ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής Πόρων για την απομείωση του κινδύνου σε συγκοινωνιακές υποδομές.

ΜΑΡΙΑ ΧΑΤΖΗ

Επίβλεψη:

Νικόλαος Λαγαρός Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Δρ. Ιωάννης Μπενέκος, Πρόεδρος Τεχνικής Επιτροπής TC A.3. – Risk Management της Διεθνούς Ένωσης Οδοποιίας
Maurizio Crispino, Καθηγητής στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο

Αθήνα, Οκτώβρης 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Στη προσπάθεια μου αυτή, η συμβολή συγκεκριμένων προσώπων υπήρξε καθοριστική.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τον κ. Νικόλαο Λαγαρό, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη καθοδήγηση, το χρόνο του αλλά και τη δημιουργική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η πραγματοποίηση και η ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Δρ. Ιωάννη Μπενέκο, Πρόεδρο της Τεχνικής Επιτροπής TC A.3 – Risk Management της Διεθνούς Ένωσης Οδοποιίας, για τις συμβουλές, την καθοδήγηση, τον χρόνο που αφιέρωσε καθώς και την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας. Χάρη στον κ. Μπενέκο έμαθα το λογισμικό CAPTool και μου δόθηκε η ευκαιρία να εκπονήσω σημαντικό μέρος της Διπλωματικής Εργασίας στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Maurizio Crispino, καθηγητή στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο (Politecnico di Milano) για τη καθοδήγηση, την φιλοξενία αλλά και για την παροχή σημαντικών πληροφοριών και επιβεβαίωση στοιχείων.

Εν συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στηρίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε κάθε στιγμή της ζωής μου, χωρίς την οποία τίποτα από όσα έχω καταφέρει μέχρι σήμερα δε θα ήταν πραγματικότητα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλες τις στιγμές που έχουμε περάσει κατά την διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων, οι οποίες μελλοντικά θα μας συνοδεύουν ως οι καλύτερες αναμνήσεις.

Μαρία Χατζή

Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής Πόρων για την απομείωση του κινδύνου σε συγκοινωνιακές υποδομές.

Μαρία Χατζή

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Νικόλαος Λαγαρός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Δρ. Ιωάννης Μπενέκος, Πρόεδρος Τεχνικής Επιτροπής TC A.3. – Risk Management της Διεθνούς Ένωσης Οδοποιίας
Maurizio Crispino, Καθηγητής στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο

ΣΥΝΟΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης κατανομής των χρηματικών πόρων, με απώτερο επιθυμητό αποτέλεσμα την απομείωση του κινδύνου στις συγκοινωνιακές υποδομές. Για την πραγματοποίηση του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στις αρχές του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Το μοντέλο αυτό προσαρμόστηκε στο λογισμικό CAPTool και εκφράστηκε μέσω αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία εισάγονται οι συντελεστές αποτελεσματικότητας της κάθε ενέργειας απομείωσης του κινδύνου. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης επιζητείται η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης με βασικό περιορισμό το διατιθέμενο προϋπολογισμό. Την μελέτη εφαρμογής αποτελεί το σύνολο των υποδομών των ιταλικών οδικών δικτύων A7, A50, A51, A52.

Αναζητήθηκε το βέλτιστο αρχικό κεφαλαίο και αφού αυτό ορίστηκε θεωρήθηκαν δώδεκα (12) διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα από τις διάφορες επιλύσεις του μοντέλου καταδεικνύουν ότι όσο αυξάνεται ο διαθέσιμος προϋπολογισμός αυξάνεται και ο αριθμός των υποδομών στους οποίους ενεργοποιούνται ενέργειες συντήρησης, όχι όμως με αναλογικό τρόπο. Επιπροσθέτως, προσδιορίστηκε η σειρά προτεραιότητας ορισμένων ενεργειών.

Ωστόσο προκύπτει ότι η βέλτιστη κατανομή των ενεργειών δεν συνδέεται γραμμικά με το ύψος του προϋπολογισμού. Τέλος, για κάθε περίπτωση διαπιστώθηκε ότι η χρονική μετακύλιση κεφαλαίου αποδίδει περισσότερο στην αξιοποίηση του διατιθέμενου κεφαλαίου.

Λέξεις κλειδιά: κατανομή πόρων, διαχείριση κινδύνου, συγκοινωνιακές υποδομές, γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός.

D*evelopment of an optimization model for budget allocation for the risk mitigation on road infrastructures.*

Maria Chatzi

Supervisors:

Nikolas Lagaros, Associate Professor NTUA
Dr. Ioannis Benekos, President in Technical Commitment TC A.3-Risk Management
Maurizio Crispino zio , Professor in Politecnico di Milano

ABSTRACT

The aim of this Diploma Thesis is to achieve the optimal allocation of the financial resources for mitigating the risk on road infrastructures. For this purpose, a mathematical optimization model based on the principles of linear integer programming has been developed and implemented to achieve the goal. This model is expressed through an objective function which includes two district parameters. The first parameter is the weight factors of each countermeasure and the second reflects the efficiency of each countermeasure. Throughout the process of optimization, the objective function needs to be maximized to meet budget constraint. The method was tested in a case study involving the road infrastructures of the A7, A50, A51, and A52 highways in Italy.
Twelve (12) different optimization scenarios have been considered and solved. The results of their solutions indicate that the increase of the budget leads to the increase of the number of countermeasures, that are activated, but not in a proportionate manner. However, it was derived that the optimal allocation of resources is not linearly related to the budget size, the project's cost or the investment's escalation. Finally, another conclusion is that in the examined scenarios, the timing of the budget allocation contributes more to the exploitation of the available fund.

Keywords: resource allocation, risk management, road infrastructures, linear integer programming

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων για την απομείωση του κινδύνου σε συγκοινωνιακές υποδομές. Η μελέτη εφαρμόστηκε στις υποδομές των ιταλικών οδικών δικτύων A7, A50, A51, A52. Πιο συγκεκριμένα, με βασικό περιορισμό αυτόν της διάθεσης των ελαχίστων πόρων επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός προγράμματος βέλτιστης συντήρησης των υποδομών σε χρονικό ορίζοντα τριών (3) ετών.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών και μεθοδολογιών παρόμοιων με το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων για τα οδικά δίκτυα επιτεύχθηκε μέσω της εταιρίας διαχείρισης των οδικών δικτύων **Milano Serravalle - Milano Tangenziali S.p.A**. Τα στοιχεία, αφού οργανώθηκαν και ομαδοποιήθηκαν κατάλληλα αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα CAPTool από το οποίο προέκυψε ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της κάθε ενέργειας συντήρησης των υποδομών.

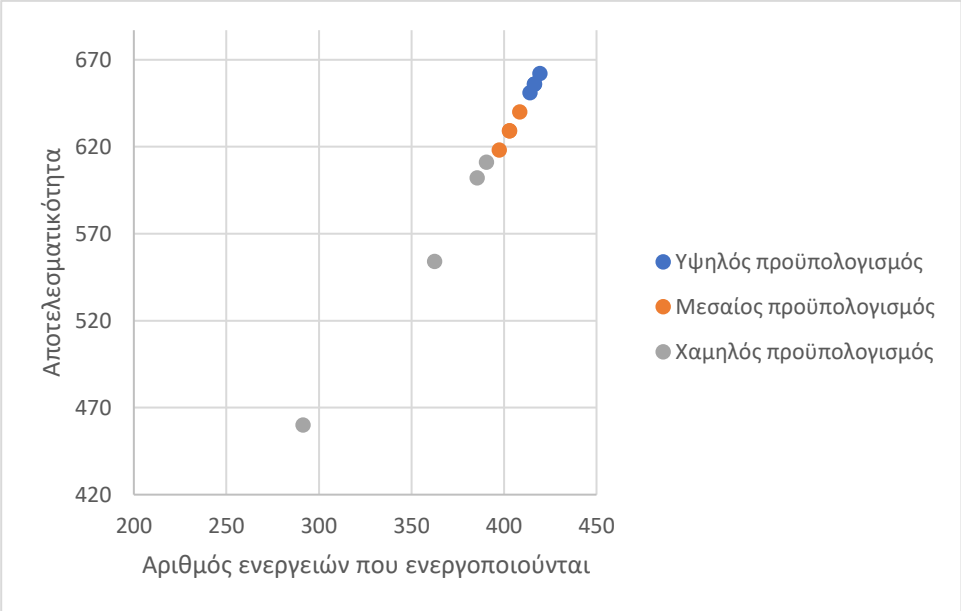
Ακολούθως αναπτύχθηκε η **αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου βελτιστοποίησης**, η οποία υποδηλώνει την απόδοση της συνολικής μείωσης του κινδύνου στις συγκοινωνιακές υποδομές και στην οποία εισάγονται οι συντελεστές αποτελεσματικότητας των ενεργειών επιζητώντας τη μεγιστοποίηση της, μέσω γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού.

Αναπτύχθηκαν διάφορα σενάρια βελτιστοποίησης για δώδεκα (12) συνδυασμούς περιπτώσεων, στις οποίες επιχειρήθηκαν μεταβολές στο αρχικό κεφάλαιο, στο κόστος ενεργοποίησης των απαιτούμενων ενεργειών μείωσης του κινδύνου, στο τρόπο καταμερισμού του προϋπολογισμού και στη σειρά προτεραιότητας των ενεργειών αυτών. Σε κάθε σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση μετακύλισης του διατιθέμενου προϋπολογισμού στο επόμενο έτος εφόσον αυτός δεν αξιοποιείται στο τρέχον έτος που παρέχεται.

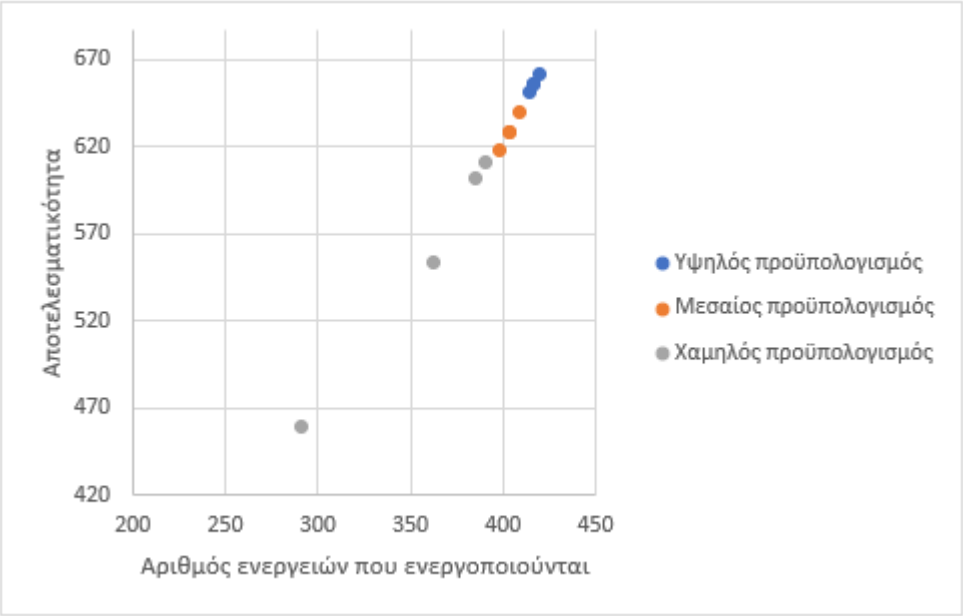
Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν πίνακες για κάθε σενάριο και συνδυασμό περιπτώσεων με εισαγωγή των στοιχείων από την εφαρμογή των διαφορετικών σεναρίων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αρχικά διαθέσιμο κεφάλαιο	Συγκριτικά στοιχεία / Προβλήματα βελτιστοποίησης	Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. (Αποτελεσματικότητα)	Συνολικό αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται	Κόστος (€)	Κόστος ανά αριθμός υλοποιήσιμων ενεργειών
30,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	416.5	656	29645270	45.19
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	416.5	656	29645270	45.19
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	419.5	662	29752260	44.94
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	414	651	29880830	45.90
21,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	403	629	20961300	33.32
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	403	629	20961300	33.32
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	408.5	640	20912670	32.68
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	397.5	618	20886160	33.80
12,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	390.5	611	11958000	19.57
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	291.5	460	11998900	26.08
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	362.5	554	11993380	21.65
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	385.5	602	11904920	19.78

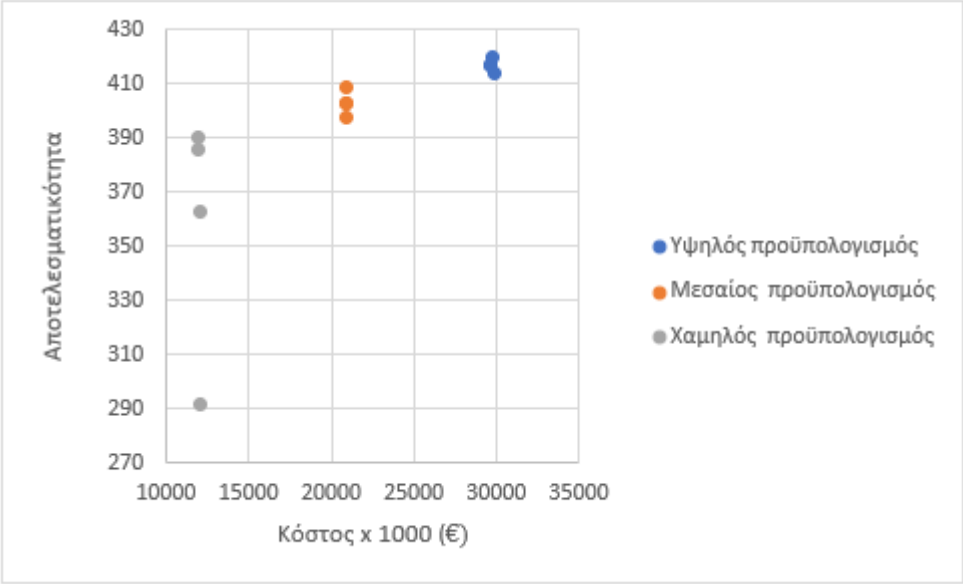
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται ο αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται συναρτήσει της αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνουν καθώς και το κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει της αποτελεσματικότητας και του αριθμού ενεργειών που εφαρμόζονται.



