμής του λ_i και οι ανεξάρτητες μεταβλητές X σε λογαριθμική μορφή μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\ln(\lambda_i) = X_i(\beta)$$

Όπου:

X_i : Διάνυσμα ανεξάρτητων μεταβλητών του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson

β : Διάνυσμα του συντελεστή του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson

Η βασική υπόθεση της κατανομής Poisson είναι ότι ο μέσος όρος ισούται με την διαφορά που δίνεται ως εξής:

$$E(Y_i) = \lambda_i$$

και

$$Var(Y_i) = \lambda_i$$

Το $E(Y_i)$ είναι ο αναμενόμενος αριθμός των καταγραφών Y_i στο μοντέλο παλινδρόμησης Poisson. Καθώς η διακύμανση (variance) είναι μεγαλύτερη από το μέσο όρο, τα δεδομένα είναι υπερ-δισπαρμένα και οι εκτιμώμενοι συντελεστές που δίνονται από το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson είναι μεροληπτικοί και ανεπαρκής.

Επίσης το λ_i μπορεί να εξηγηθεί από ανεξάρτητες μεταβλητές, ως εκ τούτου η παράμετρος του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson εκφράζεται ως εξής:

$$E(Y_i) = \lambda_i = e^{X_i \cdot \beta}$$

Όπου:

λ_i : ο μέσος όρος της i^{th} καταγραφής.

Y_i : ο αριθμός ατυχημάτων στην i^{th} καταγραφή

X_i : Διάνυσμα ανεξάρτητων μεταβλητών του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

β : Διάνυσμα των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n)$

Η εκτίμηση της παραμέτρου του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson χρησιμοποιεί την Maximum Likelihood Estimation (MLE) και την Συνάρτηση πιθανότητας (Likelihood Function) ως εξής:

$$L = \prod_{i=1}^n P(Y_i = y_i) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-e^{X_i \beta}} \cdot (e^{X_i \beta})^{y_i}}{y_i!}$$

Η Log Likelihood Function είναι:

$$LL(\hat{\beta}|y_i, X_i) = \sum_{i=1}^n [-e^{X_i\beta} + y_i \cdot X_i \cdot \beta - \log(y_i!)]$$

2.4.1.2. Μοντέλο αρνητικής διωνυμικής παλινδρόμησης (NB)

Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα υπερδιασποράς (overdispersion) στα αριθμητικά δεδομένα (count data), μια κοινώς χρησιμοποιούμενη κατανομή είναι η NB (λέγεται και μοντέλο Poisson – gamma). Το μοντέλο παλινδρόμησης NB

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\Gamma(y_i + 1/\alpha)}{y_i! \cdot \Gamma(1/\alpha)} \left(\frac{\lambda}{\lambda + 1/\alpha}\right)^{y_i} \left(\frac{1/\alpha}{\lambda + 1/\alpha}\right)^{1/\alpha}, y_i = 0, 1, 2, \dots$$

Όπου:

Y_i : η μέτρηση (count) της i^{th} καταγραφής

λ_i : ο μέσος όρος της i^{th} καταγραφής

α : η παράμετρος διασποράς

Όπου:

$$\lambda_i = E(Y_i) = \exp(\beta \cdot X_i + \varepsilon_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Και η διακύμανση (variance) του Y_i είναι $Var(Y_i) = \lambda_i + a \cdot \lambda_i^2$

Όπου $a \geq 0$ και συνήθως αναφέρεται ως παράμετρος διασποράς (dispersion parameter). Από την εξίσωση $Var(Y_i) = \lambda_i + a \cdot \lambda_i^2$ φαίνεται ότι το μοντέλο αυτό επιτρέπει στη διακύμανση (variance) να υπερβεί το μέσο. Επίσης το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson θεωρείται περιοριστικό μοντέλο της αρνητικού διωνυμικού μοντέλου παλινδρόμησης όσο το a τείνει στο μηδέν. Η συνάρτηση σύνδεσης της παραμέτρου λ_i και οι ανεξάρτητες μεταβλητές X_i είναι $\lambda_i = \exp(\beta \cdot X_i + \varepsilon_i)$, όπου $\exp(\varepsilon)$ ακολουθεί την κατανομή Γάμμα (Gamma) όπου ο μέσος του ισούται με 1 και η διασπορά (variance) είναι α^2 . Όταν η a είναι μηδέν η αρνητική διωνυμική κατανομή θα γίνει κατανομή Poisson. Ωστόσο το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μοντέλου NB.

Η εκτίμηση ML του μοντέλου παλινδρόμησης NB και ο υπολογισμός των σχετικών στατιστικών περιγράφονται λεπτομερώς από τον Lawless (1987). Ειδικά η Συνάρτηση Μέγιστης Πιθανότητας (the Maximum Likelihood Function) είναι η ακόλουθη:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{\Gamma(y_i + 1/\alpha)}{y_i! \cdot \Gamma(1/\alpha)} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda + 1/\alpha}\right)^{y_i} \cdot \left(\frac{1/\alpha}{\lambda + 1/\alpha}\right)^{1/\alpha}$$

Το μοντέλο παλινδρόμησης NB είναι πιο γενικό από το μοντέλο Poisson και απαιτεί πιο εκτεταμένους υπολογισμούς για να εκτιμηθούν οι παράμετροι του

μοντέλου και για να παραχθούν επαγωγικά στατιστικά (inferential statistics) σε σχέση με το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson.

2.4.1.3. Μοντέλο παλινδρόμησης ZIP

Ένας λόγος που λαμβάνουμε υπόψη το μοντέλο παλινδρόμησης ZIP είναι η δυνατότητα του να εφαρμοστεί σε ελλιπή δεδομένα για τα ατυχήματα σε ισόπεδες διαβάσεις ιδίως όσο αφορά τους μικρούς τραυματισμούς και τα ατυχήματα που αφορούν ζημιές σε υποδομές. Αν ο αριθμός των οχημάτων και των πεζών που εμπλέκονται στα ατυχήματα ακολουθούν την κατανομή Poisson τότε εξαιτίας των ελλειπών δεδομένων, ο αριθμός των οχημάτων και πεζών που έχουν καταγραφεί στα ατυχήματα θα ακολουθούν μια κατανομή ZIP υπό μερικές μη καταγεγραμμένες συνθήκες.

Μόλις τα δεδομένα περιέχουν πολλά μηδέν το μοντέλο Poisson θα μεταβεί σε extra-Poisson διασπορά. Για αυτά τα δεδομένα μπορεί να μοντελοποιηθεί από το μοντέλο ZIP. Ο Lambert (1992) πρότεινε το μοντέλο παλινδρόμησης ZIP και την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function) ως εξής:

$$Y_i = 0 \text{ με πιθανότητα } P(Y_i = 0) = p_i + (1 - p_i) \cdot e^{-\lambda}$$

$$Y_i = y \text{ με πιθανότητα } P(Y_i = y) = (1 - p_i) \cdot \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^y}{y!}, y = 1, 2, \dots$$

Όπου p_i είναι η πιθανότητα να είναι ένα επιπλέον 0. Ως εκ τούτου όταν $Y_i = 0$ ένα τμήμα ακολουθεί την κατανομή Poisson όπου το σύνολο των ατυχημάτων είναι 0 και η παράμετρος είναι η λ , και ένα άλλο τμήμα είναι το επιπλέον 0 με πιθανότητα p_i .

Η μέση τιμή και η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής Y του μοντέλου ZIP υπολογίζεται ως εξής:

$$E(Y_i) = (1 - p_i) \cdot \lambda_i \text{ και}$$

$$Var(Y_i) = \lambda_i \cdot (1 - p_i) \cdot (1 + \lambda_i \cdot p_i)$$

Η μέση τιμή του μοντέλου ZIP συνεπάγεται τη μέση τιμή της Poisson. Δηλαδή όταν $p_i = 0$ δεν υπάρχουν επιπλέον μηδέν και η μέση τιμή του μοντέλου ZIP ισούται με του Poisson. Ο λόγος (ratio) της διασποράς και της μέσης τιμής του ZIP είναι:

$$\frac{Var(Y_i)}{E(Y_i)} = 1 + (1 - p_i) \cdot \lambda_i = 1 + \left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right) \cdot E(Y_i)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η διασπορά του μοντέλου ZIP είναι πιο διασπαρμένη από εκείνη του μοντέλου Poisson. Η αναλογία (ratio) $\left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right)$ είναι παρόμοια με τη παράμετρο α στο μοντέλο NB. Όταν $p_i = 0$ τα δεδομένα δεν

παρουσιάζουν υπερδιασπορά.

