ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### Διπλωματική Εργασία

**« Συνδυαστική Χρήση Ποιοτικών και Ποσοτικών Μεθόδων για την Εκτίμηση Ρίσκου και Κινδύνων: Εφαρμογές, Περιορισμοί και Προοπτικές»**

**Μάτσης Αθανάσιος**

**Α.Μ φοιτητή : 138389**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Μαρχαβίλας Παναγιώτης**

**Πάτρα, Ιούνιος 2026**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή (Μάτση Αθανάσιο) που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# Διπλωματική Εργασία

# « Συνδυαστική Χρήση Ποιοτικών και Ποσοτικών Μεθόδων για την Εκτίμηση Ρίσκου και Κινδύνων: Εφαρμογές, Περιορισμοί και Προοπτικές»

**Μάτσης Αθανάσιος**

**Α.Μ φοιτητή : 138389**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Μαρχαβίλας Παναγιώτης**

**Συν-Επιβλέπων Καθηγητής: Τσαγκαράκης Κωνσταντίνος**

**Πάτρα, Ιούνιος 2026**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επιβλέπον Καθηγητή κύριο Μαρχαβίλα Παναγιώτη, για την προσφορά του στην καθοδήγηση και υποστήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Οι συμβουλές και οδηγίες του υπήρξαν καθοριστικές στην ανάπτυξη και τη βελτίωση του επιστημονικού επιπέδου της εργασίας.

# Περίληψη

Η διαχείριση και η εκτίμηση κινδύνων αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι των κατασκευαστικών έργων. Ο αυξημένος κίνδυνος που προέρχεται από τις πολλές και αλληλεξαρτώμενες παραμέτρους που προσδιορίζουν τα έργα, είναι και ο λόγος που η εκτίμηση των κινδύνων ερευνάται και εξελίσσεται συνεχώς. Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα έργα, οι παραδοσιακές μέθοδοι, αποδεικνύεται ότι υστερούν όταν εφαρμόζονται μεμονωμένα. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει τη συνδυαστική χρήση μεθόδων εκτίμησης κινδύνων, αναπτύσσοντας ένα υβριδικό πλαίσιο ανάλυσης και διαχείρισης κινδύνου σε κατασκευαστικά έργα. Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάζει τους βασικούς όρους του κινδύνου και της αβεβαιότητας όπως περιγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η περιγραφή βασικών ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων, καθώς και τεχνικών και εργαλείων που τις συντελούν. Παράλληλα εξετάζεται και ο ρόλος της Τεχνολογίας AI και τεχνολογιών που εφαρμόζονται στην σύγχρονη εκτίμηση κινδύνων.

Στο πλαίσιο της έρευνας δημιουργήθηκε το συνδυαστικό μοντέλο εκτίμησης κινδύνων, που βασίζεται στην ποιοτική αξιολόγηση και στην ποσοτικοποίηση κινδύνων μέσω ανάπτυξης προσομοιώσεων και σεναρίων. Το συνδυαστικό μοντέλο κατασκευασμένο σε περιβάλλον Excel, έπειτα εφαρμόστηκε σε υποθετική μελέτη περίπτωσης κατασκευαστικού έργου. Η διαδικασία εφαρμογής ξεκινά από τη δημιουργία πίνακα Risk Register και την βαθμολόγηση τους μέσω της μεθόδου FMEA. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η προσομοίωση της Monte Carlo όπου και εφαρμόζεται και Ανάλυση Ευαισθησίας από τις οποίες προκύπτουν και τα αποτελέσματα. Επίσης εφαρμόζεται και η Expected Monetary Value με σκοπό την σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν σημαντική αβεβαιότητα ως προς το συνολικό κόστος και τη διάρκεια του έργου. Στην περίπτωση καταγραφής δυσμενών συνθηκών, αυτά παρουσιάζουν αποκλίσεις από το χρονοδιάγραμμα και τον προϋπολογισμό του έργου, όπως είναι αναμενόμενο. Παράλληλα, η ανάλυση Pareto και η ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζουν ότι περιορισμένος αριθμός κινδύνων έχουν τη δυνατότητα να επηρεάζουν το έργο σε μεγάλο βαθμό. Η εφαρμογή αναδεικνύει την σημαντικότητα της συνδυαστικής χρήσης των μεθόδων έναντι των μεμονωμένων προσεγγίσεων με τη δυνατότητα τους να παρουσιάζουν μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση στην εκτίμηση.

Τέλος πραγματοποιείται αξιολόγηση του πλαισίου, ως προς την αποτελεσματικότητα του, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς που το χαρακτηρίζουν και παρουσιάζονται προτάσεις για την προσθήκη της τεχνολογίας AI αλλά και για μελλοντική εργασία.

**Λέξεις-Κλειδιά :** Διαχείριση Κινδύνων, Συνδυαστικές Μέθοδοι Εκτίμησης, Πλαίσιο Εκτίμησης.

# Abstract

Risk assessment has become an integral part of projects in the construction sector. The increased risk, which derives from the numerous interdependent parameters, is the reason why risk assessment is continuously researched and developed. Due to the continuous increasing of the complexity of the projects, traditional methods, prove to be insufficient when applied individually. This thesis examines the use of combined qualitative and quantitative methods to develop a hybrid framework for risk analysis in construction projects. The thesis initially conducts a literature review, presenting the fundamental terms of risk and uncertainty as described in the international literature. Subsequently, the study describes the main qualitative and quantitative methods techniques and tools, while also discussing their advantages and limitations. Artificial Intelligence technologies applied in contemporary risk assessment is also explored.

A combined risk assessment model was developed, based on both qualitative and quantitative methods. Qualitative methods were used in order to evaluate and justify the concept of risk and uncertainty. As for the Quantitative methods, they were used for the quantification of risks through the development of simulations and scenarios. The hybrid model was developed in a Microsoft Excel environment and was applied to a hypothetical yet realistic case study of a construction project. The implementation of the model begins with the creation of a Risk register table. Afterwards, the FMEA method is used for the evaluation of the risks appointed. The results of the model were derived from the use of Monte Carlo Simulation and Sensitivity Analysis. At the same time, the Expected Monetary Value is calculated and applied to the model in order to compare the results of the two approaches.

As for the results, they demonstrate significant uncertainty regarding the total cost and duration of the project. Furthermore, under adverse conditions, deviations from the project schedule and budget were observed, as expected. In addition, Pareto analysis and sensitivity analysis conclude that a limited number of risks affect the project significantly. The results indicate that the combined use of methods provides a more realistic representation of uncertainty compared to isolated approaches. Finally, the framework is evaluated, in terms of its effectiveness, its advantages and limitations. Suggestions regarding the integration of AI technologies, as well as directions for future research and development conclude the present research.

**Keywords: Risk Management, Mixed Method Research, Framework for Risk Assessment**

# Πίνακας Περιεχομένων

**Περίληψη** ..... 5
**Abstract** ..... 6
**Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή** ..... 10
**1.1: Μεθοδολογία** ..... 11
**Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο** ..... 12
**2.1 Διεθνή Πρότυπα Διαχείρισης Κινδύνων** ..... 15
**Κεφάλαιο 3: Ποιοτικές μέθοδοι** ..... 16
**3.1 Εισαγωγή στις ποιοτικές μεθόδους** ..... 16
**3.2 Τεχνικές ποιοτικής ανάλυσης** ..... 17
**3.3 Εργαλεία Ποιοτικής Αξιολόγησης** ..... 18
**3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ποιοτικών μεθόδων** ..... 18
**Κεφάλαιο 4: Ποσοτικές Μέθοδοι** ..... 19
**4.1 Εισαγωγή Ποσοτικών Μεθόδων** ..... 19
**4.2 Στατιστικά και πιθανοτικά μοντέλα** ..... 20
**4.3 Μοντέλα Πολυκριτηριακής Ανάλυσης** ..... 24
**4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ποσοτικών μεθόδων** ..... 25
**Κεφάλαιο 5: Ο ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης στην εκτίμηση κινδύνων** ..... 26
**5.1 Εισαγωγή** ..... 26
**5.2 Εργαλεία και τεχνικές AI** ..... 26
**5.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί** ..... 27
**Κεφάλαιο 6: Συνδυαστικές Μεθοδολογίες στην Εκτίμηση Κινδύνων** ..... 27
**6.1 Κυριότεροι τύποι Συνδυαστικών μεθόδων** ..... 28
**6.2 Παραδείγματα συνδυαστικών εφαρμογών** ..... 28
**6.3 Πλεονεκτήματα Συνδυαστικής Ανάλυσης Συγκριτικά με τις Μεμονωμένες Προσεγγίσεις** ..... 30
**Κεφάλαιο 7: Προτεινόμενο Πλαίσιο** ..... 30
**7.1 Αναγκαιότητα Δημιουργίας του Συνδυαστικού Πλαισίου** ..... 30
**7.2 Δομή και Αρχιτεκτονική Πλαισίου** ..... 32
**7.3 Επιλογή και Αιτιολόγηση χρήσης Μεθόδων του Προτεινόμενου Πλαισίου.** ..... 34
**Κεφάλαιο 8: Παρουσίαση Κατασκευαστικού έργου** ..... 35
**8.1 Κριτήρια Επιλογής Κατασκευαστικού Έργου και Αιτιολόγηση** ..... 35
**8.2 Περιγραφή Έργου** ..... 35
**8.3 Φάσεις υλοποίησης του Έργου** ..... 36

**8.3 Αναγνώριση και Κατηγοριοποίηση Κινδύνων**..... 36
**8.4 Επιλογή Μεθοδολογίας** ..... 38
**Κεφάλαιο 9: Εφαρμογή του πλαισίου και αποτελέσματα**..... 39
**9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων** ..... 44
**9.3 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων των Μεθόδων Monte Carlo και EMV**..... 49
**9.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη Βιβλιογραφία** ..... 50
**Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα**..... 51
**10.1 Σύνοψη της Εργασίας**..... 51
**10.2 Αξιολόγηση αποτελεσματικότητας του πλαισίου** ..... 51
**10.3 Πρωτοτυπία και Συμβολή της Εργασίας στη Βιβλιογραφία**..... 52
**10.4 Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία** ..... 53
**Βιβλιογραφικές Πηγές** ..... 54
**Χρήσιμοι Σύνδεσμοι:** ..... 56
**Παράρτημα** ..... 57

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση Διεθνών Προτύπων ..... 16
Πίνακας 3. Στοιχεία Κατασκευαστικού έργου. ..... 35
Πίνακας 4. Φάσεις Έργου ..... 36
Πίνακας 5. Κατηγορίες και κατάλογος κινδύνων ..... 37
Πίνακας 6. Καρτέλες Excel ..... 40
Πίνακας 7. Ταξινόμηση Σημαντικότητας ..... 40
Πίνακας 8.Πίνακας FMEA ..... 41
Πίνακας 9.Top 10 Risks ..... 42
Πίνακας 10. Αποτελέσματα Monte Carlo Base ..... 44
Πίνακας 11.Σύγκριση Σεναρίων ..... 46
Πίνακας 12. FMEA Top Risks ..... 46
Πίνακας 13.Αποτελέσματα EMV ..... 48
Πίνακας 14.Σύγκριση Monte Carlo – EMV ..... 49

## Περιεχόμενα Γραφημάτων

Διάγραμμα 1. Κατανομή Κόστους Monte Carlo. ..... 45
Διάγραμμα 2. Κατανομή Καθυστέρησης Έργου Monte Carlo. ..... 45
Διάγραμμα 3 Συνεισφορά Κινδύνου στο Κόστος ..... 47
Διάγραμμα 4 EMV - Pareto ..... 48

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Διαγραμμα ροής της δομής της εργασίας ..... 32
Εικόνα 2. Βαθμονόμηση. ..... 42
Εικόνα3.Πολλαπλασιαστές Σεναρίων…….**Error! Bookmark not defined.**

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η εκτίμηση ρίσκου και κινδύνου αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στον κατασκευαστικό τομέα. Με τη χρήση της σωστής μεθοδολογίας μπορεί να οδηγήσει στην καλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητα των έργων. Καθώς η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται, οι επαγγελματίες του κλάδου καλούνται να αντιμετωπίζουν συνεχώς τα καινούργια ζητήματα που προκύπτουν, και επηρεάζουν την πορεία υλοποίησης των έργων. Για αυτό το λόγο, η ανάγκη για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εκτίμηση και διαχείριση του ρίσκου γίνεται ολοένα και πιο αναγκαία. Σύμφωνα με την έρευνα της McKinsey Global Institute (2017), τα μεγάλα κατασκευαστικά έργα παρουσιάζουν υπερβάσεις σε κόστος κατά 80% και σε διάρκεια έως και 20 μήνες. Αντίστοιχα η Eurostat (2022) καταγράφει ποσοστό άνω των 60% των κατασκευαστικών έργων, να παρουσιάζει καθυστερήσεις και υπερβάσεις του προϋπολογισμού. Παράλληλα στον τομέα των κινδύνων, ο κατασκευαστικός κλάδος ευθύνεται περίπου για το 25% των θανατηφόρων ατυχημάτων στην Ε.Ε. ενώ απασχολεί συνολικά το 10% του ανθρώπινου δυναμικού (OSHA 2023). Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν την σοβαρότητα των κινδύνων και του ρίσκου στον κατασκευαστικό τομέα, κάτι που καθιστά την ανάπτυξη αξιόπιστων πλαισίων εκτίμησης κινδύνων αναγκαία διαδικασία.

Στην παρούσα εργασία, σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα συνολικό εννοιολογικό πλαίσιο που θα συνδυάζει ποιοτικές και ποσοτικές μεθόδους εκτίμησης ρίσκου. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της συνδυαστικής ανάλυσης στην εκτίμηση ρίσκου και κινδύνων.

Επίσης, θα εξεταστεί και η δυνατότητα της ενσωμάτωσης των σύγχρονων τεχνολογιών (AI) όπου με τη συμβολή της μηχανικής μάθησης να βελτιωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των εκτιμήσεων. Ο παραπάνω συνδυασμός στοχεύει στην ανάπτυξη μιας σφαιρικής και αξιόπιστης εικόνας των κινδύνων και των ρίσκων που ενδέχεται να παρουσιαστούν σε ένα κατασκευαστικό έργο. Κατά την ανάπτυξη της εργασίας, αρχικά θα γίνει μια ανάλυση των βασικών όρων και εννοιών που σχετίζονται με τη διαχείριση ρίσκου και κινδύνων. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι ποσοτικές και ποιοτικές μέθοδοι εκτίμησης ρίσκου. Η προτεινόμενη συνδυαστική μεθοδολογία θα αξιολογηθεί με παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία, ώστε να αναδειχθούν οι πρακτικές εφαρμογές και τα οφέλη της. Ταυτόχρονα, θα διερευνηθεί ο ρόλος της τεχνολογίας AI στην εκτίμηση κινδύνου, αναλύοντας πώς οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης και προβλεπτικής ανάλυσης μπορούν να βελτιώσουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σκοπός είναι να δοθεί στους επαγγελματίες του τομέα ένα αξιόπιστο πλαίσιο για την εκτίμηση και διαχείριση των κινδύνων, συμβάλλοντας έτσι στην επιτυχία των κατασκευαστικών έργων. Με την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας, επιδιώκεται να παραχθεί ένα χρήσιμο εργαλείο που θα ενισχύσει τη διαχείριση κινδύνου στον κατασκευαστικό τομέα, προάγοντας την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα σε ένα περιβάλλον γεμάτο προκλήσεις.

Βάσει των παραπάνω, η παρούσα εργασία αναπτύσσεται γύρω από τα τρία βασικά ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν.

1) Σε ποιο βαθμό η χρήση συνδυαστικών μεθόδων παράγει ρεαλιστικές εκτιμήσεις συγκριτικά με τις μεμονωμένες προσεγγίσεις

2) Ποιοι κίνδυνοι έχουν την τάση να επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το κόστος και το χρονοδιάγραμμα ενός κατασκευαστικού έργου και με ποιο τρόπο μπορεί αυτοί να αναδειχθούν.
3) Ποιες είναι οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της Τεχνολογίας Τεχνητής Νοημοσύνης στο προτεινόμενο πλαίσιο.

Τα ερωτήματα αυτά αποτελούν βάση για την ανάπτυξη της δομής της εργασίας και απαντώνται τμηματικά μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, της ανάπτυξης του πλαισίου και την τελική εφαρμογή του.

Σύμφωνα με τα διατυπωμένα ερευνητικά ζητήματα, η εργασία στοχεύει στην :

- Ανασκόπηση και ταυτόχρονα κριτική αξιολόγηση και σύγκριση των υφιστάμενων μεθόδων εκτίμησης και διαχείρισης κινδύνων (Ποσοτικών, Ποιοτικών, Συνδυαστικών).
- Ανάπτυξη ενός συνδυαστικού πλαισίου εκτίμησης κινδύνων που να παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα
- Εφαρμογή του πλαισίου σε κατασκευαστικό έργο με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του με δεδομένα και πρακτικές της διεθνούς βιβλιογραφίας
- Ανάπτυξη ενός εργαλείου εκτίμησης κινδύνων που θα είναι πρακτικό και εύκολα προσβάσιμο σε διαχειριστές έργων και μηχανικούς.

## 1.1: Μεθοδολογία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθείται η συνδυαστική ερευνητική μεθοδολογία. Βασίζεται στο συνδυασμό των ποιοτικών και ποσοτικών προσεγγίσεων, μεθόδων και εργαλείων, με σκοπό την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου διαχείρισης και εκτίμησης ρίσκου για τα κατασκευαστικά έργα. Η εργασία στηρίζεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών προτύπων και ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί και δημοσιευτεί, καθώς και σε επίσημες επιστημονικές πηγές δεδομένων, όπως οργανισμούς και στατιστικές υπηρεσίες. Κατά τη θεωρητική διερεύνηση, θα εξεταστούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της ποιοτικής και ποσοτικής προσέγγισης, όπως και του συνδυασμού αυτών, μαζί με τις βασικές μεθόδους και εργαλεία που τις χαρακτηρίζουν.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί ένα προτεινόμενο υβριδικό πλαίσιο εκτίμησης ρίσκου στα κατασκευαστικά έργα, το οποίο θα συνδυάζει τις ποιοτικές τεχνικές αναγνώρισης και ιεράρχησης κινδύνων με ποσοτικά μοντέλα προσομοίωσης σεναρίων. Θα χρησιμοποιηθούν εργαλεία όπως η μέθοδος FMEA, Monte Carlo Simulation, Expected Monetary Value, Sensitivity Analysis, ώστε να παραχθούν τα απαιτούμενα αποτελέσματα. Το πλαίσιο αυτό θα εφαρμοστεί σε ένα πλασματικό κατασκευαστικό έργο, μεσαίας έκτασης και διάρκειας, μεν απλοποιημένο αλλά ταυτόχρονα και απαιτητικό ως προς τους κινδύνους και το ρίσκο. Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί, θα είναι σε περιβάλλον Excel, με στόχο την πρακτικότητα του στην εφαρμογή και τη λειτουργικότητα του.

Όσον αφορά την δομή της εργασίας, αυτή ξεκινά αρχικά από το θεωρητικό υπόβαθρο διαχείρισης κινδύνων, όπου αναλύονται οι βασικές έννοιες του κινδύνου του

ρίσκου και της αβεβαιότητας. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι ποιοτικές και ποσοτικές προσεγγίσεις με τις μεθόδους και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Έπειτα παρουσιάζεται το προτεινόμενο πλαίσιο εκτίμησης κινδύνων και εφαρμόζεται στο κατασκευαστικό έργο. Μετά την εφαρμογή, ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αξιολόγηση του μοντέλου ως προς την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ευελιξία στην εφαρμογή του. Τέλος η εργασία κλείνει με τα συμπεράσματα, τους περιορισμούς και τις προτάσεις που προκύπτουν για την περαιτέρω ανάπτυξη του πλαισίου.

# Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

Η ανάγκη για την εκτίμηση και τη διαχείριση κινδύνων έχει καταστεί ως αναπόσπαστο κομμάτι της διοίκησης τεχνικών έργων. Οι απαιτήσεις και η πολυπλοκότητα των κατασκευαστικών έργων χαρακτηρίζονται από συνεχείς μεταβολές και αβεβαιότητα. Η αποτελεσματική εφαρμογή των μεθόδων εκτίμησης κινδύνων, συμβάλλει στον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών προβλημάτων και στη δημιουργία στρατηγικών που θα μετριάσουν ή θα εξαλείψουν τις συνέπειες αυτών. Έτσι η πρόληψη του κινδύνου και του ρίσκου αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία που πραγματοποιείται σε όλες τις φάσεις του έργου, από τη αρχή μέχρι και την αποπεράτωση του. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές έννοιες που αφορούν τον κίνδυνο, την αβεβαιότητα και τα διεθνή πρότυπα που δραστηριοποιούνται στις πτυχές αυτών.

Προσπαθώντας να κατανοήσουμε την ανάγκη για την πρόληψη κινδύνων και ρίσκου, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι βασικοί όροι του κίνδυνου και του ρίσκου. Σύμφωνα με το τμήμα Αντιμετώπισης Κινδύνων του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (UNDRR), ο κίνδυνος είναι μια διεργασία, είτε προκύπτει από κάποιο φαινόμενο είτε από την ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία μπορεί να προκαλέσει απώλεια ζωής, τραυματισμό ή άλλες επιδράσεις στην υγεία, μπορεί να προκαλέσει ζημιές, κοινωνικές και οικονομικές αναστατώσεις και περιβαλλοντικές υποβαθμίσεις. Οι κίνδυνοι διακρίνονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με την περίπτωση μελέτης. Στην περίπτωση του κατασκευαστικού τομέα, οι κίνδυνοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ενδεικτικά σε :

- Φυσικοί Κίνδυνοι ( Καιρικές συνθήκες , Φυσικές Καταστροφές)
- Κίνδυνοι Υγείας και Ασφάλειας (Ατυχήματα, Έκθεση σε επικίνδυνες ουσίες κ.α.)
- Οικονομικοί Κίνδυνοι ( Υπερβάσεις Κόστους, Ρήτρες κ.α.)
- Διοικητικοί Κίνδυνοι ( Καθυστερήσεις και Έλλειψη συντονισμού)
- Τεχνικοί Κίνδυνοι (Σφάλματα μελετών, Αστοχίες υλικών, Λάθος εφαρμογές μελετών κ.α.)
- Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι ( Ρύπανση, Θόρυβος κ.α.)
- Κοινωνικοί Κίνδυνοι (Αντιδράσεις τοπικής κοινότητας)

Όπως φαίνεται, οι κίνδυνοι είναι πολυδιάστατοι και πολυπληθείς και αυξάνονται όσο αυξάνεται και το μέγεθος του έργου το οποίο καλείται ο μελετητής να ερευνήσει.ν Στην περίπτωση του ρίσκου, όπως αυτό αναφέρεται στο ISO 31000, είναι το αποτέλεσμα ενός οργανισμού, ο οποίος θέτει και επιδιώκει κάποιους στόχους σε αβέβαιο περιβάλλον. Το αβέβαιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες που το επηρεάζουν και θα συντελέσουν στο τελικό αποτέλεσμα. Το ρίσκο ορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αναδεικνύει ότι η μεθοδολογία της εκτίμησης του ρίσκου είναι ο τρόπος

με τον οποίο θα φτάσει ο οργανισμός στο επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, παρά να παρουσιάζει το ρίσκο ως απλό θετικό αποτέλεσμα η κάποια αρνητική συνέπεια.

Οι δύο παραπάνω έννοιες του ρίσκου και του κινδύνου, δεν είναι ταυτόσημες καθώς ο κίνδυνος είναι πηγή πιθανής ζημιάς και επικεντρώνεται σε συγκεκριμένο γεγονός ή κατάσταση που δημιουργεί πρόβλημα ενώ το ρίσκο είναι μια πιο ευρεία έννοια η οποία συνδυάζει την πιθανότητα και την επίπτωση (η οποία δεν σημαίνει απαραίτητα την αρνητική συνέπεια). Όπως αναφέρει ο Woodruff, J.(2005) « Ρίσκο είναι η πιθανότητα που κάποιος ή κάτι που είναι μετρήσιμο θα επηρεαστεί από τον κίνδυνο, ενώ ο κίνδυνος είναι η πιθανή πηγή ενός συμβάντος που μπορεί να προκαλέσει ατύχημα ή ζημιά».

Πλέον πέρα των κινδύνων και του ρίσκου, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει και η πτυχή της αβεβαιότητας, η οποία αποτελεί χαρακτηριστικό των κατασκευαστικών έργων. Η αβεβαιότητα, αφορά την δυσκολία της πρόβλεψης καταστάσεων και συνθηκών που επηρεάζουν το έργο. Η αβεβαιότητα προκύπτει από πλήθος παραγόντων εσωτερικών αλλά και εξωτερικών, όπως για παράδειγμα, περιβαλλοντικοί παράγοντες, οικονομικές μεταβολές, ανθρώπινος παράγοντας (συμπεριφορά, εσφαλμένη κρίση κτλ.). Σύμφωνα με την USEPA – United Stated Environmental Protection Agency, η αβεβαιότητα αφορά την απουσία της πλήρους επίγνωσης και κατανόησης των μεταβλητών ενός συστήματος και των συνθηκών αλληλεξάρτησης και συσχέτισης μεταξύ τους. Η συνθήκη της αβεβαιότητας είναι άμεσα εξαρτώμενη με την διαχείριση κινδύνων, αφού όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανάγκη για την πρόληψη κινδύνων.

Στην προσπάθεια της μείωσης των κινδύνων και της πρόβλεψης του ρίσκου, αναπτύσσεται ο όρος της μελέτης της εκτίμησης κινδύνων, η οποία σύμφωνα με την Υπηρεσία Υγείας και Ασφάλειας OSHA (Occupational Safety and Health Administration), ορίζεται ως «Η διαδικασία αξιολόγησης των κινδύνων για την ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων, που προκύπτουν από υπαρκτούς κινδύνους»

Η μελέτη της εκτίμησης κινδύνων εξετάζει :

- Τι θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη η τραυματισμό
- Κατά πόσο θα μπορούσαν να εξαλειφθούν ή να περιοριστούν οι πηγές κινδύνου
- Ποια μέτρα έχουν παρθεί , ή πρέπει να θεσπιστούν ώστε να περιοριστεί ο κίνδυνος.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 31000, η διαδικασία διαχείρισης κινδύνων περιλαμβάνει την αναγνώριση, την ανάλυση και την αξιολόγηση των κινδύνων, την ανάπτυξη στρατηγικών για την αντιμετώπιση τους και τέλος την παρακολούθηση και την αναθεώρηση των στρατηγικών κατά ανάγκη. Η διαδικασία εφαρμόζεται σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου και συμβάλλει στην βελτίωση της ασφάλειας, στον καλύτερο προγραμματισμό, στη διατήρηση της ποιότητας του έργου αλλά και στην μείωση της πιθανότητας να βγει το έργο εκτός προϋπολογισμού.

Στην περίπτωση των τεχνικών κατασκευών, αυτές από τη φύση τους επηρεάζονται από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες. Οπότε οι κατηγορίες των κινδύνων που μπορούν να εμφανιστούν είναι πολλές και αλληλένδετες. Οι κυριότερες κατηγορίες κινδύνων των κατασκευαστικών έργων είναι :

- Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι ( καιρικά φαινόμενα, σεισμοί κλπ.)
- Κίνδυνοι Υγείας και Ασφάλειας ( εργατικά ατυχήματα, θόρυβος, δονήσεις κλπ.)
- Οικονομικοί Κίνδυνοι ( μεταβολές τιμών, υπερβάσεις κόστους κλπ.)

- Τεχνικοί κίνδυνοι ( αστοχίες υλικών, αστοχίες εξοπλισμού, σφάλματα σχεδιασμού κλπ.)
- Διοικητικοί και Οργανωτικοί Κίνδυνοι (έλλειψη συντονισμού και προγραμματισμού κλπ.)
- Κοινωνικοί και Νομικοί Κίνδυνοι (νομικές διαφορές, καθυστερήσεις αδειοδοτήσεων κλπ.)