Διάγραμμα 1: Αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται συναρτήσει της αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνουν.



Διάγραμμα 2: Κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει της αποτελεσματικότητας.



Διάγραμμα 3:Κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει του αριθμού ενεργειών που εφαρμόζονται.

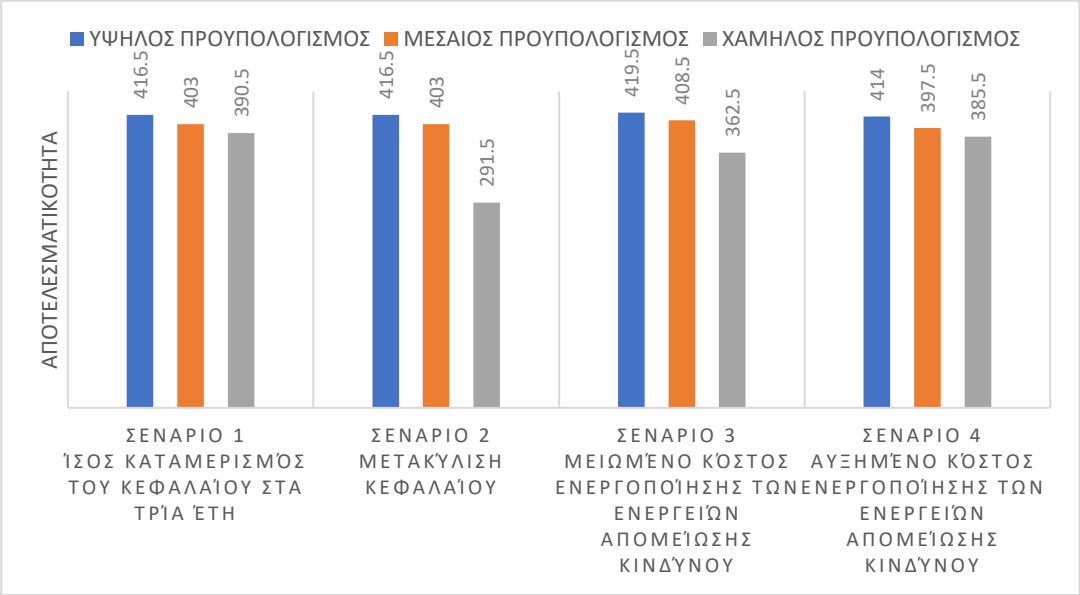
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται όπως είναι φυσικό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των ενεργειών αυξάνεται και η συνολική αποτελεσματικότητα.

Επιπροσθέτως η αποτελεσματικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται το διαθέσιμο κεφάλαιο καθώς η αύξηση του προϋπολογισμού συνεπάγεται και την ενεργοποίηση μεγαλύτερου αριθμού ενεργειών.

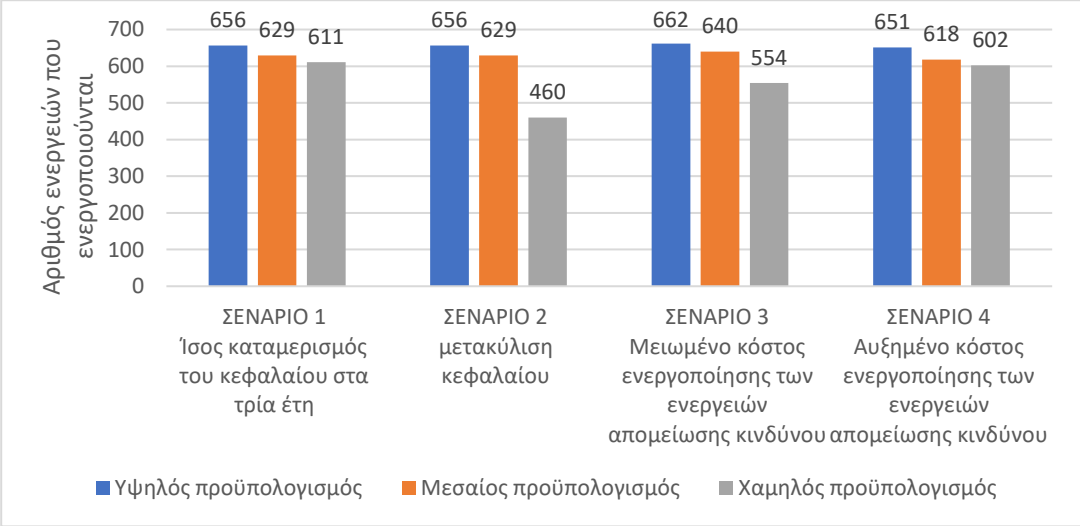
Στο σενάριο του χαμηλού προϋπολογισμού εμφανίζεται μεγαλύτερη διακύμανση στην συνολική αποτελεσματικότητα και στον αριθμό των ενεργοποιήσιμων ενεργειών, γεγονός που οφείλεται στην αδυναμία υλοποίησης του αντίμετρου ‘seismic retrofitting’.

Για τα σενάρια υψηλού και μεσαίου προϋπολογισμού απεικονίζονται τρία σημεία καθώς τα αποτελέσματα του σεναρίου για ισόποσο καταμερισμό και για μετακύλιση του αρχικά διαθέσιμου κεφαλαίου στα τρία έτη ταυτίζονται.

Τέλος στα επόμενα Διαγράμματα παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα και ο αριθμός των αντιμέτρων που ενεργοποιούνται για το κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια για τις τρεις θεωρήσεις αρχικού διαθέσιμου κεφαλαίου.



Διάγραμμα 4: Αποτελεσματικότητα ανά σενάριο για υψηλό, μεσαίο και χαμηλό προϋπολογισμό.



Διάγραμμα 5: Αριθμός των αντιμέτρων που ενεργοποιούνται ανά σενάριο για υψηλό, μεσαίο και χαμηλό προϋπολογισμό.

Από τα διαγράμματα 4 και 5 παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι λογικά, καθώς για το κάθε σενάριο η αποτελεσματικότητα και ο αριθμός των ενεργειών αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του προϋπολογισμού. Στο σενάριο 2 και 3 παρατηρείται αισθητά χαμηλότερη αποτελεσματικότητα και αριθμός ενεργοποιήσιμων ενεργειών για τον χαμηλό προϋπολογισμό, καθώς στα σενάρια αυτά συμπεριλαμβάνεται το αντίμετρο seismic retrofitting που έχει υπέρμετρα υψηλό κόστος ενεργοποίησης συγκριτικά με τον συντελεστή αποτελεσματικότητας του.

Από τα διάφορα στάδια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας προέκυψαν επιμέρους χρήσιμα αποτελέσματα, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον κύριο στόχο που τέθηκε αρχικά. Στο παρόν υποκεφάλαιο, επιχειρείται να δοθεί απάντηση στα ερωτήματα που τέθηκαν αρχικά με τη σύνθεση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων.

Τα συνολικά συμπεράσματα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

1. Με βάση την εκτενή ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την κατανομή πόρων για την απομείωση του κινδύνου στις υποδομές οδικών δικτύων, φαίνεται ότι για πρώτη φορά αναπτύσσεται ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής πόρων βασισμένο στη μεθοδολογία CAPTA.

2. Η επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού που αποδείχθηκε κατάλληλη για τέτοιου είδους προβλήματα, διότι επιτρέπει στον εκάστοτε διαχειριστή δικτύου να διερευνήσει με αποτελεσματικό τρόπο το σύνολο των πιθανών στρατηγικών διαχείρισης. Επιπλέον, η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού που επιλέχθηκε διαθέτει μια καλά ανεπτυγμένη θεωρία για την ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να καθοριστεί η επίδραση των παραμέτρων εισόδου σε μια δεδομένη λύση του προβλήματος.

3. Η αντικειμενική συνάρτηση που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει συντελεστές αποτελεσματικότητας για την κάθε ενέργεια που σχετίζονται με την επίδρασης της εκάστοτε ενέργειας στην απομείωση του κινδύνου.

4. Καθοριστικός παράγοντας για την απομείωση του κινδύνου αποτελεί η επάρκεια του προϋπολογισμού. Ωστόσο, εφόσον ο διατιθέμενος προϋπολογισμός επαρκεί, προτεραιότητα δίνεται στα αντίμετρα που έχουν μεγαλύτερο συντελεστή αποτελεσματικότητας.

5. Η απόδοση που επιφέρει η υλοποίηση των ενεργειών στα έργα υποδομής των οδικών δικτύων δεν αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του διαθέσιμου κεφαλαίου. Στο πρώτο στάδιο αύξησης του κεφαλαίου αυξάνεται σχεδόν αναλογικά αλλά στη συνέχεια επιβραδύνεται.

6. Η μετακύλιση του χαμηλού προϋπολογισμού σε επόμενα έτη καθιστά εφικτή την ικανοποίηση του περιορισμού των προεπιλεγμένων ενεργειών καθώς επιτρέπει τον καταμερισμό του κεφαλαίου με τρόπο που επιτυγχάνει την ενεργοποίηση όλων των προεπιλεγμένων ενεργειών.

7. Τα αποτελέσματα για σταθερό και μεταβαλλόμενο ετήσιο υψηλό και μεσαίο προϋπολογισμό δεν διαφοροποιούνται αισθητά. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για ίσους διατιθέμενους συνολικούς προϋπολογισμούς στις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρατηρείται ότι:

    - Ο αριθμός των υποδομών στις οποίες ενεργοποιούνται ενέργειες είναι ίδιος τόσο για σταθερό όσο και για μεταβαλλόμενο ετήσιο προϋπολογισμό.

    - Το ποσοστό εκμετάλλευσης του διατιθέμενου προϋπολογισμού στην περίπτωση του μεταβαλλόμενου ετήσιου προϋπολογισμού είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με εκείνο του σταθερού ετήσιου προϋπολογισμού.

8. Οι μεταβολές των απαιτούμενων δαπανών είτε με την αύξηση 10% είτε με τη μείωση 10% του κόστους ενεργοποίησης των αντιμέτρων δεν σημαίνει ότι θα επιφέρει αισθητή αντίστοιχη αύξηση/μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτηση ή του συνολικού αριθμού των υλοποιήσιμων ενεργειών. Είναι λογικό ωστόσο να ενεργοποιούνται λιγότερες ενέργειες καθώς αυξάνονται οι δαπάνες των αντιμέτρων και περισσότερες ενέργειες καθώς μειώνονται οι δαπάνες των αντιμέτρων.

9. Το μέσο κόστος ανά υλοποιήσιμη ενέργεια ελαχιστοποιείται για το σενάριο χαμηλού προϋπολογισμού χωρίς μετακύλιση αν ληφθεί υπόψη ο λόγος διαθέσιμος προϋπολογισμός / σύνολο υλοποιήσιμων ενεργειών. Συνεπώς το κόστος δεν μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των υλοποιήσιμων ενεργειών αλλά επηρεάζεται περισσότερο από τον προϋπολογισμού που είναι διαθέσιμος.

10. Τα ποσοστά των πιο σημαντικών ενεργειών που υλοποιούνται ως προς το σύνολο των ενεργοποιήσιμων ενεργειών είναι μικρότερα για τα σενάρια χαμηλού προϋπολογισμού. Συνεπώς επιβεβαιώνεται ότι αν η απόδοση κρίνεται από αυτούς τους δείκτες είναι πιο αποδοτικά τα σενάρια υψηλού προϋπολογισμού.

11. Σχεδόν σε όλα τα σενάρια υπάρχει συμμετρία στα αποτελέσματα σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, μόνο τα αποτελέσματα για τα σενάρια χαμηλού προϋπολογισμού στα οποία δεν καθίσταται δυνατή η ενεργοποίηση του μέτρου seismic retrofitting παρουσιάζουν ασσυμετρία. Άρα επιβεβαιώνεται ότι η απόδοση είναι συνάρτηση των συντελεστών αποτελεσματικότητας, για τους οποίους η ποσοτική εκτίμηση 0,5 , 1, 2, 4 κρίνεται ικανοποιητική για το 82,3 % των σεναρίων

12. Υπό προϋποθέσεις, μπορεί να καταστεί δυνατή η γενίκευση του μοντέλου βελτιστοποίησης της Διπλωματικής αυτής Εργασίας και για περιοχές εκτός από την περιοχή μελέτης.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή ..... - 1 -
1.1 Γενική ανασκόπηση ..... - 1 -
1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας ..... - 2 -
1.3 Μεθοδολογία ..... - 2 -
1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας ..... - 3 -
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση ..... - 5 -
2.1 Γενικά ..... - 5 -
2.2 Εφαρμογές βελτιστοποίησης- Συναφείς Έρευνες ..... - 5 -
2.2.1 Συντήρηση οδοστρωμάτων ..... - 6 -
2.2.2 Συντήρηση γεφυρών ..... - 9 -
2.2.3 Αναβάθμιση ασφάλειας μεταφορών ..... - 10 -
2.3 Κριτική αξιολόγηση ..... - 12 -
3. Θεωρητικό υπόβαθρο βελτιστοποίησης ..... - 13 -
3.1 Γενικά ..... - 13 -
3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός ..... - 13 -
3.2.1 Εισαγωγή ..... - 13 -
3.2.2 Τι είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός ..... - 13 -
3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού ..... - 14 -
3.2.4 Προϋποθέσεις Γραμμικού Προγραμματισμού ..... - 16 -
3.2.5 Είδη λύσεων Γραμμικού Προγραμματισμού ..... - 17 -
3.3 Η μέθοδος Simplex ..... - 18 -
3.4 Επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων ..... - 19 -
3.5 Ακέραιος Προγραμματισμός ..... - 20 -
3.6 Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός ..... - 20 -
3.7 Ο αλγόριθμος του Excel Solver για Ακέραιο Προγραμματισμό. ..... - 21 -
3.7.1 Αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης. ..... - 21 -
3.7.2 Αλγόριθμοι Επέκτασης και Οριοθέτησης ..... - 21 -
3.8 Επιλογή του Μοντέλου της Διπλωματικής Εργασίας ..... - 22 -
4. Δεδομένα-Ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης ..... - 24 -
4.1 Γενικά ..... - 24 -
4.2 Συλλογή δεδομένων ..... - 24 -
4.3 Η μεθοδολογία CAPTA ..... - 30 -
4.3.1 Γενικά ..... - 30 -
4.3.2 Το λογισμικό της μεθοδολογίας CAPTA ..... - 33 -
4.3.3 Κίνδυνοι που περιλαμβάνονται στο CAPTool ..... - 34 -
4.3.4. Υποδομές που περιλαμβάνονται στο CAPTool ..... - 36 -
4.3.5 Κατηγορίες επιπτώσεων ..... - 36 -
4.4 Βήματα CAPTool ..... - 36 -
4.4.1 Βήμα 1: Σχετικό ρίσκο (Relevant risk) ..... - 37 -
4.4.2. Βήμα 2: Όρια επιπτώσεων (Threshold) ..... - 37 -