Για το μοντέλο ZIP η συνάρτηση σύνδεσης του p_i μοντελοποιείται με συνάρτηση logistic ή πιθανοτήτων (probit) και το λ μορφοποιείται από εκθετική συνάρτηση δηλαδή η συνάρτηση συσχέτισης είναι:

$$\begin{aligned}\ln \lambda_i &= X_i \cdot \beta \\ \text{logit}(p_i) &= \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = G_i \cdot \gamma \\ p_i &= \frac{e^{G_i \cdot \gamma}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}}\end{aligned}$$

Οι παράμετροι λ_i και p_i μοντελοποιούνται ξεχωριστά από διανύσματα ανεξάρτητων, μεταβλητών X_i και G_i και τα διανύσματα αυτά μπορεί να είναι τα ίδια ή διαφορετικά. Εκτός από το μοντέλο ZIP μπορεί να εκφραστεί και με άλλο τρόπο. Έστω u_i είναι μια ενδεικτική μεταβλητή. Όταν $u_i = 1$ τότε $Y_i = 0$, εάν όμως $u_i = 0$ τότε $Y_i = y$. Το μοντέλ ZIP μορφοποιείται ως ακολούθως:

$$P(Y_i) = u_i \cdot [p_i + (1 - p_i) \cdot e^{-\lambda_i}] + (1 - u_i) \cdot \left[(1 - p_i) \cdot \frac{e^{-\lambda_i} \cdot \lambda_i^{y_i}}{y_i!} \right]$$

Αναπτύσσοντας τη προκύπτει

$$\begin{aligned}P(Y_i) &= u_i \cdot \left[\frac{e^{G_i \cdot \gamma}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} + \left(1 - \frac{e^{G_i \cdot \gamma}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} \right) \cdot e^{-X_i \cdot \beta} \right] + (1 - u_i) \\ &\cdot \left[\left(1 - \frac{e^{G_i \cdot \gamma}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} \right) \cdot \frac{e^{-e^{X_i \cdot \beta}} (e^{X_i \cdot \beta})^{y_i}}{y_i!} \right] \\ &= u_i \cdot \left[\frac{e^{G_i \cdot \gamma}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} + \frac{e^{-e^{X_i \cdot \beta}}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} \right] + (1 - u_i) \\ &\cdot \left[\left(\frac{1}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} \right) \cdot \frac{e^{-e^{X_i \cdot \beta}} (e^{X_i \cdot \beta})^{y_i}}{y_i!} \right] \\ &= u_i \cdot \left[\frac{e^{G_i \cdot \gamma} + e^{-e^{X_i \cdot \beta}}}{1 + e^{G_i \cdot \gamma}} \right] + (1 - u_i) \cdot \left[\frac{e^{-e^{X_i \cdot \beta}} (e^{X_i \cdot \beta})^{y_i}}{(1 + e^{G_i \cdot \gamma}) y_i!} \right]\end{aligned}$$

Αν και η παλινδρόμηση ZIP είναι πιο ευέλικτη από τη Poisson, η ερμηνεία της ZIP μπορεί να είναι δύσκολη. Για παράδειγμα ο αναμενόμενος αριθμός οχημάτων και πεζών σε ένα ατύχημα λ_i σχετίζεται και με άλλες συμμετάβλητες X_i με περισσότερο πολύπλοκο τρόπο στην παλινδρόμηση ZIP παρά στην Poisson και δεν είναι εύκολο να διακρίνουμε πως η αύξηση στο X_i θα αυξήσει ή θα μειώσει τη μέση τιμή λ_i στην παλινδρόμηση ZIP. Να σημειωθεί ωστόσο ότι το μοντέλο παλινδρόμησης ZIP εξακολουθεί να διασφαλίζει ότι το ποσοστό συμμετοχής οχημάτων ή πεζών σε

ατύχημα είναι πάντα μη αρνητικό.

Η εκτίμηση ML και άλλες πιθανές παραλλαγές των μοντέλων παλινδρόμησης ZIP έχουν συζητηθεί από τον Lambert (1992). Εδώ η MLE εφαρμόζεται για να εκτιμηθούν άγνωστοι παράμετροι και οι τυπικές ασυμπτωτικές παρεκκλίσεις και t – statistics εκτιμούνται εφαρμόζοντας την δεύτερη παράγωγο της πιθανοτικής λογαριθμικής συνάρτησης (log-likelihood function). Η log-likelihood function του μοντέλου ZIP είναι:

$$\begin{aligned}
 LL &= \sum_{i=1}^n \log \left\{ u_i \left[\frac{e^{G_i \gamma} + e^{-e^{X_i \beta}}}{1 + e^{G_i \gamma}} \right] + (1 - u_i) \cdot \left[\frac{e^{-e^{X_i \beta}} (e^{X_i \beta})^{y_i}}{(1 + e^{G_i \gamma}) y_i!} \right] \right\} \\
 &= \sum_{i=1}^n \left\{ \left[u_i \log (e^{G_i \gamma} + e^{-e^{X_i \beta}}) - u_i \log (1 + e^{G_i \gamma}) \right] + \right. \\
 &\quad \left. \left[(1 - u_i) (-e^{X_i \beta} + y_i X_i \beta) - (1 - u_i) \log (1 + e^{G_i \gamma}) - (1 - u_i) \log (y_i!) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

2.4.1.4. Σύγκριση των μοντέλων Poisson, NB, ZIP

1. Περιορισμοί του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson

Η βασική υπόθεση του μοντέλου παλινδρόμησης Poisson είναι ότι η μέση τιμή πρέπει να ισούται με την διακύμανση (variance). Συχνά όμως παρατηρείται ότι τα δύο αυτά μεγέθη των δεδομένων που μελετώνται έχουν διαφορετικές τιμές για πολλές εμπειρικές αναλύσεις. Συνήθως η διασπορά είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή. Δηλαδή υπάρχουν υπερδισπαρμένα ή υπάρχουν επιπλέον μηδενικά. Η εξήγηση μπορεί να είναι ότι πολλά μηδενικά στα δεδομένα ή η απλή κατανομή εστιάζει υπερβολικά σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Όταν εφαρμόζουμε το μοντέλο παλινδρόμησης Poisson ο εκτιμώμενος συντελεστής β από την MLE θα τείνει προς την πραγματική τιμή του πληθυσμού αυξάνοντας τους απλούς αριθμούς. Αν αγνοήσουμε την υπερ-διασπορά, η variance του εκτιμώμενου συντελεστή β θα υποτιμηθεί. Οπότε σημαντικό ποσοστό του εκτιμώμενου συντελεστή β θα υπερεκτιμηθεί. Το μοντέλο Poisson εφαρμόστηκε εκτεταμένα για να διαχειριστούν τα διακριτά δεδομένα στο παρελθόν. Με την παρουσία την υπερ-διασποράς το αρνητικό διωνυμικό μοντέλο είναι υποψήφιο για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό. Επειδή το μοντέλο NB επιτρέπει στη μέση τιμή να έχει διαφορετική τιμή από την variance. Η μέση τιμή των απλών τιμών θα μπορεί να είναι μικρότερη από τη variance. Άλλωστε το ZIP μοντέλο εφαρμόζεται εκτενώς σε δεδομένα που περιέχουν πολλά μηδενικά.

Επειδή η υπερ-διασπορά θα έχει ως αποτέλεσμα μεροληπτικές εκτιμήσεις των παραμέτρων με την εφαρμογή του Poisson, η έρευνα περιγράφει τις μεθόδους ανίχνευσης και διόρθωσης ως εξής:

(1) Ανίχνευση της overdispersion και επιπλέον μηδενικά συμβάντα

Μπορεί να εφαρμοστεί η παράμετρος διασποράς α για τον έλεγχο του μοντέλου Poisson εάν υφίσταται overdispersion. Άλλωστε η πιθανότητα να υπάρχει ένα επιπλέον μηδενικό p_i ελέγχει την ύπαρξη ενός επιπλέον μηδενικού συμβάντος.

(2) Διόρθωση της overdispersion και των επιπλέον μηδενικά συμβάντα

Εάν η overdispersion και τα επιπλέον μηδενικά συμβάντα υπάρχουν στα δεδομένα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο NB ή ZIP αντί του Poisson. Τα μοντέλα αυτά δεν απαιτούν η μέση τιμή να ισούται με τη variance. Αντιθέτως επιτρέπουν στη μέση τιμή να είναι μικρότερη από την variance. Δηλαδή επιτρέπουν την εμφάνιση της overdispersion και των επιπλέον μηδενικών. Επομένως τα μοντέλα NB και ZIP μπορούν να διαχειριστούν τα προβλήματα της overdispersion και των επιπλέον μηδενικών.

II. Ανίχνευση της υπεδιασποράς και των επιπλέον μηδενικών συμβάντων

Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει τα τρία μοντέλα με βάση τη μέση τιμή τους και τη variance. Είναι γνωστό ότι ο λόγος της variance και της μέσης τιμής του Poisson ισούται με 1 έτσι η μέση τιμή είναι περιορισμένη να ισούται με τη variance. Για το μοντέλο NB η variance μπορεί να διαφοροποιηθεί από τη μέση τιμή και γενικότερα η variance είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή, όπως $Var(Y_i)/E(Y_i) = 1 + \alpha_i E(Y_i) > 1$. Η διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα Poisson και NB είναι ότι η παράμετρος overdispersion α_i είτε υπάρχει σημαντικά είτε όχι. Καθώς η παράμετρος overdispersion α_i ισούται με 0 που σημαίνει ότι δεν υπάρχει overdispersion στα δεδομένα τότε το μοντέλο Poisson θα είναι πιο κατάλληλο. Σε αντίθετη περίπτωση το μοντέλο NB θα είναι μια καλή περίπτωση για να χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 3 Σύγκριση της μέσης τιμής και της διακύμανσης των μοντέλων Poisson, NB και ZIP

<i>Μοντέλο</i>	<i>Μέση τιμή</i>	<i>Διακύμανση (Variance)</i>	$\frac{Var(Y_i)}{E(Y_i)}$
Poisson	λ_i	λ_i	1
NB	λ_i	$\lambda_i[1 + \alpha\lambda_i]$	$1 + \alpha\lambda_i$
ZIP	$(1 - p_i) \cdot \lambda_i$	$(1 - p_i)\lambda_i \left[1 + \left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right) (1 - p_i)\lambda_i \right]$	$1 + \left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right) (1 - p_i)\lambda_i$