Η μελέτη της εκτίμησης κινδύνων και ρίσκου, στην ουσία αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία, η οποία συμπεριλαμβάνει την αναγνώριση, την ανάλυση και την πρόληψη κινδύνων πάσης φύσεως στον χώρο. Στο πλαίσιο της συμπεριλαμβάνει όλες τις διαδικασίες που αφορούν τις μετρήσεις, τις αξιολογήσεις και τις δραστηριότητες λήψης αποφάσεων, για την εφαρμογή μέτρων και στρατηγικών με σκοπό την μείωση, ή σε ιδανικά σενάρια, την εξάλειψη των κινδύνων. Πέρα από τον περιορισμό ή την εξάλειψη των κινδύνων, στοχεύει στην ενημέρωση και στην εκπαίδευση των εργαζομένων και των εργοδοτών στους κινδύνους που εγκυμονεί η φύση της εργασίας και ο περιβάλλοντας χώρος αυτής. Σύμφωνα με τις αρχές της εκτίμησης κινδύνων, υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για τη μελέτη και την αξιολόγηση τους. Ανάλογα με τη φύση του κινδύνου και κατά πόσο μπορεί να αξιολογηθεί και να μετρηθεί χρησιμοποιούνται οι ποσοτικές και οι ποιοτικές μεθόδους εκτίμησης. Η κάθε μέθοδος έχει το δικό της τρόπο προσέγγισης και ανάλυσης του κινδύνου και χαρακτηρίζεται από τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στον κλάδο των κατασκευών, η εκτίμηση κινδύνων, στην αρχή πραγματοποιούνταν με ποιοτικές μεθόδους, βασιζόμενες σε αξιολογήσεις και εμπειρίες ειδικών για τον εντοπισμό κινδύνων. Με την πάροδο του χρόνου, η ανάγκη για πιο αντικειμενικές και πιο αναλυτικές εκτιμήσεις συνέβαλε στην χρήση των ποσοτικών μεθόδων. Στη συνέχεια, με τη χρήση των ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων ταυτόχρονα, αναπτύσσεται το μοντέλο των συνδυαστικών μεθόδων εκτίμησης κινδύνων, όπου φαίνεται να έχει τη δυνατότητα να προσφέρει τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων. Η θεωρία των συνδυαστικών μεθόδων δεν θεωρείται καινοτομία της σημερινής εποχής καθώς αναπτύχθηκε το 1967 από τον Jick (Jick T.,1979), ο οποίος προσπάθησε να βρει το κοινό σημείο των ποσοτικών και των ποιοτικών μεθόδων μέσω της κοινωνικής επιστήμης (Creswell, 2003). Ως καινοτομία της εποχής, μπορεί να θεωρηθεί η Τεχνολογία AI (Artificial Intelligence) η οποία σε συνδυασμό με τις συνδυαστικές μεθόδους μπορεί να αποδώσει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και να υποστηρίζει καινούργιες δυνατότητες έρευνας. Στα παρακάτω κεφάλαια πραγματοποιείται η ανάλυση των ποιοτικών των ποσοτικών και των συνδυαστικών μεθόδων. Επίσης, εξετάζεται η συνεισφορά της τεχνολογίας AI στην εκτίμηση των κινδύνων και γίνεται μια αξιολόγηση των παραπάνω σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

## 2.1 Διεθνή Πρότυπα Διαχείρισης Κινδύνων

Οι βέλτιστες πρακτικές στην διαχείριση κινδύνων ορίζονται από διεθνή πρότυπα και πλάισια. Τα πιο διαδεδομένα στον ερευνητικό κλάδο είναι το πρότυπο ISO 31000, το Project Management Body of Knowledge (PMBOK) και το Projects In Controlled Environments 2 (PRINCE2).

Το ISO31000 είναι το πιο διαδεδομένο από τα υπόλοιπα δύο και εφαρμόζεται σε κατασκευαστικά έργα, δημόσιες υπηρεσίες και χρηματοπιστωτικούς οργανισμούς. Στο πλαίσιο του αναπτύσσονται πέντε στάδια:

- Εντοπισμός Κινδύνων
- Ανάλυση
- Αξιολόγηση
- Αντιμετώπιση
- Παρακολούθηση

Το πρότυπο, δεν επιβάλλει στον ερευνητή συγκεκριμένη μεθοδολογία, προσφέροντας ελευθερία επιλογής των μεθόδων και των εργαλείων που θα χρησιμοποιήσει. Με αυτόν τον τρόπο το πρότυπο προσφέρει κατευθύνσεις χωρίς να είναι ελεγκτικό και απόλυτο.

Το PMBOK σε αντίθεση με το ISO31000 είναι πιο εξειδικευμένο στη διαχείριση κινδύνων σε κατασκευαστικά έργα. Προτείνει συγκεκριμένα εργαλεία για την ανάπτυξη της διαδικασίας εκτίμησης και ορίζει έξι στάδια.

- Σχεδιασμός Διαχείρισης Κινδύνων
- Αναγνώριση
- Ποιοτική Ανάλυση
- Ποσοτική Ανάλυση
- Σχεδιασμός Αντιμετώπισης
- Παρακολούθηση

Το PMBOK είναι το πρότυπο που αναπτύσσει και τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας.

Το PRINCE 2 εφαρμόζεται στον τομέα της Διοίκησης και Διαχείρισης και στοχεύει στην παράδοση έργων εντός προϋπολογισμού και εντός χρονοδιαγράμματος. Χαρακτηρίζεται ως πιο πολύπλοκο, πιο αυστηρό και απόλυτα διαδικαστικό, αφού ορίζει ρόλους και αρμοδιότητες κατά την διαδικασία της διαχείρισης των κινδύνων. Κατά την εφαρμογή του ορίζει επτά κανόνες:

- Το project πρέπει να έχει νόημα οικονομικά και λειτουργικά
- Αποτύπωση λαθών με σκοπό να μην επαναλαμβάνονται
- Ορίζονται ρόλοι και ευθύνες, ώστε όλοι να ξέρουν το κομμάτι τους
- Διαχείριση ανά στάδια διαχειρίσιμα και διακριτά
- Παρέμβαση κατά σημαντική απόκλιση από τα όρια ανοχής
- Εστίαση την ποιότητα του τελικού προϊόντος
- Προσαρμογή του πλαισίου στην κλίμακα και στη φύση του έργου

**Πίνακας 1. Σύγκριση Διεθνών Προτύπων**

| Κριτήριο | ISO 31000 | PMBOK | PRINCE2 |
|---|---|---|---|
| Πεδίο Εφαρμογής | Γενικό | Διαχείριση Έργων | Γενικό |
| Εξειδίκευση μεθόδων | Χαμηλή | Υψηλή | Μέτρια |
| Εργαλεία εκτίμησης | Ελεύθερο | Risk Register/Monte Carlo/P-I Matrix | Risk Register, Risk Log |
| Εστίαση | Οργανωτική | Τεχνική - Αναλυτική | Οργανωτική |

# Κεφάλαιο 3: Ποιοτικές μέθοδοι

## 3.1 Εισαγωγή στις ποιοτικές μεθόδους

Οι ποιοτικές μέθοδοι επιτρέπουν την καταγραφή συνιστωσών του περιβάλλοντος που δεν μπορούν να ερμηνευτούν με αριθμούς. Αφορά την αποτύπωση της πληροφορίας και την ανάλυση της. Οι δύο κυριότερες μέθοδοι σύμφωνα με τον Volkan E.,(2021) είναι:

1) Keep it super simple (KISS): Χρησιμοποιείται σε έρευνες μικρής κλίμακας, όπου δεν υπάρχει λόγος η ανάλυση και η αξιολόγηση των κινδύνων να είναι πολύπλοκη διαδικασία. Η μελέτη πραγματοποιείται από ομάδες μελετητών που δεν χρειάζεται να έχουν κάποια ιδιαίτερη εμπειρία σε τέτοιου είδους μελέτες.
2) Probability / Impact (Πιθανότητας / Επίπτωσης), η οποία χρησιμοποιείται για μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα έργα με ομάδες ερευνητών που κατέχουν εμπειρία στον κλάδο της εκτίμησης κινδύνων.

Οι ποιοτικές μέθοδοι αντίστοιχα έχουν ως σκοπό την αναγνώριση πιθανών κινδύνων και ρίσκου, με τη διαφορά ότι δεν βασίζονται σε αριθμητικά δεδομένα, αλλά σε υποκειμενικές κρίσεις, αντιλήψεις και εμπειρίες των μελετητών.

Χαρακτηρίζονται από τα πέντε παρακάτω στάδια :

- Αναγνώριση : Αναγνωρίζονται οι πιθανοί κίνδυνοι του έργου. Συνήθως αυτή η προσέγγιση αφορά διαβουλεύσεις ειδικών, ιστορικά δεδομένα παρόμοιων έργων κτλ.
- Ανάλυση : Αναλύονται οι κίνδυνοι ως προς τον βαθμό που μπορούν να επηρεάσουν και πόσο συχνά μπορούν να εμφανίζονται.
- Αξιολόγηση: Αξιολογούνται οι κίνδυνοι με τη βαρύτητα των επιπτώσεων που προκαλούν
- Διαβάθμιση και ιεράρχηση: Όπου δίνεται προτεραιότητα στους κινδύνους όπου έχουν τις μεγαλύτερες συνέπειες και αποφασίζονται και οι στρατηγικές και οι πόροι που θα δοθούν στην εξάλειψη αυτών η στον περιορισμό τους
- Έλεγχος και Ανατροφοδότηση : Όπου ελέγχεται η αποτελεσματικότητα των αποφάσεων που λήφθηκαν και αξιολογείται. Σε περίπτωση που δεν κρίνονται επαρκείς, προσαρμόζονται στις αλλαγές των συνθηκών και επαναπροσδιορίζονται.

## 3.2 Τεχνικές ποιοτικής ανάλυσης

**Μέθοδος Delphi :**

Η μέθοδος Delphi στηρίζεται στην επικοινωνία μεταξύ των μερών και των ειδικών. Χρησιμοποιεί τις απόψεις των ειδικών μέσω συνεντεύξεων και ερωτηματολογίων και ελέγχεται από ειδικούς εμπειρογνώμονες για να αναγνωριστούν όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι με σκοπό να ληφθούν αποφάσεις. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από ανωνυμία, σκοπεύοντας στην καθαρή άποψη των μερών, δίχως να αλληλοεπηρεάζονται. Η μέθοδος Delphi χαρακτηρίζεται ως ευέλικτη μέθοδος καθώς έχει τη δυνατότητα να εφαρμόζεται σε ποικίλους τομείς και κλάδους. Εφαρμόζεται για την πρόβλεψη, την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων, κατά την λήψη αποφάσεων και στρατηγικών (Hasson F., et. al 2025).

**Ανάλυση Σεναρίων ( Scenario Analysis) :**

Η ανάλυση σεναρίων αποτελεί ένα τρόπο για την εκτίμηση κινδύνων που υποδεικνύει τις πιθανές εναλλακτικές εξελίξεις και συνέπειες του κινδύνου που ερευνάται. Χρησιμοποιείται για εκτιμήσεις όπου χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα και συνεχές μεταβολές στις συνθήκες τους. Η Ανάλυση Σεναρίων αφορά τη δημιουργία των βέλτιστων και των χειρότερων σεναρίων καθώς και μιας μέσης λύσης, ώστε να συγκριθούν τα πιθανά σενάρια μεταξύ τους και να δημιουργηθούν οι κατάλληλες στρατηγικές. (Hassani B., 2016)

**Hazard and Operability Studies (HAZOP):**

Η τεχνική HAZOP είναι μια μέθοδος αναγνώρισης και εκτίμησης κινδύνων η οποία συνήθως χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις αυξημένου κινδύνου. Οι εγκαταστάσεις αυξημένου κινδύνου αποτελούν επιχειρήσεις που ασχολούνται με επικίνδυνα χημικά, καύσιμα , πυρηνικά και ορυκτά και η HAZOP είναι αναπόσπαστο κομμάτι αυτών. Είναι αναγνωρισμένη από τον OSHA και βοηθάει στην αναγνώριση κινδύνων που προκαλούν σοβαρές συνέπειες στον άνθρωπο αλλά και μεγάλες ζημιές και καταστροφές στο γύρω περιβάλλον. Η χρήση της απαιτεί χρόνο και εξειδικευμένη ομάδα που θα εξετάσει κάθε τμήμα και κάθε δραστηριότητα της επιχείρησης με σκοπό να αποφευχθούν οι συνήθως καταστροφικές συνέπειες. Η HAZOP αποτελεί «μια τεχνική μέθοδος που χρησιμοποιεί συστηματικές διεργασίες για να αναγνωρίζει αποκλίσεις από τις συνηθισμένες διαδικασίες και να εξασφαλίζει ότι τα απαραίτητα μέτρα έχουν παρθεί ώστε να μειώνεται η πιθανότητα ατυχήματος» (Marhavilas P., 2015).

**Failure Mode and Effects Analysis (FMEA):**

Η FMEA είναι μια τεχνική αναγνώρισης και αξιολόγησης των ενδεχομένων αστοχιών κατά τη χρήση κάποιου εξοπλισμού, μιας διαδικασίας ή ενός προϊόντος. Αποτελεί εργαλείο που μπορεί να μετατρέψει τα εμπειρικά ποιοτικά δεδομένα σε ποσοτικά μετρήσιμα στοιχεία. Αφορά τεχνική προληπτικής διαχείρισης κινδύνου σε μεγάλες βιομηχανίες και εγκαταστάσεις, αφού προσπαθεί να εντοπίσει την αστοχία πριν γίνει, τι μπορεί να την προκαλέσει και ποια θα είναι τα αποτελέσματα της. (Stamatis D., 2018). Η FMEA τεχνική προσδιορίζεται από τρείς βασικούς δείκτες:

1) Κρισιμότητα (Severity ) “S”
2) Πιθανότητα Εμφάνισης (Occurrence) “O”
3) Δυνατότητα εντοπισμού (Detection) “D”

Ο τελικός δείκτης ονομάζεται “Risk Priority Number” και υπολογίζεται ως εξής : RPN = S x O x D.

Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ποσοτική ανάλυση αλλά και για ποιοτική, και συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, όπως FTA , ETA, Monte Carlo και Fuzzy Logic για την καλύτερη διατύπωση αποτελεσμάτων. Παραδείγματα ερευνών που αξιοποιούν τις δυνατότητες της FMEA σε συνδυασμό με ποσοτικές τεχνικές και εργαλεία είναι η μελέτη των Villalta & Borja (2023), όπου συνδυάζει την FMEA με την Monte Carlo Simulation για να ποσοτικοποιήσει τα ποιοτικά δεδομένα και η μελέτη των Chakhrit A., et al (2026), που συνδυάζει τεχνικές FMEA με HAZOP, Fuzzy FTA και ETA μεθόδους για να πραγματοποιήσει εκτίμηση ρίσκου σε πετρελαϊκές εγκαταστάσεις.

**Bow-Tie:**

Η συγκεκριμένη αποτελεί μια ημιποιοτική τεχνική ανάλυσης κινδύνων, η οποία χρησιμοποιείται ως επί το πλείστων σε εγκαταστάσεις υψηλής επικινδυνότητας, όπως για παράδειγμα κατασκευαστικά έργα, βιομηχανίες κτλ. Αποτελεί μια οπτική μέθοδος, διαγραμματική, όπου στο κέντρο τοποθετείται το κρίσιμο ανεπιθύμητο γεγονός, στα αριστερά καταγράφονται οι αιτίες που οδηγούν το ανεπιθύμητο γεγονός και στα δεξιά καταγράφονται οι πιθανές συνέπειες που μπορεί να προκύψουν. Συνήθως η Bow tie τεχνική χρησιμοποιείται μαζί με άλλες τεχνικές όπως ,Monte Carlo , ETA, FTA καθώς αναπαριστά μόνο λογικές σχέσεις και δεν αποτυπώνει εξαρτήσεις και πιθανότητες. (Khakzad N., et al 2012)

## 3.3 Εργαλεία Ποιοτικής Αξιολόγησης

Τα εργαλεία ποιοτικής αξιολόγησης βοηθούν στην αποτύπωση και την οργάνωση των πληροφοριών που προέρχονται από τις κρίσεις, τις εμπειρίες και τις παρατηρήσεις των ειδικών που ερευνούν το έργο. Αφορούν πίνακες, σχηματικές αναπαραστάσεις και βαθμολογικές προσεγγίσεις που προσδίδουν μια καλύτερη και σαφέστερη εικόνα του ζητήματος που ερευνάται.

**Πίνακες Κινδύνου:**

Αποτελούν έναν τρόπο απεικόνισης της πιθανότητας εμφάνισης κινδύνου και της σοβαρότητας των επιπτώσεων, κατά την μελέτη ποιοτικής αξιολόγησης κινδύνων. Χρησιμοποιείται από πλήθος οργανισμών και κατηγοριοποιεί τον κίνδυνο σε χαμηλό, μεσαίο και υψηλό ρίσκο, παρουσιάζοντας μια εύκολα κατανοητή εικόνα του κινδύνου. (Duijm, 2015).

## 3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ποιοτικών μεθόδων

Οι ποιοτικές μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχουν δεδομένα ή είναι ελλιπή και υπάρχουν μεγάλες αβεβαιότητες. Τα δεδομένα σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθούν και οι αναλύσεις βασίζονται στην εμπειρία, τις κρίσεις και τις αντιλήψεις των ερευνητών. Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της χρήσης των ποιοτικών μεθόδων, όπως προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι:

Πλεονεκτήματα:

- Η ευελιξία και η ταχύτητα της εφαρμογής των μεθόδων καθώς δεν χρειάζονται συγκεκριμένα αριθμητικά δεδομένα.

- Χαμηλό κόστος από άποψη μη χρήσης λογισμικών και υπολογιστικών συστημάτων
- Καλύτερη κατανόηση των συνθηκών αλλά και των αποτελεσμάτων μέσω της επικοινωνίας των μερών.

Μειονεκτήματα :

- Κάποιες τεχνικές που απαιτούν συνεντεύξεις και ερωτηματολόγια μπορούν να χαρακτηριστούν και ως χρονοβόρες. Η δημιουργία της δομής των ερωτήσεων, η συλλογή των δεδομένων και η ανάλυση αυτών αποτελεί κρίσιμη και αναπόφευκτη διαδικασία που απαιτεί χρόνο και πόρους.
- Οι αποφάσεις και οι εκτιμήσεις μπορούν εύκολα να επηρεαστούν από προσωπικές απόψεις
- Οι ποιοτικές τεχνικές δεν χαρακτηρίζονται από επαναληπτικότητα, καθώς διαφορετικοί ερευνητές μπορούν να καταλήξουν σε διαφορετικά συμπεράσματα.

# Κεφάλαιο 4: Ποσοτικές Μέθοδοι

## 4.1 Εισαγωγή Ποσοτικών Μεθόδων

Οι ποσοτικές μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται ως εργαλεία για τη λήψη αποφάσεων, που σχετίζονται με το ρίσκο και τους κινδύνους. Από τη δεκαετία του 1970 και χρησιμοποιούνται και ως σήμερα, χωρίς να φέρουν ιδιαίτερες αλλαγές στον τρόπο χρήσης τους (Aven T.,2020). Οι πρώτες εφαρμογές αφορούσαν χώρους μεγάλων εγκαταστάσεων υγρών καυσίμων, αλλά και πυρηνικών εγκαταστάσεων, όπου οι κίνδυνοι χαρακτηρίζονται πολύπλοκοι και κρίσιμοι περιορισμού και αντιμετώπισης. Στην πάροδο των χρόνων, έχουν εξελιχθεί οι υπάρχουσες μέθοδοι και έχουν αναπτυχθεί και νέες, με σκοπό να προσαρμόζονται στους νέους κινδύνους που μπορεί παρουσιάζει το συνεχώς μεταβαλλόμενο και εξελισσόμενο περιβάλλον.

Οι ποσοτικές μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων, αποτελούν εργαλεία με τα οποία γίνεται δυνατή η ανάλυση αριθμητικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν έναν κίνδυνο ή μια αβέβαιη κατάσταση. Αποτυπώνουν την πιθανότητα μιας έκβασης με στατιστικά στοιχεία βοηθώντας τους μελετητές να προβλέψουν πιθανούς κινδύνους και στη συνέχεια να προχωρήσουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι ποσοτικές μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων, σύμφωνα με τους Kaplan και Garrick (1981), συστηματοποιούν την γνώση και την αβεβαιότητα για τα φαινόμενα που μελετώνται, αναλύοντας τρείς βασικές ερωτήσεις:

- Τι μπορεί να συμβεί;
- Εάν συμβεί ποιες θα είναι οι συνέπειες;
- Πόσο πιθανόν είναι αυτά τα σενάρια να εξελιχθούν

(Kaplan,Garrick,1981)

Με αυτή τη λογική σκέψη, οι κίνδυνοι μπορούν να υπολογισθούν με τη χρήση πιθανοτήτων και να εκφραστούν με αριθμητικά δεδομένα. Αυτό προσδίδει μια πιο απτή και κατανοητή εικόνα στον ερευνητή. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος της ποσοτικοποίησης του ρίσκου είναι :

RISK = P x I, όπου, P= πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου, I= αναμενόμενη επίπτωση / συνέπεια

Μέσα όμως στην παραπάνω εξίσωση κρύβεται και η αβεβαιότητα, η οποία καθιστά την ανάλυση ακόμα πιο πολύπλοκή. Με τον όρο αβεβαιότητα αναφερόμαστε στην απουσία γνώσης. Η απουσία γνώσης στον πραγματικό αριθμό των μεταβλητών αλλά και στις σχέσεις εξάρτησης που μπορεί να έχουν μεταξύ τους (USEPA 2011). Με αυτή την προοπτική εξελίσσονται οι τεχνικές των ποσοτικών μεθόδων , οι οποίες στοχεύουν στην ενσωμάτωση της αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία εκτίμησης των κινδύνων. Μέσω των ποσοτικών μεθόδων πραγματοποιείται η ανάλυση της αβεβαιότητας και η αξιολόγηση της με σκοπό να βοηθήσουν τον μελετητή να λάμβάνει αποφάσεις. Οι ποσοτικές μέθοδοι, παρόλα τα θετικά στοιχεία που προσφέρουν, κατά καιρούς έχουν λάβει κριτική, ως προς την χρήση τους. Παρόλο που η χρήση των μεθόδων αποτελεί εργαλείο για την ενημέρωση του ρίσκου, οι μελετητές τείνουν να το χρησιμοποιούν «μηχανικά» χωρίς να ερμηνεύουν απόλυτα τα δεδομένα (Aven T, 2020). Στις μελέτες ρίσκου και κινδύνων τα αποτελέσματα των μεθόδων χαρακτηρίζονται συνήθως σε αποδεκτά και μη αποδεκτά συγκριτικά με ένα όριο που θέτει ο ερευνητής. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα είναι άνω του ορίου, τότε λαμβάνονται μέτρα για την αντιμετώπιση και τον περιορισμό όπως θα έπρεπε. Ενώ στις περιπτώσεις που βρίσκονται κάτω του ορίου, τότε δεν λαμβάνονται μέτρα και οι τιμές θεωρούνται αμελητέες ενώ κανονικά θα έπρεπε να μελετώνται περαιτέρω ως προς τις συνέπειες και το κόστος. Ο Reid (1992), αναφέρει πως οι εκτιμήσεις του ρίσκου γίνονται υποκειμενικές καθώς υπάρχει η συνήθεια να υποτιμάται η κρισιμότητα της αβεβαιότητας.

## 4.2 Στατιστικά και πιθανοτικά μοντέλα

Τα στατιστικά και πιθανοτικά μοντέλα αποτελούν εργαλεία των ποσοτικών μεθόδων που δίνουν την δυνατότητα στον μελετητή να καταγράφει την πιθανότητα και την αβεβαιότητα με ποσοτικά δεδομένα. Μέσω αυτών, μελετώνται σενάρια και εναλλακτικές επιλογές, καθώς και εκτιμώνται πιθανές συνέπειες των κινδύνων που αφορούν το έργο. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία τα κυριότερα στατιστικά και πιθανοτικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις ποσοτικές μεθόδους εκτίμησης κινδύνων είναι τα παρακάτω:

**Monte Carlo Simulation:**

Η Προσομοίωση Monte Carlo αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές ποσοτικής εκτίμησης κινδύνου. Χρησιμοποιεί τα ποσοτικά δεδομένα που εισάγει ο μελετητής και παράγει τυχαίες επαναλήψεις ως αποτελέσματα. Κάθε αποτέλεσμα αποτελεί μια πιθανή έκβαση σύμφωνα με τις καθορισμένες τιμές της πιθανότητας (Normal, Triangular, Lognormal). Αντί κάθε μεταβλητή να ορίζεται από μία μοναδική τιμή, η συγκεκριμένη μέθοδος ορίζει τυχαίες τιμές για κάθε μεταβλητή οι οποίες ορίζονται από κατανομές, ερευνώντας έτσι ένα πλήρες φάσμα πιθανών εκβάσεων. Έτσι το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι επίσης μια κατανομή. Η συγκεκριμένη τεχνική αποδίδει πλήρεις κατανομές πιθανότητας, επιτρέπει την ανάλυση σεναρίων (Best case scenario, Worst case Scenario) και αποτελεί ιδανικό εργαλείο για συνθήκες με μεγάλες αβεβαιότητες. Εφαρμόζεται σε μελέτες :

- Χρονοπρογραμματισμών έργων
- Αξιολογήσεις υπερβάσεων κόστους
- Εκτιμήσεις Συχνότητας Ατυχημάτων
- Προσομοιώσεις κινδύνων από καιρικά φαινόμενα σε εργοτάξια.

Η μέθοδος Monte Carlo χαρακτηρίζεται από τους μελετητές ως σαφής και απλοϊκή. Έχει τη δυνατότητα να επαναλαμβάνεται συνεχώς με σκοπό την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας. Τα βασικά της στάδια είναι :

1) Ο ορισμός του προβλήματος, όπου τίθεται ο σκοπός της προσομοίωσης και αναγνωρίζονται οι κίνδυνοι και οι μεταβλητές
2) Αναγνώριση των αβέβαιων μεταβλητών (διάρκεια, κόστος, καιρικές συνθήκες κτλ.)
3) Καθορισμός κατανομών , το οποίο περιγράφει την μορφή της αβεβαιότητας.
   - Τριγωνικής κατανομής, για τιμές Min, Max
   - Κανονικής κατανομής για τιμές που συγκεντρώνονται γύρο από μια μέση τιμή.
   - Ομοιόμορφη κατανομή, όταν οι τιμές είναι εξίσου πιθανές
   - Λογαριθμικής κατανομής για πιο σύνθετες περιπτώσεις
4) Δημιουργία μαθηματικού μοντέλου, όπου πραγματοποιείται η διασύνδεση των αβέβαιων μεταβλητών με το τελικό αποτέλεσμα.
5) Δειγματοληψία και τυχαίες επαναλήψεις, όπου αντλούνται οι τυχαίες τιμές από την κατανομή και υπολογίζονται τα αποτελέσματα για τον αριθμό επαναλήψεων που έχει τεθεί.
6) Δημιουργία κατανομής αποτελεσμάτων, όπου οι τιμές παρουσιάζονται ως κατανομή και υπολογίζονται, η μέση τιμή, η διάμεσος και η τυπική απόκλιση.
7) Εξαγωγή συμπερασμάτων, όπου υπολογίζονται οι τελικές πιθανότητες των κινδύνων και της αβεβαιότητας.
8) Λήψη αποφάσεων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα.

Στη μελέτη του Wali (2019), εφαρμόζεται η Monte Carlo Simulation μαζί με Sensitivity Analysis για να αξιολογηθούν οι καθυστερήσεις που μπορεί να υπάρξουν σε ένα κατασκευαστικό έργο. Μέσω της μεθόδου, αναλύονται οι κίνδυνοι που επηρεάζουν τον προγραμματισμό του έργου και γίνεται εκτίμηση της πιθανότητας ολοκλήρωσης του έργου εντός του αρχικού προγράμματος, πριν και μετά την εφαρμογή μέτρων. Η εφαρμογή της μελέτης απέδειξε πως η τεχνική βοηθάει στην διαδικασία λήψης αποφάσεων και στον σχεδιασμό στρατηγικών μετριασμού των κινδύνων, ακόμα και σε πολύπλοκα και αβέβαια περιβάλλοντα.

Οι Joubert & Snyman (2022), χρησιμοποιούν αντίστοιχα την τεχνική σε ένα χαρτοφυλάκιο έργων, με σκοπό να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις των συστημικών παραγόντων κινδύνων που τα συντελούν. Αποσκοπούν στη δημιουργία μιας κατανομής πιθανών τιμών κόστους για τα έργα, υπολογίζοντας τις πιθανότητες να υπερβούν το αρχικό κόστος. Η χρήση της Monte Carlo Simulation όπως αποδεικνύεται από τη διεθνή βιβλιογραφία και από τα έργα των Wali και Joubert, Snyman , μειώνει την αβεβαιότητα στον προγραμματισμό των έργων. Οι πολλαπλοί παράγοντες που επηρεάζουν το έργο, μέσω της παραγωγής των πιθανών εκβάσεων καταλήγουν να είναι μετρήσιμοι και εύκολα υπολογίσιμοι στην διαδικασία της εκτίμησης των κινδύνων.

**Bayesian Networks:**

Το θεώρημα Bayesian παρουσιάστηκε το 1764 από τον Thomas Bayes και υποστηρίζει τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Τα Bayesian Networks εμπεριέχουν γραφικά μοντέλα τα οποία αποτυπώνουν γεγονότα, μεταβλητές και κινδύνους και εξετάζουν την σχέση μεταξύ τους καθώς και τον τρόπο που αλληλοεπηρεάζονται. Κάθε μεταβλητή αποτελεί έναν κόμβο, ο οποίος έχει ένα δικό του πίνακα πιθανοτήτων και κάθε βέλος αναπαριστά τις αιτιακές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Το βασικό ερώτημα που αναλύει το θεώρημα είναι, πώς η γνώση επηρεάζει την πιθανότητα. Προσφέρει δηλαδή τη δυνατότητα της αναθεώρησης στην περίπτωση όπου αποκτηθεί μια νέα πληροφορία (Anderson et al.,1999).