4.4.3 Βήμα 3: Υποδομές ....- 38 -
4.4.4 Βήμα 4: Κρίσιμες υποδομές. ....- 39 -
4.4.5 Βήμα 5: Επιλογή αντιμέτρων (Countermeasure Opportunities) ....- 40 -
4.4.5.1 Βήμα 5α: Κόστος ενεργειών απομείωσης κινδύνου. ....- 41 -
4.4.5.2 Βήμα 5β: Λεξικό αντίμετρων (Countermeasures dictionary) ....- 43 -
4.4.6 Βήμα 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων ....- 44 -
4.5 Αξιολόγηση CAPTool ....- 45 -
4.5.1 Αξιολόγηση των 31 αντίμετρων του CAPTool ....- 45 -
4.5.2 Συμπλήρωση του πίνακα CM Opportunities. ....- 48 -
4.5.3 Δημιουργία του πίνακα κόστους ....- 49 -
4.5.4 Δημιουργία του πίνακα αποτελεσματικότητας (effectiveness table). ....- 50 -
4.6 Περιγραφή προγραμματιστικού μοντέλου βελτιστοποίησης ....- 53 -
4.6.1 Αντικειμενική συνάρτηση ....- 53 -
4.6.2 Το μοντέλο βελτιστοποίησης γενικά ....- 54 -
4.6.3 Περιορισμοί ....- 55 -
5.Εφαρμογή μεθοδολογίας – Αποτελέσματα ....- 59 -
5.1 Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel – Open Solver ....- 59 -
5.2 Αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης ....- 64 -
5.2.1 Αποτελέσματα για το σενάριο 1: Εύρεση αρχικού προϋπολογισμού χωρίς προεπιλεγμένες ενέργειες ....- 64 -
5.2.2. Αποτελέσματα για το σενάριο 2: Εύρεση αρχικού προϋπολογισμού με τον περιορισμό προτεραιότητας των ενεργειών απομείωσης του κινδύνου ....- 66 -
5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ....- 68 -
5.4 Ανάλυση ευαισθησίας ....- 68 -
5.4.1 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για υψηλό προϋπολογισμό. ....- 69 -
5.4.2 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για μεσαίο προϋπολογισμό. ....- 72 -
5.4.3 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για χαμηλό προϋπολογισμό. ....- 74 -
6. Συμπεράσματα ....- 78 -
6.1 Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας ....- 78 -
6.2 Συμπεράσματα ....- 83 -
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. ....- 84 -
7. Βιβλιογραφία ....- 86 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ....- 89 -
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΩΝ ΣΕ VISUAL BASIC FOR APPLICATION - 89 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ....- 93 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ....- 93 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ ....- 95 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ....- 95 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ ....- 96 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ....- 96 -

1. Εισαγωγή

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η ανάγκη για μεταφορά γεννήθηκε παράλληλα με την ανθρώπινη ύπαρξη. Ο πρωτόγονος άνθρωπος στην προσπάθεια εξέλιξης του, ερχόμενος αντιμέτωπος με τις φυσικές του αντοχές και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αναζήτησε διάφορα μέσα μεταφοράς για τον ίδιο αλλά και για τα αγαθά του. Συνεπώς , ύστερα από πολλαπλές εφευρέσεις από τροχό, πανί και ατμό έφθασε στη σημερινή εποχή, όπου τα συστήματα υποδομών διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο, αφού συνιστούν βασικό μοχλό ανάπτυξης του ανθρώπου και της κοινωνίας. Με τη βοήθεια αυτών αίρονται οι γεωγραφικοί περιορισμοί και καθίστανται εφικτές οι μετακινήσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση για ομαλή και ισόρροπη κοινωνικο-οικονομική ανάπτυξη συνιστά η καλή και οικονομική λειτουργία των υποδομών, η οποία βασίζεται στην σωστή διαχείριση των υποδομών αυτών, τόσο στο σύνολό τους όσο και των επιμέρους στοιχείων τους.

Η ομαλή αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία των οδικών δικτύων επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων συστημάτων υποδομών, των οποίων η υλοποίηση, ο προγραμματισμός και ο σχεδιασμός τους είναι ένα δύσκολο έργο, είτε πρόκειται για ολοκληρωμένη παρέμβαση είτε για προσπάθεια περισσότερο παραδοσιακή, τοπικής βελτιστοποίησης. Η διαχείριση αυτή των υποδομών η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την Επιχειρησιακή Έρευνα έχει ως βασικό στόχο τον καθορισμό ενός γενικού προγραμματισμού συντήρησης και αναβάθμισης των υποδομών παράλληλα με τη βέλτιστη διαχείριση των διατιθέμενων οικονομικών πόρων, ο οποίος στοχεύει στην απομείωση του κινδύνου.

Σήμερα, η κρίση, την οποία διέρχεται η Ιταλική οικονομία υποδεικνύει την αναγκαιότητα υιοθέτησης δράσεων στην κατεύθυνση προσαρμογής σε ένα αναπτυξιακό πρότυπο το οποίο έχει ως εφαλτήριο την τόνωση των πλεονεκτημάτων της χώρας. Ο τουρισμός και το διεθνές εμπόριο, με την εξαγωγή προϊόντων και υπηρεσιών καλούνται να διαδραματίσουν ακόμη πιο ενεργό ρόλο.

Η πλούσια πολιτιστική κληρονομιά, το απαράμιλλο φυσικό κάλλος, το φυσικό περιβάλλον, τα προϊόντα μοναδικής ποιότητας και αξεπέραστης διατροφικής αξίας, ο τουρισμός συμβάλλουν στην ανάπτυξη των μεταφορών.

Η Ιταλία διαθέτει ένα από τα αρχαιότερα και πιο εκτενή αυτοκινητοδρομικά δίκτυα στην Ευρώπη. Το δίκτυο αυτοκινητόδρομων της ονομάζεται **Autostrade** και εκτείνεται σε μήκος μεγαλύτερο των 6.400 χιλιομέτρων. Άρχισε να κατασκευάζεται στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και επεκτάθηκε τη δεκαετία του 1930 επί Μουσολίνι. Το όριο ταχύτητας στους Ιταλικούς αυτοκινητοδρόμους είναι τα 130 χλμ./ώρα, ωστόσο οι τοπικές αρχές επιτρέπουν έως και τα 150 χλμ./ώρα.

Δεδομένης ωστόσο της οικονομικής κρίσης της χώρας κρίνεται επιτακτική η ανάγκη διασφάλισης των πόρων αλλά και ο πολλαπλασιασμός αυτών, που θα επέλθει μέσω της

προστασίας αρχικά και ακολούθως μέσω της συνεχούς αναβάθμισης τω συστημάτων συγκοινωνιακής υποδομής. Προκειμένου να αξιοποιηθούν κατάλληλα τα οδικά συστήματα και να προσελκύσουν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, χρήζει άμεση η ανάγκη για λειτουργικότητα, ασφάλεια και αξιοπιστία σε βάθος χρόνου, απόρροια της βέλτιστης διαχείρισης τους με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Επομένως, τίθεται ύψιστης σημασίας η εξασφάλιση μιας περιοδικής επιθεώρησης και αξιολόγησης των υποδομών των οδικών δικτύων, ο προσδιορισμός των ενεργειών συντήρησης και βελτίωσης της ασφάλειας τους και τέλος ο προσδιορισμός της κατανομής των ενεργειών αυτών με την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας τους και την βελτιστοποίηση των σχετικών επενδύσεων.

1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης της κατανομής των πόρων για τη συντήρηση και την απομείωση του κινδύνου των υποδομών των οδικών δικτύων. Θέτοντας ως βασικό άξονα και περιορισμό τον ελάχιστο διατιθέμενο προϋπολογισμό θα καταβληθεί προσπάθεια συντήρησης και αναβάθμισης των υποδομών σε χρονικό διάστημα τριών ετών.

1.3 Μεθοδολογία

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά η συγκεκριμένη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας.

Αρχικά καθορίστηκε το αντικείμενο που εξετάζει η παρούσα Διπλωματική Εργασία καθώς και ο επιδιωκόμενος στόχος. Για την υλοποίηση του στόχου πραγματοποιήθηκε ευρεία ελληνική και διεθνής **βιβλιογραφική μελέτη**. Αναζητήθηκαν έρευνες, μελέτες επιστημονικά άρθρα και γενικά κάθε πληροφορία σχετική με το με θέμα της Διπλωματικής Εργασίας. Μέσω όλων αυτών των ερευνών καταβλήθηκε προσπάθεια για απόκτηση μίας σχετικής εμπειρίας στην επεξεργασία τέτοιων θεμάτων, η οποία οδηγεί στην απόφαση της μεθόδου με βάση την οποία θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των στοιχείων και θα επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος στόχος.

Μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης βιβλιογραφικών αναφορών, ακολούθησε η εύρεση του τρόπου **συλλογής των στοιχείων**. Πηγή της προέλευσης των στοιχείων αποτέλεσε κατά κύριο λόγο η εταιρία **Milano Serravalle - Milano Tangenziali S.p.A.** Στη συνέχεια, τα στοιχεία καταχωρήθηκαν σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων, η οποία βελτιώθηκε σταδιακά, έως ότου αποκτήσει την τελική της μορφή. Ακολούθησε η **επιλογή της μεθόδου** στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων.

Την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διαδέχτηκε η ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων, η εφαρμογή τους και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, προέκυψαν τα συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο *Σχήμα 1* παρουσιάζονται, υπό μορφή διαγράμματος ροής, τα διαδοχικά στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής των σταδίων εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Δομή της Διπλωματικής Εργασίας, μέσω της συνοπτικής αναφοράς στο περιεχόμενο των κεφαλαίων της.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στο θέμα της Διπλωματικής Εργασίας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο στόχος της. Έπειτα από μια γενική ανασκόπηση της αναγκαιότητας των οδικών μεταφορών επισημαίνεται η σπουδαιότητα των συστημάτων υποδομών με στόχο τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας, συντήρησης και αναβάθμισης των γεφυρών και των σηράγγων και καταγράφεται με μεγαλύτερη σαφήνεια ο στόχος εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Για την καλύτερη αντίληψη αυτής, παρατίθεται και ένα διάγραμμα ροής, που απεικονίζει την αλληλουχία των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν με μεγαλύτερη σαφήνεια.

Κεφάλαιο 2: Αποτελέσματα της **βιβλιογραφικής ανασκόπησης**, όπως αυτά προέκυψαν μετά από την σχετική έρευνα. Παρατίθενται έρευνες, άρθρα και συγγράμματα από την Ελλάδα και το εξωτερικό, τα οποία έχουν δημοσιευτεί σε συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά. Πραγματοποιείται σύνοψη της κάθε εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα, με έμφαση στα στοιχεία που παρουσιάζουν συνάφεια με το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια προσπάθεια συγκριτικής αξιολόγησης, ώστε να διαπιστωθεί αν και ποιες από αυτές μπορούν να συνδράμουν στην εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας..

Κεφάλαιο 3: Προσδιορίζεται το **θεωρητικό υπόβαθρο,** αναλύεται η μεθοδολογία που επιλέχτηκε και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της.

Κεφάλαιο 4: Παρουσιάζονται οι διαδικασίες **συλλογής και επεξεργασίας των στατιστικών στοιχείων**, στα οποία στηρίχθηκε η Διπλωματική Εργασία και περιγράφεται και το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Κεφάλαιο 5: Πραγματοποιείται η αναλυτική **περιγραφή της μεθόδου** που εφαρμόστηκε ως την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λεπτομερή παρουσίαση και ανάλυση των εξαγόμενων στοιχείων, στη περιγραφή και στην εξήγηση των αποτελεσμάτων. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων της μεθοδολογίας, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται η σύγκριση των επιμέρους σεναρίων.

Κεφάλαιο 6: Παρουσιάζονται τα **συνολικά συμπεράσματα** που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είτε με άλλες μεθόδους, είτε με εξέταση πρόσθετων παραμέτρων και μεταβλητών.

Κεφάλαιο 7: Παρατίθεται **ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών**, σχετικών με το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Γενικά

Το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης περιλαμβάνει την παρουσίαση και την ανασκόπηση αφενός των αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας και αφετέρου μεθοδολογιών συναφών με τη μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζονται εργασίες από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Και στα δύο μέρη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρατίθεται σύνοψη της κάθε εξεταζόμενης εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα με έμφαση στα συναφή στοιχεία με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Στο τέλος παρατίθεται σύνθεση των βασικών σημείων όλων των ερευνών που εξετάστηκαν με στόχο αφενός να προκύπτει η αναγκαιότητα εξέτασης του αντικειμένου της Διπλωματικής Εργασίας και αφετέρου να αιτιολογηθεί η επιλογή της υιοθετηθείσας μεθοδολογίας.

Ο στόχος της ανασκόπησης αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι να προσδιοριστούν όλες οι συναφείς έρευνες επιτρέποντας τον προσδιορισμό ενός αντικειμένου της Διπλωματικής Εργασίας, το οποίο δεν έχει καλυφθεί πλήρως, συμπληρώνοντας έτσι τις υπάρχουσες εργασίες. Επιπλέον, η ανασκόπηση συναφών ερευνών επιτρέπει την σύγκριση των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής Εργασίας, με εκείνα της διεθνούς βιβλιογραφίας, διευκολύνοντας έτσι την ερμηνεία τους.