Λαμβάνοντας υπόψη την overdispersion, Cameron και Trivedi (1990) και Greene

(2000) πρότειναν μια υποθετική δοκιμή για να επιλεγεί ένα πιο κατάλληλο μοντέλο μεταξύ των μοντέλων Poisson και NB. Οι υποθέσεις της δοκιμής αυτής είναι οι ακόλουθες:

$$H_0: Var(Y) = E(Y)$$

$$H_1: Var(Y) = E(Y)(1 + aE(Y))$$

Οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να τροποποιηθούν ως ακολούθως:

$$H_0: \alpha = 0$$

$$H_1: \alpha \neq 0$$

Τελικώς ελέγχουμε την παράμετρο υπερδιασποράς a_i εάν είναι 0 ή όχι εφαρμόζοντας τη t στατιστική συνάρτηση ως εξής:

$$t^* = \frac{\hat{a}}{S_{\hat{a}}}$$

Για το μοντέλο ZIP η διακύμανση γενικά δεν ισούται με τη μέση τιμή αλλά είναι μεγαλύτερη της όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$Var(Y_i)/E(Y_i) = 1 + \left(\frac{p_i}{1+p_i}\right)E(Y_i) > 1.$$

Η βασική διαφορά μεταξύ της Poisson και της ZIP είναι ότι η πιθανότητα να υπάρχει επιπλέον μηδέν p_i υφίσταται σημαντικά ή όχι. Καθώς η πιθανότητα να υπάρχει ένα επιπλέον μηδενικό p_i ισούται με 0 που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν επιπλέον μηδενικά συμβάντα στα δεδομένα το μοντέλο Poisson θα είναι κατάλληλο. Σε αντίθετη περίπτωση το μοντέλο ZIP θα είναι καλύτερη επιλογή. Ο Vuong (1989) πρότεινε μια άλλη δοκιμή για να επιλέξει καταλληλότερο μοντέλο από το παραδοσιακό Poisson και το ZIP και οι υποθέσεις που γίνονται σε αυτή τη δοκιμή είναι:

$$H_0: Var(Y) = E(Y)$$

$$H_1: Var(Y) = E(Y) \left(1 + \left(\frac{p}{1-p} \right) E(Y) \right)$$

Οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να τροποποιηθούν ως ακολούθως:

$$H_0: p = 0$$

$$H_1: p \neq 0$$

Η V στατιστική είναι:

$$V = \frac{\sqrt{n}[(1/n) \sum_{i=1}^n m_i]}{\sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}} = \frac{\sqrt{n}(\bar{m})}{S_m} = \frac{\bar{m}}{S_m/\sqrt{n}}$$

Όπου

$$m_i: \log \left(\frac{f_1(y_i|x_i)}{f_2(y_i|x_i)} \right)$$

$f_1(y_i|x_i)$: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function) του μοντέλου ZIP

$f_2(y_i|x_i)$: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function) του μοντέλου NB ή Poisson

\bar{m} : η μέση τιμή

S_m : η τυπική απόκλιση (standard deviation) της κατανομής m^{th}

n : ο αριθμός των δειγμάτων

Η V στατιστική ακολουθεί τυπική κανονική κατανομή (standard normal distribution) και εάν $V > 1.96$ κάτω από 95% στο διάστημα εμπιστοσύνης (confidence interval) το μοντέλο ZIP θα είναι κατάλληλο να εφαρμοστεί σε αυτή τη περίπτωση. Αντίθετα εάν $V < 1.96$ τότε το μοντέλο ZIP ή Poisson θα είναι πιο κατάλληλα.

2.4.2 Μοντέλο Κατηγορικών Δεδομένων (*Categorical data*)

Η γραμμική παλινδρόμηση (Linear regression) είναι η πιο δημοφιλή στατιστική μέθοδος στην ποσοτική ανάλυση. Ωστόσο τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να έχουν περιορισμούς σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα το μοντέλο δεν είναι κατάλληλο να εφαρμοστεί αν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι κατηγορική (categorical) αντί για συνεχής (continuous) (Wang Kuo, 2003).

Για την ανάλυση των κατηγορικών δεδομένων (categorical data) οι στατιστικοί μέθοδοι που συνήθως εφαρμόζονται είναι τα λογαριθμικά μοντέλα (loglinear). Ως δυαδική (Binary) μεταβλητή του λογαριθμικού μοντέλου συμπεριφέρεται ως η εξαρτημένη μεταβλητή και το λογαριθμικό μοντέλο γίνεται logits μοντέλο.

2.4.2.1 Μοντέλο Παλινδρόμησης Logits

Έστω η δυαδική εξαρτημένη μεταβλητή Y_i και η ανεξάρτητη μεταβλητή X_i και υποθέτουμε ότι P_i' είναι η πιθανότητα να συμβεί το i^{th} γεγονός. Η πιθανότητα P_i' είναι παράμετρος της διωνυμικής κατανομής (binomial distribution). Για το μοντέλο παλινδρόμησης logits η δεσμευμένη πιθανότητα (conditional probability) να συμβεί ένα γεγονός είναι:

$$P_i' = \frac{1}{1 + e^{-(a+\beta x_i)}} = \frac{e^{a+\beta x_i}}{1 + e^{a+\beta x_i}}$$

Είναι μια μη γραμμική συνάρτηση που περιέχει την ανεξάρτητη μεταβλητή X_i , ωστόσο η συνάρτηση αυτή μπορεί να μετασχηματιστεί σε γραμμική. Η δεσμευμένη πιθανότητα να μη συμβεί κάποιο γεγονός είναι:

$$1 - P_i' = 1 - \left(\frac{1}{1 + e^{-(a+\beta x_i)}} \right) = \frac{1}{1 + e^{a+\beta x_i}}$$

Ο λόγος της πιθανότητας να συμβεί και να μη συμβεί ένα γεγονός είναι:

$$\frac{P_i'}{1 - P_i'} = e^{a+\beta x_i}$$

Ο λόγος χαρακτηρίζεται από τις πιθανότητες εμπειρίας ενός συμβάντος και έχει αδιαμφισβήτητα θετική τιμή που κυμαίνεται από 0 έως 1. Εάν εισάγουμε τη τιμή στον λογάριθμο θα προκύψει γραμμική συνάρτηση, η οποία είναι:

$$\ln \left(\frac{P_i'}{1 - P_i'} \right) = a + \beta x_i$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι με Logit μορφή και εμφανίζεται και ως $logit(y)$. Δηλαδή η $logit(y)$ μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλές από τις ιδιότητες του γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης. Για παράδειγμα είναι γραμμικό και συνδέεται με τη παράμετρο X_i και κυμαίνεται από $-\infty$ έως $+\infty$. Καθώς ο λόγος μειώνεται από 1 σε 0 η $logit(y)$ είναι αρνητική και η απόλυτη τιμή larger. Σε αντίθεση με τη περίπτωση που η $logit(y)$ είναι θετική και η απόλυτη τιμή γίνεται greater. Για τον μετασχηματισμό αυτό δε θα πρέπει να ανησυχούμε για την εκτιμώμενη πιθανότητα που μπορεί να υπερβεί την τιμή της πιθανότητας. Επίσης για τους συντελεστές (coefficient) a και β δίδεται γενική περιγραφή.

Οι δύο βασικές διαφορές του μοντέλου παλινδρόμησης logits και του γραμμικού είναι ότι η σχέση της εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης είναι γραμμική ενώ η αντίστοιχη σχέση στο μοντέλο παλινδρόμησης logits είναι μη-γραμμική. Ένα άλλο σημείο είναι ότι η εξαρτημένη μεταβλητή Y_i του γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης ακολουθεί την κανονική κατανομή ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή στο μοντέλο logits ακολουθεί την διωνυμική κατανομή.

2.4.2.2 Πολυωνυμικό μοντέλο Logits

Εάν η κατηγορίες της εξαρτημένης μεταβλητής είναι τρία επίπεδα ή περισσότερα και δεν υπάρχει ταξινομημένη διαφορετικότητα ανάμεσα στα επίπεδα, είναι δυνατό να

χρησιμοποιήσουμε το πολυωνυμικό logits μοντέλο παλινδρόμησης. Είναι μια επέκταση του logits μοντέλο παλινδρόμησης και μπορεί να εξηγηθεί με ευκολία. Εάν δεν είμαστε σίγουροι ότι τα δεδομένα ικανοποιούν όλες τις υποθέσεις του logits μοντέλο παλινδρόμησης, θα χρησιμοποιήσουμε εκείνα τα μοντέλα που οι υποθέσεις είναι λιγότερες ή λιγότερο αυστηρές. Για παράδειγμα, η υπόθεση των πιθανοτήτων να συμβεί ένα γεγονός απορρίπτεται τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε το πολυωνυμικό logits μοντέλο παλινδρόμησης για να αναλύσουμε την ταξινομημένη εξαρτημένη μεταβλητή.