Κατά τον κανόνα του Bayes ισχύει ότι:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

Όπου,

P(A) είναι η αρχική εκτίμηση της πιθανότητας

P(A/B) είναι η πιθανότητα του A αφού έχουμε την πληροφορία ότι συνέβη το B.

P(B/A) είναι η πιθανότητα εμφάνισης του B εφόσον ισχύει το A

P(B) είναι η συνολική πιθανότητα του B ανεξαρτήτως από τι την προκαλεί ( μπορεί να προκαλείται και από παραπάνω από μία αιτίες).

Για παράδειγμα σε πλασματικά δεδομένα, έστω ότι υπάρχει η πιθανότητα δυσμενών καιρικών συνθηκών P(A) = 30% και λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών μπορεί να προκληθεί ατύχημα P(B/A) = 40% ενώ γενικά η πρόκληση ατυχήματος στη συγκεκριμένη εργασία ορίζεται στην πιθανότητα των 15%, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση , P(A/B) = 0,4*0,3 / 0,15 = 80% . Αυτό σημαίνει πως η πιθανότητα να προκλήθηκε το ατύχημα λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών είναι 80%.

Τα Bayesian Networks προσφέρουν μια γραφική αναπαράσταση του ζητήματος, που αναδεικνύει την αλληλεξάρτηση των μεταβλητών και των τρόπων που επηρεάζονται. Αφορά κυρίως μια προσομοίωση της λογικής «τι θα συμβεί εάν» και σε συνέχεια αναγνωρίζει τους πιο κρίσιμους παράγοντες μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας ( Sensitivity Analysis). Κατά καιρούς τα Bayesian έχουν ερευνηθεί και έχουν αξιολογηθεί, ως προς τη χρησιμότητα τους και έχουν αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο σε πολύπλοκα και συνεχώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Αναφορές από τη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να γίνουν στα ερευνητικά έργα των Kabir et al (2019) και Wang et al (2018). όπου ερευνάται η αποδοτικότητα των τεχνικών Bayesian, οι οποίοι τα εφάρμοσαν και σε αναλύσεις για στον κατασκευαστικό τομέα. Η χρήση τους είναι πιο συνηθισμένη σε βιομηχανικά και κατασκευαστικά έργα και σε συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες όπου οι πολλοί παράγοντες επηρεάσουν συνεχώς το περιβάλλον που ερευνάται.

**Event Tree Analysis (ETA) & Fault Tree Analysis (FTA):**

Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι αν και αποτελούν εργαλεία «ημιποσοτικά» χαρακτηρίζονται και ως ποσοτικά εφόσον η ανάλυση τους αποτελείται μόνο από αριθμητικά δεδομένα. Μέσω των συγκεκριμένων τεχνικών, αναλύεται η εξέλιξη ενός συμβάντος. Εξετάζεται πώς μέσα από διαφορετικές στρατηγικές και αποφάσεις μπορούν να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα, από ασφαλή μέχρι καταστροφικά. Ξεκινώντας από το αρχικό γεγονός εξετάζονται οι πιθανές διαδρομές εξέλιξης σε μορφή δέντρου. Τα κύρια βήματα των τεχνικών είναι :

1) Προσδιορισμός του αρχικού γεγονότος
2) Αναγνώριση των επόμενων διαδοχικών συμβάντων
3) Κατασκευή του δέντρου γεγονότων
4) Απόδοση πιθανοτήτων (βασισμένα σε εκτιμήσεις και ιστορικά δεδομένα)
5) Υπολογισμός πιθανοτήτων τελικών εκβάσεων

Η χρήση των συγκεκριμένων τεχνικών προτιμάται σε μεγάλα τεχνικά έργα, στη βιομηχανία και σε επικίνδυνες εγκαταστάσεις με χημικά, καύσιμα, πυρηνικά κ.α. Οι τεχνικές FTA και ETA όπως φαίνεται και στο έργο των Saffar & Ezzat (2020), είναι ικανές να εξετάζουν την εξέλιξη των γεγονότων, αποτυπώνοντας τις πιθανές διαδρομές και τα τελικά αποτελέσματα. Οι μέθοδοι FTA και ETA είναι ευέλικτες μέθοδοι και συνδυάζονται με άλλες μεθόδους ποσοτικές και ποιοτικές, ώστε να προσφέρουν πιο ολοκληρωμένες και ρεαλιστικές εκτιμήσεις κινδύνων.

**Ανάλυση Ευαισθησίας:**

Η ανάλυση Ευαισθησίας είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για να καθορίσουν οι μελετητές πως οι μεταβλητές που εισέρχονται στο μοντέλο μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Ταυτόχρονα μπορεί να βοηθήσει να αναγνωριστούν ποιες μεταβλητές είναι αυτές που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το αποτέλεσμα, προσφέροντας την δυνατότητα στον μελετητή να δώσει προτεραιότητα στους μεγαλύτερους κινδύνους. Κατά τη χρήση της μεθόδου αρχικά γίνεται ο καθορισμός της μεταβλητής που καθορίζει τον στόχο. Έπειτα επιλέγονται οι μεταβλητές εισόδου, οι οποίες αφορούν τους κινδύνους που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια αλλάζουν οι τιμές των μεταβλητών εντός των προκαθορισμένων ορίων και αξιολογούνται οι επιδράσεις στο τελικό αποτέλεσμα.

Η χρησιμότητα της τεχνικής αυτής είναι σε περιπτώσεις όπου τα συστήματα είναι πολύπλοκα και οι μεταβλητές διασυνδέονται μεταξύ τους με πολύπλοκες και πολυπληθείς σχέσεις. Η Ανάλυση της Ευαισθησίας χρησιμοποιείται με αναλύσεις παράγωγων και σεναρίων, καθώς και αναλύσεις τύπου «What if» για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, όπως και στην κατανόηση του βαθμού που επηρεάζουν οι μεταβλητές το αποτέλεσμα.

**Fuzzy logic:**

Είναι μια μέθοδος ποσοτική η οποία αναπτύχθηκε από τον Lotfi Zadeh το 1965, με σκοπό να ποσοτικοποιηθούν οι καταστάσεις ασάφειας και αβεβαιότητας σε ένα περιβάλλον που ερευνάται. Αντί οι καταστάσεις να χαρακτηρίζονται από τις δυαδικές λογικές προσεγγίσεις (ναι, όχι , σωστό, λάθος κτλ.) , η Fuzzy logic προσδίδει και ενδιάμεσες τιμές μεταξύ τους, προσφέροντας μια διαφορετική αντιμετώπιση σε πολύπλοκες καταστάσεις. Η χρήση της ενδείκνυται σε καταστάσεις όπου τα δεδομένα που υπάρχουν είναι αναξιόπιστα και ανεπαρκή. Σύμφωνα με τους Kabir & Hasin (2011) , η τεχνική Fuzzy logic μετατρέπει τις ποιοτικές κρίσεις σε ποσοτικές τιμές, ενσωματώνοντας τις απόψεις ειδικών στα ποσοτικά μοντέλα , και δίνει τη δυνατότητα

στον μελετητή να χειρίζεται αβέβαιες και ασαφείς μεταβλητές. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής, αρχικά ορίζονται οι μεταβλητές και έπειτα δίνονται οι ενδιάμεσες τιμές (Fuzzification). Στη συνέχεια ορίζονται οι κανόνες στις πιθανές εκβάσεις και υπολογίζονται οι κίνδυνοι σε μαθηματικούς συντελεστές.

**Proportional Risk Assessment Technique (PRAT):**

Η τεχνική αξιολόγησης αναλογικού κινδύνου αποτελεί τεχνική ποσοτικής ανάλυσης η οποία χρησιμοποιεί ιστορικά και στατιστικά δεδομένα για να υπολογίζει το ρίσκο που προκύπτει. Το ρίσκο υπολογίζεται με την εξίσωση R = P x S x Fr , όπου η μεταβλητή «P» αφορά την πιθανότητα, η μεταβλητή «S» αναφέρεται στην κρισιμότητα και «Fr» αποτελεί η συχνότητα εμφάνισης του κινδύνου. Οι τρείς αυτοί παράγοντες λαμβάνουν τιμές από μηδέν έως δέκα με την τελική τιμή που παράγει η εξίσωση να παράγει μια τιμή Risk Value από μηδέν έως χίλια. Η τεχνική ομαλοποιεί και βαθμολογεί τα δεδομένα που μπορούν στην σειρά τους είναι δυνατό να αξιολογηθούν και να ιεραρχηθούν. Τα δεδομένα εξόδου της τεχνικής μπορούν να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για άλλες τεχνικές και άλλα εργαλεία ποσοτικής εκτίμησης, όπως Fuzzy Topsis, που θα οδηγήσουν σε αποτελέσματα και συμπεράσματα για την εκάστοτε μελέτη περίπτωσης. (Koulinas et al. 2019).

**Expected Monetary Value – EMV:**

Η Expected Monetary Value (αναμενόμενη χρηματική αξία), αποτελεί σημαντικό εργαλείο της εκτίμησης ρίσκου στον τομέα της διαχείρισης έργων. Χρησιμοποιείται για να παρουσιάζει τα πιθανά αποτελέσματα αποφάσεων, βοηθώντας τους μελετητές να εκτιμούν το κόστος των κινδύνων και του ρίσκου που συσχετίζονται με αυτές, ώστε να λαμβάνουν μέτρα και στρατηγικές. (Harahap L., 2023). Χρησιμοποιείται για τη λήψη αποφάσεων, για τον υπολογισμό «απρόβλεπτων» εξόδων αλλά και για τον καθορισμό των κινδύνων που θα χρειαστεί να δοθεί περισσότερη σημασία. Η EMV υπολογίζεται μέσω της πιθανότητας και της συνέπειας.

$$EMV = Probability \times Impact$$

Όπου, η πιθανότητα εκφράζεται ως ποσοστό και η συνέπεια μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Σε περίπτωση πολλών σεναρίων υπολογίζεται το Συνολικό EMV το οποίο είναι το άθροισμα των επιμέρους EMV. Η μέθοδος παρουσιάζει μια καθαρή αριθμητική εικόνα του ρίσκου και ενισχύει τον στρατηγικό σχεδιασμό. Παράλληλα στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στα δεδομένα εισόδου και στην υπόθεση ότι οι πιθανότητες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και τα σενάρια είναι απόλυτα.

## 4.3 Μοντέλα Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

Τα μοντέλα Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου η εκτίμηση κινδύνου δεν είναι μονοδιάστατη (Πιθανότητα x Κρισιμότητα) αλλά συνδυάζει και άλλες παραμέτρους, περιβαλλοντικές , τεχνικές, οικονομικές κ.α.

Μια από τις τεχνικές είναι η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP) η οποία αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980) και βασίζεται στην ιεραρχική δομή κριτηρίων και στη σύγκριση αυτών ανά ζεύγη ώστε να προσδιοριστεί η σχετική βαρύτητα του κάθε παράγοντα.

Η μέθοδος TOPSIS η οποία παρουσιάστηκε αρχικά από τους Hwang and Yoon(1981) η οποία χρησιμοποιείται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων με πλήθος

στόχων οι οποίοι μπορεί να είναι αντιφατικοί και να συγκρούονται μεταξύ τους. Αναλύει, συγκρίνει και αξιολογεί τις εναλλακτικές περιπτώσεις, με σκοπό την επιλογής της βέλτιστης λύσης συγκριτικά με τα κριτήρια που θέτει ο μελετητής. Ταυτόχρονα υπολογίζει την χειρότερη και την ιδανική λύση προσφέροντας ένα φάσμα περιπτώσεων στον μελετητή.

Αντίστοιχα η τεχνική της PROMETHEE η οποία αναπτύχθηκε από τους Brans&Vinke (1985) η οποία είναι μια μέθοδος που αξιολογεί ένα αριθμό ενεργειών που επιλέγονται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, συνήθως αντικρουόμενων μεταξύ τους. Η μέθοδος PROMETHEE χρησιμοποιώντας μαθηματικές συναρτήσεις, εκφράζει πόσο ιδανική είναι η μια εναλλακτική λύση έναντι κάποιας άλλης, ως προς τα κριτήρια που θέτει ο ερευνητής. Έτσι ο ερευνητής έχει ξεκάθαρη εικόνα του προβληματισμού, ώστε να μπορεί να επιλέξει την βέλτιστη πρακτική.

Τα παραπάνω μοντέλα συμβάλλουν στην συστηματική αξιολόγηση πολύπλοκων ζητημάτων και στην ενίσχυση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και στρατηγικών.

## 4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ποσοτικών μεθόδων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των ποσοτικών μεθόδων.

- Μειώνουν την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης κρίσης μέσω της ποσοτικοποίησης των μεταβλητών.
- Υπολογίζουν την πιθανότητα μιας έκβασης με ακρίβεια
- Προσφέρουν την δυνατότητα της ανάλυσης ενός συνδυασμού παραγόντων ταυτόχρονα και όχι μεμονωμένα.
- Είναι κατάλληλα για μεγάλης κλίμακας έργα
- Προσφέρουν σταθερά αποτελέσματα, αφού η αναπαραγωγή από τρίτους δεν επηρεάζεται από την προσωπική κρίση και εμπειρία.

Στα μειονεκτήματα κυρίως συγκαταλέγονται:

- Η ανάγκη χρήσης υπολογιστικών λογισμικών, το οποίο μπορεί να αυξήσει το κόστος
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα
- Η ανάγκη της συλλογής δεδομένων αξιόπιστων που συχνά είναι δυσεύρετα
- Πολυπλοκότητα κάποιων τεχνικών π.χ. Bayesian Networks
- Ευαισθησία των μοντέλων σε λάθος υποθέσεις και μεταβλητές

Η χρήση των ποσοτικών μεθόδων μπορεί να αποτελεί μια δύσκολη απόφαση για τους μη έμπειρους μελετητές, ωστόσο μπορούν να αποτελέσουν σημαντικά και ισχυρά εργαλεία ( Hilson, D., 2020).

# Κεφάλαιο 5: Ο ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης στην εκτίμηση κινδύνων

## 5.1 Εισαγωγή

Η Τεχνητή Νοημοσύνη-AI εξελίσσεται συνεχώς, προσφέροντας στους χρήστες ολοένα και περισσότερες δυνατότητες στη συλλογή, στην ανάλυση και στην επεξεργασία των πληροφοριών. Στην περίπτωση της διαδικασίας της εκτίμησης κινδύνων, μπορεί να συμβάλλει στην συλλογή πληροφοριών, στην ανάλυση και πρόβλεψη κινδύνων και στην λήψη αποφάσεων. Οι δυνατότητες που παρέχει ποικίλουν καθώς η τεχνητή νοημοσύνη (AI) μπορεί να επεξεργαστεί και να αυτοματοποιήσει διαδικασίες, όπως και να καταλήξει σε συμπεράσματα με μεγάλη ταχύτητα, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους (Russel & Norvig, 2021). Η χρήση της AI τεχνολογίας μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο εξοικονόμησης χρόνου και κόστους για τον ερευνητή. Παρέχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται μεγάλο μέγεθος πληροφορίας και να αναγνωρίζει μοτίβα και σχέσεις μεταξύ τους.

Με τη χρήση των μεθόδων της μηχανικής μάθησης και της NLP – Natural Language Processing, η AI μπορεί να αναλύσει κείμενα γραμμένα από το ανθρώπινο χέρι και να παρουσιάζει δεδομένα τα οποία μπορούν να δομηθούν και ποσοτικοποιηθούν πιο εύκολα από τον άνθρωπο. Μέσω της χρήσης αισθητήρων και συσκευών μπορούν να δημιουργηθούν προγνωστικά μοντέλα επικίνδυνων συνθηκών. Για παράδειγμα μέσω αισθητήρων δονήσεων, ήχου, καιρικών συνθηκών, ρύπανσης κ.α. μπορεί να δημιουργηθεί ένα σενάριο που να προειδοποιεί για τις επικίνδυνες συνθήκες εργασίας που προκύπτουν σε πραγματικό χρόνο, ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα.

## 5.2 Εργαλεία και τεχνικές AI

**Machine Learning:**

Η μηχανική μάθηση αποτελεί μέθοδο της τεχνητής νοημοσύνης και βασίζεται στη δημιουργία αλγορίθμων που δίνουν την δυνατότητα εκμάθησης, μελετώντας τα δεδομένα εισόδου, χωρίς να απαιτείται άμεσος προγραμματισμός (Mitchell, 1997). Οι αλγόριθμοι μπορούν επίσης να επεξεργάζονται ιστορικά δεδομένα και να εντοπίζουν συσχετίσεις μεταξύ των παραγόντων που μπορεί να μην είναι εύκολα διακριτές από τον άνθρωπο (Zhang et al, 2019)

**NLP-Natural Language Processing:**

Η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας, επιτρέπει στους υπολογιστές να αναλύουν και να κατανοούν δεδομένα που βρίσκονται σε μορφή φυσικής γλώσσας, όπως αναφορές συμβάντων σε εργοτάξια και γραπτές αξιολογήσεις. (Jurafsky & Martin, 2023). Η χρήση των NLP, επιτρέπει την αξιοποίηση όγκου δεδομένων, ο οποίος δεν είναι δομημένος και απαιτεί πολλές ώρες επεξεργασίας και ανάλυσης από τον ανθρώπινο παράγοντα.

**Predictive Analysis:**

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί διαδικασία ανάλυσης ιστορικών δεδομένων σε συνδυασμό με την υφιστάμενη κατάσταση με σκοπό την πρόβλεψη μελλοντικών κινδύνων. Η τεχνική βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα και σε αλγόριθμους Machine Learning (Shmueli & Koppius, 2011). Με τη βοήθεια της μεθόδου οι διαχειριστές

μπορούν να προλαμβάνουν τον κίνδυνο μέσω της έγκαιρης πρόβλεψης κρίσιμων παραγόντων που επηρεάζουν την ασφάλεια.

Η αξιοποίηση της AI, ενισχύει την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης και της πρόβλεψης κινδύνων, της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και της ανίχνευσης επικίνδυνων συνθηκών, συμβάλλοντας στην βελτίωση της ασφάλειας και της συνολικής απόδοσης του προγραμματισμού των έργων.

## 5.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνητής νοημοσύνης η δυνατότητα της επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, αλλά και η ταχύτερη ανάλυση τους συγκριτικά με τον άνθρωπο. Επίσης, επιτρέπει να αυτοματοποιούνται διαδικασίες και να ανιχνεύονται έγκαιρα κίνδυνοι, συμβάλλοντας σημαντικά στην διαδικασία της λήψης αποφάσεων.

Παρά τα πολλαπλά οφέλη της AI, υπάρχουν όμως και περιορισμοί οι οποίοι προκύπτουν από τη φύση της, καθώς χρειάζεται να επεξεργάζεται δεδομένα ακριβείας, ώστε να παράγονται αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον για την αποτελεσματική χρήση της, η εξειδίκευση στην λειτουργία της AI είναι απαραίτητη όπως και η κατανόηση των αλγορίθμων που την συνιστούν. Στους περιορισμούς επίσης είναι και το αυξημένο κόστος εφαρμογής τους, καθώς η αναγνώριση κινδύνων σε πραγματικό χρόνο απαιτεί εξειδικευμένα μηχανήματα και αισθητήρες τα οποία αυξάνουν σημαντικά το κόστος.

# Κεφάλαιο 6: Συνδυαστικές Μεθοδολογίες στην Εκτίμηση Κινδύνων

Ταυτόχρονα με την αύξηση της πολυπλοκότητας των έργων, αυξάνεται και η ανάγκη για πιο ολοκληρωμένες προσεγγίσεις, που αποτυπώνουν καλύτερα τις ανάγκες για την εκτίμηση κινδύνων. Με αυτή την πρόφαση, οι συνδυαστικές προσεγγίσεις, με την επιλογή των ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων, προσφέρουν μια πολυδιάστατη κατανόηση των ζητημάτων που προκύπτουν. Οι συνδυαστικές μέθοδοι δεν χαρακτηρίζονται ως απλή παράθεση δύο προσεγγίσεων, αλλά ως μια μεθοδολογική στρατηγική που αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα κάθε μιας, ενώ ταυτόχρονα αντισταθμίζει τους περιορισμούς τους (Johnson& Onwuegbuzie, 2004). Οι συνδυαστικές μέθοδοι, προσφέρουν μια καλύτερη εικόνα του τρόπου που συνδέονται και εξαρτώνται τα μαθηματικά δεδομένα με τις εμπειρικές κρίσεις (Ostlund et al.,2011).

Με τις ποσοτικές μεθόδους να μπορούν να προσφέρουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τις ποιοτικές να προσφέρουν το καλύτερο βάθος κατανόησης του προβλήματος, δίνεται η δυνατότητα στους ερευνητές να καταλήγουν σε πιο τεκμηριωμένες και πιο αποτελεσματικές εκτιμήσεις. Σύμφωνα με τους Jonson & Onwuegbuzie (2004), «οι συνδυαστικές μέθοδοι μπορούν αναδεικνύουν και ενισχύουν τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων, αναγνωρίζοντας την σημασία του περιβάλλοντα χώρου, αλλά και την σημαντικότητα της ανθρώπινης εμπειρίας». Στον τομέα των κατασκευαστικών έργων, ο εμφανής διαχωρισμός μεταξύ των χαρακτηριστικών των κινδύνων δημιουργεί την ανάγκη για την συνδυαστική προσέγγιση τους. Κάποιοι κίνδυνοι παρουσιάζουν εμφανή ποιοτικά χαρακτηριστικά που συντελούν κυρίως τον ανθρώπινο παράγοντα και άλλοι ποσοτικά χαρακτηριστικά που αποτελούν

μετρήσιμες επιδράσεις όπως κόστη και χρονικές καθυστερήσεις. Ο συνδυασμός των μεθόδων δεν αφορά συγκεκριμένους συνδυασμούς τεχνικών και μεθόδων, αλλά είναι στην κρίση του ερευνητή να επιλέξει τον καταλληλότερο συνδυασμό που θα περιγράφει καλύτερα το περιβάλλον που ερευνά και τις ιδιαιτερότητες του.

## 6.1 Κυριότεροι τύποι Συνδυαστικών μεθόδων

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συνδυαστικών προσεγγίσεων. Η διαφορά μεταξύ αυτών είναι η σειρά εφαρμογής και ο τρόπος ολοκλήρωσης των δύο μεθοδολογιών (Creswell, 2003)

**Διαδοχική Προσέγγιση (Sequential):**

Αρχικά αναπτύσσεται η ποιοτική ανάλυση και τα δεδομένα που παράγει αποτελούν δεδομένα εισόδου για την ποσοτική φάση. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου πραγματοποιείται μια αρχική αναγνώριση και ιεράρχηση των κινδύνων και σε συνέχεια δημιουργείται η ποσοτική ανάλυση μέσω προσομοιώσεων. Αυτή τη λογική σειρά θα ακολουθήσει και η παρούσα εργασία.

**Ταυτόχρονη Προσέγγιση (Concurrent):**

Η ποιοτική και η ποσοτική ανάλυση αναπτύσσονται παράλληλα και τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται και συνδυάζονται για να παραχθούν συμπεράσματα. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει την ύπαρξη δεδομένων που μπορούν να υποστηρίξουν και τις δύο φάσεις.

**Ενσωματωμένη Προσέγγιση ( Embedded):**

Όπου η μία μέθοδος ενσωματώνεται στην άλλη με δευτερεύοντα ρόλο. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις όπου τα ποιοτικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και την απόδοση βαρύτητας στις ποσοτικές μεταβλητές.

## 6.2 Παραδείγματα συνδυαστικών εφαρμογών

Στη διεθνή βιβλιογραφία οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στο συνδυασμό τεχνικών ποιοτικής αξιολόγησης με ποσοτικά μοντέλα και τεχνικές. Αυτό έχει ως σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας κατά την διαδικασία της εκτίμησης κινδύνων. Αυτό το είδος προσεγγίσεων επιτρέπουν την δυναμική ανάλυση των δεδομένων σε συνδυασμό με τις εμπειρικές γνώσεις και εφαρμόζονται ευρέως στον κατασκευαστικό τομέα όπου οι κίνδυνοι είναι πολυδιάστατοι και αλληλένδετοι.

**Συνδυασμός FMEA και Monte Carlo Simulation:**

Ο συνδυασμός αυτός, αποτελεί μια από τις πιο τεκμηριωμένες προσεγγίσεις συνδυαστικών μεθόδων και αξιοποιείται και από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος FMEA χρησιμοποιείται για την βαθμολόγηση και ιεράρχηση των κινδύνων και τα αποτελέσματα της χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη σεναρίων μέσω της Monte Carlo. Όπως αναφέρουν οι Liu et al.(2013), ο συνδυασμός αυτός βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία της αξιολόγησης των κινδύνων και ταυτόχρονα επιτρέπει την μετάβαση από στατικές μελέτες σε δυναμικά πιθανοτικά μοντέλα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και στην έρευνα των Patil&Patil (2025)

**Συνδυασμός Fuzzy Logic και Πολυκριτηριακές Μέθοδοι (AHP/TOPSIS):**

Άλλος σημαντικός συνδυασμός που προκύπτει είναι η θεωρία της Ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic) μαζί με πολυκριτηριακές μεθόδους (AHP ή TOPSIS). Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση της αβεβαιότητας και των ασαφών μεταβλητών. Η χρήση τους στηρίζεται σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα χαρακτηρίζονται ασαφείς και υποκειμενικά (Kabir & Hasin, 2011). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή Fuzzy AHP και PRAT για την εκτίμηση των κινδύνων υγείας και ασφάλειας, όπου συνδυάζεται η εμπειρία με τις ποσοτικές εκτιμήσεις. Οι ποσοτικές εκτιμήσεις στηρίζονται σε ιστορικά δεδομένα και τα αποτελέσματα λόγω αυτού μπορούν να χαρακτηρίζονται ως ασφαλή και αξιόπιστα (Koulinas G., et al, 2019).

**Συνδυασμός Bayesian Networks και Πιθανοτική Ανάλυση:**

Εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των κινδύνων είναι πολυπληθείς και πολύπλοκες και η δυναμική παρακολούθηση τους είναι απαραίτητη. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τα Bayesian Networks σε συνδυασμό με τεχνικές πιθανοτικής ανάλυσης και προσομοίωσης, αφού επιτρέπουν την ανάδειξη της αιτιότητας του αποτελέσματος μεταξύ των μεταβλητών (Khakzad et al.,2013).

**Συνδυασμός Bow-Tie και Monte Carlo:**

Η Bow-tie τεχνική δημιουργεί την οπτική αναπαράσταση των αιτιών και των συνεπειών του κρίσιμου γεγονότος ενώ ταυτόχρονα η Monte Carlo Simulation ποσοτικοποιεί τις πιθανότητες των διαδρομών κινδύνου. Ο συνδυασμός αυτός κυρίως εφαρμόζεται σε συνθήκες υψηλής επικινδυνότητας (Khakzad et al.,2012).

**Συνδυαστικές μέθοδοι και Τεχνητή Νοημοσύνη:**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η αυξημένη χρήση των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στον τομέα της εκτίμησης κινδύνων και ρίσκου. Χρησιμοποιούνται τεχνικές και εργαλεία που βοηθούν την τεχνητή νοημοσύνη να αναλύει δεδομένα και να αποκαλύπτει εξαρτήσεις μεταξύ μεταβλητών, με σκοπό την πρόβλεψη αλλά και την αντιμετώπιση κινδύνων (Zhang et al, 2020). Οι τεχνικές της Predictive Analysis και Machine Learning χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις συμβατικές μεθόδους για να βελτιώνουν την ακρίβεια των προβλέψεων στη διαχείριση των κινδύνων

Συγκεκριμένα στον κατασκευαστικό τομέα, οι συνδυαστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση κινδύνων σε σύνθετα και πολύπλοκα συστήματα. Οι συνδυαστικές προσεγγίσεις καλούνται να αναλύουν μεγάλο όγκο δεδομένων με αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις που επηρεάζουν την αξιοπιστία και την ρεαλιστική απόδοση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που παράγουν, αφορούν την ασφάλεια, το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και την τεχνική απόδοση των έργων, με σκοπό την δημιουργία μοντέλων ανάλυσης που υποστηρίζουν την διαδικασία λήψης αποφάσεων.