Ο στόχος της ανασκόπησης μεθοδολογιών συναφών με τη μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας είναι να προσδιοριστούν οι μεθοδολογίες από τις οποίες θα επιλεγεί η καταλληλότερη για την επίτευξη του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας. Επιπλέον, η ανασκόπηση των συναφών μεθοδολογιών επιτρέπει την αναλυτική εξέταση των χαρακτηριστικών της επιλεγείσας μεθοδολογίας, διευκολύνοντας την εφαρμογή της κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.

2.2 Εφαρμογές βελτιστοποίησης- Συναφείς Έρευνες

Τα συστήματα υποδομών είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη διατήρηση και τη βελτίωση της οικονομικής ανάπτυξης. Η Ιταλία, στην παρούσα οικονομική κρίση, δεν έχει την πολυτέλεια τυχόν αποτυχίας της οικονομικής δραστηριότητας και παραγωγικότητας, οι οποίες αναπτερώνουν τις ζωτικές λειτουργίες της κοινωνίας, διασφαλίζοντας την υγεία, την φυσική προστασία, την ασφάλεια, την οικονομική και κοινωνική ευημερία των πολιτών. Οι υποδομές ζωτικής σημασίας της χώρας είναι αυτά τα συστήματα ή υποσυστήματα, όπως τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ενέργειας, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και τα συστήματα οδικών δικτύων.

Ωστόσο, το πρόβλημα της βέλτιστης λύσης κατανομής των πόρων με σκοπό τη συντήρηση, την ανανέωση και την απομείωση του κινδύνου στα οδικά δίκτυα είναι ένα θέμα το οποίο απασχολεί χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Ήδη από το 1940, γεννήθηκε η ανάγκη ενός

νέου επιστημονικού κλάδου, ο οποίος έχει ως αντικείμενο την εύρεση του καλύτερου δυνατού τρόπου επίλυσης των προβλημάτων της κατανομής των πόρων και είναι σε θέση να ικανοποιεί την προσπάθεια για επιστημονική διοίκηση των οργανισμών. Η παραπάνω επιστήμη ονομάζεται **Επιχειρησιακή Έρευνα**.

Βασικά στάδια της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι η ανάλυση του συστήματος, η διατύπωση στόχων, η διατύπωση του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, η επίλυση του μοντέλου, η ανάλυση ευαισθησίας και η υλοποίηση της λύσης.

Κατά την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων, ένα από τα σημαντικότερα βήματα είναι η επιλογή της μεθόδου βελτιστοποίησης, ώστε να βρεθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη λύση ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς. Τα τελευταία χρόνια ποικίλες προσεγγίσεις έχουν προταθεί για τη βέλτιστη συντήρηση και αποκατάσταση των δικτύων. Κοινό συστατικό στοιχείο όλων αυτών των προσεγγίσεων αποτελούν τα παρακάτω:

- Προσδιορισμός του συστήματος πληροφοριών των δικτύων
- Αξιολόγηση των τρεχουσών αναγκών
- Καθορισμός των στρατηγικών επεξεργασίας
- Πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης των στοιχείων
- Ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- Επιλογή των κατάλληλων επεξεργασιών

Παρακάτω παρατίθενται χρονολογικά διάφορες συναφείς έρευνες κατανομής των πόρων και πεδίων εφαρμογών τους.

Οι **Zanakis et al. (1995)** στη δημοσίευσή τους παρέχουν μία λεπτομερή ανάλυση των ήδη υπαρχουσών παλαιότερων ερευνών που σχετίζονται με την κατανομή των πόρων και τις κατατάσσουν με βάση τα διαφορετικά μοντέλα στα οποία στηρίχθηκαν, τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν, τον σκοπό κάθε έρευνας και τα επιστημονικά πεδία στα οποία βρίσκουν εφαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, επισημαίνεται ότι οι διάφοροι φορείς αντιμετωπίζουν τακτικά την ανάγκη να κατανείμουν τα περιορισμένα κεφάλαιά τους στα διαφορετικά προγράμματα/έργα ικανοποιώντας αντικρουόμενους στόχους και ενδιαφέροντα. Το πρόβλημα της κατανομής πόρων στην δημοσίευση των Zanakis et al. (1995) τίθεται θεωρώντας ένα σύνολο προγραμμάτων/έργων με ένα ποσοτικοποιημένο όφελος που ανατίθεται σε κάθε πρόγραμμα/έργο. Κρίσιμη θεωρείται η απόφαση σχετικά με το ποιο πρόγραμμα θα χρηματοδοτηθεί και με ποιο ποσό. Η εκάστοτε απόφαση υπόκειται στους περιορισμούς και υπαγορεύεται από τους αντικρουόμενους στόχους και ενδιαφέροντα.

2.2.1 Συντήρηση οδοστρωμάτων

Οι **Ravirala και Γρίβα (1994)** επισημαίνουν ότι ο προγραμματισμός στόχου είναι ευεργετικός για την επίτευξη αντικρουόμενων στόχων ταυτόχρονα. Παρολ΄αυτά, ο προγραμματισμός στόχου παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολο να ενσωματώσει τις πιθανότητες μετάβασης κατά Markov στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα, ο ακέραιος προγραμματισμός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την προσέγγιση είναι μη εφαρμόσιμος σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα οδοστρωμάτων εξαιτίας των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Έτσι, το μοντέλο που προτάθηκε από τον Ravirala

χρησιμοποιεί γραμμικό προγραμματισμό αντί του ακέραιου για να αναπτύξει ένα βέλτιστο πολυετές πρόγραμμα συντήρησης.

Ακολούθως, οι **Ravirala et al. (1997)** προτίμησαν αυτή την παραπάνω προσέγγιση του προγραμματισμού στόχου εξαιτίας της δυνατότητάς εξέτασης προβλημάτων που περιλαμβάνουν αντικρουόμενους στόχους με διαφορετικούς βαθμούς σπουδαιότητας.

Οι **Mbwana και Turnquist (1996)** περιέγραψαν ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρώματος χρησιμοποιώντας έναν μεγάλης κλίμακας γραμμικό αλγόριθμο. Οι πιθανότητες μετάβασης Markov χρησιμοποιούνται στο μοντέλο για να προβλέψουν την μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος.

Οι **Liu και Wang (1996)** πρότειναν ένα νέο σύστημα βελτιστοποίησης δικτύου, όπου ο διαθέσιμος ετήσιος προϋπολογισμός για τη συντήρηση και την αποκατάσταση του δικτύου εισάχθηκε ως περιορισμός. Ο στόχος του προτεινόμενου μοντέλου ήταν να μεγιστοποιήσει την ποιότητα του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Οι Liu και Wang (1996) χρησιμοποίησαν γραμμικό προγραμματισμό για να εκτελέσουν την βελτιστοποίηση του δικτύου. Η αντικειμενική συνάρτηση του προτεινόμενου μοντέλου περιλαμβάνει τους συντελεστές $w_{i,k}$ και f_i, όπου ο συντελεστής $w_{i,k}$ υποδηλώνει την αναλόγια των οδοστρωμάτων που βρίσκονται στην κατάσταση i στην αρχή της πρώτης περιόδου του χρονικού ορίζοντα T σε σχέση με εκείνα που εφαρμόζει η διαδικασία συντήρησης, ενώ ο συντελεστής f_i υποδηλώνει την βαθμονόμηση των επιδόσεων για την κατάσταση i. Ο συντελεστής f_i χρησιμοποιείται στο μοντέλο ως μια χρηστική αξία για να εξεταστεί η επίδραση της κάθε κατάστασης στη συνολική «επίδοση» του οδοστρώματος. Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποιεί την ολική «επίδοση» του οδοστρώματος για τον χρονικό ορίζοντα T. Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου μοντέλου βελτιστοποίησης ήταν:

- Η κατανομή του ετήσιου προϋπολογισμού για διαφορετικές δράσεις βελτιστοποίησης,
- Τα ποσοστά των οδοστρωμάτων τα οποία αναμένεται να είναι στην κάθε κατάσταση στην αρχή του κάθε έτους.

Οι **Tak και Chou (2002)** έδειξαν ότι ένας γενετικός αλγόριθμος βασισμένος στη βελτιστοποίηση αποδείχτηκε κατάλληλος στον καθορισμό πολυετών προγραμμάτων συντήρησης. Ο στόχος του μοντέλου ήταν να επιτύχει την υψηλότερη κατάσταση του πεζοδρομίου για το οδικό δίκτυο. Ο βαθμός της ευελιξίας και της επεκτασιμότητας που υπάρχει στον γενετικό αλγόριθμο έχει το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι για κάθε τύπο πεζοδρομίου απαιτούνται διαφορετικά μοντέλα επιδείνωσης της κατάστασης και τύπους επισκευής. Από την άλλη πλευρά ο δυναμικός προγραμματισμός στερείται τέτοιων χαρακτηριστικών όπως είναι η ευελιξία και η επεκτασιμότητα. Επομένως, οι Tak και Chou συμπέραναν ότι ο δυναμικός προγραμματισμός είναι ανεπιτυχής για το συγκεκριμένο μοντέλο. Επιπρόσθετα, οι Chou et al. υποστήριξαν την παραπάνω άποψη ισχυριζόμενοι πως ο γενετικός αλγόριθμος είναι κατάλληλος για προβλήματα με ένα σημαντικό αριθμό μεταβλητών και περιορισμών, επειδή η κωδικοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων στον γενετικό αλγόριθμο είναι ευέλικτη.

οι **Abaza και Ashur (2004)** εφάρμοσαν ένα μοντέλο Markov για να προβλέψουν τη μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος και ανέπτυξαν μία μη γραμμική μέθοδο

βελτιστοποίησης ώστε να επιτύχουν βέλτιστη κατάσταση οδοστρώματος με βάση και τους περιορισμούς του προϋπολογισμού. Το μοντέλο Markov που χρησιμοποιήθηκε από τους Abaza και Ashur αποτελείτο από τρία κύρια συστατικά στοιχεία:

1. Πέντε δείκτες κατάστασης, a, b, c, d, e οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την τέλεια, καλή, μέτρια, πτωχή και κακή κατάσταση, αντίστοιχα.
2. Πιθανότητες επιδείνωσης Pij, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα που έχει το οδόστρωμα να χειροτερεύσει από την κατάσταση i στην κατάσταση j σε ένα μεμονωμένο χρονικό διάστημα
3. Πιθανότητες συντήρησης fij, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα που έχει ένα οδόστρωμα να βελτιωθεί από την κατάσταση i στην κατάσταση j σε ένα μεμονωμένο χρονικό διάστημα, ως αποτέλεσμα των ενεργειών συντήρησης.

Ο κύριος στόχος από την έρευνα που έγινε από τους Abaza και Ashur ήταν να καθοριστεί το βέλτιστο μελλοντικό πρόγραμμα συντήρησης και βελτιστοποίησης, το οποίο θα εφαρμοστεί. Το προτεινόμενο μοντέλο ήταν σε θέση να παρέχει το ποσό επένδυσης που απαιτήθηκε για κάθε στρατηγική συντήρησης και αποκατάστασης έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Οι **Herabat και Tangphaisankun (2005)** χρησιμοποιούν γενετικό αλγόριθμο για την κατασκευή ενός συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων για το οδικό δίκτυο της Ταϋλάνδης. Το σύστημα χρησιμοποιεί γραμμικά μοντέλα φθοράς που βασίζονται στο δείκτη IRI (International Roughness Index) και διαθέτει πέντε εναλλακτικές τεχνικές συντήρησης. Το μοντέλο θεωρεί ότι η καταπόνηση του οδοστρώματος οφείλεται αποκλειστικά σε κυκλοφοριακούς παράγοντες και προσπαθεί να βρει τη βέλτιστη τεχνική συντήρησης που ελαχιστοποιεί το κόστος του χρήστη εξαιτίας της χρήσης του οχήματος (Vehicle Operation Cost).

Οι **Chootinan et al. (2005)** εισήγαγαν ένα πολυετές πρόγραμμα συντήρησης οδοστρωμάτων το οποίο μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια την αβεβαιότητα στην επιδείνωση της κατάστασης του οδοστρώματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος είναι ικανός να προγραμματίσει τις δραστηριότητες συντήρησης για μία πολυετή περίοδο προγραμματισμού. Χρησιμοποιείται μια στοχαστική προσομοίωση της αβεβαιότητας της μελλοντικής κατάστασης των οδοστρωμάτων και στη συνέχεια αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της αβεβαιότητας της επιδείνωσης της κατάστασης των οδοστρωμάτων στο πρόγραμμα συντήρησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι προγραμματίζοντας τις δραστηριότητες συντήρησης χρησιμοποιώντας μόνο τις αναμενόμενες καταστάσεις των οδοστρωμάτων είναι πιθανό να υποεκτιμηθεί ο απαιτούμενος προϋπολογισμός και να υπερεκτιμηθεί η επίδοση του δικτύου οδοστρωμάτων

Στην **πολιτεία της Αριζόνα (2006)** εφαρμόστηκε ένα ακόμη πρόγραμμα βελτιστοποίησης δικτύου. Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προσπάθειες κατασκευής συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων. Το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε είχε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το ετήσιο κόστος συντήρησης και αποκατάστασης για την περίοδο προγραμματισμού. Το σύστημα που κατασκευάστηκε λαμβάνει δεδομένα δεδομένα για την περιοχή από την οποία προέρχονται τα τμήματα του οδοστρώματος, το είδος των τμημάτων αυτών, στοιχεία για κυκλοφοριακούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες που επιδρούν στα τμήματα κ.α. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση εξωτερικών παραγόντων στο οδόστρωμα χρησιμοποιείται ο δείκτης PDI (Pavement Distress Index) και τα οδοστρώματα ταξινομούνται ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται. Το σύστημα διαθέτει μια

λίστα με τις διαθέσιμες τεχνικές συντήρησης και τη βελτίωση που προσφέρει η κάθε μία στο οδόστρωμα. Η εύρεση της καλύτερης λύσης γίνεται με δέντρα αποφάσεων.