Ο περιορισμός του μοντέλου αυτού είναι ότι οποιαδήποτε από τις δύο κατηγορίες των εξαρτημένων μεταβλητών που θα επιλεγούν θα πρέπει να υποθέσουμε ότι δεν είναι σχετικές με άλλες κατηγορίες και ονομάζεται IIA property, οι ανεξάρτητες και μη σχετικές εναλλακτικές. Για τις μη ταξινομημένες εξαρτημένες μεταβλητές με J κατηγορίες, το μοντέλο εμφανίζεται ως εξής:

$$\ln \left[\frac{P(y = j|x)}{P(y = J|x)} \right] = a_j + \sum_{k=1}^k \beta_{jk} x_k, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Για το πολυωνυμικό logits μοντέλο παλινδρόμησης το logit μορφοποιείται από το λόγο των μη επαναλαμβανόμενων κατηγοριών των εξαρτημένων μεταβλητών και τότε όλα τα logit(s) χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου. Ως εκ τούτου το μοντέλο περιέχει (J-1) logit(s) με J κατηγορίες. Αυτό το μοντέλο έχει (J-1) επαναλήψεις (intercepts) και (J-1) σύνολα κλίσης των συντελεστών. Τα (J-1) logit(s) είναι τα εξής:

$$\begin{aligned} \ln \left[\frac{P(y = 1|x)}{P(y = J|x)} \right] &= a_1 + \sum_{k=1}^k \beta_{1k} x_k \\ \ln \left[\frac{P(y = 2|x)}{P(y = J|x)} \right] &= a_2 + \sum_{k=1}^k \beta_{2k} x_k \\ &\vdots \\ \ln \left[\frac{P(y = J - 1|x)}{P(y = J|x)} \right] &= a_{J-1} + \sum_{k=1}^k \beta_{(J-1)k} x_k \end{aligned}$$

Όπου η τελευταία είναι κατηγορία αναφοράς.

Επειδή $P(y = 1|X) + P(y = 2|X) + \dots + P(y = J|X) = 1$ η J^{th} πιθανότητα εκτιμάται ως εξής:

$$P(y = j|x) = \frac{e^{a_j + \sum_{k=1}^k \beta_j x_k}}{1 + \sum_{j=1}^{J-1} e^{a_j + \sum_{k=1}^k \beta_j x_k}}$$

Υποθέτουμε ότι το πολυωνυμικό logits μοντέλο παλινδρόμησης έχει τρεις κατηγορίες τότε θα πρέπει να υπάρχουν δύο πιθανότητες για να συμβεί ένα γεγονός σε

Logit μορφή, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = a_2 + \sum_{k=1}^k \beta_{2k} x_k$$
$$\ln \frac{p_3}{p_1} = a_3 + \sum_{k=1}^k \beta_{3k} x_k$$

Οι παραπάνω τύποι θα εκτιμήσουν την επίδραση των εξαρτημένων μεταβλητών σε διαφορετικά logit(s), δηλαδή το πολυωνυμικό logits μοντέλο παλινδρόμησης θα παράγει δύο σύνολα συντελεστών. Οι συντελεστές αυτοί θα εκτιμήσουν την μεταβολή (variation) μιας κατηγορίας στο σημείο αναφοράς όταν μια ανεξάρτητη μεταβλητή διαφοροποιείται κατά μια μονάδα διατηρώντας τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές σταθερή.

2.4.2.3 Διατεταγμένο λογιστικό μοντέλο (*ordered logistic model*)

Αν υπάρχει ταξινομημένη σχέση μεταξύ των κατηγοριών των εξαρτημένων μεταβλητών τότε το διατεταγμένο λογιστικό μοντέλο είναι πιο κατάλληλο. Για μερικούς ερευνητές της κοινωνιολογίας πολλές εξαρτημένες μεταβλητές είναι ταξινομημένες. Οι απαντήσεις κωδικοποιούνται σε ακέραιη σειρά όπως “1, 2, 3, and 4”. Αυτές οι εξαρτημένες μεταβλητές βαθμολογούνται από χαμηλό σε υψηλό επίπεδο αλλά η απόσταση μεταξύ των κατηγοριών είναι άγνωστη. Συνήθως οι μεταβλητές αυτές θεωρούνται συνεχείς ωστόσο αυτό προϋποθέτει μια υπόθεση ότι η απόσταση μεταξύ των κατηγοριών είναι η ίδια. Η υπόθεση όμως αυτή μπορεί να έχει λάθος αποτελέσματα. Ως εκ τούτου προτείνεται να εφαρμοστεί ένα ειδικό μοντέλο για αυτές τις διατεταγμένες εξαρτημένες μεταβλητές και η μορφοποίηση αυτή ονομάζεται διατεταγμένο λογιστικό μοντέλο παλινδρόμησης (*ordered logistic regression model*). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου αυτού μπορεί να είναι συνεχής, κατηγορική ή και τα δύο. Δηλαδή το μοντέλο είναι επέκταση του logits μοντέλου και ορίζεται ως εξής:

$$y^* = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k + \varepsilon$$

Όπου

y^* : Η εσωτερική τάση των παρατηρούμενου φαινομένου που δε μπορεί άμεσα να μετρηθεί

ε : Σφάλμα

Αν υπάρχουν J κατηγορίες των εξαρτημένων μεταβλητών ($j = 1, 2, \dots, J$) θα κωδικοποιηθούν ως $y = 1, y = 2, \dots, y = J$. Η σχέση μεταξύ του είναι $(y = 1) < (y = 2) < \dots < (y = J)$.

Δηλαδή περιλαμβάνει $(J-1)$ άγνωστα ξεχωριστά σημεία:

$$\begin{aligned} y^* &\leq \mu_1 \text{ εάν } y = 1 \\ \mu_1 &< y^* \leq \mu_2 \text{ εάν } y = 2 \\ &\vdots \\ \mu_{j-1} &< y^* \text{ εάν } y = J \end{aligned}$$

Όπου μ_j αντιπροσωπεύει τα ξεχωριστά σημεία και περιλαμβάνει $(J-1)$ τιμές που η σχέση που τις συνδέει είναι: $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_{j-1}$. Για την εκτίμηση των παραμέτρων συνήθως υποθέτουμε ότι το πρώτο ξεχωριστό σημείο $\mu_1 = 0$. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται μια εκτιμώμενη παράμετρο. Με άλλα λόγια υπάρχουν μόνο $(J-1)$ παράμετροι μ_{j-1} να εκτιμηθούν. Δεδομένου τις τιμές του x , η αθροιστική πιθανότητα είναι:

$$\begin{aligned} p(y \leq j|x) &= p(y^* \leq \mu_j) = p\left[\left(\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k + \varepsilon\right) \leq \mu_j\right] \\ &= p\left[\varepsilon \leq \mu_j - \left(\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k\right)\right] = F\left[\mu_j - \left(\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k\right)\right] \end{aligned}$$

Η αθροιστική πιθανότητα αντιπροσωπεύει την ordered σχέση και μπορούμε να κατασκευάσουμε την συνάρτηση σύνδεσης του μοντέλου για ordered εξαρτημένη μεταβλητή σε logit μορφή. Είναι το logits μοντέλο παλινδρόμησης και ο ορισμός του είναι:

$$\ln\left[\frac{p(y = j|x)}{1 - p(y = J|x)}\right] = \mu_j - \left(\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_k\right)$$

Η logit μορφή του διατεταγμένου μοντέλου παλινδρόμησης ορίζεται με την ταξινόμηση των κατηγοριών των εξαρτημένων μεταβλητών, δηλαδή οι πιθανότητες να συμβεί ένα γεγονός στο μοντέλο σχηματοποιείται σύμφωνα με την αθροιστική πιθανότητα.

Η αθροιστική πιθανότητα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$p(y \leq j|x) = p(y^* \leq \mu_j|x) = \frac{e^{\mu_j - \sum_{k=1}^k \beta_k x_k}}{1 + e^{\mu_j - \sum_{k=1}^k \beta_k x_k}}$$

Μόλις υπολογιστεί η αθροιστική πιθανότητα, οι πιθανότητες άλλων κατηγοριών υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} p(y = 1) &= p(y \leq 1) \\ p(y = 2) &= p(y \leq 2) - p(y \leq 1) \\ &\vdots \\ p(y = J) &= 1 - p(y \leq (J - 1)) \end{aligned}$$

$$\text{Όπου } p(y = 1) + p(y = 2) + \dots + p(y = J) = 1$$

Εάν υποθέσουμε ότι ο αριθμός των κατηγοριών των εξαρτημένων παραμέτρων σε στο διατεταγμένο μοντέλο παλινδρόμησης Logits είναι τρεις, τότε το μοντέλο περιλαμβάνει δύο logit συναρτήσεις:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{p_1}{p_2 + p_3}\right) &= \beta_{01} - \sum_{k=1}^k \beta_k x_k \\ \ln\left(\frac{p_1 + p_2}{p_3}\right) &= \beta_{02} - \sum_{k=1}^k \beta_k x_k \end{aligned}$$

Οι παραπάνω τύποι εκτιμούν την επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών σε διαφορετικά logit(s) δηλαδή το μοντέλο έχει ως αποτέλεσμα 2 σύνολα συντελεστών.

2.5 Μέθοδοι Υπολογισμού Εκτίμησης Επιπτώσεων

Στη παρούσα διατριβή μας ενδιαφέρει η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της αστοχίας λειτουργίας του δικτύου, δηλαδή η ποσοτική κοστολόγησή τους σε τέσσερα συστήματα: α) Άνθρωποι (Θνησιμότητα/ τραυματισμοί), β) Περιβάλλον, γ) Υποδομές, δ) Οικονομική δραστηριότητα της εταιρίας διαχείρισης του δικτύου

Από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι για να μετατραπούν σε συγκρίσιμα μεγέθη όλες οι επιπτώσεις θα πρέπει να τους ανατεθεί ένας κοινός παρανομαστής. Μερικά κόστη και επιπτώσεις έχουν εμπορική αξία, όπως οι επενδύσεις και τα κόστη των υλικών που πρέπει να αντικατασταθούν σε περίπτωση ατυχήματος. Για το λόγο αυτό είναι βολικό να ανατεθούν χρηματικές (**monetary**) τιμές στις επιπτώσεις που δεν έχουν εμπορική (**market**) αξία όπως η ασφάλεια έτσι ώστε να μετατραπούν σε συγκρίσιμα μεγέθη.