## 6.3 Πλεονεκτήματα Συνδυαστικής Ανάλυσης Συγκριτικά με τις Μεμονωμένες Προσεγγίσεις

Η απάντηση του πρώτου ερευνητικού ζητήματος, συνάδει με τη σύγκριση των τριών προσεγγίσεων. Οι μεμονωμένες ποιοτικές μέθοδοι φαίνεται να υστερούν ως προς την αντικειμενικότητα και την αριθμητική τεκμηρίωση ενώ οι ποσοτικές αντίστοιχα δυσκολεύονται να αποτυπώνουν τους κινδύνους που δεν χαρακτηρίζονται από ποσοτικά δεδομένα (Ward & Chapman, 2003). Η συνδυαστική προσέγγιση μπορεί να αντιμετωπίζει τους περιορισμούς των υπόλοιπων δύο προσεγγίσεων και να αποδίδει πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Συγκεκριμένα, προσφέρει:

- Καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των κινδύνων
- Καλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων
- Αποτελεσματικές σε πολύπλοκα και πολυδιάστατα περιβάλλοντα
- Διευκόλυνση στη λήψη αποφάσεων

Αντιθέτως, όμως, παρά τα πολλά οφέλη που προσφέρει, χαρακτηρίζεται και από περιορισμούς όσον αφορά την εφαρμογή τους κυρίως. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- Απαιτούν περισσότερους πόρους και χρόνο
- Πολυπλοκότητα διαχείρισης και ανάλυσης του πλήθους των δεδομένων
- Δυσκολία ενσωμάτωσης και διασύνδεσης των ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων μεταξύ τους
- Απαιτούν γνώσεις και δεξιότητες

# Κεφάλαιο 7: Προτεινόμενο Πλαίσιο

## 7.1 Αναγκαιότητα Δημιουργίας του Συνδυαστικού Πλαισίου

Η δημιουργία του πλαισίου προκύπτει από την αξιολόγηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Μέσω της ανασκόπησης προκύπτουν οι προβληματισμοί και οι αδυναμίες που αναδεικνύουν την αναγκαιότητα της ανάπτυξης του.

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας της δεκαπενταετίας 2000 -2015 που διατυπώνεται στην διδακτορική διατριβή του Μαρχαβίλα Π. (Marhavilas,2015), παρουσιάζει ευρήματα από την μελέτη μεγάλου πλήθους ερευνών, που αφορούν τις μεθόδους εκτίμησης και τη χρήση τους στους διάφορους τομείς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι ποσοτικές μέθοδοι κυριαρχούν συγκριτικά με τις ποιοτικές και τις υβριδικές σε ποσοστό 65,6% στην συνολική βιβλιογραφία. Μετά ακολουθούν οι ποιοτικές με ποσοστό 27,7% και τέλος οι υβριδικές με ποσοστό 6,7%. Για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, αποδεικνύεται η μεγάλη έλλειψη στη ανάπτυξη υβριδικών προσεγγίσεων και εφαρμογών στη βιβλιογραφία. Το χαμηλό ποσοστό η μελέτη το αποδίδει στην αυξημένη πολυπλοκότητα αλλά και στην έλλειψη εφαρμόσιμων πλαισίων.

Αντίστοιχα και στη ίδια κατεύθυνση αναπτύσσεται και η μελέτη των Su&Khallaf(2022), η οποία μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

- Υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης πλαισίου που να επιχειρεί την εκτίμηση κινδύνων ως ολοκληρωμένο σύστημα, αντί μεμονωμένων εφαρμογών όπως συνηθίζεται
- Χρειάζεται να αναπτυχθούν νέες μεθοδολογίες που να βελτιώνουν την ακρίβεια των ποσοτικών εκτιμήσεων, μέσω της χρήσης πραγματικών δεδομένων.
- Αναγκαία είναι επίσης, η ανάπτυξη μεθοδολογιών που να ενσωματώνουν την λήψη αποφάσεων των εμπλεκόμενων.

Σύμφωνα με τις παραπάνω έρευνες, στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει έλλειψη στις εφαρμογές συνδυαστικών προσεγγίσεων στην εκτίμηση κινδύνων εκ των οποίων σημαντικό μέρος των ερευνών παραμένει σε θεωρητικό επίπεδο. Επίσης, όπως αναφέρεται, δεν υπάρχει κάποιο ολοκληρωμένο πλαίσιο το οποίο να μπορεί να συνδυάζει την ποιοτική αξιολόγηση των κινδύνων και μαζί με την ποσοτικοποίηση τους να αναπτύσσει πιθανοτικές προσομοιώσεις και σενάρια. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το ερευνητικό κενό με την ανάπτυξη ενός συνδυαστικού πλαισίου που να είναι πρακτικά εφαρμόσιμο και προσβάσιμο για τους διαχειριστές.

Η εργασία επιδιώκει να αξιοποιήσει την εμπειρική γνώση σε συνδυασμό με την ποσοτική αποτύπωση και να παράγει αποτελέσματα που υποστηρίζουν την διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, το μοντέλο εκτίμησης πρακτικά θα παρουσιάζει ένα λειτουργικό υπολογιστικό μοντέλο, με ένα δυναμικό πίνακα αποτελεσμάτων που θα παρουσιάζει αριθμητικά δεδομένα και διαγράμματα. Μέσω του πίνακα αποτελεσμάτων θα μπορεί ο διαχειριστής να αξιολογήσει τα διαφορετικά σενάρια και να δημιουργήσει στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου.

Η μεμονωμένη εφαρμογή μεθόδων, είτε ποιοτικών είτε ποσοτικών, παρόλα τα πλεονεκτήματα τους παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς. Ο συνδυασμός αυτών όπως προκύπτει και από τη βιβλιογραφία, δημιουργεί ένα πιο ολοκληρωμένο και λειτουργικό πλαίσιο διαχείρισης κινδύνων. Με αυτή τη λογική προτείνεται και το πλαίσιο που αποσκοπεί στην ενσωμάτωση της εμπειρικής γνώσης των ειδικών μαζί με την αριθμητική προσομοίωση της αβεβαιότητας.

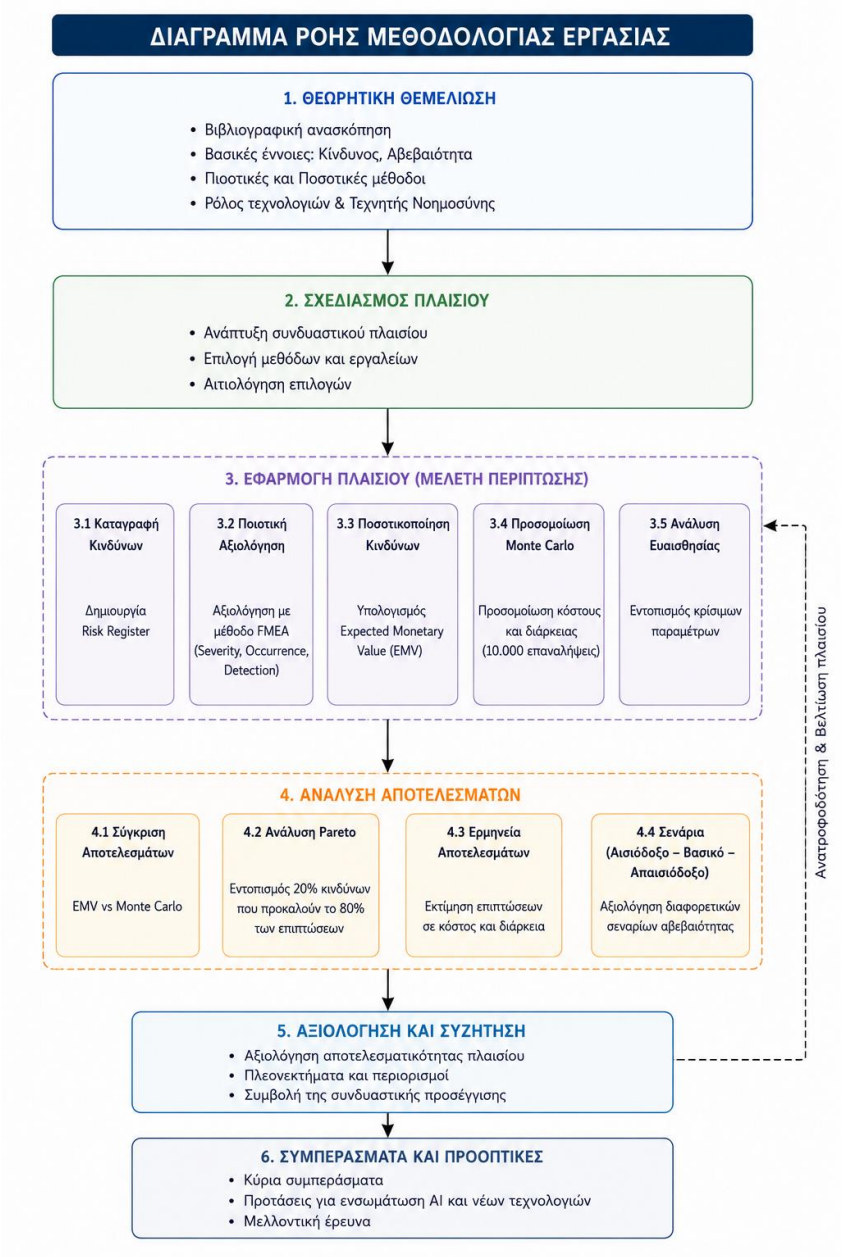
Η ανάπτυξη του πλαισίου γίνεται στα πλαίσια που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα όπως το ISO 31000, όπως και σε σύγχρονες πρακτικές που εφαρμόζονται στον κατασκευαστικό τομέα. Το μοντέλο σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Excel με σκοπό να χρησιμοποιείται ως εργαλείο υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων.

Οι στόχοι του προτεινόμενου πλαισίου είναι :

- Αναγνώριση κινδύνων
- Αξιολόγηση της πιθανότητας και της σοβαρότητας
- Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας
- Προσομοίωση σεναρίων
- Ιεράρχηση κρίσιμων κινδύνων
- Υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων

## 7.2 Δομή και Αρχιτεκτονική Πλαισίου

Η συνολική μεθοδολογία και ροή εργασιών του πλαισίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Το διάγραμμα ροής αποτυπώνει τα στάδια δημιουργίας του πλαισίου από την θεωρητική φάση έως και την εφαρμογή του, την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του.




**Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής της δομής της εργασίας**

Η μεθοδολογία εξελίσσεται σε έξι στάδια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους και δρουν συμπληρωματικά με σκοπό την παραγωγή αποτελεσμάτων. Κάθε στάδιο θα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του πλαισίου και θα δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα εκτίμησης κινδύνων.

Το **πρώτο στάδιο**, αφορά την τη θεωρητική θεμελίωση. Πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου αναπτύσσονται οι βασικοί ορισμοί, και οι ποιοτικές, ποσοτικές και συνδυαστικές μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων. Επίσης αναλύεται και η τεχνολογία AI μαζί με τις τεχνικές και τα εργαλεία που την συνοδεύουν. Το πρώτο στάδιο αποτελεί τη θεωρητική βάση στην οποία θα αναπτυχθεί το προτεινόμενο πλαίσιο.

Στο **δεύτερο στάδιο** πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του πλαισίου. Καθορίζεται η σειρά εφαρμογής των μεθόδων, τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν και το λογισμικό στο οποίο θα αναπτυχθεί.

Στο **τρίτο στάδιο**, το πλαίσιο εφαρμόζεται σε κατασκευαστικό στάδιο. Η εφαρμογή του γίνεται σε πέντε φάσεις οι οποίες παράγουν τα ζητούμενα αποτελέσματα. Αρχικά αναγνωρίζονται οι πιθανοί κίνδυνοι με τη χρήση ποιοτικών μεθόδων που βασίζονται στην βιβλιογραφία, την εμπειρία και την κρίση ειδικών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα μητρώο κινδύνων και με την εφαρμογή της FMEA ιεραρχούνται μέσω του δείκτη RPN. Έπειτα ακολουθεί η ποσοτικοποίηση των κινδύνων, όπου τα ποιοτικά δεδομένα μετατρέπονται σε ποσοτικά στοιχεία, με σκοπό τη χρήση τους σε μαθηματικά και στατιστικά μοντέλα. Με τη χρήση της Monte Carlo και EMV, υπολογίζονται οι οικονομικές και χρονικές επιπτώσεις στο έργο στα διαφορετικά σενάρια. Τέλος με τη χρήση της Ανάλυσης Ευαισθησίας, εντοπίζονται οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα.

Στο **τέταρτο στάδιο** πραγματοποιείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Μέσω της δημιουργίας της καρτέλας αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται τα τελικά δεδομένα σε μορφή κατανομών και ιστογραμμάτων σε διαφορετικά σενάρια (Best-Base-Worst-Stress). Υπολογίζονται πιο πιθανές τιμές, μέσες τιμές και τιμές ακραίων σεναρίων για το κόστος και τον χρόνο αποπεράτωσης του έργου με σκοπό οι διαχειριστές του έργου να :

- Ιεραρχήσουν κινδύνους
- Επιλέξουν στρατηγικές αντιμετώπισης
- Πραγματοποιήσουν κατανομή πόρων
- Σχεδιάσουν και εφαρμόσουν μέτρα πρόληψης
- Δημιουργήσουν εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης

Στο **πέμπτο στάδιο**, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του πλαισίου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη βιβλιογραφία με σκοπό την εξέταση της αξιοπιστίας τους. Επίσης παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί του πλαισίου και αναδεικνύεται η σημαντικότητα της συνδυαστικής προσέγγισης συγκριτικά με τις μεμονωμένες μεθόδους.

Στο **έκτο στάδιο** συνοψίζονται τα συνολικά συμπεράσματα της εργασίας. Δίνονται οδηγίες για την μελλοντική εργασία και την ανάπτυξη του πλαισίου ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία και εξετάζεται η προοπτική της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας AI .

## 7.3 Επιλογή και Αιτιολόγηση χρήσης Μεθόδων του Προτεινόμενου Πλαισίου.

Το προτεινόμενο πλαίσιο βασίστηκε στην ανάγκη της δημιουργίας ενός εύχρηστου και αξιόπιστού μοντέλου εκτίμησης κινδύνων. Η επιλογή των μεθόδων και των τεχνικών, πραγματοποιήθηκε με βασικά κριτήρια την δυνατότητα εφαρμογής τους σε κατασκευαστικά έργα και την αξιοπιστία τους στον επιστημονικό κλάδο και την διεθνή βιβλιογραφία.

Οι επιλεγμένοι μέθοδοι συνδυάζονται και εφαρμόζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η ποιοτική ανάλυση να μπορεί να εκφραστεί σε ποσοτικά δεδομένα και να παράγει τεκμηριωμένα αποτελέσματα. Η FMEA, EMV, Monte Carlo Simulation και Sensitivity Analysis καλύπτουν τα διαφορετικά στάδια της εκτίμησης κινδύνου που αναπτύχθηκαν στην δομή του πλαισίου και ο συνδυασμός τους επιτρέπει την αντιμετώπιση περιορισμών που προκύπτουν όταν αυτές εφαρμόζονται μεμονωμένα.

Η μέθοδος FMEA μαζί με την εμπειρική γνώση επιλέχθηκε για το αρχικό στάδιο αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων. Η FMEA στη βιβλιογραφία εφαρμόζεται σε βιομηχανικά συστήματα αλλά και σε τεχνικά έργα, όπου με το δείκτη RPN αξιολογεί τους κινδύνους και βοηθάει στη λήψη μέτρων και την ανάθεση πόρων. Η χρήση της δεν απαιτεί δεδομένα εισόδου και αξιοποιεί την εμπειρία ειδικών για να παράγει αποτελέσματα. Η επιλογή της μεθόδου αφορά τη χρήση της στο αρχικό στάδιο αξιολόγησης και δεν αποτελεί αποκλειστική μέθοδος του πλαισίου.

Η επιλογή της μεθόδου EMV αφορά την ποσοτικοποίηση του βαθμού της επίδρασης των κινδύνων στον προϋπολογισμό του έργου. Η EMV υπολογίζει την αναμενόμενη οικονομική συνεισφορά του κάθε κινδύνου μέσω της πιθανότητας εμφάνισης του και της οικονομικής επίπτωσης που παρουσιάζει. Τα αποτελέσματα της μεθόδου, διευκολύνουν την ιεράρχηση των κινδύνων και συνεισφέρουν στην δημιουργία στρατηγικών αποφάσεων.

Η Monte Carlo Simulation αποτελεί το εργαλείο που ενσωματώνει την αβεβαιότητα και ποσοτικοποιεί τα δεδομένα στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Ο τρόπος που λαμβάνει τις τυχαίες μεταβλητές στα σενάρια, επιτρέπουν τη δυναμική ανάλυση των μεταβλητών που επηρεάζουν το κόστος και τη χρονική διάρκεια. Μέσω της μεθόδου, υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης του κόστους και του χρόνου, όπως και οι πιθανότητες της εμφάνισης ακραίων σεναρίων.

Η Ανάλυση Ευαισθησίας, ενσωματώθηκε στο πλαίσιο, με σκοπό την παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Η χρήση της στοχεύει στην καλύτερη παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν τα δεδομένα εξόδου του πλαισίου και στην υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Το λογισμικό ανάπτυξης του πλαισίου του δίνει την ιδιότητα της απλότητας και της ευκολίας χρήσης του, χωρίς να του αναιρεί την αξιοπιστία του στην παραγωγή συμπερασμάτων. Η χρήση του αποτελεί εύκολη διαδικασία για μηχανικούς και στελέχη έργων, χωρίς να απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μεταβατικό στάδιο, καθώς από την έρευνα καταλήγουμε στην εφαρμογή. Το παραπάνω πλαίσιο που αναπτύχθηκε, θα εφαρμοστεί σε ένα έργο, μεν πλασματικό, αλλά με δεδομένα τα οποία ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες. Ο στόχος της εφαρμογής είναι να αξιολογηθεί η πρακτική λειτουργικότητα του πλαισίου και η αξιοπιστία του. Η εφαρμογή του πλαισίου

πραγματοποιείται με την ακολουθία των βημάτων που αποτυπώθηκαν, σε στοιχεία τα οποία προκύπτουν από μελέτες ερευνητών και από επίσημες στατιστικές αναλύσεις της Ε.Ε.

# Κεφάλαιο 8: Παρουσίαση Κατασκευαστικού έργου

## 8.1 Κριτήρια Επιλογής Κατασκευαστικού Έργου και Αιτιολόγηση

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου επιλέχθηκε υποθετικό κατασκευαστικό έργο το οποίο ορίζεται υπό συγκεκριμένα κριτήρια. Στόχος της επιλογής του έργου, είναι η δημιουργία ενός σεναρίου που θα μπορεί να αναδείξει τις δυνατότητες του πλαισίου και να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Κατά την επιλογή του κατασκευαστικού έργου τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη αφορούν :

- Διάρκεια : Είναι σημαντικό να υπάρχει αρκετά μεγάλη διάρκεια ώστε να επηρεάζεται και η πιθανότητα εμφάνισης των κινδύνων
- Πολυπλοκότητα : Η ταυτόχρονη εκτέλεση εργασιών αποτελεί παράγοντας που επίσης επηρεάζει την παρουσία κινδύνου.
- Κόστος : Αρκετά μεγάλο, ώστε οι μεταβολές να είναι κρίσιμες
- Αριθμός απασχολούμενων: Ικανός αριθμός ώστε να επηρεάζει τους κινδύνους Υ&Α
- Χώρος εγκατάστασης εργοταξίου : Η ύπαρξη εργοταξίου μέσα στον αστικό ιστό περιορίζει κατά πολύ τη δραστηριότητα στο εργοτάξιο και την ασφάλεια.

## 8.2 Περιγραφή Έργου

Με σκοπό να θέσουμε ένα πολύπλοκο ερώτημα ως προς τους κινδύνους του έργου, καταλήγουμε στο εξής έργο:

Κατασκευή ενός μεγάλου κτιρίου μεικτής χρήσης ( 20.000 m2) , μέσα στον αστικό ιστό. Ο χρόνος υλοποίησης ορίζεται σε δύο έτη και ο προϋπολογισμός ανέρχεται στα 25 εκατομμύρια ευρώ. Το εργοτάξιο απασχολεί περισσότερα από 50 άτομα ημερησίως (Τεχνικό προσωπικό, εργολάβοι, διοικητική υποστήριξη κλπ.). Η εκτέλεση πολλών εργασιών ταυτόχρονα είναι αυτονόητη και η πολυπλοκότητα των εργασιών προσδίδει στο έργο τον αυξημένο κίνδυνο, όσον αφορά την ασφάλεια, το χρονοδιάγραμμα και το συνολικό κόστος. Τα έργα αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από υπερβάσεις στο κόστος και στο χρονοδιάγραμμα, καθιστώντας τα ιδανικά για την πιλοτική εφαρμογή πλαισίου συνδυαστικής εκτίμησης.

**Πίνακας 2. Στοιχεία Κατασκευαστικού έργου.**

| Στοιχεία Έργου | Τιμές |
|---|---|
| Επιφάνεια | 20.000m$^2$ |
| Προϋπολογισμός | 25.000.000 € |
| Διάρκεια | 24 μήνες |
| Απασχολούμενοι | >50 άτομα / ημέρα |
| Τοποθεσία | Αστικός Ιστός |

Τα δεδομένα βασίζονται σε παραδοχές έργων αντίστοιχης κλίμακας, σύμφωνα με τον PMBOK (PMI,2021) και στοιχεία από κατασκευές της ΕΛΣΤΑΤ. Ως προς την Κατανομή Κόστους προκύπτει :

- Δομικά 45% - 11.250.000€
- Η/Μ 30% - 7.500.000€
- Οργάνωση εργοταξίου – ασφάλεια 10% - 2.500.000€
- Απρόβλεπτα 15% - 3.750.000€

Σύνολο = 25.000.000€

## 8.3 Φάσεις υλοποίησης του Έργου

Ξεκινώντας την διαδικασία της εφαρμογής, είναι σημαντικό να μελετήσουμε την φύση των εργασιών και να αναγνωρίσουμε τους πιθανούς κινδύνους. Έτσι από την φύση του έργου προκύπτει το εύρος των παρακάτω εργασιών :

**Πίνακας 3. Φάσεις Έργου**

| Φάση | Ποσοστό διάρκειας | Μήνες |
|---|---|---|
| Χωματουργικά & θεμελιώσεις | 15% | 3,6 |
| Φέρων οργανισμός | 25% | 6 |
| Κέλυφος & όψεις | 20% | 4,8 |
| Η/Μ εγκαταστάσεις | 25% | 6 |
| Τελειώματα & παράδοση | 15% | 3,6 |
| Σύνολο | 100% | 24 |

## 8.3 Αναγνώριση και Κατηγοριοποίηση Κινδύνων

Οι παραπάνω εργασίες προϋποθέτουν την χρήση επικίνδυνων εργαλείων και μηχανημάτων σε συνθήκες, όπου εργάζονται πολλά συνεργεία, συνήθως σε περιορισμένο χώρο, με έκθεση σε θόρυβο, σκόνη, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, δονήσεις και επιπλέον με πίεση στα χρονικά περιθώρια. Σύμφωνα με διεθνείς στατιστικές πηγές (EU-OSHA, OSHA,ILO), οι παραπάνω εργασίες χαρακτηρίζονται από:

- Αυξημένη συχνότητα εργατικών ατυχημάτων,
- Υψηλή έκθεση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες,
- Σημαντικές αβεβαιότητες στον χρόνο και στο κόστος,
- Αλληλεξαρτώμενους κινδύνους που εξελίσσονται δυναμικά.

Η εκτίμηση κινδύνου στο συγκεκριμένο έργο, με αυτόν τον τρόπο, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία πρέπει να ερευνηθεί συνολικά και συνδυαστικά με μεθόδους ποιοτικές και ποσοτικές και τα εργαλεία, μαζί, θα αποφέρουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Με σκοπό την διευκόλυνση της ανάλυσης των κινδύνων, τα παραπάνω κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- Κίνδυνοι Υγείας και Ασφάλειας
- Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι
- Κίνδυνοι εξοπλισμού και τεχνικών αστοχιών
- Κίνδυνοι χρονοδιαγράμματος και κόστους
- Οργανωτικοί και διαχειριστικοί κίνδυνοι

Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση αντιστοιχεί στις κατευθύνσεις που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα PMBOK και ISO 31000 για την εκτίμηση ρίσκου και κινδύνων. Σύμφωνα με τις κατηγορίες που διακρίνονται, με τη βιβλιογραφία αλλά και την προσωπική εμπειρία, καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα που περιγράφει τους ενδεικτικούς κινδύνους που εμφανίζονται ανά κατηγορία (Πίνακας 5).

**Πίνακας 4. Κατηγορίες και κατάλογος κινδύνων**

| | |
|---|---|
| **1.Κίνδυνοι Υγείας και Ασφάλειας** | |
| Κ.1 | Πτώση εργαζομένου από ύψος |
| Κ.2 | Πτώση αντικειμένων από ύψος |
| Κ.3 | Τραυματισμός από κινούμενο μηχάνημα |
| Κ.4 | Ηλεκτροπληξία |
| Κ.5 | Καταπλάκωση κατά τις εργασίες εκσκαφών |
| Κ.6 | Ολίσθηση / πτώση |
| Κ.7 | Έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου |
| Κ.8 | Έκθεση σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις σκόνης |
| Κ.9 | Μυοσκελετικοί τραυματισμοί |
| Κ.10 | Κόπωση |
| **2. Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι** | |
| Κ.11 | Έντονες βροχοπτώσεις |
| Κ.12 | Ισχυροί άνεμοι |
| Κ.13 | Υψηλές θερμοκρασίες |
| Κ.14 | Χαμηλή ορατότητα (σκόνη / ομίχλη) |
| Κ.15 | Υπέρβαση ορίων θορύβου σε γειτονικές περιοχές |
| Κ.16 | Περιβαλλοντικά πρόστιμα |
| **3.Αστοχία μηχανημάτων και εξοπλισμού** | |
| Κ.17 | Βλάβη μηχανημάτων |
| Κ.18 | Αστοχία συστημάτων ασφαλείας |
| Κ.19 | Καθυστέρηση επισκευής εξοπλισμού |
| Κ.20 | Έλλειψη ανταλλακτικών |
| Κ.21 | Λανθασμένη χρήση εξοπλισμού |
| **4.Κίνδυνοι χρόνου και κόστους** | |
| Κ.22 | Καθυστέρηση προμήθειας υλικών |
| Κ.23 | Αύξηση κόστους υλικών |
| Κ.24 | Καθυστερήσεις υπεργολάβων |
| Κ.25 | Κακή αλληλουχία εργασιών |
| Κ.26 | Επανεργασίες λόγω λαθών |
| Κ.27 | Υποεκτίμηση διάρκειας δραστηριοτήτων |
| **5.Οργανωτικοί και Διοικητικοί Κίνδυνοι** | |
| Κ.28 | Έλλειψη εμπειρίας προσωπικού |
| Κ.29 | Ανεπαρκής εκπαίδευση H&S |
| Κ.30 | Κακή επικοινωνία μεταξύ συνεργείων |
| Κ.31 | Μη τήρηση διαδικασιών |
| Κ.32 | Πίεση χρόνου από διοίκηση |
| Κ.33 | Ανθρώπινο λάθος |
| Κ.34 | Ελλιπής επίβλεψη εργοταξίου |

Οι παραπάνω κίνδυνοι δεν καλύπτουν πλήρως τις κατηγορίες κινδύνων όλων των έργων, αλλά κρίνονται επαρκής για να προσδιορίσουν τις ανάγκες για μέτρα στο συγκεκριμένο κατασκευαστικό έργο. Από τις παραπάνω κατηγορίες κινδύνων, οι κίνδυνοι για τους οποίους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία είναι οι κίνδυνοι Υγείας και Ασφάλειας, οι οποίοι αφορούν το ανθρώπινο δυναμικό και οι συνέπειες αυτών μπορεί να στοιχήσουν ζωές.

## 8.4 Επιλογή Μεθοδολογίας

Η επιλογή της μεθοδολογικής προσέγγισης σε αυτή τη μελέτη βασίζεται στην ανάγκη αποτελεσματικής καταγραφής και ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας στην ανάλυση κινδύνου του έργου. Δεδομένης της πολυπλοκότητας και της εγγενούς μεταβλητότητας των περιβαλλόντων του έργου, μια καθαρά ποιοτική ή ντετερμινιστική προσέγγιση θεωρήθηκε ανεπαρκής.

**Ενσωμάτωση Ποιοτικών και Ποσοτικών Προσεγγίσεων:**

Ο εντοπισμός κινδύνου και η αρχική αξιολόγηση είναι εγγενώς ποιοτικές διαδικασίες, που βασίζονται στην κρίση των ειδικών, την εμπειρία και την κατανόηση του πλαισίου. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για τον ορισμό της δομής του μητρώου κινδύνου, συμπεριλαμβανομένων των κατηγοριών κινδύνου, των επιπέδων πιθανότητας και των πιθανών επιπτώσεων. Ωστόσο, οι ποιοτικές αξιολογήσεις από μόνες τους δεν παρέχουν μετρήσιμα αποτελέσματα που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων, όπως αναμενόμενες υπερβάσεις κόστους ή καθυστερήσεις χρονοδιαγράμματος. Για αυτόν τον λόγο, τα ποιοτικά δεδομένα μετασχηματίζονται συστηματικά σε ποσοτικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των πιθανοτήτων και του εύρους επιπτώσεων.