Οι **Bosurgi και Trifilo (2007)** κατασκεύασαν ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων βασισμένο σε γενετικό αλγόριθμο που με βάση έναν αρχικό προϋπολογισμό αναζητά τον καλύτερο συνδυασμό λύσεων ώστε η κατάσταση του οδοστρώματος να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Τα δεδομένα του συστήματος είναι η κατάσταση του οδοστρώματος και τα κυκλοφορικά και περιβαλλοντικά δεδομένα της περιοχής. Το μοντέλο φθοράς που χρησιμοποιεί το σύστημα βασίζεται στο δείκτη PSI (Present Serviceability Index) και είναι γραμμικό. Το σύστημα λαμβάνει περιορισμένο αριθμό εναλλακτικών συντηρήσεων και δεν υπολογίζει όλες τις παραμέτρους του κόστους του χρήστη.

Οι **Sceinberg και Anastasopoulos (2010)** δημιούργησαν ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων που έχει ως στόχο την επιλογή της βέλτιστης λύσης για τη συντήρηση του οδοστρώματος που θα διατηρεί το οδόστρωμα στην καλύτερη δυνατή κατάσταση και ταυτόχρονα θα δαπανά λιγότερους πόρους. Για να το επιτύχει αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με δέντρα αποφάσεων. Τα δεδομένα του συστήματος είναι οι εναλλακτικές παρεμβάσεις συντήρησης και η κατάσταση του οδοστρώματος.

Το **Υπουργείο Μεταφορών του Τέξας (2010)** σε συνδυασμό με το Πανεπιστήμιο του Τέξας παρουσίασαν μια διαδικτυακή εφαρμογή που έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των απαραίτητων κονδυλίων για τη συντήρηση του οδοστρώματος. Το σύστημα εμπεριέχει ιστορικά δεδομένα και μπορεί να καθορίζει την κατάσταση του οδοστρώματος μέσω της βαθμολογίας που το κάθε τμήμα συγκεντρώνει σε τρεις παραμέτρους: την κατάσταση στην επιφάνεια του οδοστρώματος, την καταπόνηση και την οδηγική άνεση. Η εφαρμογή είναι πολύ εύχρηστη στη διαχείριση οδοστρωμάτων, αλλά είναι απαραίτητη η περαιτέρω εξέλιξη της εφαρμογής για την προσθήκη της επιλογής εναλλακτικών παρεμβάσεων συντήρησης.

Οι **Elhadidy et al. (2014)** περιέγραψαν ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης για τη συντήρηση και την αποκατάσταση οδοστρωμάτων στην Αίγυπτο. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους και στην μεγιστοποίηση της κατάστασης για το οδικό δίκτυο. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, η αλυσίδα Markov χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της κατάστασης του οδοστρώματος και τον υπολογισμό της αναμενόμενης επιδείνωσής της στις διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ένας γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε για την επίλυση του πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης. Το μοντέλο αναζήτησε τις βέλτιστες δράσεις βελτιστοποίησης που έπρεπε να εφαρμοστούν στον κατάλληλο χρόνο σε ένα πεζοδρόμιο.

2.2.2 Συντήρηση γεφυρών

Οι **Jiang και Sinha (1989)** μελέτησαν το θέμα της συντήρησης των γεφυρών. Οι τεχνικές που χρησιμοποίησαν για να αναπτύξουν ένα κατανοητό σύστημα διαχείρισης των γεφυρών για το τμήμα «Indiana Department of Highways (IDOH)» στηρίζονταν σε συνδυασμό του δυναμικού προγραμματισμού με ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό και την αλυσίδα Μαρκόφ/Μαρκοβιανή αλυσίδα (Markov chain). Πιο συγκεκριμένα, η Μαρκοβιανή αλυσίδα χρησιμοποιήθηκε για να κατασκευαστεί ένα μοντέλο το οποίο θα προβλέπει την επιδείνωση της κατάστασης των γεφυρών τα επόμενα χρόνια. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα του ακέραιου

(γραμμικού) προγραμματισμού της μορφής «0-1» (Zero-one integer linear programming) χρησιμοποιήθηκε για να επιτύχει την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος των γεφυρών με το μικρότερο δυνατό κόστος. Ελήφθησαν υπόψιν τρεις βασικές ενέργειες συντήρησης: ανοικοδόμηση καταστρώματος, αντικατάσταση καταστρώματος και αντικατάσταση γέφυρας. Κάθε μία από τις παραπάνω δραστηριότητες αντιστοιχούσε στον αριθμό ένα ή μηδέν. Ο αριθμός ένα σήμαινε ότι η αντίστοιχη δραστηριότητα εκτελούνταν, ενώ ο αριθμός μηδέν ότι η αντίστοιχη δραστηριότητα δεν εκτελούνταν. Τέλος, η χρήση του δυναμικού προγραμματισμού έγινε για να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή των πόρων, λαμβάνοντας υπόψιν περιορισμούς ανάλογα με τον προϋπολογισμό της επένδυσης. Ουσιαστικά, σε αυτό το σημείο η μέθοδος διαιρούνταν σε στάδια στα οποία αντιστοιχούσαν δύο μεταβλητές: κατάσταση γέφυρας και διαθέσιμοι πόροι. Οι αποφάσεις που πάρθηκαν σε κάθε στάδιο είχαν σκοπό την καλύτερη λειτουργία του συστήματος των γεφυρών.

2.2.3 Αναβάθμιση ασφάλειας μεταφορών

Οι **N.Lagaros, K.Kepaptsoglou και G.Karlaftis. (2013)** μελέτησαν την ασφάλεια της υποδομής των μεταφορών, η οποία είναι βασικής σημασίας τα τελευταία χρόνια. Οι αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια οδηγούν τις αρχές μεταφορών στο να βελτιώσουν, να αναβαθμίσουν και να ενισχύσουν την επιτήρηση, την πρόληψη και τον εξοπλισμό στις εγκαταστάσεις, συχνά κάτω από τους σφιχτούς δημοσιονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Σε αυτό το πλαίσιο, στην παρούσα μελέτη, προτείνεται ένα μοντέλο κατανομής πόρων για την αναβάθμιση της ασφάλειας των μεταφορών. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι μη γραμμικός προγραμματισμός. Η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποίησε το μετρό της Αττικής και έγιναν διάφορες δοκιμές με διαφορετικούς κάθε φορά προϋπολογισμούς. Στο τέλος σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης.

Στον ακόλουθο Πίνακας 1 παρουσιάζονται πινακοποιημένα και συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της παραπάνω βιβλιογραφίας με τα χαρακτηριστικά που αφορούν το ζητούμενο αποτέλεσμα της κάθε εργασίας και τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε.

Εργασία	Ζητούμενο αποτέλεσμα	Μέθοδος μόρφωσης προτύπου και επίλυσης
Jiang και Sinha (1989)	Κατανομή πόρων για επισκευή γεφυρών	Δυναμικός προγραμματισμός, ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (της μορφής «0-1») και αλυσίδα Μαρκόφ/ Μαρκοβιανή αλυσίδα
Zanakis et al. (1995)	Ανάλυση και κατάταξη παλαιότερων ερευνών που σχετίζονται με την κατανομή πόρων ανάλογα με το μοντέλο στο οποίο στηρίχτηκαν	Γραμμικός και μη γραμμικός προγραμματισμός ανάλογα με την έρευνα που αναλύεται κάθε φορά
Mbwana και Turnquist (1996)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Γραμμικός προγραμματισμός
Liu και Wang (1996)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Γραμμικός προγραμματισμός
Ravirala et al. (1997)	Εξέταση προβλημάτων που περιλαμβάνουν αντικρουόμενους στόχους με διαφορετικούς βαθμούς σπουδαιότητας	Προγραμματισμός στόχου
Tak και Chou (2002)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Γενετικός προγραμματισμός
Abaza και Ashur (2004)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Μη γραμμικός προγραμματισμός και αλυσίδα Μαρκόφ/Μαρκοβιανή αλυσίδα
Chootiman et al. (2005)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Γενετικός προγραμματισμός και στοχαστική προσομοίωση
Herabat και Tangphaisankun (2005)	Επιλογή τεχνικής συντήρησης με ελαχιστοποίηση κόστους χρήστη εξαιτίας χρήσης οχήματος	Γενετικός Αλγόριθμος
Σύστημα Διαχείρησης Οδοστρωμάτων στην Αριζόνα (2006)	Επιλογή τεχνικής συντήρησης για εύκαμπτα ή δύσκαμπτα οδοστρώματα	Δέντρα αποφάσεων
Bosurgi και Trifiro (2007)	Επιλογή τεχνικής συντήρησης για εύκαμπτα ή δύσκαμπτα οδοστρώματα	Γενετικός προγραμματισμός
Υπουργείο Μεταφορών του Τέξας (2010)	Προσδιορισμός κονδυλίων συντήρησης οδοστρώματος	Διαδικτυακή εφαρμογή
Steinberg και Anastasopoulos (2010)	Επιλογή τεχνικής συντήρησης οδοστρώματος με ελαχιστοποίηση κόστους συντήρησης και διατήρηση καλής κατάστασης οδοστρώματος	Γραμμικός προγραμματισμός και δέντρα αποφάσεων
Lagaros, Kepaptsoglou και Karlaftis (2013)	Κατανομή πόρων για βελτίωση της συγκοινωνιακής υποδομής από άποψη ασφάλειας	Μη γραμμικός προγραμματισμός
Elhadidy et al. (2014)	Κατανομή πόρων για την συντήρηση πεζοδρομίων	Γενετικός προγραμματισμός και αλυσίδα Μαρκόφ/Μαρκοβιανή αλυσίδα

Πίνακας 1:Συγκεντρωτικός πίνακας των βιβλιογραφικών αναφορών κατά αύξουσα χρονολογική σειρά.

2.3 Κριτική αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καταβλήθηκε προσπάθεια παράθεσης και ανάλυσης διαφόρων ερευνών βέλτιστης κατανομής πόρων για την συντήρηση διάφορων ειδών συστημάτων υποδομής. Από την σύνθεση των βασικών τους σημείων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Στις περισσότερες προαναφερθείσες μελέτες χρησιμοποιήθηκε η **αλυσίδα Μαρκόφ/Μαρκοβιανή Αλυσίδα**, ώστε να εκτιμηθεί η μελλοντική κατάσταση των συστημάτων υποδομής λόγω του χρόνου και της χρήσης. Ωστόσο, η χρήση της αλυσίδας Μαρκόφ απαιτεί την ύπαρξη πολλών δεδομένων για το εκάστοτε σύστημα υποδομής.

- Η **μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού** που χρησιμοποιήθηκε σε κάποιες μελέτες παρουσιάζει το πλεονέκτημα της καλύτερης δυνατής χρήσης των διαθέσιμων παραγωγικών πόρων, ενώ βασικό του μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι εφαρμόζεται μόνο σε προβλήματα, όπου οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμικοί όροι.

- Η **μέθοδος του ακέραιου προγραμματισμού** προέρχεται από εκείνη του γραμμικού, ενώ προστίθενται και κάποιοι επιπλέον περιορισμοί που απαιτούν κάποιες μεταβλητές να είναι ακέραιες. Ωστόσο, ο επιπλέον αυτός περιορισμός καθιστά ορισμένες φορές πιο δύσκολη την επίλυση των εκάστοτε μοντέλων.

- Η **μέθοδος του γενετικού προγραμματισμού** από την άλλη πλευρά είναι μία μέθοδος που μπορεί να την κατανοήσει κάποιος εύκολα, δεν απαιτεί ιδιαίτερη γνώση μαθηματικών και είναι ευέλικτη, αλλά δεν έχει εφαρμοστεί αρκετά σε προβλήματα συντήρησης συστημάτων υποδομών.

- Η **μέθοδος του προγραμματισμού στόχου** είναι ευεργετική στο να συμπεριλαμβάνει αντικρουόμενους στόχους ταυτόχρονα. Παρολ'αυτά, ο προγραμματισμός στόχου έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να ενσωματώσει την αλυσίδα Μαρκόφ στην διαδικασία βελτιστοποίησης.

- Τα **δέντρα απόφασης (decision trees)** αναπαριστούν μια διαδικασία λήψης απόφασης, όπου κάθε πιθανό σημείο απόφασης ή κατάσταση αναπαρίσταται από έναν κόμβο, ενώ κάθε πιθανή επιλογή που μπορεί να γίνει σε ένα σημείο απόφασης αναπαρίσταται μια ακμή προς έναν κόμβο. Βασικό μειονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι παρουσιάζονται προβλήματα, όταν δεν υπάρχει πληθώρα δεδομένων.

3. Θεωρητικό υπόβαθρο βελτιστοποίησης

3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο, επιδιώκεται η περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου πάνω στο οποίο θα βασιστεί η ανάλυση του αντικειμένου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στη σημασία του γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων για την απομείωση του κινδύνου στις υποδομές των οδικών δικτύων A7,A50,A51,A52 με τη βοήθεια του εργαλείου επίλυσης του Excel (Excel Open Solver).

3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός

3.2.1 Εισαγωγή

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι ένας από τους πιο εφαρμοσμένους κλάδους της επιστήμης των μαθηματικών με πληθώρα εφαρμογών στην επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και ασχολείται με την επίλυση του γραμμικού μοντέλου στην Επιχειρησιακή Έρευνα. Για το σκοπό αυτό μελετάει τις ιδιότητες του γραμμικού προβλήματος, κατασκευάζει τρόπους επίλυσης και εξετάζει τρόπους εφαρμογής των αποτελεσμάτων στη λήψη πολύπλοκων αποφάσεων. Από την οικονομική σκοπιά, ο Γραμμικός Προγραμματισμός είναι μια τεχνική που ασχολείται με το πρόβλημα της **βέλτιστης κατανομής των περιορισμένων πόρων** ενός συστήματος σε ανταγωνιζόμενες δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ακόμη, χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ενέργειας, διοίκησης προσωπικού, προστασίας του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και προβλημάτων που αφορούν την ανάθεση πεπερασμένων πόρων σε ανταγωνιστικές απαιτήσεις (π.χ. κατανομή εργατικού δυναμικού, πρώτων υλών και τεχνολογικού εξοπλισμού).