Στη περίπτωση του οδικού άξονα εφαρμόζεται η εκτίμηση του κόστους πρόληψης ατυχημάτων. Το κόστος υπολογίζεται ως το μέσο άθροισμα του κόστους των υλικών ενός ατυχήματος και η αξία της ανθρώπινης ζωής. Τα υλικά κόστη είναι για την περίθαλψη, η καθαρή απώλεια σε κόστος παραγωγής, η καταστροφή ιδιοκτησίας και

της διοίκησης, πολλές φορές δεν συνεκτιμούνται. Η ανθρώπινη αξία εκτιμάται με την πρόθεση να πληρώσουν. Η μέση εκτίμηση τότε εφαρμόζεται στην οικονομική ανάλυση των μέτρων οδικής ασφάλειας.

Επιπλέον οι επιπτώσεις που διαφαίνονται μετά από 20 χρόνια θα πρέπει να είναι συγκρίσιμες με τα άμεσα κόστη. Για το λόγο αυτό απαιτούνται τα επιτόκια μείωσης της τιμής με τη πάροδο του χρόνου, δηλαδή θα πρέπει να είναι γνωστό ένα τοκοχρεολύσιο και χρονικός ορίζοντας.

2.5.1 Ανθρώπινος Παράγοντας

Ο παράγοντας θνησιμότητας μπορεί να εκτιμηθεί για κάθε σενάριο ατυχήματος εφαρμόζοντας τις ακόλουθες μαθηματικές συναρτήσεις:

$$PDI = PDI \cdot PDFI$$
$$C_i = (AR)_i \cdot (PDI)_i / UFR$$
$$C = \sum_{i=1,n} C_i$$

Όπου UFR δηλώνει το μη αποδεκτό ποσοστό θνησιμότητας και προτεινόμενη τιμή της είναι 10^{-3} (υποκειμενική τιμή για κάθε σενάριο). Ο PDFI εκφράζει την κατανομή του πληθυσμού και απεικονίζει την αναμοιογένεια της κατανομής πληθυσμού. Εάν ο πληθυσμός κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή που μας ενδιαφέρει (ακτίνα μέχρι 500m) τότε PDFI = 1, ενώ ένα ο πλυθησμός είναι συγκεντρωμένος και μακριά από το σημείο του ατυχήματος τότε PDFI = 0,2. Τέλος η PDI (persons/m²) είναι η πυκνότητα πλυθυσμού στη περιοχή που πλήγηκε από το συμβάν (μέχρι ακτίνα 500m).

Συνήθως θεωρείται ότι η εκτίμηση επικινδυνότητας ισοδυναμεί με την θνησιμότητα. Για παράδειγμα το Ινστιτούτο Μεταφορών της Ταϊβαν (IOT) ορίζει την θνησιμότητα ως:

$$\text{Θνησιμότητα} = \text{αριθμός θανάτων} + 0,368 * (\text{αριθμός τραυματισμών}).$$

Το HSE (Health and Safety Executive) της Αγγλίας αναλογία της θνησιμότητας, το βαρύ τραυματισμό και τον ελαφρύ τραυματισμό είναι 1:0.1:0.05. Για την επικινδυνότητα του ατυχήματος (ισοδυναμία με θάνατο), η στάθμιση για τον θάνατο, τον τραυματισμό και την καταστροφή περιουσίας αντιπροσωπεύει το επίπεδο των επιπτώσεων για διαφορετικά σενάρια ατυχημάτων. Για παράδειγμα οι Saccomanno et al. (2003) θεώρησαν ότι η αναλογία για τον αριθμό των θανάτων, των τραυματισμών και την καταστροφή της περιουσίας είναι 44:1:1. Οι Geurts and Wets (2003) πρότειναν η αναλογία του αριθμού θανάτων, ελαφρύ τραυματισμών και σοβαρών

τραυματισμών να είναι 8.35: 1.67: 5. Παρόμοια το Βρετανικό Γραφείο Νομοθεσία Σιδηροδρόμων (British Office of Rail Regulation, ORR, 2006) εξίσωσε ένα θάνατο σε σιδηροδρομικό ατύχημα με 10 σοβαρούς και 200 ελαφρύ τραυματισμούς.

Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν τα ακόλουθα προβλήματα: 1) ο ορισμός και η αναλογία με την θνησιμότητα είναι διαφορετικές για κάθε χώρα, 2) δεν υπάρχει συνοχή στην επιλογή αντικειμενικής αναλογίας στην εξίσωση της θνησιμότητας και 3) τα σταθμισμένα δεδομένα δεν έχουν τις ιδιότητες των αριθμητικών δεδομένων με αποτέλεσμα τα παραδοσιακά στατιστικά μοντέλα (π.χ. Poisson ή NB), δεν είναι πλέον κατάλληλα για την ανάλυσή τους.

Άλλωστε στη πλειονότητά του τα σχέδια ασφαλείας στο τομέα των μεταφορών θεωρούν την θνησιμότητα λόγω ατυχημάτων ως το απόλυτο παράγοντα επικινδυνότητας.

2.5.2 Περιβάλλον

Η επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας έστω D την καταστροφή στο οικοσύστημα και εκτιμάται ως ακολούθως:

$$D_i = (AR)_i \cdot (IM)_i / UDA$$

$$D = \sum_{i=1,n} D_i$$

Όπου UDA είναι το μη αποδεκτό επίπεδο της περιοχής που έχει πληγεί και η προτεινόμενη τιμή για αυτή τη παράμετρο είναι $1000m^2$ (υποκειμενική τιμή που μπορεί να μεταβληθεί αναλόγως με το σενάριο). Η IM θεωρείται παράμετρος σημαντικότητας και είναι Unity εάν η ακτίνα της ζημιάς είναι υψηλότερη από την απόσταση μεταξύ του σημείου ατυχήματος και τη τοποθεσία του οικοσυστήματος. Η παράμετρος ποσοτικοποιήθηκε από τους Khan και Haddara (2003).

2.5.3 Υποδομές

Το οικονομικό κόστος εξαιτίας ζημιάς που θα προκληθεί σε υποδομές του συστήματος και του περιβάλλοντος χώρου, μπορεί να υπολογιστεί για κάθε σενάριο ατυχήματος εφαρμόζοντας την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$B_i = (AR)_i \cdot (AD)_i / UFL$$

$$B = \sum_{i=1,n} B_i$$

Όπου B ο παράγοντας κόστους ζημιάς, i είναι ο αριθμός των συμβάντων (π.χ. εκδήλωση πυρκαγιάς, εκτροχιασμός αμαξοστοιχίας), UFL είναι το επίπεδο της μη

αποδεκτής απώλειας (κόστος). Η τιμή αυτή είναι υποκειμενική και διαφέρει για κάθε περίπτωση (σενάριο) και ανάλογα με τα κριτήρια του φορέα διαχείρισης του συστήματος (Khan & Haddara, 2003 θεωρούν ότι $UFL = 1000$). Επίσης AR (m^2) είναι η ακτίνα της περιοχής που έχει πληγεί εξαιτίας του ατυχήματος και AD ($€/m^2$) η πυκνότητα της περιοχής που επηρεάστηκε από το συμβάν (μέχρι ακτίνα 500m).

2.5.4 Οικονομική Δραστηριότητα της επιχείρησης

Η απόδοση του συστήματος μπορεί να μετρηθεί θεωρώντας έστω ότι ο παράγοντα A είναι το μέτρο μείωσης της απόδοσης του συστήματος εξαιτίας της αστοχίας ενός υλικού/ μονάδας. Η εκτίμηση του μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας μια ημι-ποιοτική μεθοδολογία που βασίζεται στην άποψη του εμπειρογνώμονα. Οι Khan και Haddara (2003) προτείνουν την ακόλουθη μαθηματική σχέση για να καθορίσουν την τιμή της παραμέτρου A : $A_i = function(performance)$. (Πίνακας 4)

Πίνακας 4 Ποσοτικοποίηση της συνάρτησης απόδοσης του συστήματος (Khan & Haddara, 2003)

Κατηγορία	Περιγραφή	Συνάρτηση (λειτουργίας)
I	Πολύ σημαντική για την λειτουργία του συστήματος. Η αστοχία του μπορεί να προκαλέσει το σταμάτημα της λειτουργίας του συστήματος	8 -10
II	Σημαντική για την καλή λειτουργία. Η αστοχία του μπορεί να προκαλέσει μειωμένη απόδοση και δυσμενής συνέπειες	6 - 8
III	Απαιτείται για την καλή λειτουργία. Η αστοχία του μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος και να οδηγήσει σε μεταγενέστερη αστοχία του.	4 - 6
IV	Προαιρετική για την υψηλή απόδοσή του. Η αστοχία του μπορεί να μην επηρεάσει την λειτουργία του άμεσα αλλά να παρατείνει την αστοχία του.	2 - 4
V	Προαιρετική για την λειτουργία του συστήματος. Η αστοχία του μπορεί να μην επηρεάσει καθόλου την απόδοσή του.	0 - 2

Συνοψίζοντας για τον τελικό υπολογισμό του παραμέτρου Con (consequence assessment factor), οι παράμετροι A , B , C και D που αναφέρθηκαν παραπάνω συνδυάζονται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$Con = [0,25A^2 + 0,25B^2 + 0,25C^2 + 0,25D^2]^{0,5}$$

2.6 Μέθοδοι ανάλυσης Κόστους - Οφέλους

Η ανάλυση κόστους-οφέλους αποτελεί ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο που παρέχει στους διαχειριστές των δικτύων μια συστηματική προσέγγιση για την οργάνωση και την κατάταξη των πλεονεκτημάτων και του κόστους των εναλλακτικών μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης της πιθανής αστοχίας. Η ανάλυση Επικινδυνότητας/κόστους-οφέλους αποτελεί ένα καίριο κομμάτι της διαχείρισης επικινδυνότητας, το οποίο όμως δεν έχει διερευνηθεί ικανοποιητικά στην παγκόσμια βιβλιογραφία.