Αυτός ο μετασχηματισμός επιτρέπει την εφαρμογή ποσοτικών τεχνικών διατηρώντας παράλληλα τον πλούτο του πλαισίου της ποιοτικής αναγνώρισης κινδύνου. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο υιοθετεί μια υβριδική προσέγγιση, όπου τα ποιοτικά δεδομένα χρησιμοποιούνται ως βάση για την ποσοτική ανάλυση.

**Προσομοίωση Monte Carlo:**

Η προσομοίωση Monte Carlo επιλέχθηκε ως η βασική αναλυτική μέθοδος λόγω της ικανότητάς της να μοντελοποιεί την αβεβαιότητα και τη μεταβλητότητα σε σύνθετα συστήματα. Σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται σε εκτιμήσεις ενός σημείου, η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιεί κατανομές πιθανότητας και επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία για να δημιουργήσει ένα εύρος πιθανών αποτελεσμάτων.

Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την ανάλυση κινδύνου έργου επειδή:

- Οι κίνδυνοι εμφανίζονται πιθανοτικά και όχι ντετερμινιστικά
- Πολλαπλοί κίνδυνοι μπορεί να εμφανιστούν ταυτόχρονα
- Οι επιπτώσεις είναι αβέβαιες και συχνά μη γραμμικές
- Τα ακραία γεγονότα, αν και σπάνια, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα
- Με την προσομοίωση χιλιάδων σεναρίων, το μοντέλο καταγράφει την πλήρη κατανομή των πιθανών αποτελεσμάτων του έργου, συμπεριλαμβανομένων των μέσων τιμών, των εκατοστημορίων (P50, P90) και των κινδύνων ουράς.

**Επιλογή Τριγωνικών Κατανομών:**

Η τριγωνική κατανομή επιλέχθηκε για τη μοντελοποίηση των επιπτώσεων στο κόστος και τον χρόνο λόγω της πρακτικότητας και της καταλληλότητας της σε περιβάλλοντα με περιορισμένα ιστορικά δεδομένα. Απαιτεί μόνο τρεις παραμέτρους (ελάχιστη, πιθανότερη και μέγιστη), οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν εύλογα από ειδικούς. Ενώ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο σύνθετες κατανομές, η τριγωνική κατανομή παρέχει μια ισορροπία μεταξύ απλότητας και ρεαλισμού, καθιστώντας την κατάλληλη για ανάλυση κινδύνου σε πρώιμο στάδιο ή περιορισμένα δεδομένα.

**Χρήση Προσαρμογών Βασισμένων σε Σενάρια:**

Το μοντέλο ενσωματώνει πολλαπλασιαστές βασισμένους σε σενάρια και προσαρμογές ανά κατηγορία για να αντικατοπτρίζει τις ποικίλες συνθήκες του έργου. Αυτό επιτρέπει στην προσομοίωση να προσαρμόζεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως αισιόδοξα, απαισιόδοξα ή σενάρια ακραίων καταστάσεων. Τέτοιες προσαρμογές ενισχύουν την ευελιξία του μοντέλου και επιτρέπουν τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ διαφορετικών υποθέσεων του έργου, υποστηρίζοντας τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων.

**Προσέγγιση Ανάλυσης Ευαισθησίας:**

Χρησιμοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας βασισμένη σε προσομοίωση για την αξιολόγηση της επίδρασης των μεμονωμένων κινδύνων στα συνολικά αποτελέσματα του έργου. Διαταράσσοντας τις παραμέτρους εισόδου και εκτελώντας ξανά την προσομοίωση, το μοντέλο καταγράφει μη γραμμικές επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις που δεν μπορούν να αναγνωριστούν μέσω ντετερμινιστικών μεθόδων.

Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια πιο ρεαλιστική αξιολόγηση της σημασίας του κινδύνου και υποστηρίζει τις προσπάθειες ιεράρχησης προτεραιοτήτων.

Η επιλεγμένη μεθοδολογία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ποιοτικών και ποσοτικών προσεγγίσεων, αξιοποιώντας τις γνώσεις των ειδικών, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αυστηρή αριθμητική ανάλυση. Η ενσωμάτωση της προσομοίωσης Monte Carlo, της πιθανοτικής μοντελοποίησης και της ανάλυσης ευαισθησίας παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την κατανόηση και τη διαχείριση του κινδύνου του έργου. Αυτή η υβριδική μεθοδολογία ευθυγραμμίζεται με τις βέλτιστες πρακτικές που συνιστώνται από οργανισμούς όπως το Project Management Institute (PMI) και το AACE International και υιοθετείται ευρέως σε εφαρμογές προηγμένης ανάλυσης κινδύνου.

Συνολικά, η προσέγγιση θεωρείται κατάλληλη για την καταγραφή της πολυπλοκότητας, της αβεβαιότητας και της μεταβλητότητας που είναι εγγενείς στα περιβάλλοντα έργων, διατηρώντας παράλληλα την πρακτική εφαρμογή εντός των περιορισμών των διαθέσιμων δεδομένων και εργαλείων.

# Κεφάλαιο 9: Εφαρμογή του πλαισίου και αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την εφαρμογή του προτεινόμενου συνδυαστικού πλαισίου εκτίμησης κινδύνων στην μελέτη περίπτωσης. Η εφαρμογή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της αποτελεσματικότητας του μοντέλου.

Το υπολογιστικό μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Excel, λόγω ευρείας χρήσης και απλότητας λειτουργιών. Σε αυτό αναπτύσσονται τα διακριτά φύλλα εργασίας τα οποία ακολουθούν και την μεθοδολογία που αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι κύριες καρτέλες είναι :

**Πίνακας 5. Καρτέλες Excel**

| | |
|---|---|
| Input | Παράμετροι έργου |
| Risk Register | FMEA |
| Quantified Risk | Ποσοτικοποίηση |
| Calibration | Βαθμονόμηση από OSHA/ HSE/ ILO |
| Scenarios | Πολλαπλασιαστές σεναρίων |
| Monte Carlo | Προσομοίωση |
| Sensitivity | Ανάλυση Ευαισθησίας |
| Results | Αποτελέσματα |
| Dashboard | Παρουσίαση Αποτελεσμάτων |

Η χρήση του ξεκινά από την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τις βασικές παραμέτρους του έργου (Input-Παράμετροι έργου). Σε αυτή τη φάση, προσδιορίζονται τα βασικά στοιχεία του έργου (Προϋπολογισμός – Διάρκεια – Εργαζόμενοι – Επιλογή Σεναρίου). Οι συντελεστές βαθμονόμησης κόστους και χρόνοι ανά κατηγορία κινδύνου αντλούνται από την καρτέλα "Calibration", η οποία βασίζεται σε δεδομένα από τις OSHA, HSE και ILO, με σκοπό οι παράμετροι του έργου να προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια συνεχίζοντας την εφαρμογή του πλαισίου, δημιουργείται ο Πίνακας Βαθμολόγησης Κινδύνων (Risk Scoring Matrix), με σκοπό να πραγματοποιηθεί η αρχική μορφή ποσοτικοποίησης των κινδύνων. Εφαρμόζεται η μέθοδος FMEA στην καρτέλα Risk Register για τους κινδύνους που αναγράφονται στον πίνακα. Τα αποτελέσματα της FMEA μεταφέρονται στην καρτέλα Quantified Risk, όπου μετατρέπονται σε ποσοτικές παραμέτρους. Η εφαρμογή της μεθόδου συμπληρώνει το στάδιο της ποιοτικής αξιολόγησης κινδύνων. Σύμφωνα με τη μέθοδο, για κάθε επιλεγμένο κίνδυνο εφαρμόζεται η εξίσωση του δείκτη RPN = OxSxD, όπου,

- O= Occurence (Συχνότητα εμφάνισης) (1-10)
- S= Severity (Σοβαρότητα Επιπτώσεων) (1-10)
- D= Detectability (Δυνατότητα Ανίχνευσης) (1-10)

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο δείκτης RPN αναδεικνύει την κρισιμότητα της επικίνδυνης κατάστασης που δημιουργεί ο κίνδυνος, με σκοπό την λήψη μέτρων και αποφάσεων. Όσο μεγαλύτερος ο δείκτης, τόσο πιο μεγάλη ανάγκη για τη λήψη μέτρων. Ένας γενικός κανόνας κατά την εφαρμογή είναι :

**Πίνακας 6. Ταξινόμηση Σημαντικότητας**

| RPN | Σημαντικότητα |
|---|---|
| 1-50 | Μικρή |
| 51-100 | Μεσαία |
| 101-200 | Μεγάλη |
| 201-1000 | Πολύ μεγάλη |

Βέβαια, όπως αναφέρεται και στην μέθοδο, ο δείκτης RPN δεν είναι ο μόνος παράγοντας λήψης αποφάσεων, καθώς και η υψηλή Κρισιμότητα (Severity) ενός κινδύνου με χαμηλό RPN μπορεί να είναι εξίσου επικίνδυνη. Ο συνολικός πίνακας RPN των κινδύνων Υγείας και Ασφάλειας προκύπτει ως εξής :

**Πίνακας 7.Πίνακας FMEA**

| Risk ID | Description | Category | Likelihood (1-10) | Severity (1-10) | Detection (1-10) | RPN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **R1** | Πτώση εργαζομένου από ύψος (σκαλωσιές) | H&S | 5 | 9 | 4 | 180 |
| **R2** | Πτώση αντικειμένων από ύψος | H&S | 6 | 8 | 3 | 144 |
| **R3** | Τραυματισμός από κινούμενο μηχάνημα | H&S | 5 | 8 | 4 | 160 |
| **R4** | Ηλεκτροπληξία | H&S | 3 | 10 | 4 | 120 |
| **R5** | Καταπλάκωση κατά τις εργασίες εκσκαφών | H&S | 4 | 9 | 5 | 180 |
| **R6** | Ολίσθηση / πτώση | H&S | 6 | 5 | 4 | 120 |
| **R7** | Έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου | H&S | 7 | 4 | 5 | 140 |
| **R8** | Έκθεση σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις σκόνης | H&S | 6 | 5 | 5 | 150 |
| **R9** | Μυοσκελετικοί τραυματισμοί | H&S | 7 | 6 | 5 | 210 |
| **R10** | Κόπωση | H&S | 6 | 7 | 4 | 168 |
| **R11** | Έντονες βροχοπτώσεις | Environmental | 5 | 6 | 3 | 90 |
| **R12** | Ισχυροί άνεμοι | Environmental | 4 | 7 | 4 | 112 |
| **R13** | Υψηλές θερμοκρασίες | Environmental | 6 | 5 | 5 | 150 |
| **R14** | Χαμηλή ορατότητα (σκόνη / ομίχλη) | Environmental | 5 | 6 | 5 | 150 |
| **R15** | Υπέρβαση ορίων θορύβου σε γειτονικές περιοχές | Environmental | 5 | 4 | 4 | 80 |
| **R16** | Περιβαλλοντικά πρόστιμα | Environmental | 3 | 7 | 6 | 126 |
| **R17** | Βλάβη μηχανημάτων | Equipment | 6 | 7 | 4 | 168 |
| **R18** | Αστοχία συστημάτων ασφαλείας | Equipment | 3 | 9 | 6 | 162 |
| **R19** | Καθυστέρηση επισκευής εξοπλισμού | Equipment | 5 | 6 | 5 | 150 |
| **R20** | Έλλειψη ανταλλακτικών | Equipment | 6 | 5 | 5 | 150 |
| **R21** | Λανθασμένη χρήση εξοπλισμού | Equipment | 5 | 7 | 4 | 140 |
| **R22** | Καθυστέρηση προμήθειας υλικών | Cost | 6 | 8 | 4 | 192 |
| **R23** | Αύξηση κόστους υλικών | Cost | 7 | 7 | 5 | 245 |
| **R24** | Καθυστερήσεις υπεργολάβων | Cost | 6 | 7 | 5 | 210 |
| **R25** | Κακή αλληλουχία εργασιών | Cost | 5 | 6 | 4 | 120 |
| **R26** | Επανεργασίες λόγω λαθών | Cost | 6 | 6 | 5 | 180 |
| **R27** | Υποεκτίμηση διάρκειας δραστηριοτήτων | Cost | 5 | 7 | 6 | 210 |
| **R28** | Έλλειψη εμπειρίας προσωπικού | Organizational | 5 | 7 | 6 | 210 |
| **R29** | Ανεπαρκής εκπαίδευση H&S | Organizational | 4 | 8 | 6 | 192 |
| **R30** | Κακή επικοινωνία μεταξύ συνεργείων | Organizational | 6 | 6 | 5 | 180 |
| **R31** | Μη τήρηση διαδικασιών | Organizational | 5 | 7 | 5 | 175 |
| **R32** | Πίεση χρόνου από διοίκηση | Organizational | 7 | 6 | 4 | 168 |
| **R33** | Ανθρώπινο λάθος | Organizational | 6 | 8 | 5 | 240 |
| **R34** | Ελλιπής επίβλεψη εργοταξίου | Organizational | 6 | 7 | 5 | 210 |

Οι παραπάνω κίνδυνοι δεν καλύπτουν πλήρως τις κατηγορίες κινδύνων όλων των έργων, αλλά κρίνονται επαρκής για να προσδιορίσουν τις ανάγκες για μέτρα στα περισσότερα κατασκευαστικά έργα. Από τον παραπάνω πίνακα διακρίνονται οι δέκα πιο κρίσιμοι κίνδυνοι :

**Πίνακας 8.Top 10 Risks**

| | | |
|---|---|---|
| **R23** | Αύξηση κόστους υλικών | 245 |
| **R33** | Ανθρώπινο λάθος | 240 |
| **R9** | Μυοσκελετικοί τραυματισμοί | 210 |
| **R24** | Καθυστερήσεις υπεργολάβων | 210 |
| **R27** | Υποεκτίμηση διάρκειας δραστηριοτήτων | 210 |
| **R28** | Έλλειψη εμπειρίας προσωπικού | 210 |
| **R4** | Ελλιπής επίβλεψη εργοταξίου | 210 |
| **R22** | Καθυστέρηση προμήθειας υλικών | 192 |
| **R29** | Ανεπαρκής εκπαίδευση H&S | 192 |
| **R1** | Πτώση εργαζομένου από ύψος (σκαλωσιές) | 180 |

Οι παραπάνω κίνδυνοι είναι αυτοί που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αβεβαιότητα και κρισιμότητα και επιδρούν με μεγαλύτερες συνέπειες στο συνολικό κόστος και στη συνολική διάρκεια του έργου.

Στη λογική του μοντέλου δημιουργούνται σενάρια αισιόδοξα, απαισιόδοξα και βασικά για κάθε τιμή κόστους, χρόνου και πιθανότητας, με σκοπό να συμπεριλαμβάνονται και εξωτερικοί παράγοντες επιρροής καθώς και σενάρια κρισιμότητας. Τα σενάρια και οι κατηγορίες κινδύνου χρησιμοποιούνται ως πολλαπλασιαστές, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για να αντικατοπτρίζουν τις ποικίλες συνθήκες του έργου. Υπολογίζονται σενάρια αισιόδοξα, απαισιόδοξα και σενάρια ακραίων καταστάσεων με σκοπό να προσδίδουν στο πλαίσιο την ευελιξία και επιτρέπουν τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ διαφορετικών υποθέσεων του έργου, υποστηρίζοντας τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων.

| Category | Ext. Influence |
|---|---|
| H&S | 0,36 |
| Environmental | 0,1 |
| Equipment | 0,12 |
| Cost | 0 |
| Organizational | 0,15 |

**Εικόνα 2. Βαθμονόμηση**

| Scenario | Prob Mult | Cost Mult | Time Mult |
|---|---|---|---|
| Base | 1 | 1 | 1 |
| Best | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
| Worst | 1,3 | 1,5 | 1,4 |
| Stress | 1,5 | 1,7 | 1,6 |

**Εικόνα 3.Πολλαπλασιαστές Σεναρίων.**

Οπότε η κάθε πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου χαρακτηρίζεται ως εξής :
P= Αρχική Πιθανότητα * Προσαρμογή κατηγορίας κινδύνου * Συντελεστής σεναρίου. Έτσι οι πιθανότητες αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά κινδύνου και τις εξωτερικές συνθήκες.

**Λογική σειρά υπολογισμών :**

Ο κάθε κίνδυνος στα αποτελέσματα δείχνει την συνεισφορά του στο συνολικό κόστος και στη συνολική διάρκεια. Επίσης καθώς διάφοροι κίνδυνοι μπορεί να επιδρούν ταυτόχρονα και να συνδέονται, χρησιμοποιείται η τυχαία μεταβλητή Bernoulli και ο λόγος λ καθώς και ο Risk Interaction Factor παράγοντας. Η Bernoulli μεταβλητή χαρακτηρίζει τις δύο πιθανότητες επιτυχίας και αποτυχίας για κάθε κίνδυνο, προσδίδοντας την τιμή 1 και 0 αντίστοιχα της κάθε περίπτωσης. Ο λόγος λ προδίδει την λογική Poisson η οποία αυξάνει την πιθανότητα των κινδύνων και ο Risk Interaction Factor δίνει την πιθανότητα να υπάρχουν περισσότερος από ένας κίνδυνοι. Αρχικά κάθε κίνδυνος αντιμετωπίζεται ως ένα πιθανολογικό γεγονός.

Η πιθανότητα του να συμβεί ορίζεται εννοιολογικά ως εξής :

P(i) = Ραρχική * Παράγοντας κατηγορίας κινδύνου * Σενάριο * λ * Interaction Factor. Έτσι η πιθανότητα γίνεται συστημική και δυναμική. Στην περίπτωση όπου συμβεί ο κίνδυνος , τότε η επίδραση στο κόστος και στο χρόνο λαμβάνονται από τιμές τριγωνικών κατανομών. Η Τριγωνική κατανομή επιλέχθηκε ως κατάλληλη κατανομή για τις περιπτώσεις όπου υπάρχουν περιορισμένα ιστορικά δεδομένα. Η κατανομή απαιτεί τρείς παραμέτρους, την ελάχιστη, την πιθανότερη και τη μέγιστη τιμή, οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν με εμπειρικές προσεγγίσεις από ειδικούς.

- Ci – Triangular ( Ci_min, Ci_ML, Ci_max)
- Ti – Triangular ( Ti_min, Ti_ML,Ti_max), όπου ML = Most Likely,
- Για κάθε x Є [a,c] , f(x) = 2(x-a)/ ((b-a)(c-a))
- Για κάθε x Є [c,b] , f(x) = 2(b-x)/ ((b-a)(b-c)) , όπου a= minimum, b = maximum, c = median

Αυτό επιτρέπει σε κάθε περίπτωση να αντικατοπτρίζει τη μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Οι ακραίες τιμές εμφανίζονται λιγότερο συχνά από τις μέσες. Στον υπολογισμό του Συνολικού Κόστους και Συνολικής Διάρκειας, αθροίζονται οι συνεισφορές όλων των κινδύνων που επιδρούν ταυτόχρονα και συμπεριλαμβάνεται το impact factor, το οποίο είναι :

- Total Cost = Σ( Xi x Ci x Wi)
- Total Delay = Σ(Xi x Ti x D xWi), Wi = Impact Factor

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η Προσομοίωση Μοντε Κάρλο, για 10.000 επαναλήψεις για να υπολογίσει τιμές συνολικού κόστους και συνολικής διάρκειας σε κάθε σενάριο όπου εμφανίζονται οι κίνδυνοι. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, σε κάθε σενάριο μπορεί να προκύπτουν παραπάνω από ένας κινδύνους, οπότε και τα κόστη και η διάρκεια αθροίζονται αναλόγως. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθοδολογίας είναι μια κατανομή τιμών κόστους και καθυστέρησης. Στα αποτελέσματα ο Μέσος Όρος χαρακτηρίζει την αναμενόμενη τιμή , η Διάμεσος P(50) , και η P(90) η οποία αντιπροσωπεύει την πιο κρίσιμη κατάσταση στην οποία μπορεί να φτάσει η ανάλυση.

- E(C) = (1/N) Σ Cost
- P(50) = median (Cost )
- P(90) = 90$^{th}$ percentile of Cost
- Αντίστοιχα και για τους υπολογισμούς της Διάρκειας

Με σκοπό να πραγματοποιηθεί και μια συγκριτική ανάλυση , υπολογίσθηκε και η EMV (Expected Monetary Value) = Σ(Pi x E(Ci)] , για το κόστος και τον χρόνο, με σκοπό να υπάρχει και μια ντετερμινιστική προσέγγιση στο μοντέλο η οποία να

παρουσιάζει την γραμμικότητα, χωρίς να προσθέτει την μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα (Gump, A.,2001).

Κατά την Ανάλυση Ευαισθησίας, η επίδραση κάθε κινδύνου υπολογίζεται, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους αυτού, κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους των υπολοίπων κινδύνων. Για κάθε κίνδυνο i, μεταβάλλεται η Πιθανότητα Pi ± δ, κατά την οποία μετριέται η ευαισθησία ως

- Si = max( │C_high- C_base│, │C_low – C_base│ ).

Έτσι προκύπτει η συνολική επιρροή του κάθε κίνδυνου χωριστά, προσδιορίζοντας αυτούς με το μεγαλύτερο αντίκτυπο. Το μοντέλο παρουσιάζει, μη γραμμικότητα, λοξότητα και μεταβλητότητα, καθώς και ευαισθησία στους κινδύνους με το μεγαλύτερο βαθμό επιρροής. Η παρουσία της μεταβλητότητας και της ασυμμετρίας των δεδομένων φαίνεται στους υπολογισμούς της επιρροής του κάθε κινδύνου στα τελικά αποτελέσματα όπου οι αρνητικές επιρροές κινδύνων σε κάποιους κινδύνους αποδίδουν θετικές τιμές.

## 9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στην καρτέλα “Dashboard” όπως προαναφέρθηκε. Η καρτέλα έχει τη δυνατότητα να παρέχει στον χρήστη :

- Δυνατότητα επιλογής σεναρίου με άμεση ενημέρωση αποτελεσμάτων
- Συνοπτικά αποτελέσματα και πληροφορίες για κόστη, χρονική διάρκεια και σενάρια δυσμενή
- Διαγράμματα Κατανομής Κόστους και Διάρκειας με τιμές P50 και P90
- Pareto διάγραμμα κατά EMV
- «Top 10» κινδύνους της Ανάλυσης Ευαισθησίας

Η ερευνητική αξία της καρτέλας αποτελεσμάτων αφορά τη δυνατότητα μετάφρασης των αποτελεσμάτων σε απλή και κατανοητή μορφή. Ο διαχειριστής έχει την ευελιξία να επιλέγει σενάρια και να αξιολογήσει τη μεταβολή του προφίλ των κινδύνων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση.

**Αποτελέσματα Monte Carlo Simulation:**

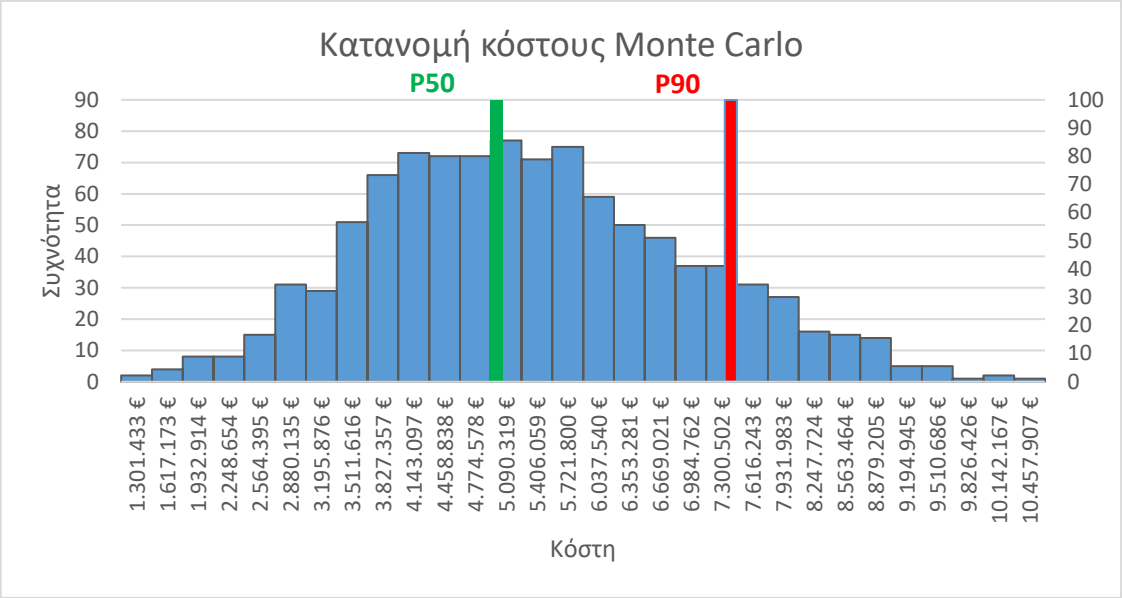
Η προσομοίωση Monte Carlo για το σενάριο Base παράγει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

**Πίνακας 9. Αποτελέσματα Monte Carlo Base**

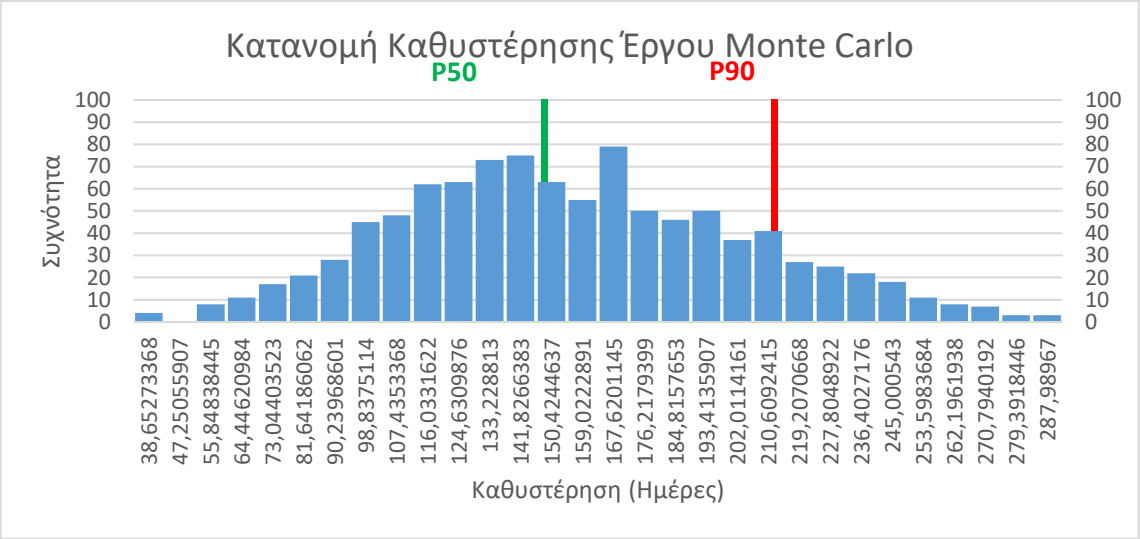
| Δείκτης | Κόστος (€) | Καθυστέρηση (Ημέρες) |
|---|---|---|
| Αναμενόμενη Τιμή | 5.152.551 | 150 |
| P50 (Διάμεσος) | 5.096.001 | 149 |
| P90 (Δυσμενές Σενάριο) | 7.238.248 | 212 |
| Απρόβλεπτα (P90-P50) | 2.142.247 | 63 |

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του έργου. Η αναμενόμενη επίπτωση των κινδύνων (5,15 εκ. ευρώ) αντιστοιχεί σε υπέρβαση 20.6% του αρχικού προϋπολογισμού με την δυσμενής τιμή P90 να φτάνει το 29%. Και οι δύο τιμές εντάσσονται στο εύρος 10-30% που τεκμηριώνεται στη βιβλιογραφία για τα κατασκευαστικά έργα παρόμοιας κλίμακας και φύσης.

Ταυτόχρονα η διαφορά της απρόβλεπτης κατάστασης που προκύπτει (2.1 εκ. ευρώ / 63 ημέρες) παρουσιάζει την αβεβαιότητα και δίνει στον διαχειριστή το μέγεθος της ζημιάς που θα προκύψει στην δυσμενής κατάσταση. Αυτή η τιμή μπορεί να δώσει στον διαχειριστή το ποσό που θα πρέπει να έχει ως αποθεματικό για να έχει καλύψει το 90% των περιπτώσεων. Οι κατανομές κόστους και χρόνου παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα




**Διάγραμμα 1. Κατανομή Κόστους Monte Carlo.**




**Διάγραμμα 2. Κατανομή Καθυστέρησης Έργου Monte Carlo.**

Οι κατανομές παρουσιάζουν δεξιά ασυμμετρία, υποδηλώνοντας ότι, κατά τις προσομοιώσεις οι τιμές συγκεντρώνονται γύρω από τη μέση τιμή, η παρουσία του μεγάλου εύρους τιμών προς τη δεξιά μεριά αποτυπώνει τις ακραίες τιμές των κινδύνων υψηλής σοβαρότητας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το έργο παρουσιάζει μια σημαντική πιθανότητα υπέρβασης του αρχικού προϋπολογισμού. Οι τιμή P50 εκφράζει το κόστος που η πιθανότητα να μην ξεπεραστεί είναι 50% και αντίστοιχα η τιμή P90 το επίπεδο κόστους που κατά 90% δεν θα ξεπεραστεί.