Η αρχική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, καθώς και μια συστηματική διαδικασία λύσης του, η μέθοδος Simplex, οφείλεται στον G. B. Dantzig στα 1947. Θεωρείται ως μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του εικοστού αιώνα και στις μέρες μας αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων μεσαίου και μεγάλου μεγέθους εμπορικών-βιομηχανικών εταιρειών.

3.2.2 Τι είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός

Τα γραμμικά μοντέλα επιδιώκουν να **βελτιστοποιήσουν** (ελαχιστοποιήσουν ή μεγιστοποιήσουν) μια γραμμική συνάρτηση κάτω από κάποιους γραμμικούς περιορισμούς. Όπως υποδηλώνει το όνομά του, το μοντέλο του **Γραμμικού Προγραμματισμού** αποτελείται από γραμμικές συναρτήσεις και περιορισμούς. Ο όρος **«Γραμμικός»**

χρησιμοποιείται για να περιγράψει το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών είναι γραμμική σχέση.

Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδίου λειτουργίας μιας παραγωγικής διαδικασίας. Δηλαδή προβλήματα καθορισμού των ποσοτήτων που πρέπει να παραχθούν από κάθε προϊόν σε σχέση με ότι βρίσκεται στις αποθήκες με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους.

Ο όρος **«προγραμματισμός»** δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών», αλλά αυτήν του «σχεδιασμού». Ο **Γραμμικός Προγραμματισμός** ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει, για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα. Σκοπός δηλαδή του Γραμμικού Προγραμματισμού είναι από όλους τους συνδυασμούς των πηγών να επιλέξουμε εκείνον που μεγιστοποιεί το κέρδος ή ελαχιστοποιεί το κόστος μιας δραστηριότητας.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον για τη θεωρητική πληροφορική. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων τα οποία εκ πρώτης όψεως δεν σχετίζονται με το γραμμικό μοντέλο.

3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση ενός επιχειρησιακού προβλήματος απαιτεί τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου. Με τη δημιουργία του μοντέλου είναι δυνατή η καλύτερη επεξεργασία του προβλήματος και των περιορισμών και η καλύτερη και πιο ακριβής επίλυση αυτού:

Η μαθηματική μοντελοποίηση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι η ακόλουθη:

$$\max/\min\ (c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \ldots c_n \cdot x_n)$$

Υπό τους περιορισμούς

$$\alpha_{11} \cdot x_1 + \alpha_{12} \cdot x_2 + \ldots + \alpha_{1n} \cdot x_n \quad [\leq, =, \geq]\ b_1$$

$$\alpha_{21} \cdot x_1 + \alpha_{22} \cdot x_2 + \ldots + \alpha_{2n} \cdot x_n \quad [\leq, =, \geq]\ b_2$$

$$\ldots$$

$$\alpha_{m1} \cdot x_1 + \alpha_{m2} \cdot x_2 + \ldots + \alpha_{mn} \cdot x_n \quad [\leq, =, \geq]\ b_m$$

και

$$x_j \geq 0,\ j=1, 2, \ldots, n$$

Σε γενικές γραμμές τρία είναι τα βήματα για τη διατύπωση κάποιου τυχαίου προβλήματος ως μαθηματικό μοντέλο:

- Προσδιορισμός των μεταβλητών απόφασης
- Διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης
- Διατύπωση των περιορισμών

Ως πρώτο βήμα θα πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές-άγνωστοι του προβλήματος Xj (j=1,2,…,n) που ονομάζονται **μεταβλητές απόφασης (decision variables).** Το επόμενο βήμα είναι να διατυπωθεί μια σχέση που να συνδέει τις μεταβλητές απόφασης με το αποτέλεσμα προς βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται **αντικειμενική συνάρτηση (objective function),** η μορφή της είναι Maximize f(x) ή Minimize f(x) και οι τιμές της ονομάζονται αντικειμενικές τιμές (objective values). Στην ορολογία του γραμμικού προγραμματισμού οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούν οι μεταβλητές απόφασης, ονομάζονται **περιορισμοί (constraints).** Η μαθηματική μορφή ενός περιορισμού είναι f(x)≥b ή f(x)≤b ή f(x)=b ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος. Ένα γραμμικό πρόβλημα στο οποίο ζητείται να βρεθεί το ελάχιστο, ονομάζεται **πρόβλημα ελαχιστοποίησης (minimization problem)**, ενώ το πρόβλημα στο οποίο ζητείται το μέγιστο ονομάζεται **πρόβλημα μεγιστοποίησης (maximization problem)**. Από μαθηματική άποψη δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δυο προβλημάτων. Λόγω της ταυτότητας **min{f(x)}=-max{-f(x)},** κάθε πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε ένα ισοδύναμο πρόβλημα μεγιστοποίησης και αντιστρόφως.

Για την διατύπωση του θεωρητικού υποβάθρου της μεθόδου Simplex, δημιουργήθηκε ο Πίνακας 2, όπου το μοντέλο μετατρέπεται ανάλογα στην τυπική (standard) ή στην κανονική (canonical) μορφή.

	Πρόβλημα ελαχιστοποίησης	Πρόβλημα μεγιστοποίησης
Τυπική Μορφή	min($c_j \cdot x_j$) $\sum_{j=0}^{n} aij \cdot xij$ = b i=1,2,.., m $X_j \geq 0$, j=1, 2, ..., n	max($c_j \cdot x_j$) $\sum_{j=0}^{n} aij \cdot xij$ = b i=1,2,.., m $X_j \geq 0$, j=1, 2, ..., n
Κανονική μορφή	min($c_j \cdot x_j$) $\sum_{j=0}^{n} aij$ = b i=1,2,.., m $X_j \geq 0$, j=1, 2, ..., n	max ($c_j \cdot x_j$) $\sum_{j=0}^{n} aij$ = b i=1,2,.., m $X_j \geq 0$, j=1, 2, ..., n

Πίνακας 2: Σύγκριση των δύο μορφών Γραμμικού Προγραμματισμού

3.2.4 Προϋποθέσεις Γραμμικού Προγραμματισμού

Κάθε μαθηματική τεχνική μοντελοποίησης λειτουργεί κάτω από ορισμένες βασικές υποθέσεις και ο γραμμικός προγραμματισμός δεν αποτελεί εξαίρεση. Υπάρχουν πέντε βασικά αξιώματα που διασφαλίζουν ότι μια πραγματική κατάσταση μπορεί να αναπαρασταθεί ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

1. Γραμμικότητα

Η αντικειμενική συνάρτηση και οι διάφοροι περιορισμοί πρέπει να είναι $1^{ου}$ βαθμού συναρτήσεις ως προς τις μεταβλητές απόφασης $x_1, x_2, \ldots x_n$.

2. Βεβαιότητα-Προσδιοριστικότητα

Μία απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορεί να εφαρμοσθεί η θεωρία του Γραμμικού Προγραμματισμού σε κάποιο πρόβλημα ορίζει πως οι διάφορες παράμετροι του προβλήματος πρέπει να είναι γνωστές και μάλιστα με απόλυτη βεβαιότητα. Το πρότυπο του Γραμμικού Προγραμματισμού προσομοιώνει καταστάσεις που συνεπάγονται λήψη αποφάσεων με βαθμό αβεβαιότητας (uncertainty). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι παράμετροι του προτύπου δεν έχουν σταθερή τιμή. Πολλές φορές η προϋπόθεση αυτή δεν ικανοποιείται. Στις περιπτώσεις αυτές βοηθά η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis), η οποία παρουσιάζει τις επιπτώσεις αλλαγής της τιμής μιας παραμέτρου στη λύση του προβλήματος. Συχνά ο βαθμός αβεβαιότητας είναι μεγάλος, έτσι ώστε καθίσταται αναγκαίο να θεωρηθεί ότι οι μεταβλητές ακολουθούν κατανομή πιθανότητας (Στοχαστικός Προγραμματισμός).

3. Αναλογικότητα

Η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών απόφασης. Αυτό έχει ως επιπτώσεις ότι συμβολή κάθε μεταβλητής απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση είναι αναλογική της τιμής της μεταβλητής και ανεξάρτητη από τις τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών απόφασης. Τα παραπάνω προϋποθέτουν ότι όλες οι συναρτήσεις πρέπει να λαμβάνουν συνεχείς τιμές στην περιοχή εφικτότητας. Αν οι μεταβλητές λαμβάνουν μόνο ακέραιες ή διακριτές τιμές ή αν η συνάρτηση κόστους κάποιας μεταβλητής δεν είναι συνεχής, τότε η επίλυση δεν μπορεί να γίνει με Γραμμικό Προγραμματισμό. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται χρήση ακέραιου, χωριζόμενου προγραμματισμού ή άλλης μεθοδολογίας. Έτσι προκύπτει η Προϋπόθεση Αναλογικότητας του Γραμμικού Προγραμματισμού (Proportionality Assumption of Linear Programming), όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι το άθροισμα των ατομικών συνεισφορών κάθε μεταβλητής, καθώς και ότι το αριστερό μέρος κάθε εξίσωσης ή ανισότητας περιορισμού ισούται με το άθροισμα των συμβολών των μεταβλητών.

4. Προσθέτικοτητα

Προϋποθέτει ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι το άθροισμα των συνεισφορών των διαφόρων μεταβλητών. Στην περίπτωση που υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ δραστηριοτήτων που τροποποιούν το κέρδος από κάθε δραστηριότητα ή την ολική χρήση των πόρων, οι συναρτήσεις παύουν να είναι γραμμικές. Η ιδιότητα της προσθετικότητας ορίζει ότι π.χ. το κέρδος από τις δραστηριότητες ($x_1, x_2, \ldots, x_n$) ισούται με το άθροισμα των επί μέρους κερδών $F(x_1)$, $F(x_2)$, …, $F(x_n)$. Το αντίστοιχο ισχύει και για τους διάφορους περιορισμούς.

5. Διαιρετότητα.
Εκφράζει την ικανότητα κατανομής των δραστηριοτήτων σε ποσοστιαία επίπεδα έτσι ώστε να είναι παραδεκτές μη ακέραιες τιμές (κλασματικές) των μεταβλητών απόφασης. Η γενική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγραμματισμού θεωρεί ότι όλες οι μεταβλητές είναι συνεχείς και διαιρετές γεγονός που συνεπάγεται ότι μπορούν να πάρουν κλασματικές και ακέραιες τιμές.

Αν και οι εφαρμογές του γραμμικού προγραμματισμού είναι ποικίλες, εν τούτοις όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι τα παρακάτω:

- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού αποβλέπουμε στη μεγιστοποίηση του κέρδους ή ελαχιστοποίηση του κόστους αντίστοιχα. Το κέρδος ή το κόστος δίνεται από μια γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών του προβλήματος η οποία καλείται αντικειμενική συνάρτηση.

- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν περιορισμοί , οι οποίοι περιορίζουν τη δυνατότητα της απεριόριστης αύξησης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις, εκ των οποίων θα επιλεγεί η βέλτιστη. Βασικός σκοπός του γραμμικού προγραμματισμού είναι η επιλογή της βέλτιστης λύσης.

3.2.5 Είδη λύσεων Γραμμικού Προγραμματισμού

Λύση (solution) ενός προβλήματος γενικά καλούμε κάθε διάνυσμα x τιμών των μεταβλητών απόφασης, ανεξάρτητα αν ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί ή αν έχουμε 'επιθυμητές' ή όχι τιμές. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να ορίσουμε ακριβέστερα τον όρο λύση στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Οπότε έχουμε τα εξής είδη λύσεων:

Εφικτή λύση (feasible solution):
Είναι η λύση (ή ένα διάνυσμα x) για την οποία ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένου και της μη αρνητικότητας.

Βέλτιστη λύση (optimal feasible solution)
Είναι εκείνη η εφικτή λύση που επιπλέον βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Η λύση αυτή είναι ουσιαστικά αυτή που αναζητείται και έτσι (αν υπάρχει) έχει επιτευχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό ο στόχος που έχει τεθεί.

Επαυξημένη λύση (augmented solution)
Είναι η λύση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο έχει κατασκευαστεί στην πρότυπη μορφή του, δηλαδή έχει επαυξηθεί με μεταβλητές έτσι ώστε οι περιορισμοί να εκφράζονται με ισότητες. Η λύση του επαυξημένου προβλήματος καλείται επαυξημένη λύση.

Μη-εφικτή λύση (infeasible solution)
Μια μη-εφικτή λύση δεν ικανοποιεί τουλάχιστον έναν περιορισμό από αυτούς που έχουν τεθεί. Γενικά, είναι αρκετά πιθανό για ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού να έχει μη-εφικτές λύσεις.

3.3 Η μέθοδος Simplex

Το 1947 ο G. Danzig διατύπωσε το γενικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο σχεδιάστηκε με τη **μέθοδο Simplex** για μια συστηματική επίλυση του προβλήματος, η οποία στη χειρότερη περίπτωση χρειαζόταν εκθετικό χρόνο. Είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων στους σημερινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ειδικότερα, είναι ένας αλγόριθμος (algorithm). Ως αλγόριθμο θεωρούμε κάθε επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση ενός προγράμματος, δηλαδή μια συστηματική διαδικασία που επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η εκάστοτε φορά κατά την οποία επαναλαμβάνεται η διαδικασία ονομάζεται επανάληψη (iteration). Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει κανόνες για να αρχίσει η διαδικασία και κριτήρια που προσδιορίζουν πότε αυτή θα τελειώσει.