Στη περίπτωση που οι επιπτώσεις του κινδύνου μπορούν να εκφραστούν σε οικονομικούς όρους, τότε η ανάλυση κόστους - οφέλους θεωρείται αναγκαία για να τεθούν οι προτεραιότητες των δράσεων και να ληφθεί η βέλτιστη δυνατή απόφαση για τη διαχείριση μιας κρίσης. Τόσο το διαθέσιμο κεφάλαιο όσο και τρέχουσες λειτουργικές δαπάνες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το κόστος αυτό μπορεί να εκφραστεί σε ετήσια βάση. Το όφελος από την επιλογή ενός αντιμέτρου είναι στην πραγματικότητα η μείωση του κόστους των συνεπειών των ατυχημάτων και μπορεί να εξαχθεί από την μείωση του δείκτη επικινδυνότητας πριν και μετά τη λήψη μιας απόφασης. Αυτό θα απαιτήσει κάποια ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας.

Η ανάλυση των τωρινών επιπέδων ασφάλειας και των πιθανών βελτιώσεων με διάφορες επιλογές. Περιλαμβάνει την εφαρμογή ποιοτικών και ποσοτικών τεχνικών για αυτό το λόγο αποτελείται από δύο (2) βήματα. Το πρώτο βήμα είναι να συνταχθεί μια λίστα όλων των επιπτώσεων και να αποφασιστεί αν είναι ευεργετικοί ή επηρεάζουν αρνητικά τις επιλογές βελτίωσης, δίνοντας έτσι μια ευρεία εικόνα των επιλογών. Το δεύτερο βήμα είναι η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων.

Αν εστιάσουμε αποκλειστικά στην επικινδυνότητα η ανάλυση θα μπορούσε να ολοκληρωθεί και να ληφθεί η επιλογή των κατάλληλων αντιμέτρων. Με τον τρόπο αυτό όμως θα αγνοηθεί το γεγονός ότι πολλά μέτρα ασφαλείας έχουν άλλες επιπτώσεις, κόστη και οφέλη. Για παράδειγμα η εγκατάσταση αυτομάτων συστημάτων ασφαλείας ATC και Line Block έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου γιατί βοηθούν στην βελτίωση της απόδοσης και ανταγωνιστικότητας του συστήματος. Για αυτό κρίνεται απαραίτητο να συμπεριληφθούν οι λειτουργικές επιδράσεις στην ανάλυση και να αντιστάθμιση των αντιμέτρων (όφελος) σε σχέση με τα άλλα κόστη και τις επιπτώσεις.

Η καλύτερη μέθοδος για στάθμιση (**weighing**) διαφορετικών κατηγοριών των επιπτώσεων είναι η εφαρμογή της μεθόδου Κόστους – Οφέλους (*Cost – Benefit Analysis, CBA*). Με τη μέθοδο αυτή, οι επιπτώσεις μιας διεργασίας ποσοτικοποιούνται σε κοινή βάση. Συνήθως στις επιπτώσεις δίνονται χρηματικές τιμές. Με τον τρόπο αυτό το κόστος επενδύσεων των αντιμέτρων μπορεί να συγκριθεί με την αξία της ανθρώπινης ζωής. Η αξία αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορες μεθόδους. Συχνά εκφράζεται ως η αξία της Στατιστικής ζωής (*Value Of a Statistical Life, VOSL*), ενώ θα έπρεπε να αποτελεί μέτρο της ποσότητας των πόρων που οι πολίτες θα πρέπει να ξοδέψουν για τη μείωση του επιπέδου επικινδυνότητας. Στην τυπική ανάλυση ο αριθμός των ζώων που δε χάνονται με τη λήψη των αντιμέτρων πολλαπλασιάζονται με την τιμή VOSL δίνοντας το συνολικό κόστος των επιπτώσεων των αντιμέτρων. Αντίστοιχες τιμές εφαρμόζονται για τους τραυματισμούς.

Μια βασική αρχή της CBA είναι το κριτήριο Hicks-Kaldor, σύμφωνα με το οποίο η εφαρμογή ενός αντιμέτρου ή μιας επένδυσης θα πρέπει να επιλέγεται αν τα συγκεντρωτικά οφέλη στον εκτιθέμενο πληθυσμό αντισταθμίζουν τα συνολικά κόστη. Αν τα οφέλη και τα κόστη είναι άνισα κατανομημένα, η πιθανότητα να αντισταθμιστούν οι απώλειες δικαιολογεί τη λήψη αντιμέτρων. Ο βασικός στόχος της CBA είναι η μεγιστοποίηση των κοινωνικών και οικονομικών οφελών συγκρίνοντας όλα τα οφέλη σε σχέση με τα κόστη.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας της ανθρώπινης ζωής (PLL). Η PLL εκφράζεται ως ο αριθμός των θανάτων που αναμένεται να εμφανιστούν κάθε έτος, κατά μέσο όρο για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και αποτελεί ένα μέτρο της κοινωνικής επικινδυνότητας. Επίσης, αποτελεί μια βάση για τις αναλύσεις κόστους-οφέλους των μέτρων μείωσης της επικινδυνότητας, υπολογίζοντας το "κόστος ενός θανατηφόρου ατυχήματος" ($ICAF = \text{κόστος του μέτρου} / (\text{αρχικός PLL} - \text{μειωμένη PLL})$). Τα αποτελέσματα θεωρούνται αμφιλεγόμενα μερικές φορές διότι να οριστεί μια τιμή για την ανθρώπινη ζωή. Ωστόσο οι υπολογισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται σε διεθνές επίπεδο, και θεωρούνται κατάλληλες για την λήψη των αποφάσεων αναφορικά με τη θέσπιση μέτρων ελέγχου και αντιμετώπισης της επικινδυνότητας.

Η λύση στο πρόβλημα των άνισα κατανομημένων δεικτών επικινδυνότητας σε συνδυασμό με την CBA είναι ο ορισμός των κριτηρίων ασφαλείας. Τα κριτήρια θέτουν όρια για το επίπεδο επικινδυνότητας που είναι αποδεκτό σε μια διεργασία. Όταν το συνολικό επίπεδο επικινδυνότητας του συστήματος έχει εκτιμηθεί μπορεί να

συγκριθεί με το μη αποδεκτό. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να σχεδιαστούν με διαφορετικού τρόπου και είναι συνήθη πρακτική να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά επίπεδα κριτηρίων για δείκτες επικινδυνότητας σε ατομικό και κοινωνικό επίπεδο. Είναι επίσης αποδεκτό να οριστούν διαφορετικά επίπεδα για υπάρχον και νέες δραστηριότητες. Τα κριτήρια για μη αποδεκτά επίπεδα επικινδυνότητας θέτει όρια στην ανάλυση κόστους οφέλους η οποία θα μπορεί να βαθμολογήσει τις διαφορετικές επιλογές σε αντίμετρα.

Στην CBA όλα τα κόστη και τα οφέλη συνδυάζονται σε μονοδιάστατο μέτρο. Οι τωρινές τιμές από τα οφέλη συγκρίνονται με την παρούσα αξία στο σύνολο από τα κόστη. Αν η παρούσα αξία από τα οφέλη υπερβαίνει την τωρινή αξία από τα κόστη τότε το μέτρο θα πρέπει να επιλεχθεί. Σε πραγματικές καταστάσεις αυτή αποτελεί μια απλούστευση. Τα κόστη όλων των αντιμέτρων συνήθως υπερβαίνουν τις οικονομικές πηγές που διατίθενται για μια επένδυση. Αυτή αποτελεί πάντα μια οικονομικό περιορισμό. Είναι επίσης σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι αυτή η μεθοδολογία καταδεικνύει ότι υπάρχουν αντίμετρα που μπορούν να προλάβουν ένα πιθανό ατύχημα αλλά δε θα πρέπει να αποτελούν επιλογή γιατί το όφελός τους δεν εξισορροπεί το κόστος τους

Το μοντέλο που ανέπτυξαν ο..... '

[BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ]

Τα αποτελέσματα των σύγχρονων μεθόδων ενέχουν βαθμό αβεβαιότητας και δεν ικανοποιούν πάντα τους οικονομικούς περιορισμούς ή αντιστοιχίζουν ανάλογα τα οφέλη μιας επιλογής με το κόστος της (ή το αντίστροφο). Η εφαρμογή της σε συνδυασμό με άλλα εργαλεία αξιολόγησης της επικινδυνότητας θα βοηθήσει τους υπευθύνους λήψης αποφάσεων για την αξιολόγηση τόσο την αποτελεσματικότητα της επένδυσης του διαθέσιμου κεφαλαίου και πόρων όσο και το συνολικό της εφαρμογής των εναλλακτικών σχεδίων πρόληψης και αντιμετώπισης της κρίσης.