**Σύγκριση Σεναρίων:**

Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει αποτελέσματα για τέσσερα διαφορετικά σενάρια πολλαπλασιαστών. (Best –Base –Worst – Stress). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων :

**Πίνακας 10.Σύγκριση Σεναρίων**

| Σενάριο | Κόστος | Καθυστέρηση | Υπέρβαση Προϋπολογισμού |
|---|---|---|---|
| Best | ≈4.1 εκ | ≈120 | ≈16% |
| Base | ≈5.1 εκ | 150 | ≈20.6% |
| Worst | ≈6.7 εκ | ≈195 | ≈26,8% |
| Stress | ≈8.75 εκ | ≈240 | ≈35% |

Η σύγκριση σεναρίων αποδεικνύει την ευαισθησία του έργου στις εξωτερικές συνθήκες. Η μεταπήδηση από το σενάριο Base στο σενάριο Stress αυξάνει το κόστος κατά 3,6 εκ και τη διάρκεια κατά 90 ημέρες, το οποίο προσδίδει αυξήσεις κατά 70% και 60 % αντίστοιχα.

**Ανάλυση FMEA – Top Risks:**

Κατά την ανάλυση FMEA χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης RPN. Οι κίνδυνοι με τα μεγαλύτερα RPN είναι :

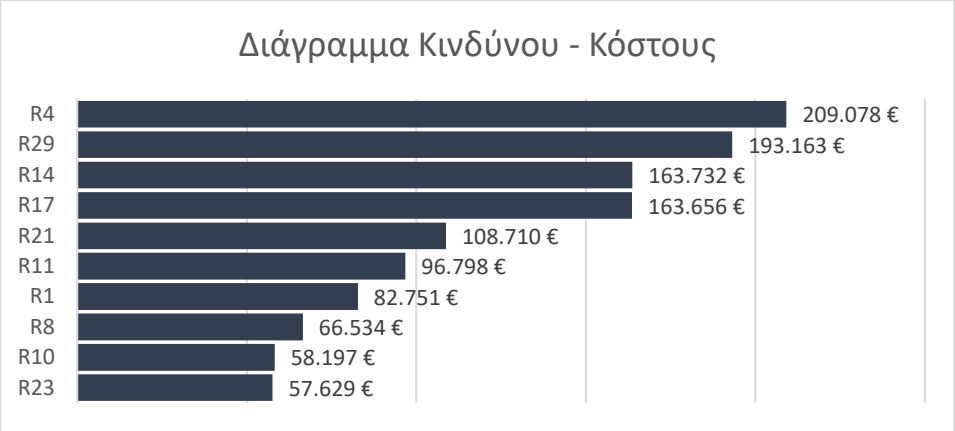
**Πίνακας 11. FMEA Top Risks**

| Risk ID | Περιγραφή Κινδύνου | RPN |
|---|---|---|
| **R23** | Αύξηση κόστους υλικών | 245 |
| **R33** | Ανθρώπινο λάθος | 240 |
| **R9** | Μυοσκελετικοί τραυματισμοί | 210 |
| **R24** | Καθυστερήσεις υπεργολάβων | 210 |
| **R27** | Υποεκτίμηση διάρκειας δραστηριοτήτων | 210 |
| **R28** | Έλλειψη εμπειρίας προσωπικού | 210 |
| **R34** | Ελλιπής επίβλεψη εργοταξίου | 210 |
| **R22** | Καθυστέρηση προμήθειας υλικών | 192 |
| **R29** | Ανεπαρκής εκπαίδευση H&S | 192 |
| **R1** | Πτώση εργαζομένου από ύψος (σκαλωσιές) | 180 |

Η κυριαρχία των οργανωτικών κινδύνων και των κινδύνων κόστους ήταν αναμενόμενη καθώς είναι και οι πιο συνηθισμένοι κίνδυνοι που επηρεάζουν το κόστος και τη διάρκεια. Ο κίνδυνος της ανεπαρκής εκπαίδευσης H&S εμφανίζεται στους 10 πιο κρίσιμους κινδύνους του RPN αλλά και της ανάλυσης ευαισθησίας, επιβεβαιώνοντας την κρισιμότητα του. Παρόλο που ο δείκτης δεν είναι απόλυτος στο κομμάτι της κρισιμότητας, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να έχει μια εικόνα για τους κινδύνους που ίσως να χρειαστεί να εστιάσει την προσοχή του.

**Sensitivity Analysis – Top Impact:**

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για την αναγνώριση των κινδύνων που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στο συνολικό κόστος του έργου. Με την μεταβολή της πιθανότητας του κάθε κίνδυνοι κατά ±10%, οι κίνδυνοι που προέκυψαν από την ανάλυση είναι :




**Διάγραμμα 3 Συνεισφορά Κινδύνου στο Κόστος**

Οι παραπάνω κίνδυνοι είναι αυτοί που επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει στο χρήστη να αναγνωρίσει τους κινδύνους με το μεγαλύτερο "exposure" στο έργο.

Οι κίνδυνοι που επιδρούν περισσότερο στο τελικό κόστος είναι :

- R4 Ηλεκτροπληξία
- R29 Ανεπαρκής εκπαίδευση H&S
- R14 Χαμηλή ορατότητα (σκόνη/ ομίχλη)
- R17 Βλάβη μηχανημάτων
- R21 Λανθασμένη Χρήση Εξοπλισμού
- R11 Έντονες Βροχοπτώσεις
- R1 Πτώση εργαζόμενου από ύψος
- R8 Έκθεση σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις σκόνης
- R10 Κόπωση
- R23 Αύξηση Κόστους Υλικών

Οι παραπάνω κίνδυνοι επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το τελικό κόστος. Τα αποτελέσματα από πρώτη ματιά παρουσιάζουν κάποια ιδιαιτερότητα. Οι κίνδυνοι δεν συμπίπτουν πλήρως με αυτούς της RPN ανάλυσης. Οι υπολογισμοί είναι απόλυτα εξαρτώμενοι από την πιθανότητα εμφάνισης και όχι της κρισιμότητας. Έτσι ενώ κάποιος κίνδυνος μεγάλης κρισιμότητας (π.χ. R1), θα ήταν αναμενόμενο να βρίσκεται στην κορυφή, καταλαμβάνει μια θέση κατώτερη, συγκριτικά με κινδύνους χαμηλότερης κρισιμότητας, αλλά μεγαλύτερης πιθανότητας εμφάνισης.

Η περίπτωση της Ηλεκτροπληξίας, η οποία καταλαμβάνει πρώτη θέση, αφορά το υψηλό κόστος επίπτωσης στο μοντέλο βαθμονόμησης αλλά και τη συχνή αλληλεπίδραση με άλλους κινδύνους κατά την προσομοίωση.

Οι κίνδυνοι που εμφανίζονται στην κορυφή του διαγράμματος χαρακτηρίζονται από :

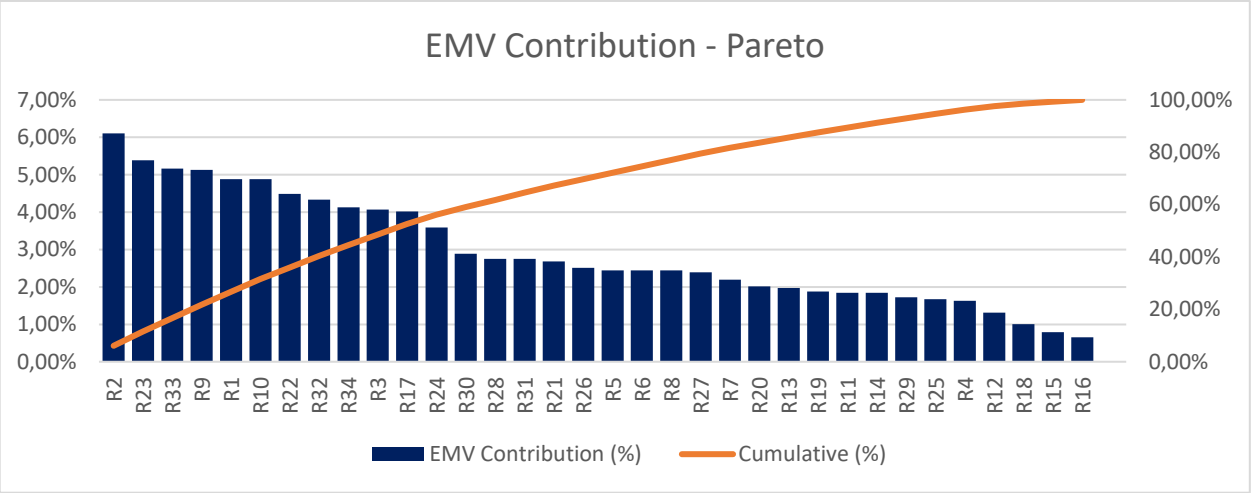
- μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης ή επαναλαμβανόμενη εμφάνιση
- χαμηλή παραγωγικότητα ή διακοπή εργασιών
- μεγάλα κόστη επίπτωση

**EMV Ανάλυση – Συνεισφορά Pareto:**

Πραγματοποιήθηκε και ανάλυση EMV η οποία ανέδειξε τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

**Πίνακας 12.Αποτελέσματα EMV**

| Σενάριο | Συνολικό Κόστος EMV € | Καθυστέρηση (Ημέρες) |
|---|---|---|
| Best | 337.500 | 9,9 |
| Base | 240.000 | 7,9 |
| Worst | 1.535.625 | 41,9 |
| Stress | 1.912.500 | 52,6 |




**Διάγραμμα 4 EMV - Pareto**

Η ανάλυση Pareto εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα της EMV ανάλυσης. Η Pareto όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, δείχνει ότι ένας μικρός αριθμός κινδύνων συνεισφέρει στο μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής τιμής. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι οι δέκα πρώτοι κίνδυνοι (R2,R23,R33…R3), συγκεντρώνουν το 60 % του συνολικού EMV κόστους. Ενώ το 80% του ποσοστού συγκεντρώνεται μεταξύ των 17 πρώτων κινδύνων. Οι τρείς πιο σημαντικοί κίνδυνοι στην ανάλυση είναι :

- R2 (Πτώση αντικείμενων από ύψος): EMV 1.657.500€ – 6.1 % του συνόλου
- R23 (Αύξηση του κόστους υλικών): EMV 1.462.500€ - 5.4 % του συνόλου
- R33 (Ανθρώπινο λάθος): EMV 1.401.562€ - 5.2% του συνόλου

Η αρχή του Pareto επιβεβαιώνεται, καθώς όπως προκύπτει και στην περίπτωση της ανάλυσης, «περιορισμένος αριθμός κινδύνων ευθύνεται για τη συντριπτική πλειονότητα της οικονομικής επίπτωσης». Ως προς τον διαχειριστή αυτό επισημαίνει την σημασία της διάθεσης πόρων για μέτρα πρόληψης στους κινδύνους αυξημένης κρισιμότητας.

## 9.3 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων των Μεθόδων Monte Carlo και EMV

**Πίνακας 13.Σύγκριση Monte Carlo – EMV**

| Χαρακτηριστικό | Monte Carlo | EMV |
|---|---|---|
| Κόστος Κινδύνων-Base (€) | 5.152.551 | 337.500 |
| Καθυστέρηση–Base (ημέρες) | 150 | 9,9 |
| Αποτύπωση αβεβαιότητας | Ναι (Κατανομή) | Όχι |
| Ταυτόχρονη Εμφάνιση Κινδύνων | Ναι | Όχι |
| Ακραία Σενάρια (P90) | Ναι | Όχι |

Η διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων Monte Carlo και EMV είναι σχεδόν 15 φορές μεγαλύτερη στο ίδιο σενάριο Base. Η μεγάλη απόκλιση δεν κρίνεται ως σφάλμα εφαρμογής, καθώς η διαφορά τους είναι τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία. Ξεκινώντας από τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε ανάλυσης, η EMV ανάλυση αποτελεί Γραμμική ανάλυση EMV = Σ(Px Impact). Η γραμμική ανάλυση υποθέτει ανεξαρτησία μεταξύ των δεδομένων και απαιτεί μέσες τιμές. Επίσης δεν υποστηρίζει τη μεταβλητότητα των δεδομένων όπως και την ταυτόχρονη εμφάνιση κινδύνων. Όπως αναφέρεται και στο PMI (Practice Standard for Risk Management), η EMV ανάλυση υποτιμά το ρίσκο εξαιτίας της έλλειψης της μοντελοποίησης της κατανομής. Η έλλειψη της μοντελοποίησης της κατανομής οδηγεί σε αδυναμία κατανόησης της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας. Έτσι η EMV ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τους πιθανούς κινδύνους (Gump, A.,2001). Παράλληλα ενισχύεται και ο παραπάνω συλλογισμός, αφού λάβουμε υπόψη και τη μελέτη των Ward & Chapman (2003), όπου αναφέρεται ότι οι ντετερμινιστικές μέθοδοι υποτιμούν την αβεβαιότητα και δίνουν λάθος αποτελέσματα. Αντιθέτως η προσομοίωση της μεθόδου Monte Carlo, δεν χαρακτηρίζεται ως μη γραμμική, η οποία περιλαμβάνει τυχαία και ταυτόχρονη εμφάνιση κινδύνων, τριγωνικές κατανομές οι οποίες προσδίδουν την αβεβαιότητα και την μεταβλητότητα στα αποτελέσματα. Με βάση τα παραπάνω όπως παρατηρείται στους πίνακες αποτελεσμάτων των μεθόδων, η EMV φαίνεται να παράγει πολύ χαμηλότερες εκτιμήσεις κόστους και καθυστέρησης συγκριτικά με την Monte Carlo Simulation, η οποία αποτυπώνει την στοχαστική φύση των κινδύνων αποδίδοντας μεγαλύτερες τιμές και πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Οι εκτιμήσεις και τα παραπάνω αποτελέσματα υποστηρίζονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, όπως το Ινστιτούτο Διαχείρισης Έργων (PMI) τονίζει ότι οι ντετερμινιστικές μέθοδοι δεν καταφέρνουν να αποτυπώσουν επαρκώς την αβεβαιότητα, ενώ το AACE International (Association for the Advancement Cost Engineering) συνιστά τη χρήση πιθανοτικών προσεγγίσεων για την αξιόπιστη πρόβλεψη κόστους σε κατασκευαστικά έργα. Τα αποτελέσματα της μελέτης αξιολογούνται σύμφωνα με την βιβλιογραφία της διαχείρισης έργων. Τα ποσά P50 και P90, αποτελούν υπέρβαση κόστους 20% και 29% αντίστοιχα οι οποίες εμπίπτουν στο 10-30% υπέρβασης κόστους προϋπολογισμού που συναντάται συνήθως στα κατασκευαστικά έργα. Παρομοίως η διάρκεια που παρατηρείται στις P50 και P90 τιμές αφορά όμοια ποσοστά, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο είναι ικανό να παράγει ρεαλιστικές εκτιμήσεις σύμφωνα με τους κινδύνους και τις συνθήκες που μελετώνται.

## 9.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη Βιβλιογραφία

Με σκοπό την συνολική αξιολόγηση του πλαισίου και των αποτελεσμάτων που παρουσιάζει, πραγματοποιείται η σύγκριση τους με παρόμοιες έρευνες.

Τα αποτελέσματα του πλαισίου, παρουσιάζουν υπέρβαση κόστους και χρόνου κατά 20% περίπου. Οι τιμές αυτές εντάσσονται στο έυρος που καταγράφεται στη βιβλιογραφία για τα κατασκευαστικά έργα αντίστοιχης κλίμακας ( Flyvbjerg et al., 2003, Love et al 2020).

Οι Martins et al. (2023) επιβεβαιώνει ότι η προσέγγιση με πιθανοτικές μεθόδους παράγει πιο ρεαλιστικά δεδομένα έναντι των ντετερμινιστικών μεθόδων.

Στην περίπτωση των Liu et al.(2013), όπου επίσης χρησιμοποιήθηκε η FMEA σε συνδυασμό με την Monte Carlo, παρουσίασαν παρόμοια αποτελέσματα στην κατανομή κόστους και επιρροής των κινδύνων. Οι κίνδυνοι με υψηλό RPN δεν σημαίνει ότι επηρεάζουν και περισσότερο το τελικό κόστος. Στην δική μας περίπτωση, ο R4 (Ηλεκτροπληξία, RPN =120), αποτελεί πρώτος παράγοντας επιρροής στο συνολικό κόστος λόγω του υψηλού βαθμού επίπτωσης.

Τα αποτελέσματα συνάδουν με τις μελέτες αποδεικνύοντας την ύπαρξη σωστής δομής και βάσης του πλαισίου. Πέρα των ερευνών και των αποτελεσμάτων, μέσω της βιβλιογραφίας μπορούν να διακριθούν τρείς βασικοί τύποι πλαισίων που αποσκοπούν σε παρόμοια αποτελέσματα.

Μια κατηγορία είναι τα πλαίσια που βασίζονται κυρίως στη Monte Carlo ανάλυση (π.χ.Vose, 2008), τα οποία όμως απαιτούν μεγάλο όγκο ιστορικών δεδομένων με σκοπό την βαθμονόμηση των μεταβλητών. Για τον υπολογισμό των πορισμάτων χρειάζεται εξειδικευμένο λογισμικό και εξειδικευμένη γνώση στην ανάλυση των δεδομένων.

Επόμενη κατηγορία είναι τα πλαίσια που στηρίζονται σε Fuzzy Logic (π.χ Kabir&Hasin.,2011) τα οποία είναι αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα με ασαφή δεδομένα. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παράγουν χρειάζεται εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία, καθιστώντας τα μη εύχρηστα για το ευρύ κοινό.

Η Τρίτη κατηγορία αφορά πλαίσια που επικεντρώνονται στα Bayesian Networks (π.χ Khakzad et al.,2013). Τα πλαίσια αυτά, αποτυπώνουν τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των κινδύνων με αποτελεσματικό τρόπο αλλά επίσης απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό και χαρακτηρίζονται από αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Το παρόν πλαίσιο παρόλο που παρουσιάζει περιορισμούς, είναι ικανό να μετριάζει τις απαιτήσεις που έχουν τα παραπάνω είδη πλαισίων. Η χρήση εξειδικευμένης γνώσης και εξειδικευμένων υλικών δεν κρίνεται αναγκαία για την παραγωγή αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

# Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα

## 10.1 Σύνοψη της Εργασίας

Η παρούσα μελέτη, ανέπτυξε και εφάρμοσε μια συνδυαστική ανάλυση ρίσκου, σε μορφή ενός πλαισίου, που βασίζεται κυρίως στη μέθοδο της προσομοίωσης, ώστε να υπολογίζει επιρροές κινδύνων στο κόστος και στη διάρκεια ενός έργου. Το πλαίσιο συνδυάζει τα ποιοτικά δεδομένα ρίσκου με τις πιθανοτικές κατανομές και προσομοιώσεις σεναρίων, με σκοπό την ρεαλιστική εκτίμηση των κινδύνων στο κόστος και στη διάρκεια ενός έργου. Το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας βασίζεται στη θεωρία της πιθανότητας, σε στοχαστικές εφαρμογές και σε τεχνικές προσομοίωσης με σκοπό να παράγει συνθήκες αβεβαιότητας που κυριαρχούν στα κατασκευαστικά έργα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποδεικνύουν ότι οι συνδυαστικές προσεγγίσεις πλεονεκτούν έναντι των μεμονωμένων μεθόδων. Ντετερμινιστικές μέθοδοι όπως η EMV (Expected Monetary Value) δεν μπορούν να κατανοήσουν πλήρως την επιρροή των κινδύνων, συνήθως υποτιμώντας το ρίσκο και τον κίνδυνο. Αντιθέτως η Monte Carlo είναι ικανή να αποτυπώνει τις αλληλεπιδράσεις και να καταλήγει σε πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Το γεγονός αυτό απαντά στο ζήτημα της αποτελεσματικότητας των συνδυαστικών μεθόδων.

Η Pareto ανάλυση σε συνδυασμό με την EMV, αναδεικνύει ότι η μεγαλύτερη επιρροή στο κόστος συγκεντρώνεται σε μικρό αριθμό κινδύνων. Η ανάλυση ευαισθησίας παράγει αποτελέσματα αυξημένης ευαισθησίας του κόστους σε συγκεκριμένους παράγοντες σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της Monte Carlo που δείχνουν υψηλή πιθανότητα καθυστέρησης. Ταυτόχρονα, η μέθοδος Monte Carlo αποδεικνύει την ύπαρξη της αβεβαιότητας ως προς το συνολικό κόστος και τη διάρκεια του έργου. Η διαφορά μεταξύ των τιμών P50 και P90 υποδεικνύει την μεταβλητότητα των παραγόντων και επισημαίνει την πιθανότητα ύπαρξης δυσμενών σεναρίων.

Η δομή του πλαισίου επιτρέπει την ενσωμάτωση της AI σε πολλαπλά επίπεδα. Η χρήση των τεχνικών NLP και Machine Learning καθιστά δυνατή την προληπτική ανάλυση κινδύνων και την παρακολούθηση εργοταξίων σε πραγματικό χρόνο. Οι αναφορές και τα τεχνικά έγγραφα μπορούν να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για την μελλοντική ανάπτυξη της δυνατότητας της AI να αναγνωρίζει πρότυπα και επικίνδυνες συνθήκες. Ο κυριότερος περιορισμός του πλαισίου που αφορά την AI, είναι η έλλειψη ιστορικών δεδομένων που περιορίζει την αξιοποίηση της στο παρόν στάδιο ανάπτυξης του.

## 10.2 Αξιολόγηση αποτελεσματικότητας του πλαισίου

Η εφαρμογή του πλαισίου ανέδειξε τα σημαντικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα κατασκευαστικά έργα. Οι επιμέρους κίνδυνοι που αναλύθηκαν σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα, παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών μεταξύ των πιθανών τιμών κόστους και χρόνου υλοποίησης που χαρακτηρίζει την φύση του έργου.

Τα αποτελέσματα συνολικά παρουσιάζουν:

- Αβεβαιότητα Κόστους
- Υψηλή πιθανότητα καθυστέρησης
- Συγκέντρωση risk exposure σε μικρό αριθμό κινδύνων
- Αυξημένη ευαισθησία στο κόστος σε μικρό αριθμό κινδύνων

Βασικό πλεονέκτημα του πλαισίου αποτελεί ο συνδυασμός ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την αξιοποίηση της εμπειρικής γνώσης στην διατύπωση των προβληματισμών, όπου στη συνέχεια με τα πιθανοτικά μοντέλα και σενάρια θα αναλυθούν.

Παράλληλα η ανάπτυξη του σε περιβάλλον Excel ενισχύει την πρακτική του εφαρμογή, καθώς το καθιστά πλήρως προσβάσιμο από κάθε διαχειριστή, χωρίς να υπάρχει ανάγκη εξειδικευμένου λογισμικού.

Επιπλέον το πλαίσιο δίνει την δυνατότητα στον διαχειριστή να αξιολογεί διαφορετικά σενάρια (Best – Base-Worst-Stress). Τα διαφορετικά σενάρια παρουσιάζουν εκτιμήσεις αποκλίσεων σε κόστος και χρόνο υλοποίησης σε συνδυασμό με στοιχεία ανάλυσης κινδύνων, με σκοπό να λειτουργεί ως εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Στους περιορισμούς συγκαταλέγεται η έλλειψη ιστορικών και εμπειρικών δεδομένων. Οι βιβλιογραφικές αναφορές και οι θεωρητικές παραδοχές ενδέχεται να επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η χρήση πραγματικών δεδομένων από αναφορές ολοκληρωμένων έργων θα μπορούσε να αποτελεί στοιχείο για την καλύτερη βαθμονόμηση του πλαισίου. Επιπλέον, η σωστή επιλογή παραμέτρων και πιθανοτικών κατανομών επηρεάζει εξίσου τα αποτελέσματα.

Αδύναμο επίσης σημείο του πλαισίου είναι ότι δεν υπάρχει πλήρης συσχέτιση μεταξύ των κινδύνων. Για παράδειγμα ο κίνδυνος του ανθρώπινου λάθους με την κόπωση παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ τους. Η ύπαρξη της μίας συνθήκης επηρεάζει σημαντικά τις πιθανότητες εμφάνισης της άλλης.

Τέλος παρόλο που το λογισμικό Excel είναι εύχρηστο, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς σε πολύπλοκες προσομοιώσεις και υπολογισμούς. Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και η διαχείριση αλληλεπιδράσεων των μεταβλητών είναι μια δύσκολη διαδικασία την οποία κάποια λογισμικά ανάλυσης πιο εξειδικευμένα μπορούν να εκτελούν πιο αποτελεσματικά.

## 10.3 Πρωτοτυπία και Συμβολή της Εργασίας στη Βιβλιογραφία

Όπως και αναφέρεται στη ενότητα 7.1, η δημιουργία του υβριδικού πλαισίου καλείται να συμπληρώσει το κενό που παρουσιάζει η διεθνής βιβλιογραφία. Η πρωτοτυπία της εργασίας αφορά τρία διακριτά μέρη.

1. Μεθοδολογική Πρωτοτυπία
   Το πλαίσιο συνδυάζει τις τρεις μεθόδους (FMEA, Monte Carlo ,Sensitivity Analysis) για τον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων. Κάθε μέθοδος οδηγεί από την ποιοτική αναγνώριση έως στην ποσοτική και πιθανοτική εκτίμηση ως ολοκληρωμένο σύστημα και όχι ως σύνολο μεμονωμένων εφαρμογών.
2. Πρακτική Πρωτοτυπία
   Η ανάπτυξη του πλαισίου σε περιβάλλον Excel με την αυτοματοποίηση του πίνακα αποτελεσμάτων μέσω εφαρμογών Visual Basic, το καθιστά ευρέως εφαρμόσιμο από τους διαχειριστές. Επίσης η δυνατότητα επιλογής σεναρίου από “Best” έως “ Stress” αποτελεί πλεονέκτημα στην διαδικασία λήψης αποφάσεων.

3. Εμπειρική Πρωτοτυπία
   Η επιλογή της βαθμονόμησης και εξομάλυνσης των μεταβλητών από στοιχεία διεθνών οργανισμών, αντί εμπειρικών κρίσεων μειώνει τον βαθμό υποκειμενικότητας.

Συνολικά, η εργασία όπως αναπτύχθηκε, καταφέρνει να γεφυρώσει την θεωρία με την πράξη, μέσω της ανάπτυξης ενός αναλυτικού και επιστημονικά τεκμηριωμένου εργαλείου που είναι άμεσα εφαρμόσιμο από διαχειριστές.

## 10.4 Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Το ανεπτυγμένο μοντέλο αποτελεί μια ισχυρή βάση για την υβριδική ανάλυση κινδύνου. Παρόλα αυτά, οι περιορισμοί, εφόσον αντιμετωπισθούν, μπορεί ο χρήστης να βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, καθώς και την εφαρμοσιμότητα του.

Στα κατασκευαστικά έργα, οι κίνδυνοι συχνά σχετίζονται (π.χ. Κόπωση – Ανθρώπινο Λάθος), το οποίο θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο μοντέλο, σε μορφή δομών συσχέτισης ή κάποιων ίσως πινάκων εξάρτησης, ώστε να περιγράφονται καλύτερα οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ τους. Επιπλέον οι τριγωνικές κατανομές αποτελούν την απλοποίηση της αβεβαιότητας. Στην περίπτωση όπου υπάρχουν επαρκή δεδομένα του έργου, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν είτε λογαριθμοκανονικές κατανομές ή βήτα κατανομές, ώστε να αποδίδουν πιο ρεαλιστικά δεδομένα. Στην περίπτωση της ύπαρξης ιστορικών δεδομένων θα υπάρχει η δυνατότητα, σε συνδυασμό με την κρίση των ειδικών και με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, να πραγματοποιηθεί μια καλύτερη βαθμονόμηση των παραμέτρων, ώστε να μειωθεί η υποκειμενικότητα.

Το λογισμικό Excel παρέχει συγκεκριμένες δυνατότητες υπολογισμών, το οποίο σε κάποιο πιο ειδικό λογισμικό με εφαρμογές Python θα μπορούσε να αποτελέσει πιο ισχυρό εργαλείο για την εκτίμηση κινδύνων. Τέλος, η δυνατότητα να υπάρχουν αισθητήρες και μηχανισμοί αποτύπωσης της υφιστάμενης κατάστασης στο εργοτάξιο, θα μπορούσε σε συνδυασμό με την τεχνολογία AI, να αποτυπώνει πλήρως τις εκτιμήσεις κινδύνων και να τις ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο όσο το έργο εξελίσσεται.