Συνεπώς, η μέθοδος Simplex είναι μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού μέχρις ότου επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση. Βασίζεται στη συστηματική δημιουργία βασικών δυνατών λύσεων και στον έλεγχο της αριστότητας τους. Με αυτή την επαναληπτική διαδικασία επιτυγχάνονται εφικτές λύσεις με έναν συστηματικό τρόπο. Η μέθοδος στηρίζεται σε δύο έννοιες. Στην έννοια της εφικτής λύσης και στην έννοια της άριστης λύσης. Επίσης βασίζεται και στην ιδιότητα ότι η άριστη λύση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, αν υπάρχει, μπορεί πάντοτε να βρεθεί σε μια από τις βασικές εφικτές λύσεις.

Η μέθοδος Simplex εξετάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μόνο στα ακραία σημεία της περιοχής των εφικτών λύσεων, με ένα συστηματικό αλγεβρικό τρόπο. Η διαδοχική εξέταση των ακραίων σημείων γίνεται με επαναληπτικό τρόπο, δηλαδή επαναλαμβάνεται το ίδιο σύνολο των διαδικασιών και αλγεβρικών πράξεων σε διαδοχικά βήματα έως ότου επιτευχθεί ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης. Κάθε βήμα της μεθόδου Simplex αντιστοιχεί στην επιλογή ενός ακραίου σημείου της περιοχής των εφικτών λύσεων. Σε κάθε νέο βήμα, το επόμενο ακραίο σημείο της περιοχής των εφικτών λύσεων επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης να αυξάνεται (ή αντίστοιχα μειώνεται αν η αντικειμενική συνάρτηση αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους) και επομένως σταδιακά προκύπτει η βέλτιστη/άριστη λύση.

Επομένως, στη μέθοδο Simplex το πρώτο στάδιο αποτελεί πάντοτε η εξεύρεση μιας βασικής εφικτής λύσης. Κατόπιν αυτή η λύση εξετάζεται για αριστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και την επίδραση που έχει η εισαγωγή μιας μη βασικής μεταβλητής για την αντικατάσταση τουλάχιστον μιας από τις βασικές μεταβλητές που ήδη υπάρχει σαν λύση. Εάν σημειώνεται βελτίωση ή αντικατάσταση γίνεται πάντοτε με την εισαγωγή μόνο μιας μη βασικής μεταβλητής κάθε φορά, η οποία δίνει πάντοτε μια νέα εφικτή λύση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου, ότι για κάθε νέα λύση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τουλάχιστον το ίδιο βέλτιστη όσο και η προηγούμενη λύση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε κάθε βήμα της

επαναληπτικής διαδικασίας να γίνεται καλύτερη προσέγγιση της λύσης. Τέλος, η μέθοδος καθορίζει που έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Εκτός από τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, δηλαδή τις τιμές των μεταβλητών και το αντίστοιχο βέλτιστο κέρδος ή κόστος, η μέθοδος Simplex, παρέχει επίσης ένα πλήθος άλλων πληροφοριών οικονομικής φύσεως, οι οποίες δεν είναι δυνατό να παραχθούν με άλλο τρόπο. Για να μπορέσουν να αναπτυχθούν οι βασικές ιδέες της μεθόδου στη λύση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, θα πρέπει να μελετηθεί πρώτα το γενικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Επιπλέον, το πρόβλημα πρέπει να είναι σε κανονική μορφή και, όπως προαναφέρθηκε, να είναι γνωστή μια (αρχική) μη εκφυλισμένη βασική εφικτή λύση. Λύνοντας ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού είναι απαραίτητο να βρούμε την λύση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων που συσχετίζονται με το πρόβλημα και το οποίο προκύπτει από τους περιορισμούς. Έτσι, εάν έχουμε ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους είναι γνωστό ότι αυτό θα έχει μια μοναδική λύση. Για κάθε τιμή του x_1 (ή του x_2), υπάρχει μια αντίστοιχη τιμή x_2 (ή x_1).

Εάν επιπλέον θεωρηθεί και η συνθήκη μη αρνητικότητας των μεταβλητών, δηλαδή $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$, τότε περιορίζεται το πεδίο τιμών των μεταβλητών. Η συνθήκη της μη αρνητικότητας των μεταβλητών είναι μια σημαντική απαίτηση των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Συστήματα στα οποία οι άγνωστοι είναι περισσότεροι από τις εξισώσεις ονομάζονται απροσδιόριστα συστήματα. Γενικά, τα απροσδιόριστα συστήματα μπορεί να μην έχουν λύση ή να έχουν άπειρες λύσεις.

3.4 Επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων

Με στόχο την επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού είναι διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία λογισμικού, κατάλληλου όχι μόνο για μεγάλους υπολογιστές αλλά ακόμη και για προσωπικούς υπολογιστές. Τρία από τα σπουδαιότερα πακέτα είναι:

- Ο «επιλυτής» – **Solver**, ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος στο φύλλο εργασίας του προγράμματος Excel, του πακέτου λογισμικού Microsoft Office. Στα διάφορα κελιά εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος, δηλαδή τα κελιά στα οποία περιέχονται οι μεταβλητές απόφασης, τα κελιά στα οποία γίνονται οι διάφοροι υπολογισμοί και τα κελιά στα οποία περιέχονται κατατοπιστικές πληροφορίες για τον χρήστη. Εισάγεται αρχικά το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης ως SUMPRODUCT, στην Αναφορά Απάντησης ‘Target Cell’ επιζητείται η μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση ή ισότητα με μία τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με τίτλο ‘Adjustable Cells’ τοποθετούνται οι μεταβλητές απόφασης προς υπολογισμό με αρχική τιμή μηδέν και στην περιοχή με τίτλο ΄Constraints’ εισάγονται οι περιορισμοί.

- Το πρόγραμμα **Lindo (Linear Discrete Optimizer).** Αρχικά εισάγεται η αντικειμενική συνάρτηση στη μορφή MAX ή MIN, έπειτα εισάγονται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος μεταξύ των γραμμών SUBJECT TO ή SUCH THAT και END. Στο αριστερό μέλος τοποθετούνται μεταβλητές μόνο με τους συντελεστές τους, ενώ στο δεξιό μέλος μόνο σταθερούς αριθμούς. Προαιρετικά μετά το END εισάγονται περισσότεροι περιορισμοί. Τέλος, επιλέγοντας το κουμπί SOLVE προκύπτει η λύση του LINDO.

- Το πακέτο ελεύθερου λογισμικού **LibreOffice**. Το LibreOffice είναι το ελεύθερο πακέτο Ανοικτού Κώδικα για τον έλεγχο παραγωγικότητας. Αποτελεί τη μη εμπορική εκδοχή του προγράμματος Excel. Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στα δύο λογισμικά.

3.5 Ακέραιος Προγραμματισμός

Ο Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming-IP) είναι μια ιδιαίτερη τεχνική της επιχειρησιακής έρευνας και αποτελεί μια ειδική περίπτωση των προβλημάτων του γραμμικού προγραμματισμού. Όταν δεν ικανοποιείται η υπόθεση της **διαιρετότητας (divisibility)** χρησιμοποιείται ο ακέραιος προγραμματισμός. Η ιδιαιτερότητα αυτών των προβλημάτων έγκειται στο γεγονός ότι οι μεταβλητές δεν παίρνουν συνεχείς τιμές αλλά ακέραιες. Επομένως τίθεται η ανάγκη ύπαρξης ακέραιων μεταβλητών απόφασης. Για παράδειγμα, όταν γίνεται ανάθεση εργασιών σε ένα σύνολο ανθρώπων, μηχανών ή οχημάτων, οι δραστηριότητες αυτές (μεταβλητές απόφασης) πρέπει να μετρούνται σε ακέραιες ποσότητες. Συχνά γίνεται αναφορά στον Ακέραιο Προγραμματισμό με την πλήρη ονομασία **Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Integer Linear Programming-ILP).**

Το μαθηματικό μοντέλο του Ακέραιου Προγραμματισμού είναι το ίδιο με αυτό του γραμμικού προγραμματισμού με τον επιπλέον περιορισμό των ακέραιων μεταβλητών (όλων ή μερικών από αυτές). Στην περίπτωση που κάποιες, αλλά όχι όλες οι μεταβλητές ικανοποιούν αυτόν τον περιορισμό, έχουμε πρόβλημα **Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming).** Όταν όμως όλες οι μεταβλητές επιτρέπεται να λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα **Καθαρού Ακέραιου Προγραμματισμού (Pure Integer Programming).**

Ο ακέραιος προγραμματισμός προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις και έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Η μεγάλη συνεισφορά του ακέραιου προγραμματισμού είναι η χρήση 0-1 μεταβλητών. Είναι λογικές μεταβλητές που παίρνουν την τιμή ‘0’ ή ‘1’. Συνήθως δεν έχουν φυσική σημασία αλλά λογικό νόημα. Διευρύνουν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του Γραμμικού Προγραμματισμού. Προβλήματα που δεν θα μπορούσαν να λυθούν με συμβατικό Γραμμικό Προγραμματισμό, με χρήση 0-1 μεταβλητών και την κατάλληλη μοντελοποίηση μπορούν να λυθούν. Παραδείγματα αποτελούν οι λογικές συνθήκες, τα σταθερά κόστη, οι οικονομίες κλίμακας, τα μη γραμμικά μοντέλα και οι διαζευκτικοί περιορισμοί κ.α.

3.6 Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός

Το παραπάνω πρόβλημα, στο οποίο οι μεταβλητές λαμβάνουν αποκλειστικά τις τιμές 0, 1 ονομάζεται πρόβλημα **Δυαδικού Ακέραιου Προγραμματισμού (Binary Integer Programming)**, ενώ οι μεταβλητές ονομάζονται **δυαδικές μεταβλητές (binary variables).** Υπάρχουν κάποιες περιοχές όπου ο ακέραιος προγραμματισμός έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη των διοικητικών αποφάσεων. Μια από αυτές είναι ο **προϋπολογισμός κεφαλαίου (capital budgeting).** Σε ένα τυπικό πρόβλημα προϋπολογισμού του κεφαλαίου οι αποφάσεις περιλαμβάνουν την επιλογή ενός αριθμού από πιθανές επενδύσεις. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα λαμβάνονται οι μεταβλητές απόφασης με τιμές ‘0’ ή ‘1’, υποδεικνύοντας την απόρριψη ή την αποδοχή της εκάστοτε επένδυσης.

3.7 Ο αλγόριθμος του Excel Solver για Ακέραιο Προγραμματισμό.

Στην παρούσα μελέτη θα επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων αρκετές φορές με την βοήθεια του Ακέραιου Προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των ενεργοποιήσιμων ενεργειών θα πραγματοποιηθεί με βάση το εργαλείο επίλυσης του Excel (Excel Solver).
Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα αποσαφηνιστεί ο αλγόριθμος, στον οποίο στηρίζεται το Excel Solver για τα προβλήματα Ακέραιου Προγραμματισμού. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία των **αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης (Blind Search Algorithms)** και ονομάζεται **αλγόριθμος επέκτασης και οριοθέτησης (Branch and Bound algorithm).**

3.7.1 Αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης.

Οι αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης (Blind Search Algorithms) εφαρμόζονται σε προβλήματα στα οποία δεν υπάρχει πληροφορία που να επιτρέπει αξιολόγηση των καταστάσεων. Στους αλγορίθμους τυφλής αναζήτησης έχει σημασία η χρονική σειρά με την οποία παράγονται οι καταστάσεις από το μηχανισμό επέκτασης.

Στον Πίνακας 3 , παρατίθενται διάφορα είδη αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης.

Όνομα Αλγορίθμου	Συντομογραφία	Ελληνική Ορολογία
Depth-First Search	DFS	Αναζήτηση Πρώτα σε Βάθος
Breadth-First Search	BFS	Αναζήτηση Πρώτα σε Πλάτος
Iterative Deepening	ID	Επαναληπτική Εκβάθυνση
Bi-directional Search	BiS	Αναζήτηση Διπλής Κατεύθυνσης
Branch and Bound	B&B	Επέκταση και Οριοθέτηση
Beam Search	BS	Ακτινωτή Αναζήτηση

Πίνακας 3:Είδη αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης

3.7.2 Αλγόριθμοι Επέκτασης και Οριοθέτησης

Οι αλγόριθμοι επέκτασης και οριοθέτησης (Branch and Blound-B&B) εφαρμόζονται σε προβλήματα όπου αναζητείται η βέλτιστη λύση (ελάχιστο κόστος). Αναζητούν τον πλήρη χώρο λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα για την βέλτιστη λύση. Ωστόσο, η ακριβής απαρίθμηση είναι συνήθως αδύνατη εξαιτίας του εκθετικά αυξανόμενου αριθμού των πιθανών λύσεων. Η χρήση των ορίων για τη συνάρτηση που βελτιστοποιείται συνδυασμένη

με την υπάρχουσα τιμή της καλύτερης λύσης επιτρέπει στον αλγόριθμο να αναζητήσει μέρη του χώρου λύσεων έμμεσα.

Σε οποιαδήποτε σημείο της διαδικασίας επίλυσης, η κατάσταση της λύσης αναφορικά με την αναζήτηση του χώρου λύσεων περιγράφεται από ανεξερεύνητο υποσύνολο αυτού και τη βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι τώρα. Αρχικά, υπάρχει μόνο ένα υποσύνολο, δηλαδή ο πλήρης χώρος λύσεων και η βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι τώρα είναι το άπειρο. Τα ανεξερεύνητα υποσύνολα αντιπροσωπεύονται ως κόμβοι σε ένα δυναμικά παραγόμενο δέντρο αναζήτησης, το οποίο αρχικά περιέχει μόνο την ρίζα και κάθε επανάληψη του αλγορίθμου επέκτασης και οριοθέτησης επεξεργάζεται ένα τέτοιον κόμβο. Η επανάληψη έχει τρεις βασικές συνιστώσες: επιλογή του κόμβου προς επεξεργασία, δεσμευμένος υπολογισμός και διακλάδωση.