2.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφηκαν τα μοντέλα και οι μεθοδολογίες διαχείρισης της επικινδυνότητας που αναφέρονται στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Όπως φαίνεται στον **πίνακα 2.1**, οι προσεγγίσεις για την διαχείριση της επικινδυνότητας των δικτύων διακρίνονται σε ποιοτικές, ποσοτικές, ημι-ποσοτικές μεθόδους. Περιγράφηκαν τα

πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σύγχρονων μεθόδων και διαμορφώθηκε μια συνολική αντίληψη για περαιτέρω ανάπτυξη των μεθόδων αυτών που για την ποσοτικοποίηση της επικινδυνότητας αλλά για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε αντίμετρα για την μείωση του επιπέδου επικινδυνότητας αστοχίας του δικτύου.

Επίσης έγινε μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων υπολογισμού των επιπέδων επικινδυνότητας, των αναμενόμενων κατανομών της επικινδυνότητας, την οικονομική εκτίμηση της μείωσης των δεικτών επικινδυνότητας και την οικονομική ανάλυση των αντιμέτρων σε σιδηροδρομικά δίκτυο. Οι περιοχές αυτές συνήθως αμελούνται κατά την ανάλυση των μέτρων ασφαλείας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα ατυχήματα είναι συνήθως σποραδικά και η κατανομή της πιθανότητας να συμβεί είναι θετικό ή συνήθως ασύμμετρα. Επομένως τα *count data models* είναι κατάλληλα για να εκτιμηθεί η συχνότητα των ατυχημάτων ή οι δείκτες επικινδυνότητας, όπως τα μοντέλα Poisson και NB. Αν και η Poisson έχει την επιθυμητή ιδιότητα κατανομής να συμπεριλάβει τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος, έχει περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι ότι η διακύμανση των δεδομένων είναι περιορισμένη και πρέπει να ισούται με το μέσο. Σε πολλές εφαρμογές η καταμέτρηση δεδομένων (*count data*) προσθέτει επιπλέον διακύμανση ή υπερ-διασπορά. Αυτό συμβαίνει γιατί η διακύμανση των δεδομένων είναι γενικώς μεγαλύτερη από το μέσο, επομένως η παράμετρος που εκτιμάται από το μοντέλο Poisson μπορεί να είναι μεροληπτική. Για να επιλυθεί το πρόβλημα της υπερδιασποράς διάφοροι ερευνητές πρότειναν την εφαρμογή του διωνυμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Αν και πολλοί ερευνητές θεώρησαν ότι το μοντέλο παλινδρόμησης zero-inflated Poisson (ZIP) να είναι πιο κατάλληλο, το μοντέλο αυτό θα πρέπει να εφαρμοστεί με προσοχή. Συγκεκριμένα θα πρέπει να επιβεβαιωθεί μια λογική βάση για την διαδικασία δυαδικής κατάστασης και ξεκάθαρες συνθήκες ορίων ανάμεσα των δυο από τα ZI-based models που θεωρούνται κατάλληλα (Lord et.al 2005, Lord et.al 2007).

Ανεξάρτητα από το γεγονός ότι το μοντέλο ZIP εκθέτει την πιθανή δυνατότητα του να μοντελοποιήσει την συχνότητα των δεδομένων ατυχημάτων σε ισόπεδες διαβάσεις και ότι είναι πιο επαρκές μοντέλο από στατιστικής πλευράς που προέκυψε από τη δοκιμή Vuong (1989), δεν υπάρχει εγγύηση ότι η διαδικασία της διπλής κατάστασης (*dual-state*) υπάρχει στα δεδομένα συχνότητας ατυχημάτων που συλλέχθηκαν στις ισόπεδες σιδηροδρομικές διαβάσεις και αυτό το γεγονός περιορίζει την εφαρμογή του

ZIP μοντέλου στη παρούσα διατριβή. Σύμφωνα με τον ορισμό της σοβαρότητας του ατυχήματος, είναι μια categorical εξαρτημένη μεταβλητή.

Σε αυτή τη διατριβή θα εφαρμόσουμε το **the multinomial logits regression model and the ordered logistic regression model για την ανάλυση της σχέσης ανάμεσα στην σοβαρότητα του ατυχήματος και των συμμεταβλητών του.** Επιπλέον είναι επιθυμητή η εκτίμηση των μαύρων σημείων σε ισόπεδες διαβάσεις στο σιδηροδρομικό δίκτυο για μελλοντική βελτίωση της ασφάλειας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *A Practical Risk Assessment Methodology for Safety-Critical Train Control Systems*. US Department of Transportation Federal Railroad Administration, RR 09-17 September 2009
2. Aczel, A.D. *Complete Business Statistics, 3rd ed.* Irwing Professional, Burr Ridge IL. p. 669, 1996
3. An M., Huang S., and Baker C. J. *Railway risk assessment – the fuzzy reasoning approach and fuzzy analytic hierarchy process approaches: a case study of shunting at Waterloo depot*. Proc. IMechE Vol. 221 Part F: J. Rail and Rapid Transit, JRRT106 © IMechE, 2007
4. Anderson Robert T. and Barkan Christopher P.L. *Railroad Accident Rates for Use in Transportation Risk Analysis*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1863. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 88-98, 2004
5. Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. 1, Basic Principles, John Wiley, New York. Chapter 2, 1975
6. Arvanitogeorgos A. *Risk analysis in industry*. Greek Institute of Health and Safety in the Work, ELINYAE. ISBN 960-7678-16-2, 1999
7. Attwood, D., Khan, F., & Veitch, B. *Occupational accident models*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), 664-682, 2006a
8. Ayyub, B. M. *Risk analysis in engineering and economics*. Chapman & Hall/CRC, ISBN 1-58488-395-2, 2003
9. Barkan Christopher P. L., Dick Tyler C., and Anderson Robert. *Railroad Derailment Factors Affecting Hazardous Materials Transportation Risk*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1825. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 64-74, 2003
10. Baysari M. T., McIntosh A. S., & Wilson J. R. *Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia*. Accident Analysis and Prevention, 40(5), 1750-1757, 2008

11. Baysari, M. T., Caponecchia C., McIntosh A. S., & Wilson J. R.. *Classification of errors contributing to rail incidents and accidents: a comparison of two human error identification techniques*. Safety Science, 47(7), 948-957, 2009
12. Beim, G. K., & Hobbs, B. F. *Event tree analysis of lock closure risks*. Journal of Water Resources Planning and Management ASCE, 123, 137-198, 1997
13. Bellamy, L. J., Geyer, T. A. W., & Wilkinson, J. *Development of a functional model which integrates human factors, safety management systems and wider organisational issues*. Safety Science, 46(3), 461-492, 2008
14. Blinkowitz, B. S., and Wartenberg, D. *Disparity in Quantitative Risk Assessment: A Review of Input Distribution*. Risk Analysis, Vol. 21, No. 1, 75-89, 2001.
15. Calgary & Alberta. *Risk Assessment Techniques for Pipeline Systems. Report for Pipeline environmental Committee of Canadian Association of Petroleum Producers*. Concord Environmental Corporation, 1993
16. Cilingir, C., & Mackhieh, A. *Effects of performance shaping factors on human error*. International Journal of Industrial Ergonomics, 22, 285-292, 1998
17. Cozzani, V., Antonioni G., & Spadoni G. *Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(5), 463-477, 2006
18. Dey P.K. *A risk – based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline*. Journal of Quality Maintenance Engineering, Vol.7 No.1:25-41, 2001
19. Diamantidis, D., Zuccarelli, F., & Westhäuser, A. *Safety of long railway tunnels*. Reliability Engineering & System Safety, 67(2), 135-145, 2000
20. Doytchev, D. E., & Szwillus, G. *Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: a case study from Bulgaria*. Accident Analysis and Prevention, 41(6), 1172-1179, 2009
21. Dziubinski, M. Fraczak and A.S. Markowski. *Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines*. Journal of Loss Prevention in the Prevention in the Process Industries 19: 399-408, 2006
22. Eschenroeder, A.Q. & Faeder E.G. *A Monte Carlo Analysis of Health Risks from PCB – Contaminated Mineral Oil Transformer Fires*. Risk Analysis, 8(2): 291-297, 1988

23. Evans, A. W. and N. Q. Verlander. *Estimating the consequences of accidents: the case of automatic train protection in Britain*, Accident Analysis and Prevention, 28 (2), p. 185, 1996
24. Florig H.K., Morgan M.G., Morgan K.M., Jenni K.E., Fischhoff B., Fischbeck P.S., DeKay M.L. *A deliberative method for ranking risks (I): Overview and test bed development*. Risk Analysis 21: 913–922, 2001
25. Geurts, K. and Wets, G. *Black spot analysis methods: Literature review*. Technical report, Steunpunt Verkeersveiligheid, 2003.
26. Glickman, T. S., & Erkut, E. *Assessment of hazardous material risks for rail yard safety*. Safety Science, 45(7), 813-822, 2007
27. Goldberg et al. *Fault Tree Handbook* Vesely, p. VII-2, 1981
28. Gratt, L.B. *Risk Analysis or Risk Assessment: a Proposal for Consistent Definitions*. Plenum Press, NY, USA, 1987.
29. Haimes, Y.Y. *Hierarchical Holographic Modeling*. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 11: 606-617, 1981.
30. Haimes, Y. Y., Kaplan, S., and Lambert, J H. *Risk Filtering, Ranking, and Management Framework Using Hierarchical Holographic Modeling (HHM)*. Risk Analysis, Vol. 22, No. 2: 383-397, 2002.
31. Haimes, Y. Y. *Risk modeling, assessment, and management* (3rd ed.). A John Wiley & Sons Inc. Publication, ISBN 978-0-470-28237-3, 2009
32. Harms-Ringdahl, L. *Safety analysis, principles and practice in occupational safety* (2nd ed.). CRC Press. ISBN: 9780415236553, p. 302, 2001
33. Hendrick, K., & Benner, L., Jr. *Investigating accidents with STEP*. New York: Marcel Dekker Inc., 1987
34. Henselwood, F., & Phillips, G. *A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(5), 433-441, 2006
35. Høj, N. P., & Kröger, W. *Risk analyses of transportation on road and railway from a European perspective*. Safety Science, 40(1-4), 337-357, 2002
36. Hollywell, P. D. *Incorporating human dependent failures in risk assessments to improve estimates of actual risk*. Safety Science, 22(1-3), 177-194, 1996
37. Hong, E.-S., Lee, I.-M., Shin, H.-S., Nam, S.-W., & Kong, J.-S. *Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: application to the design of*