Συμπερασματικά, το προτεινόμενο μοντέλο, αποτελεί βάση για την συνδυαστική εκτίμηση κινδύνων και ρίσκου με περιθώρια βελτίωσης, τόσο σε ακαδημαϊκό, όσο και σε πρακτικό πλαίσιο.

# Βιβλιογραφικές Πηγές


Arteaga F., Perez-Bermejo M., (2020) How to Build a Monte Carlo Simulation Tool in Excel With Only Five Lines of VBA Code. International Technology Education and Development Conference.

Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method. Management Science, 31(6), 647–656.

Chakhrit, A., Benharkat, N., & Wadi, M. (2026). A holistic risk identification approach for LPG storage systems using a combination of HAZOP, fuzzy FTA, ETA and FMECA methods. Process Safety Progress. DOI: 10.1002/prs.70060.

Creswell. (2003). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Sage Publications.

Daniel Jurafsky, & James H. Martin. (2023). Speech and language processing. Pearson.

Denzin N., Lincoln Y.,(2018) « The Sage Handbook of Qualitative Research», Manchester Metropolitan University, UK.

Fadilla, M. (2025). Mitigating construction delays using Monte Carlo simulation: A risk-based approach. Journal of Industrial Engineering and Management.

Farrance I., Frenkel R (2014) Uncertainty in Measurement: A review of Monte Carlo Simulation Using Microsoft Excel for the Calculation of Uncertainties Through Functional Relationships, Including Uncertainties in Empirically Derived Constants. Clin Biochem Rev. 35(1),p.36-61

Gump A.,(2001) Expected Monetary Value Choices Risk Impact PMI: Using Decision Models in the Real World. Decision Making Risk Management, PM Network 15(1), pp 43-45.

Hassani, B. (2016). Scenario analysis in risk management: Theory and practice in finance. Springer.

Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. (2025). Revisiting the Delphi technique: Research thinking and practice. Discussion paper.

Harahap, L., et al. (2023). Using the expected monetary value (EMV) method to minimize risk in project decision making. Economic Journal of Economics and Business, 2(4), 131–135.

Hilson, D. (2020). Quantitative risk analysis: Strengths and weaknesses. PM World Journal, 9(12).

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer.

Jick, T. D. (1979). Mixing qualitative and quantitative methods: Triangulation in action. Administrative Science Quarterly, 24(4), 602–611. https://doi.org/10.2307/2392366

Johnson, R. B., & Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed methods research: A research paradigm whose time has come. Educational Researcher, 33(7), 14–26.

Joubert, F. J., & Snyman, M. (2021). Using Monte Carlo simulation to quantify the cost impact of systemic risk factors in a project portfolio: A case study. South African Journal of Industrial Engineering, 32(4), 67–82.

Kabir, S., et al. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. Safety Science.

Kabir G. & Hasin M., (2011) " Comparative Analysis of AHP and Fuzzy AHP Models for Multicriteria Inventory Classification" International Journal of Fuzzy Logic Systems 1(1), p 1-16.

Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2012). Dynamic risk analysis using the bow-tie approach.

Khakzad N., Khan F., & Amyotte P. (2013) " Dynamic Risk Analysis Using Bayesian Networks" Process Safety and Environmental Protection, 91(1-2), 46-53.

Koulinas G, Marhavilas P., Demesouka O., Vavatsikos A., Koulouriotis D.,(2019) «Risk Analysis and Assessment in the Worksites using the Fuzzy-Analytical Hierarchy Process and a Quantitative Technique – A Case Study for the Greek Construction Sector». Safety science 112 pp 96-104.

Liu H., Liu L.,& Liu N(2013) " Risk Evaluation Approached in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review." Expert Systems with Applications 40(2), pp828-838.

Madanchian, M., & Taherdoost, H. (2023). A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. Sustainable Social Development, 1(1).

Marhavilas, P. (2015). Risk assessment techniques in the worksites of occupational health-safety systems with emphasis on industries and constructions (Doctoral dissertation, Democritus University of Thrace). (Link)

Garrido Martins, C., Bogus, S.M., & Valentin, V. (2023**).** Quantitative Risk Assessment Model and Optimization in Infrastructure Fast-Track Construction Projects. Infrastructures, 8(4), 78. https://doi.org/10.3390/infrastructures8040078

Martins, E. F., Lima, G. B. A., Sant'Anna, A. P., Fonseca, R. A., Silva, P. M., & Gavião, L. O. (2017). Stochastic Risk Analysis: Monte Carlo Simulation and FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). Revista Espacios, 38(4), 26.Link

Patil A., Patil D.(2025). Monte Carlo Simulation in Construction Risk Management: A Comprehensive Review. JETIR, Vol 12, 8.

Reid, S. G. (1992). Acceptable risk. In D. I. Blockley (Ed.), Engineering safety (pp. 138–166). McGraw-Hill.

Saffar, I., & Ezzat, A. (2020). Probabilistic risk assessment of typical process plant using event tree and fault tree analysis. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 43(7), 465–477.

Shmueli, G., & Koppius, O. (2011). Predictive analytics in information systems research. MIS Quarterly, 35(3), 553–572.

Stamatis, D. H. (2018). Risk management using failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. ASQ Quality Press.

Stuart Russell, & Peter Norvig. (2021). Artificial intelligence: A modern approach (4th ed.). Pearson.

Su G., Khallaf R., (2022) Research on the Influence of Risk on Construction Project Perfomance: A Systemtic Review. Sustainability 2022 14(11), 6412

Terje Aven. (2020). The science of risk analysis: Foundation and practice. Routledge.

Thomas L. Saaty. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill.

Ulbig, E., et al. (2010). Evaluation of communication on the differences between "risk" and "hazard". Federal Institute for Risk Assessment.

Volkan, E. (2021). Risk assessment and analysis methods: Qualitative and quantitative. ISACA Journal, 2.

Wang, et al. (2018). Structural system reliability analysis based on improved explicit connectivity Bayesian networks. KSCE Journal of Civil Engineering.

Ward, S., & Chapman, C. (2003). Transforming project risk management into project uncertainty management. International Journal of Project Management, 21(2), 97–105.

Woodruff, J. M. (2005). Consequence and likelihood in risk estimation: A matter of balance in UK health and safety risk assessment practice. Safety Science, 43, 345–353.

Zhang, S., Sulankivi, K., Kiviniemi, M., Romo, I., Eastman, C. M., & Teizer, J. (2014). BIM-based Fall Hazard Identification and Prevention in Construction Safety Planning. Safety Science, 72, 31–45

Zhang S., Teizer J., Lee J., Eastman C., & Venugopal M. (2013)" Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. Department of Interior Architecture and Build Environment.

**Χρήσιμοι Σύνδεσμοι:**

AACE International. (n.d.). *Cost engineering and project controls professionals*.

US EPA – Uncertainty and Variability. (n.d.).

UNDRR – Terminology on Disaster Risk Reduction (Link)

# Παράρτημα

**Λογική Δημιουργίας Πλαισίου**

Το πλαίσιο αποτελεί μια συνδυαστική εφαρμογή ποιοτικών και ποσοτικών μεθόδων εκτίμησης ρίσκου και κινδύνων. Συνδυάζει στοχαστικές και πιθανοτικές τεχνικές με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης των κινδύνων σε κατασκευαστικά έργα. Βασίζεται στα δεδομένα που εισάγει ο μελετήτής και σε δεδομένα που προέρχονται από διεθνής βάσεις δεδομένων με σκοπό να παράγει αποτελέσματα. Η καρτέλα Risk Register είναι και η βασική βάση δεδομένων του μοντέλου το οποίο καθορίζει τις πιθανότητες των κινδύνων και τις πιθανές επιδράσεις τους στο έργο.

**Μοντέλο Πιθανοτήτων**

P_base: προέρχεται από την FMEA, Likelihood (O) μέσω της συνάρτησης Excel :

P_base = CHOOSE(D; 0.01; 0.03; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.45; 0.6; 0.75; 0.9)

P_updated ενσωματώνει το ποσοστό που επηρεάζει ο κίνδυνος, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία βρίσκεται (H&S , Περιβαλλοντικοί κ.α.). Αυτή η μεταβλητή μετατρέπει το μοντέλο από στατικό σε δυναμικό συμπεριλαμβάνοντας και τα σενάρια κατάστασης του έργου. Μέσω της συνάρτησης

P_updated = Πιθανότητα x Συντελεστή Κατηγορίας x Σενάριο

P_updated = MIN(1; H × (1 + VLOOKUP(Category; External_Data; factor)) × Scaling_Factor).

Η παραπάνω συνάρτηση βεβαιώνει ότι οι πιθανότητες παραμένουν από 0 -1 , και ότι οι κατηγορίες επηρεάζουν την πιθανότητα.

**Μοντέλο Κόστους**

Το μοντέλο κόστους αποτελείται από Cost_min, Cost_ML (Most Likely), Cost_max

Το Cost base = Κόστος Έργου x Συντελεστή Βαθμονόμησης (Calibration)

Cost_base =Input!$B$3*VLOOKUP(E2;Calibration!$C$3:$D$12;2;TRUE)

Αυτό επιτρέπει οι συνέπειες να είναι ανάλογες με το μέγεθος του έργου.

**Μοντέλο Χρονικής Διάρκειας**

Οι επιπτώσεις χρόνου αποτυπώνονται ως ποσοστά και όχι ως απόλυτες τιμές. Τα ποσοστά στη συνέχεια μετατρέπονται σε πραγματικές τιμές καθυστέρησης μέσω της αναλογίας με τη χρονική διάρκεια του έργου.

Time_base = VLOOKUP(Activity_Type; Calibration_Table)

Delay = Time_ratio x Project Duration

**Monte Carlo Simulation**

Προσομοιάζει την αβεβαιότητα και την επιρροή του κάθε κινδύνου στο έργο. Για κάθε προσομοίωση, για κάθε κίνδυνο δημιουργείται ένας αριθμός. Ο κίνδυνος προκύπτει εάν είναι <= P_adj. Εφόσον εμφανιστεί ο κίνδυνος , τότε από την τριγωνική κατανομή επιλέγεται μια τιμή κόστους και καθυστέρησης. Το συνολικό κόστος και η συνολική διάρκεια προκύπτει από όλους τους κινδύνους που εμφανίζονται σε μια προσομοίωση. Η λογική του Monte Carlo εφαρμόστηκε σε VBA, Visual Basic Application στο Excel ώστε να μην «βαραίνει» το μοντέλο με συναρτήσεις. Παρακάτω αναλύεται η δημιουργία της VBA.

```
Sub MonteCarloSimulation()                ← Κύρια λειτουργία
Dim i As Long, j As Long                  ← i = Iteration ( Επανάληψη) , j= Risk,
                                            long = μορφή δεδομένου
Dim totalCost As double, totalDelay As double                ← Double =
μορφή δεδομένου, totalCost,totalDelay  =  αποτελέσματα
Dim P As Double, C As Double, T As Double
Dim occurs As Boolean          ← P= πιθανότητα, C=κόστος, T= χρονική
διάρκεια,  occurs = αν συμβεί ο κίνδυνος
Dim ProjectDuration As Double
ProjectDuration = Sheets("Input").Range("B2").Value      ← Ορίζουμε από
που αντλεί δεδομένα
Dim ImpactFactor As Double
ImpactFactor = 0.25
Dim GlobalShock As Boolean
Dim CategoryFactor As Double                ← Ορισμός μορφής μεταβλητών
Dim category As String
Randomize                                   ← Λειτουργία τυχαίων σεναρίων
For i = 1 To 10000                          ← Αριθμός επαναλήψεων Monte Carlo
totalCost = 0
totalDelay = 0                              ← Μηδενισμός τιμών κάθε επανάληψης
If Rnd() < 0.2 Then
GlobalShock = True
Else
GlobalShock = False
End If                                      ← Global Shock 20% πιθανότητα
For j = 2 To 35                             ← Εσωτερικό loop στους κινδύνους
With Sheets("Risk Register")
category = .Cells(j, 3).Value
P = .Cells(j, 10).Value
Select Case category
Case "H&S": CategoryFactor = 0.6            ← Προσθήκη κατηγορίας κινδύνου
Case "Cost": CategoryFactor = 0.4
Select Case category
Case "H&S": ImpactFactor = 0.3
If Rnd() > (CategoryFactor + 0.2) Then GoTo NextRisk
If GlobalShock Then
P = P * 1.3
End If                                      ← Συστημική αύξηση του ρίσκου
If P > 1 Then P = 1
occurs = (Rnd() <= P)                       ← Bernoulli trial (Συμβαίνει ή όχι)
If occurs Then
C = Triangular(.Cells(j, 15), .Cells(j, 16), .Cells(j, 17))
T = Triangular(.Cells(j, 18), .Cells(j, 19), .Cells(j, 20))
totalCost = totalCost + (C * ImpactFactor)
totalDelay = totalDelay + (T * ProjectDuration * ImpactFactor)
NextRisk:
```

```
Next j
Sheets("Monte Carlo").Cells(i + 1, 2).Value = totalCost
Sheets("Monte Carlo").Cells(i + 1, 3).Value = totalDelay      ← Αποθήκευση αποτελεσμάτων
```

**Τριγωνική Κατανομή**

Για την τριγωνική κατανομή, επίσης δημιουργήθηκε μια VBA

```
Function Triangular(minVal As Double, modeVal As Double, maxVal As Double) As Double
Dim u As Double, C As Double                    ← u= τυχαίος αριθμός,
                                                  C =breakpoint της κατανομής
u = Rnd()
If maxVal = minVal Then
Triangular = minVal
Exit Function
End If                                          ← εάν δεν υπάρχει εύρος, επιστρέφει
                                                  Σταθερή τιμή
C = (modeVal - minVal) / (maxVal - minVal)      ← υπολογισμός peak τιμής
If u < C Then
Triangular = minVal + Sqr(u * (maxVal - minVal) * (modeVal - minVal)) ←
υπολογισμός rising slope
Else
Triangular = maxVal - Sqr((1 - u) * (maxVal - minVal) * (maxVal - modeVal))
← Falling slope,   συμμετρική λογική
```

Στο πλαίσιο προστίθενται οι κατηγορίες κινδύνων, επηρεάζοντας την πιθανότητα ενεργοποίησης αυτών, μέσω προκαθορισμένων παραγόντων. Επίσης περιλαμβάνει έναν μηχανισμό «σοκ» (Global Shock) με σκοπό την αύξηση της πιθανότητας να πραγματοποιούνται πολλοί κίνδυνοι ταυτόχρονα. Οι επιπτώσεις των κινδύνων σταθμίζονται σύμφωνα με τον παράγοντα επιπτώσεων (Impact Factor) Συνολική επίπτωση = Δειγματοληπτική τιμή x Παράγοντα επιπτώσεων, με σκοπό να διαφοροποιούνται οι επιπτώσεις μεταξύ των κατηγοριών κινδύνου.

**Ανάλυση Ευαισθησίας**

Στο πλαίσιο πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας , όπου για κάθε κίνδυνο η πιθανότητα μειώνεται κατά 10% πραγματοποιείται η Monte Carlo αυξάνεται κατά 10% και επαναλαμβάνεται με σκοπό να παράγει αποτελέσματα Low Impact και High Impact για κάθε κίνδυνο. Στην περίπτωση τη δική μας επειδή το μοντέλο είναι παράλληλα στοχαστικό, κατά την ανάλυση ευαισθησίας, μπορεί τα High και Low Impacts να είναι και τα δύο θετικές τιμές και όχι συμμετρικές, όπως συνήθως παρουσιάζεται σε πιο στατικά μοντέλα.

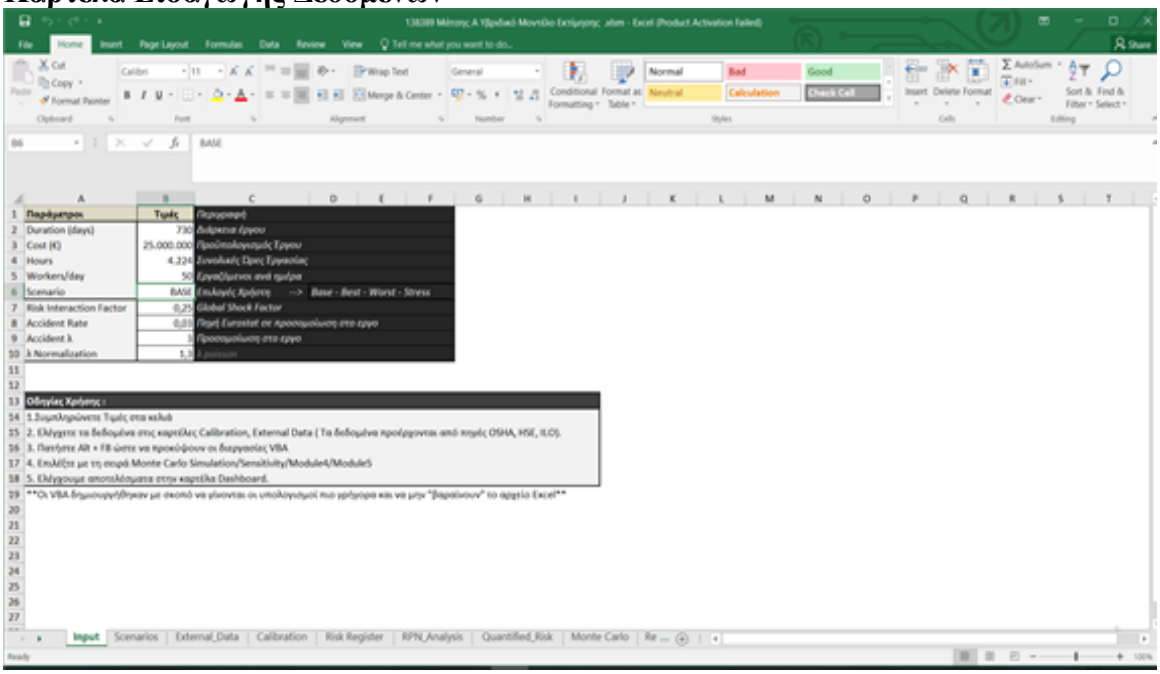
```
Sub SensitivityAnalysis()

Dim i As Long
Dim baseP As Double
Dim baseResult As Double, lowResult As Double, highResult As Double

Dim wsRisk As Worksheet, wsSens As Worksheet, wsMC As Worksheet

Set wsRisk = Sheets("Risk Register")
Set wsSens = Sheets("Sensitivity")
Set wsMC = Sheets("Monte Carlo")
nMC = 100                                   ← Επανάληψη Monte Carlo
Call MonteCarloSimulation
baseResult = WorksheetFunction.Average(wsMC.Range("B2:B" & nMC + 1))
For i = 2 To 35
baseP = wsRisk.Cells(i, 10).Value
wsRisk.Cells(i, 10).Value = baseP * 0.9
Call MonteCarloSimulation
lowResult = WorksheetFunction.Average(wsMC.Range("B2:B" & nMC + 1))
wsRisk.Cells(i, 10).Value = WorksheetFunction.Min(1, baseP * 1.1)
Call MonteCarloSimulation
highResult = WorksheetFunction.Average(wsMC.Range("B2:B" & nMC + 1))
wsRisk.Cells(i, 10).Value = baseP
wsSens.Cells(i, 2).Value = baseResult
wsSens.Cells(i, 3).Value = lowResult
wsSens.Cells(i, 4).Value = highResult
wsSens.Cells(i, 5).Value = WorksheetFunction.Max( _Abs(highResult - baseResult),
_Abs(lowResult - baseResult))
```

Συνολικά οι παραδοχές του μοντέλου έχουν ως εξής:

- Οι κίνδυνοι είναι στατιστικά ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη παραδοχή χρησιμοποιήθηκε για λόγους απλότητας καθώς λείπουν ιστορικά και εμπειρικά δεδομένα συσχέτισης. Η πρόταση για την αντιμετώπιση του περιορισμού υπάρχει στο Κεφάλαιο 10 της εργασίας.
- Οι τριγωνικές κατανομές και η Monte Carlo ενσωματώνουν την αβεβαιότητα στο πλαίσιο
- Οι παράγοντες επιπτώσεων αναδεικνύουν την κρισιμότητα των κινδύνων.

# Στιγμιότυπα Αρχείου Excel

## Καρτέλα Εισαγωγής Δεδομένων



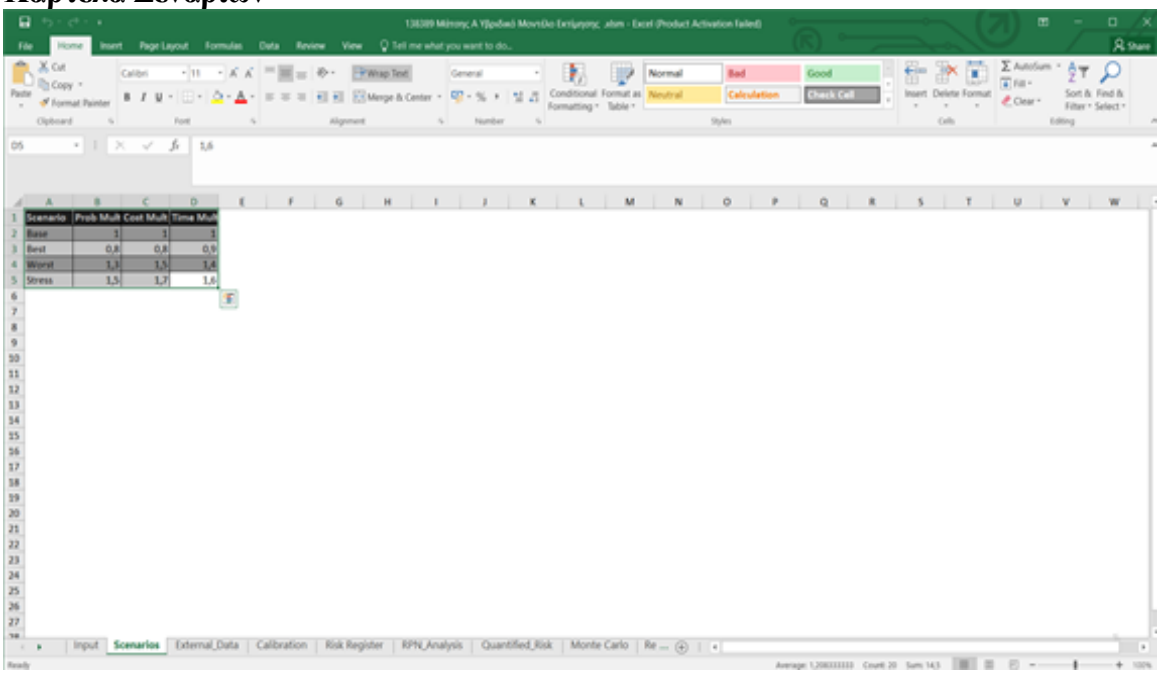
| Παράμετρος | Τιμές | Περιγραφή |
|---|---|---|
| Duration (days) | 730 | Διάρκεια Έργου |
| Cost (€) | 25.000.000 | Προϋπολογισμός Έργου |
| Hours | 4.224 | Συνολικές Ώρες Εργασίας |
| Workers/day | 50 | Εργαζόμενοι ανά ημέρα |
| Scenario | BASE | Επιλογές Χρήστη --> Base - Best - Worst - Stress |
| Risk Interaction Factor | 0,25 | Global Shock Factor |
| Accident Rate | 0,03 | Πηγή Eurostat ανά προσομοίωση στο έργο |
| Accident k | 3 | Προσομοίωση στο έργο |
| λ Normalization | 1,3 | Poisson |

**Οδηγίες Χρήσης :**

1. Συμπληρώνετε Τιμές στα κελιά
2. Ελέγχετε τα δεδομένα στις καρτέλες Calibration, External Data ( Τα δεδομένα προέρχονται από πηγές OSHA, HSE, ILO).
3. Πατήστε Alt + F8 ώστε να προκύψουν οι διεργασίες VBA
4. Επιλέξτε με τη σειρά Monte Carlo Simulation/Sensitivity/Module4/Module5
5. Ελέγχουμε αποτελέσματα στην καρτέλα Dashboard.

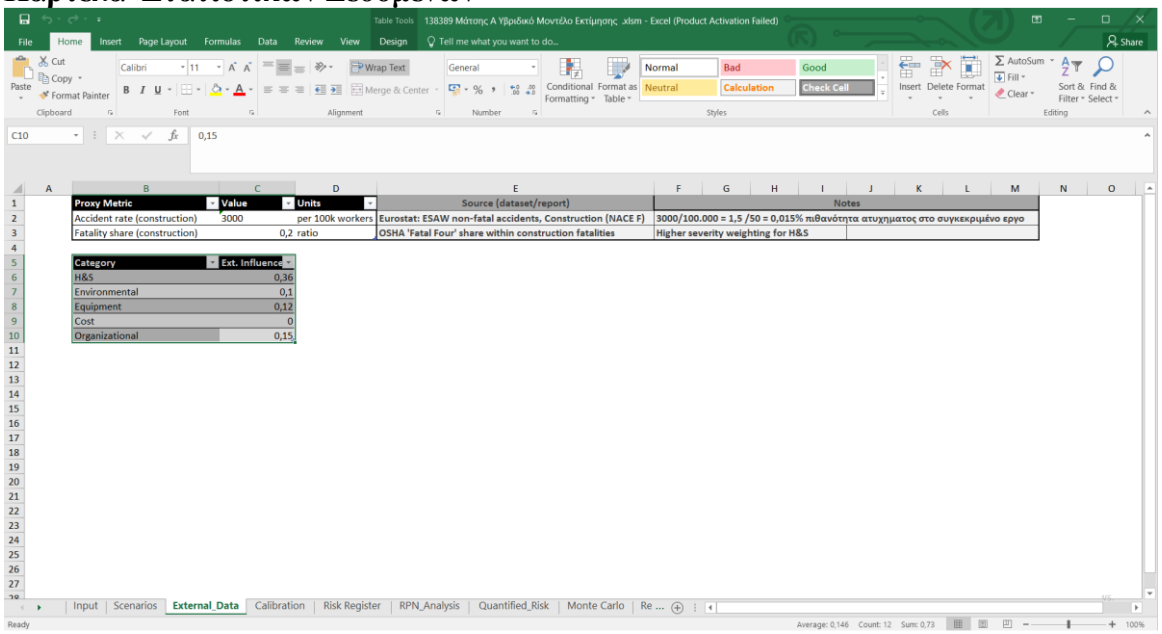
**Οι VBA δημιουργήθηκαν με σκοπό να γίνονται οι υπολογισμοί πιο γρήγορα και να μην "βαραίνουν" το αρχείο Excel**

## Καρτέλα Σεναρίων



| Scenario | Prob Mult | Cost Mult | Time Mult |
|---|---|---|---|
| Base | 1 | 1 | 1 |
| Best | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
| Worst | 1,3 | 1,5 | 1,4 |
| Stress | 1,5 | 1,7 | 1,6 |

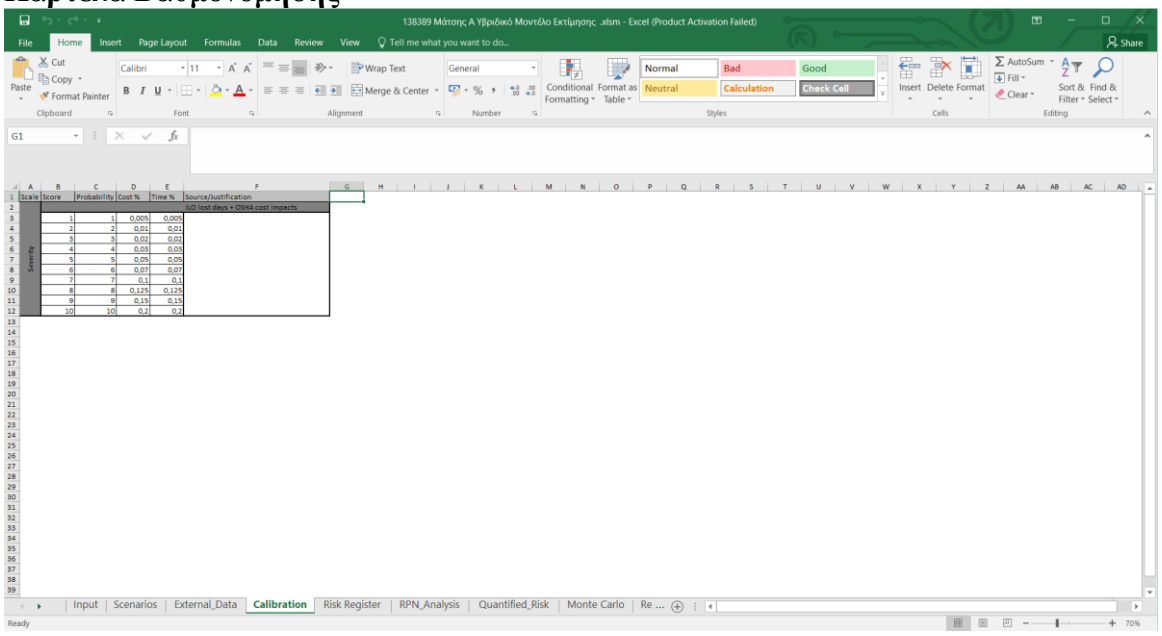
## Καρτέλα Στατιστικών Δεδομένων



| Proxy Metric | Value | Units | Source (dataset/report) | Notes |
|---|---|---|---|---|
| Accident rate (construction) | 3000 | per 100k workers | Eurostat: ESAW non-fatal accidents, Construction (NACE F) | 3000/100.000 = 1,5 /50 = 0,015% πιθανότητα ατυχηματος στο συγκεκριμένο εργο |
| Fatality share (construction) | 0,2 | ratio | OSHA 'Fatal Four' share within construction fatalities | Higher severity weighting for H&S |