- shield TBM*. Tunnelling and Underground Space Technology, 24(3), 269-277, 2009
38. Huang W.S. *Exploring the Factors Affecting the Level Crossing Accident of TRA*. National Chiao Tung University, 2006.
39. Kaplan, S., Haimes, Y. Y., and Garrick, B. J. *Fitting Hierarchical Holographic Modeling (HHM) into the Theory of Scenario Structuring and Refinement to the Quantitative Definition of Risk*. Risk Analysis, Vol. 21, No. 5: 807-819, 2001
40. Khan, F. I., & Abbasi, S. A. *Mathematical model for HAZOP study time estimation*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 10(4), 249-251, 1997
41. Khan, F. I., & Haddara, M. R. *Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), 561-573, 2003
42. Kim, J. W., & Jung, W. D. *A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), 479-495, 2003
43. Kirwan, B. *A guide to practical human reliability assessment*. Boca Raton: Taylor & Francis Press, 1994
44. Kontogiannis, T. *User strategies in recovering from errors in man-machine systems*. Safety Science, 32(1), 49-68, 1999
45. Kontogiannis, T., Leopoulos, V., & Marmaras, N. *A comparison of accident analysis techniques for safety-critical man-machine systems*. International Journal of Industrial Ergonomics, 25, 327-347, 2000
46. Kontogiannis, T., & Malakis, S. *A proactive approach to human error detection and identification in aviation and air traffic control*. Safety Science, 47(5), 693-706, 2009
47. Lambert D. *Zero-Inflated Poisson Regression, with an Application to Defects in Manufacturing*. American Statistical Association and the American Society for Quality Control, Vol. 34, No. 1, pp.11-14, 1992.
48. Lee, J. H., Jin, B. S., & Ji, Y. *Development of a Structural Equation Model for ride comfort of the Korean high-speed railway*. International Journal of Industrial Ergonomics, 39(1), 7-14, 2009

49. Lindberg, E., T. Thedéen, et al. (*Risk analysis/risk evaluation in a railway context*, (381), 1993
50. Lin F.F. and Chou Y.H. *A Study of Rail-Highway Grade Crossing Accidents in Taiwan Area*. Institute of Transportation, 1996.
51. Lowrance, W.W., *Acceptable Risk*, William Kaufmann Los Altos, CA, USA, 1976.
52. Marhavilas, P. K., & Koulouriotis, D. E. *A risk estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: application in an aluminum extrusion industry*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21(6), 596-603, 2008
53. Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D. E., & Voulgaridou, K. *Development of a quantitative risk assessment technique and application on an industry's worksite using real accidents' data*. *Scientific Journal of Hellenic Association of Mechanical & Electrical Engineers*, 416, 14-20, 2009
54. Marhavilas P.K., Koulouriotis D., Gemeni V. *Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000 - 2009*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* V.24 (477-523), 2011
55. Miranda-Moreno L.F., Fu L., Saccomanno F.F and Labbe A. *Alternative Risk Models for Ranking Locations for Safety Improvement*. *Transportation Research Record*, No. 1908, pp. 1-8, 2005.
56. Muttram R I. *Railway Safety's Safety Risk Model*. *Proc Instn Mech Engrs*. Vol 216 Part F: J Rail and Rapid Transit, 2002
57. Nessim, M. A., & Stephens, M. J. *Risk based optimization of pipeline integrity maintenance*. *OMAE*, V, 303 – 314, 1995
58. Oh, J., Washington, S. P., & Nam, D. *Accident prediction model for railway highway interfaces*. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 346-356, 2006
59. Pandey, M. D. *Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines*. *NDT&E International*, 31(5), 349 – 358, 1998
60. Park Chan-Woo, Wang Jong-Bae, Kwak Sang-Log, Choi Don-Bum. *Review and Assessment of the Korea Rail's Safety Performance using Risk Assessment Models*. *International Railway Safety Conference*, 2009
61. Pate-Cornell et al. (1995, 2002)

62. Rådbo, H., Svedung, I., & Andersson, R. Suicide prevention in railway systems: application of a barrier approach. *Safety Science*, 46(5), 729-737, 2008
63. Reinach, S., & Viale, A. *Application of a human error framework to conduct train accident/incident investigations*. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 396-406, 2006
64. Reniers, G. L. L., Dullaert, W., Ale, B. J. M., & Soudan, K. *Developing an external domino prevention framework: Hazwim*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 127 – 138, 2005
65. Rouvroye, J. L., & van den Bliet, E. G. *Comparing safety analysis techniques*. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(3), 289-294, 2002
66. Saccomanno F.F., Fu L., and Miranda-Moreno L.F., *Risk-Based Model for Identifying Highway-Rail Grade Crossing Blackspots*. *Transportation Research Record*, No. 1862, pp. 127-135, 2004.
67. Saccomanno F.F., Park Y.J., Fu L. *Estimating Countermeasure Effects for Reducing Collisions at Highway-Railway Grade Crossings*. *Accident Analysis and Prevention* 39, 406-416, 2007.
68. Shankar V., Milton J., Mannering F. *Modeling Accident Frequencies as Zero-Altered Probability Processes: An Empirical Inquiry*. *Accident Analysis and Prevention* 29, No. 6, pp.829-837, 1997.
69. Shariari, M. *Risk analysis at railway/highway level crossings: "A fault tree analysis"*, Arbetsrapprt TFB Dnr 90-111-53, 1991
70. Suddle, S. I., & Waarts, P. H. *The safety of risk or the risk of safety? Safety and reliability*. In Bedford., van Gelder., Swets., & Zeitlinger (Eds.), *The Netherlands: Lisse*. Vol. 2 (pp. 1511-1518). 2003
71. Suddle, S. *The weighted risk analysis*. *Safety Science*, 47(5), 668-679, 2009
72. Sungwook Yoon and Hang Choi. *Development of Quantitative Risk Analysis tool for the fire safety in railway tunnel*. *International Forum on Engineering Decision Making*, Fourth IFED Forum, Hakone, Japan, 13-16 May 2009
73. Symons and Dennis, 2000, p. 2
74. Tsai M.W. *"A study on Accident Analysis for Highway-Railway level Crossing*. National Cheng Kung University, 2006.
75. Van Duijne, F. H., Aken, D., & Schouten, E. G. *Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment*. *Safety Science*, 46(2), 245-254, 2008

76. Vanderhaegen, F. *A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method: application to railway system*. Reliability Engineering & System Safety, 71(1), 1-13, 2001
77. Vernez, D., & Vuille, F. *Method to assess and optimise dependability of complex macro-systems: application to a railway signaling system*. Safety Science, 47(3), 382-394, 2009
78. Vesely, Goldberg et al., 1981, Andrews and Moss, 1993, p. 154- 156, *Five rules for fault tree construction*. Fault Tree Handbook. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission
79. Vuong, Q.H. *Likelihood ratio tests for model selection and non-nested hypotheses*. Econometrica, Vol. 57, No. 2, 1989, pp. 307–333, 1989
80. Wang K., Lee A.H., Yau K.K.W., Carrivick P.J.W. *A Bivariate Zero-inflated Poisson Regression Model to Analyze Occupational Injuries*. Accident Analysis and Prevention 35, 625-629, 2003.
81. Washington, S., & Oh, J. *Bayesian methodology incorporating expert judgment for ranking countermeasure effectiveness under uncertainty: example applied to at grade railroad crossings in Korea*. Accident Analysis and Prevention, 38(2), 234-247, 2006
82. Wharton, F. *Risk Management: Basic Concepts and General Principle*. Risk Analysis Assessment and Management, Wiley, England, 1992.
83. Woodruff, J. M. *Consequence and likelihood in risk estimation: a matter of balance in UK health and safety risk assessment practice*. Safety Science, 43(5-6), 345-353, 2005
84. Yang, S.-H., & Yang, L. *Automatic safety analysis of control systems*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, 178-185, 2005
85. Yang K.P. *Accident Frequency and Impact Analysis of Railway Level Crossing*. National Cheng Kung University, 2007.
86. Ye, X., Pendyala, R. M., Washington, S. P., Konduri, K., & Oh, J. *A simultaneous equations model of crash frequency by collision type for rural intersections*. Safety Science, 47(3), 443-452, 2009
87. Yuhua, D., & Datao, Y. *Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18(2), 83-88, 2005

88. Zio, E., Marella, M., & Podofillini, L. *Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems: application to the railway industry*. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(10), 1303-1314, 2007b