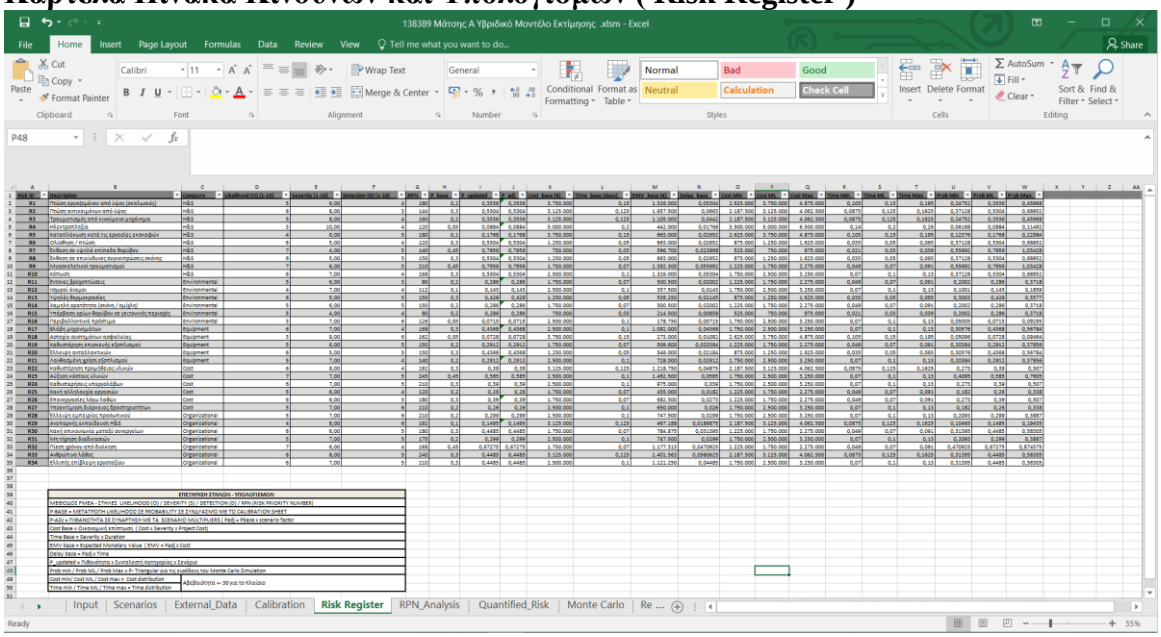
| Category | Ext. Influence |
|---|---|
| H&S | 0,36 |
| Environmental | 0,1 |
| Equipment | 0,12 |
| Cost | 0 |
| Organizational | 0,15 |

## Καρτέλα Βαθμονόμησης

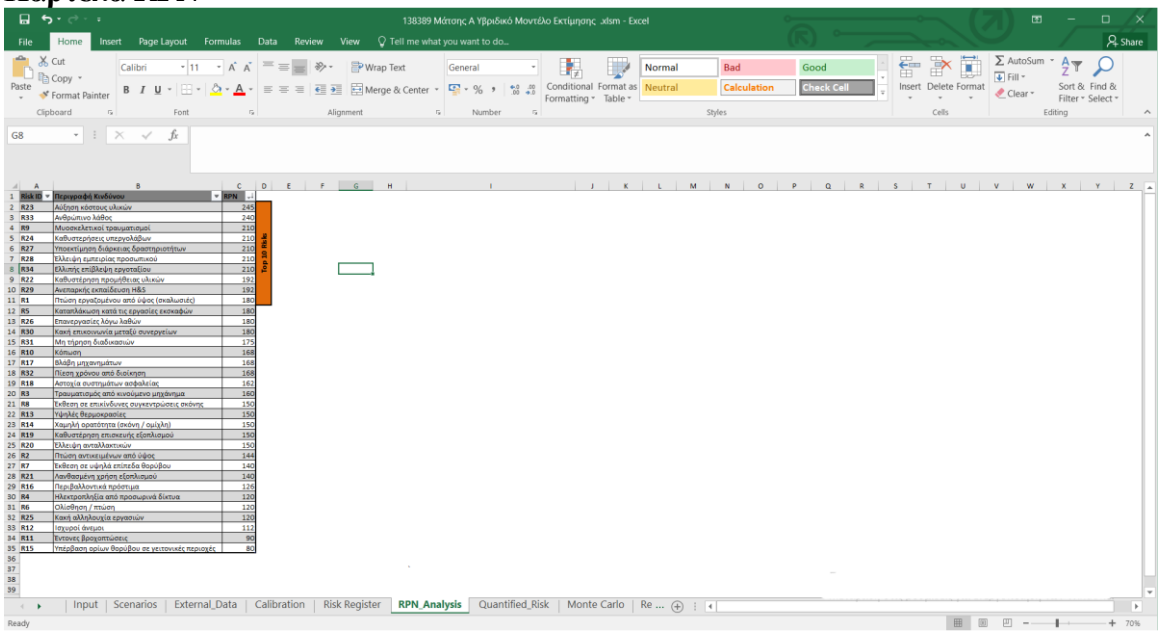


| Scale | Score | Probability | Cost % | Time % | Source/Justification |
|---|---|---|---|---|---|
| Severity | | | | | 1/0 lost days + OSHA cost impacts |
| | 1 | 1 | 0,005 | 0,005 | |
| | 2 | 2 | 0,01 | 0,01 | |
| | 3 | 3 | 0,02 | 0,02 | |
| | 4 | 4 | 0,03 | 0,03 | |
| | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 | |
| | 6 | 6 | 0,07 | 0,07 | |
| | 7 | 7 | 0,1 | 0,1 | |
| | 8 | 8 | 0,125 | 0,125 | |
| | 9 | 9 | 0,15 | 0,15 | |
| | 10 | 10 | 0,2 | 0,2 | |

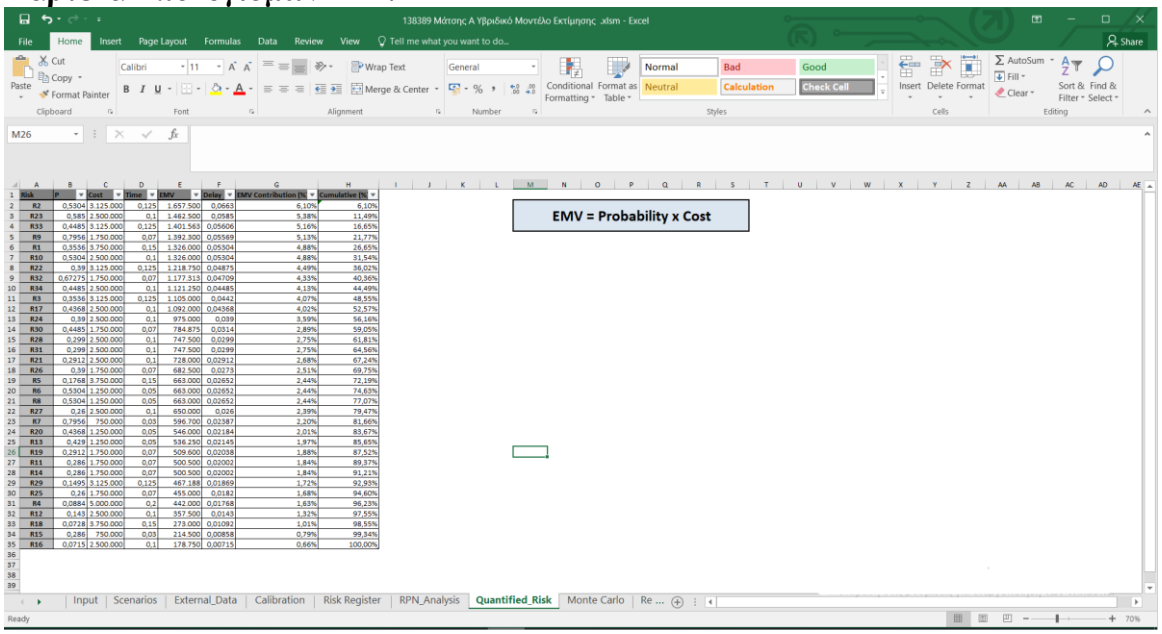
## Καρτέλα Πίνακα Κινδύνων και Υπολογισμών ( Risk Register )



## Καρτέλα RPN



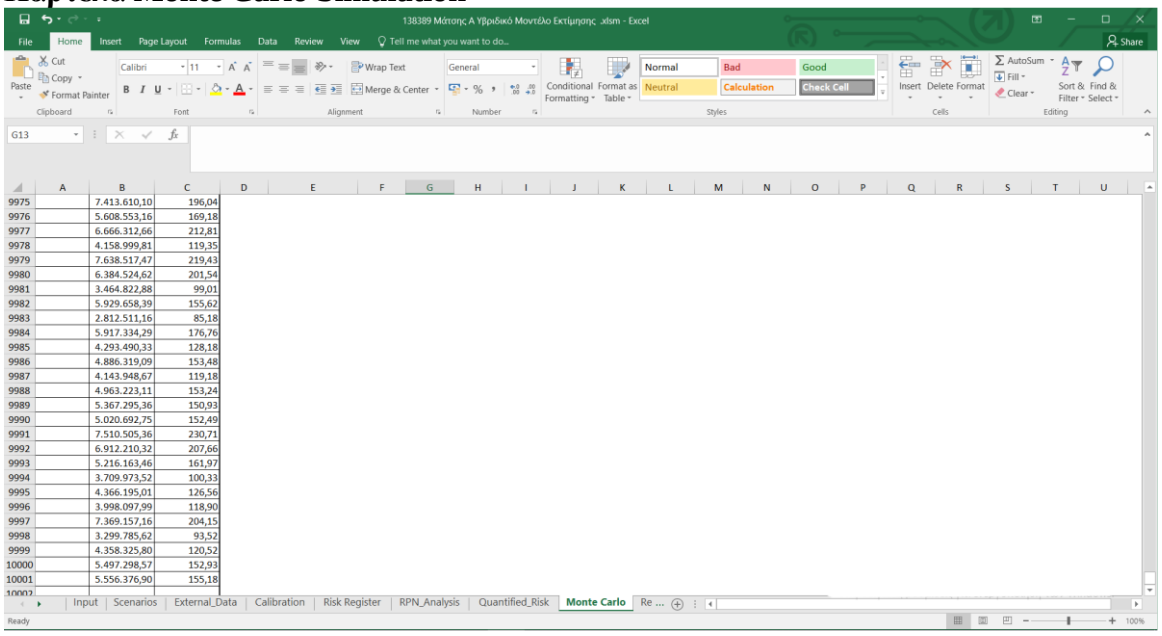
## Καρτέλα Υπολογισμών EMV



| Risk | P | Cost | Time | EMV | Delay | EMV Contribution [%] | Cumulative [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R2 | 0,5304 | 3.125.000 | 0,125 | 1.657.500 | 0,0663 | 6,10% | 6,10% |
| R23 | 0,585 | 2.500.000 | 0,1 | 1.462.500 | 0,0585 | 5,38% | 11,49% |
| R33 | 0,4485 | 3.125.000 | 0,125 | 1.401.563 | 0,05606 | 5,16% | 16,65% |
| R9 | 0,7956 | 1.750.000 | 0,07 | 1.392.300 | 0,05569 | 5,13% | 21,77% |
| R1 | 0,3536 | 3.750.000 | 0,15 | 1.326.000 | 0,05304 | 4,88% | 26,65% |
| R10 | 0,5304 | 2.500.000 | 0,1 | 1.326.000 | 0,05304 | 4,88% | 31,54% |
| R22 | 0,39 | 3.125.000 | 0,125 | 1.218.750 | 0,04875 | 4,49% | 36,02% |
| R32 | 0,67275 | 1.750.000 | 0,07 | 1.177.313 | 0,04709 | 4,33% | 40,36% |
| R34 | 0,4485 | 2.500.000 | 0,1 | 1.121.250 | 0,04485 | 4,13% | 44,49% |
| R3 | 0,3536 | 3.125.000 | 0,125 | 1.105.000 | 0,0442 | 4,07% | 48,55% |
| R17 | 0,4368 | 2.500.000 | 0,1 | 1.092.000 | 0,04368 | 4,02% | 52,57% |
| R24 | 0,39 | 2.500.000 | 0,1 | 975.000 | 0,039 | 3,59% | 56,16% |
| R30 | 0,4485 | 1.750.000 | 0,07 | 784.875 | 0,0314 | 2,89% | 59,05% |
| R28 | 0,299 | 2.500.000 | 0,1 | 747.500 | 0,0299 | 2,75% | 61,81% |
| R31 | 0,299 | 2.500.000 | 0,1 | 747.500 | 0,0299 | 2,75% | 64,56% |
| R21 | 0,2912 | 2.500.000 | 0,1 | 728.000 | 0,02912 | 2,68% | 67,24% |
| R26 | 0,39 | 1.750.000 | 0,07 | 682.500 | 0,0273 | 2,51% | 69,75% |
| R5 | 0,1768 | 3.750.000 | 0,15 | 663.000 | 0,02652 | 2,44% | 72,19% |
| R6 | 0,5304 | 1.250.000 | 0,05 | 663.000 | 0,02652 | 2,44% | 74,63% |
| R8 | 0,5304 | 1.250.000 | 0,05 | 663.000 | 0,02652 | 2,44% | 77,07% |
| R27 | 0,26 | 2.500.000 | 0,1 | 650.000 | 0,026 | 2,39% | 79,47% |
| R7 | 0,7956 | 750.000 | 0,03 | 596.700 | 0,02387 | 2,20% | 81,66% |
| R20 | 0,4368 | 1.250.000 | 0,05 | 546.000 | 0,02184 | 2,01% | 83,67% |
| R13 | 0,429 | 1.250.000 | 0,05 | 536.250 | 0,02145 | 1,97% | 85,65% |
| R19 | 0,2912 | 1.750.000 | 0,07 | 509.600 | 0,02038 | 1,88% | 87,52% |
| R11 | 0,286 | 1.750.000 | 0,07 | 500.500 | 0,02002 | 1,84% | 89,37% |
| R14 | 0,286 | 1.750.000 | 0,07 | 500.500 | 0,02002 | 1,84% | 91,21% |
| R29 | 0,1495 | 3.125.000 | 0,125 | 467.188 | 0,01869 | 1,72% | 92,93% |
| R25 | 0,26 | 1.750.000 | 0,07 | 455.000 | 0,0182 | 1,68% | 94,60% |
| R4 | 0,0884 | 5.000.000 | 0,2 | 442.000 | 0,01768 | 1,63% | 96,23% |
| R12 | 0,143 | 2.500.000 | 0,1 | 357.500 | 0,0143 | 1,32% | 97,55% |
| R18 | 0,0728 | 3.750.000 | 0,15 | 273.000 | 0,01092 | 1,01% | 98,55% |
| R15 | 0,286 | 750.000 | 0,03 | 214.500 | 0,00858 | 0,79% | 99,34% |
| R16 | 0,0715 | 2.500.000 | 0,1 | 178.750 | 0,00715 | 0,66% | 100,00% |

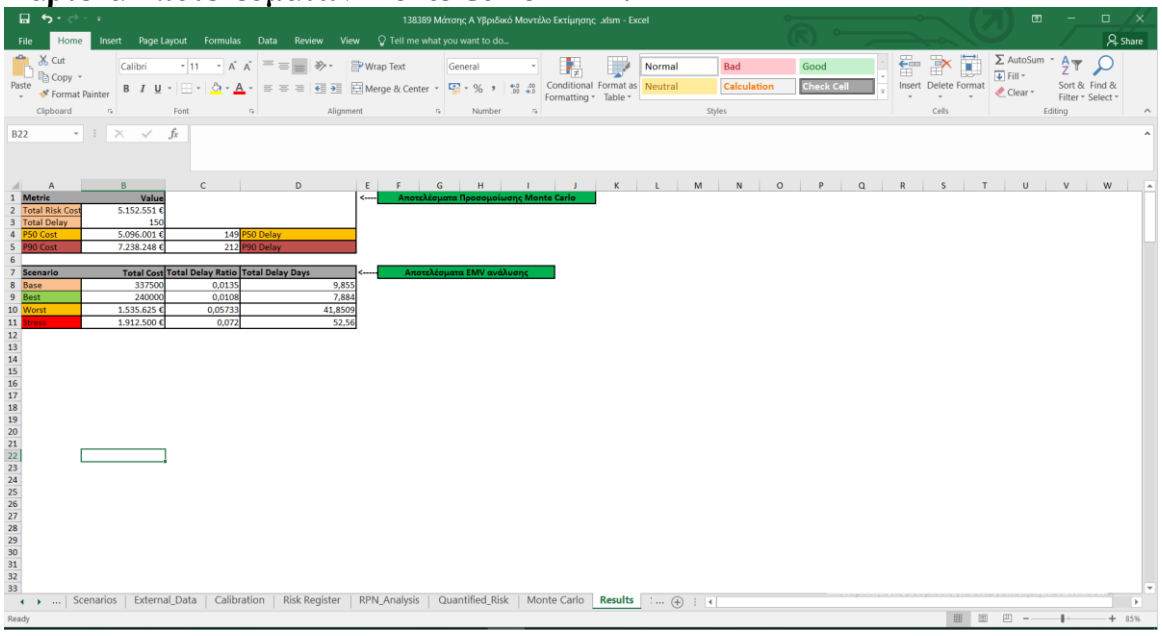


## Καρτέλα Monte Carlo Simulation



| | | |
|---|---|---|
| 9975 | 7.413.610,10 | 196,04 |
| 9976 | 5.608.553,16 | 169,18 |
| 9977 | 6.666.312,66 | 212,81 |
| 9978 | 4.158.999,81 | 119,35 |
| 9979 | 7.638.517,47 | 219,43 |
| 9980 | 6.384.524,62 | 201,54 |
| 9981 | 3.464.822,88 | 99,01 |
| 9982 | 5.929.658,39 | 155,62 |
| 9983 | 2.812.511,16 | 85,18 |
| 9984 | 5.917.334,29 | 176,76 |
| 9985 | 4.293.490,33 | 128,18 |
| 9986 | 4.886.319,09 | 153,48 |
| 9987 | 4.143.948,67 | 119,18 |
| 9988 | 4.963.223,11 | 153,24 |
| 9989 | 5.367.295,36 | 150,93 |
| 9990 | 5.020.692,75 | 152,49 |
| 9991 | 7.510.505,36 | 230,71 |
| 9992 | 6.912.210,32 | 207,66 |
| 9993 | 5.216.163,46 | 161,97 |
| 9994 | 3.709.973,52 | 100,33 |
| 9995 | 4.366.195,01 | 126,56 |
| 9996 | 3.998.097,99 | 118,90 |
| 9997 | 7.369.157,16 | 204,15 |
| 9998 | 3.299.785,62 | 93,52 |
| 9999 | 4.358.325,80 | 120,52 |
| 10000 | 5.497.298,57 | 152,93 |
| 10001 | 5.556.376,90 | 155,18 |

## Καρτέλα Αποτελεσμάτων Monte Carlo - EMV



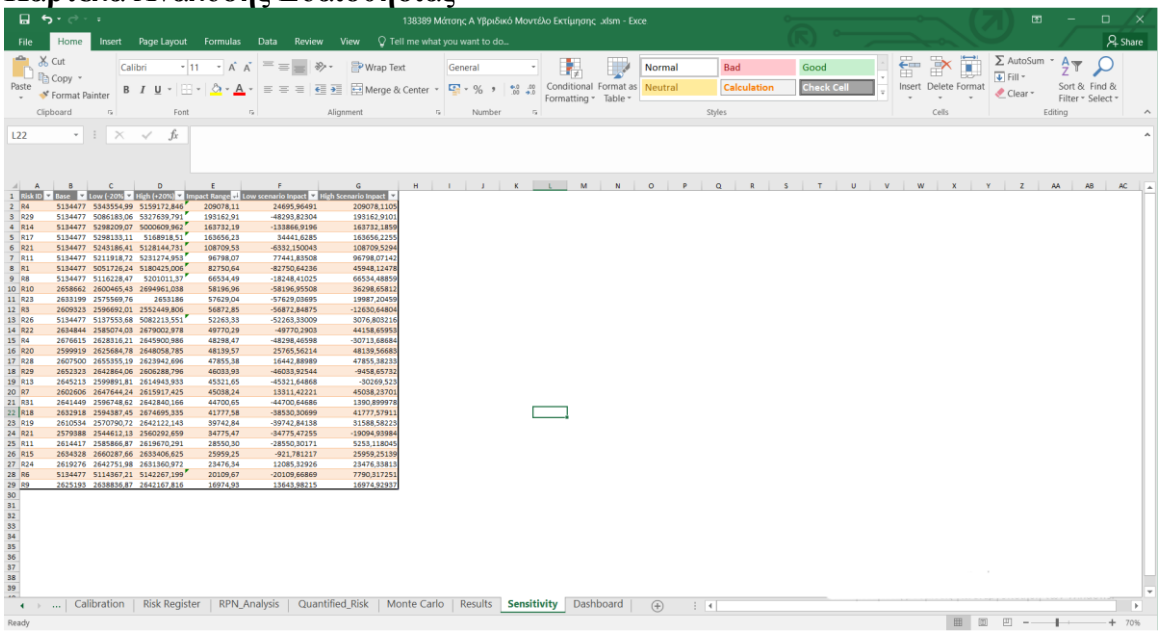
| Metric | Value | | |
|---|---|---|---|
| Total Risk Cost | 5.152.551 € | | |
| Total Delay | 150 | | |
| P50 Cost | 5.096.001 € | 149 | P50 Delay |
| P90 Cost | 7.238.248 € | 212 | P90 Delay |

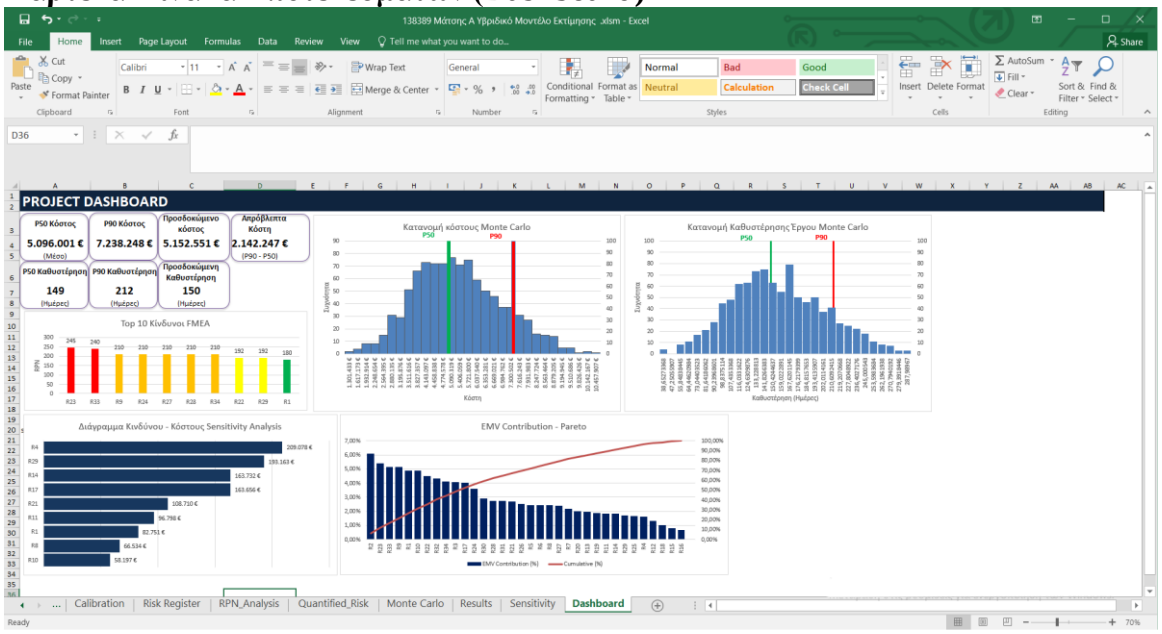
Αποτελέσματα Προσομοίωσης Monte Carlo

| Scenario | Total Cost | Total Delay Ratio | Total Delay Days |
|---|---|---|---|
| Base | 337500 | 0,0135 | 9,855 |
| Best | 240000 | 0,0108 | 7,884 |
| Worst | 1.535.625 € | 0,05733 | 41,8509 |
| Trend | 1.912.500 € | 0,072 | 52,56 |

Αποτελέσματα EMV ανάλυσης

## Καρτέλα Ανάλυσης Ευαισθησίας



| Risk ID | Base | Low (-20%) | High (+20%) | Impact Range | Low scenario Impact | High Scenario Impact |
|---|---|---|---|---|---|---|
| R4 | 5134477 | 5343554,99 | 5159172,846 | 209078,11 | 24695,96491 | 209078,1105 |
| R29 | 5134477 | 5086183,06 | 5327639,791 | 193162,91 | -48293,82304 | 193162,9101 |
| R14 | 5134477 | 5298209,07 | 5000609,962 | 163732,19 | -133866,9196 | 163732,1859 |
| R17 | 5134477 | 5298133,11 | 5168918,51 | 163656,23 | 34441,6285 | 163656,2255 |
| R21 | 5134477 | 5243186,41 | 5128144,731 | 108709,53 | -6332,150043 | 108709,5294 |
| R11 | 5134477 | 5211818,72 | 5231274,953 | 96798,07 | 77441,83508 | 96798,07142 |
| R1 | 5134477 | 5051726,24 | 5180425,006 | 82750,64 | -82750,64236 | 45948,12478 |
| R8 | 5134477 | 5116228,47 | 5201011,37 | 66534,49 | -18248,41025 | 66534,48859 |
| R10 | 2658662 | 2600465,43 | 2694961,038 | 58196,96 | -58196,95508 | 36298,65812 |
| R23 | 2633199 | 2575569,76 | 2653186 | 57629,04 | -57628,03695 | 19987,20459 |
| R3 | 2609323 | 2596692,01 | 2552449,806 | 56872,85 | -56872,84875 | -12630,64804 |
| R26 | 5134477 | 5137553,68 | 5082213,551 | 52263,33 | -52263,33009 | 3076,803216 |
| R22 | 2634844 | 2585074,03 | 2679002,978 | 49770,29 | -49770,2903 | 44158,65953 |
| R4 | 2676615 | 2628316,21 | 2645800,986 | 48298,47 | -48298,46598 | -30713,68684 |
| R20 | 2599919 | 2625684,78 | 2648058,785 | 48139,57 | 25765,56214 | 48139,56683 |
| R28 | 2607500 | 2655355,19 | 2623942,696 | 47855,38 | 16442,88989 | 47855,38233 |
| R29 | 2652323 | 2642864,06 | 2606288,796 | 46033,93 | -46033,92544 | -9458,65732 |
| R13 | 2645213 | 2599891,81 | 2614943,933 | 45321,65 | -45321,64868 | -30269,523 |
| R7 | 2602606 | 2647644,24 | 2615917,425 | 45038,24 | 13311,42221 | 45038,23701 |
| R31 | 2641449 | 2596748,62 | 2642840,166 | 44700,65 | -44700,64686 | 1390,899978 |
| R18 | 2632918 | 2594387,45 | 2674695,335 | 41777,58 | -38530,30699 | 41777,57911 |
| R19 | 2610534 | 2570790,72 | 2642122,143 | 39742,84 | -39742,84138 | 31588,58223 |
| R21 | 2579388 | 2544612,13 | 2560292,659 | 34775,47 | -34775,47255 | -19094,93984 |
| R11 | 2614417 | 2585866,87 | 2619670,291 | 28550,30 | -28550,30171 | 5253,118045 |
| R15 | 2634328 | 2660287,66 | 2633406,625 | 25959,25 | -921,781217 | 25959,25139 |
| R24 | 2619276 | 2642751,98 | 2631360,972 | 23476,34 | 12085,32926 | 23476,33813 |
| R6 | 5134477 | 5114367,21 | 5142267,199 | 20109,67 | -20109,66869 | 7790,317251 |
| R9 | 2625193 | 2638836,87 | 2642167,816 | 16974,93 | 13643,98215 | 16974,92937 |

## Καρτέλα Πίνακα Αποτελεσμάτων (Dashboard)