Η αλληλουχία αυτών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την επιλεχθείσα στρατηγική για την επιλογή του επόμενου κόμβου προς επεξεργασία. Αν η επιλογή του επόμενου υποπροβλήματος βασίζεται στη δεσμευμένη αξία των υποπροβλημάτων, τότε η πρώτη λειτουργία της επανάληψης μετά την επιλογή του κόμβου είναι είναι η διακλάδωση, δηλαδή η υποδιαίρεση του χώρου λύσεων του κόμβου σε δύο ή περισσότερους υπόχωρους. Για κάθε έναν από τους δύο, ελέγχεται εάν ο υπόχωρος αποτελείται από μια μοναδική λύση. Σε αυτή την περίπτωση, συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη λύση, κρατώντας την καλύτερη εξ' αυτών. Διαφορετικά, υπολογίζεται η δεσμευμένη συνάρτηση για τον υπόχωρο και συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη λύση. Εάν μπορεί να αποδειχτεί ότι ο υπόχωρος δεν μπορεί να περιέχει τη βέλτιστη λύση ο συνολικός υπόχωρος απορρίπτεται. Διαφορετικά αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή από ζωντανούς κόμβους μαζί με τα όρια αυτών.

Η εναλλακτική είναι να ξεκινήσει υπολογίζοντας το όριο του επιλεγμένου κόμβου. Οι κόμβοι που δημιουργούνται αποθηκεύονται μαζί με το όριο του επεξεργασμένου κόμβου. Αυτή η στρατηγική ονομάζεται «νωθρή» και συχνά χρησιμοποιείται όταν ο επόμενος κόμβος προς επεξεργασία επιλέγεται να είναι ένας ζωντανός κόμβος του μέγιστου βάθους του δέντρου αναζήτησης.

Η έρευνα τερματίζεται, όταν δεν υπάρχουν ανερεύνητα κομμάτια του χώρου λύσεων και η βέλτιστη λύση είναι, τότε, η καλύτερη δυνατή. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ουσιαστικά «κλαδεύει» καταστάσεις (pruning) και μειώνει το χώρο αναζήτησης.

3.8 Επιλογή του Μοντέλου της Διπλωματικής Εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση μοντέλων προγραμματισμού έτσι όπως εμφανίζονται στο θεωρητικό υπόβαθρο της Διπλωματικής Εργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας, που είναι η βέλτιστη κατανομή των πόρων για την απομείωση του κινδύνου στις υποδομές των οδικών δικτύων A7, A50, A51, A52, επιλέχθηκε να αναπτυχθεί και να εφαρμοσθεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο βασίζεται στις αρχές του Ακέραιου Προγραμματισμού, όπως αναλύεται στη επόμενη παράγραφο. Το παραπάνω προσφέρεται ως ένα υπολογιστικό πακέτο του Microsoft Excel, ονομάζεται Open Solver for excel και χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CBC, γνωστό ως λειτουργία μπλοκ, κρυπτογράφησης και αλυσοποίησης.

Συγκεκριμένα, στο πρόβλημα εισάγεται μοναδική αντικειμενική συνάρτηση για την οποία επιδιώκεται μεγιστοποίηση καθώς εκφράζει την απομείωση του κινδύνου που επέρχεται μέσω των ενεργειών συντήρησης των υποδομών. Σε αυτήν εισάγονται οι μεταβλητές απόφασης Xij, όπου i η κάθε υποδομή, j η κάθε ενέργεια απομείωσης του κινδύνου, οι οποίες λαμβάνουν μόνο τιμές 0 ή 1, ανάλογα με το αν επαρκεί ο αρχικός διαθέσιμος προϋπολογισμός για την ενεργοποίηση της κάθε ενέργειας σε κάθε υποδομή. Σε περίπτωση ενεργοποίησης της ενέργειας η μεταβλητή παίρνει την τιμή 1 ενώ σε περίπτωση μη ενεργοποίησης της ενέργειας η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0. Τα δεδομένα εισαγωγής στο προγραμματιστικό μοντέλο και η πλήρη περιγραφή του αναλύονται στα κεφάλαια 4 και 5.

4. Δεδομένα-Ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης

4.1 Γενικά

Ύστερα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και των μεθοδολογιών από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας ακολουθεί η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνονται:

- Το είδος των δεδομένων που συλλέχθηκαν.
- Η περιγραφή του λογισμικού CAPTool από το οποίο έγινε η ανάλυση του ρίσκου και εξήλθαν οι συντελεστές αποτελεσματικότητας της εκάστης προβλεπόμενης ενέργειας.
- Οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν ώστε να γίνει εφικτή η προσαρμογή του λογισμικού Captool στον στόχο της Διπλωματικής Εργασίας
- περιγραφή του μοντέλου και η διαδικασία εφαρμογής του.
- Η ανάλυση όλων των παραμέτρων, των περιορισμών και των υποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν.
- Η περιγραφή της μαθηματικής επίλυσης στο excel.

4.2 Συλλογή δεδομένων

Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που εξάγονται μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, συλλέχθηκαν αρχικά πραγματικά στοιχεία από τους οργανισμούς διαχείρισης των εξεταζόμενων οδικών τμημάτων. Τα στοιχεία επεξεργάστηκαν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επισκεψιμότητα, το μέγεθος, τη δυναμική αλλά και τον οικονομικό κύκλο κάθε υποδομής. Τα στοιχεία αυτά, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα CAPTool, είναι:

- το μήκος
- ο αριθμός γραμμών
- ο μέσος ετήσιος αριθμός οχημάτων κάθε υποδομής
- ο ετήσιος προϋπολογισμός συντήρησης όλων των υποδομών.

Στους Πίνακας 4, Πίνακας 5, Πίνακας 6, Πίνακας 7 παρουσιάζονται τα φυσικά δεδομένα των οδικών δικτύων A7, A50, A51, A52 αντίστοιχα , όπως παρασχέθηκαν από την εταιρία δικτύων Milano Serravalle - Milano Tangenziali S.p.A . Στον Πίνακα 8 και στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα οικονομικά δεδομένα προϋπολογισμού από το έτος 2012 έως το 2028 από την εταιρία διαχείρισης των οδικών δικτύων.

n.	description	PK inizio	PK fine	dir	lenght (m)	lanes	AADT
1	Ponte canale deviatore Olona	B+586	B+605	N/S	19	6	69,200
2	Ponte cavo Borromeo	3+175	3+190	N/S	15	6	69,200
3	Viadotto Binasco	11+313	11+367	N/S	54	6	49,400
4	Ponte Ticino	23+805	24+081	N/S	76	6	49,400
5	Ponte roggia Castellana	28+905	28+923	N/S	18	6	49,400
6	Ponte roggia Caselle	28+999	29+027	N/S	28	6	49,400
7	Ponte torrente Terdoppio	36+911	36+939	N/S	28	6	44,900
8	Ponte Po Carreggiata Nord	40+782	41+554	N	772	3	22,450
9	Ponte Po Carreggiata Sud	40+782	41+623	S	841	3	22,450
10	Ponte torrente Curone	49+504	49+537	N/S	33	6	44,900
11	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord	57+937	58+222	N	285	3	26,200
12	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud	57+937	58+222	S	285	3	26,200
13	Viadotto Tortona Carreggiata Nord	64+965	65+193	N	128	3	21,700
14	Viadotto Tortona Carreggiata Sud	65+006	65+193	S	187	3	21,700

Πίνακας 4:Φυσικά δεδομένα υποδομών του οδικού δικτύου A7.

n.	description	PK inizio	PK fine	dir	lenght (m)	lanes	AADT
1	Viadotto di Rho	1+992	2+326	N/S	334	6	55,000
2	Ponte Fiume Olona Carreggiata Sud	3+249	3+258	S	9	3	27,750
3	Ponte Fiume Olona Carreggiata Nord	3+256	3+265	N	9	3	27,750
4	Manufatto M1 - Ghisolfa Carreggiata Nord	4+013	4+086	N	73	3	45,000
5	Manufatto M2 - Ghisolfa Carreggiata Nord	3+481	3+619	N	138	3	45,000
6	Manufatto M6 - Ghisolfa Carreggiata Nord	4+508	4+635	N	127	3	45,000
7	Manufatto M4 - Ghisolfa Carreggiata Sud	4+049	4+105	S	56	3	45,000
8	Canale scolmatore	5+923	5+933	N/S	10	6	90,000
9	Viadotto SP 11	6+760	6+796	N/S	36	6	90,000
10	Viadotto svincolo Baggio	10+571	10+605	N/S	34	6	90,000
11	Viadotto Lorenteggio	13+874	13+923	N/S	49	6	90,000
12	Viadotto FS Mortara	14+217	14+250	N/S	33	6	90,000
13	Viadotto Naviglio Grande	14+461	14+549	N/S	88	6	90,000
14	Scatolare Cavo Belgioioso	16+688	16+706	N/S	18	6	90,000
15	Viadotto Svincolo A7	20+342	20+385	N/S	43	6	90,000
16	Viadotto SS 35	21+050	21+154	N/S	104	6	90,000
17	Viadotto Val Tidone	26+235	26+263	N/S	28	6	95,500
18	Viadotto FS	27+856	27+876	N/S	20	6	95,500

Πίνακας 5:Φυσικά δεδομένα υποδομών του οδικού δικτύου A50

n.	description	PK inizio	PK fine	dir	lenght (m)	lanes	AADT
1	Viadotto Via Mecenate Nord Carreggiata Nord	2+684	2+715	N	31	3	30,900
2	Viadotto Via Mecenate Sud Carreggiata Sud	2+684	2+715	S	31	3	30,900
3	Viadotto Via Fantoli Nord Carreggiata Nord	3+558	3+650	N	92	3	30,900
4	Viadotto Via Fantoli Sud Carreggiata Sud	3+558	3+650	S	92	3	30,900
5	Viadotto Forlanini Carreggiata Nord	4+430	4+803	N	373	3	30,900
6	Viadotto Forlanini Carreggiata Sud	4+430	4+800	S	370	3	30,900
7	Viadotto dei Parchi Nord Carreggiata Nord	5+106	8+026	N	2920	3	30,900
8	Viadotto dei Parchi Sud Carreggiata Sud	4+966	8+013	S	3047	3	30,900
9	Cavalcavia Via Padova Nord Carreggiata Nord	10+446	10+481	N	35	3	30,900
10	Cavalcavia Via Padova Sud Carreggiata Sud	10+430	10+464	S	34	3	30,900
11	Cavalcavia Via Palmanova Nord Carreggiata Nord	10+570	10+597	N	27	3	30,900
12	Cavalcavia Via Palmanova Sud Carreggiata Sud	10+570	10+597	S	27	3	30,900
13	Ponte Naviglio Martesana Nord Carreggiata Nord	11+102	11+114	N	12	3	30,900
14	Ponte Naviglio Martesana Sud Carreggiata Sud	11+102	11+114	S	12	3	30,900
15	Viadotto Imbersago	12+280	12+403	N/S	123	6	37,100
16	Ponte Canale Villoresi Nord Carreggiata Nord	19+740	19+758	N	18	3	13,700
17	Ponte Canale Villoresi Sud Carreggiata Sud	19+717	19+738	S	21	3	13,700
18	Sovrappasso ramo di svincolo A4 Carreggiata Nord	19+855	19+883	N	28	3	13,700
19	Ponte Autostrada A4	20+023	20+123	N/S	100	6	27,400
20	Cavalcavia Via Archimede	20+237	20+256	N/S	19	6	27,400
21	Cavalcavia Via Ghiringhella	20+410	20+420	N/S	10	4	37,200

22	Cavalcavia SP 41	23+735	23+749	N/S	14	4	37,200
23	Cavalcavia Vimercate Sud	24+592	24+627	N/S	35	4	37,200
24	Galleria Martiri di Boves	25+368	25+468	N/S	100	4	37,200
25	Galleria Vimercate Centro	25+767	26+634	N/S	867	4	37,200
26	Cavalcavia Via Paganini	28+983	29+005	N/S	22	4	37,200

Πίνακας 6: Φυσικά δεδομένα υποδομών του οδικού δικτύου A51.

n.	description	PK inizio	PK fine	dir	lenght (m)	lanes	AADT
1	Sovrappasso alla Tangenziale Est Carreggiata Nord	0+328	0+478	N	150	2	35,300
2	Viadotto Fiume Lambro Carreggiata Sud	0+268	0+390	S	122	2	35,300
3	Viadotto Di Vittorio	0+652	0+743	N/S	91	4	70,600
4	I Ponte Fiume Lambro	2+935	2+962	N/S	27	4	70,600
5	II Ponte Fiume Lambro	3+032	3+059	N/S	27	4	70,600
6	Sovrappasso A4 Carreggiata Nord	4+259	4+334	N	75	2	35,300
7	Sovrappasso A4 Carreggiata Sud	4+259	4+334	S	75	2	35,300
8	Galleria S. Rocco	4+603	5+103	N/S	500	4	70,600
9	Galleria	6+570	6+648	N/S	78	4	70,600
10	Galleria	7+307	7+353	N/S	46	4	70,600
11	Galleria De Amicis	7+865	7+985	N/S	120	4	70,600
12	Galleria Montegrappa	8+285	8+495	N/S	210	4	70,600
13	Galleria	9+795	9+834	N/S	39	4	70,600
14	Galleria	11+483	11+579	N/S	96	4	70,600
15	Galleria	11+851	11+955	N/S	104	4	70,600

Πίνακας 7: Φυσικά δεδομένα υποδομών του οδικού δικτύου A52.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Structures such as tunnels and bridges	5346	3407	7168	4653	5550	5550	4250	3800	4150	3000	3000	3000	3500	3500	3500	3500	3500
Road safety	3848	4423	2528	4067	3513	3513	4813	5263	4913	6063	6063	6063	5563	5563	5563	5563	5563
Supplies and other maintenance	300	161	144	344	476	476	476	476	476	476	476	476	476	476	476	476	476
Maintenance of new constructions	2630	2123	2889	3912	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510	2510
Other expenses	0	0	0	0	231	231	231	231	231	1003	1003	1003	1003	1003	1070	1070	1070
Sum (€x1000)	**12124**	**10114**	**12729**	**12976**	**12280**	**12280**	**12280**	**12280**	**12280**	**13052**	**13052**	**13052**	**13052**	**13052**	**13119**	**13119**	**13119**

Πίνακας 8: Ετήσια προϋπολογισμός που διατίθεται στις ενέργειες συντήρησης για το σύνολο των υποδομών των οδικών δικτύων A7, A50, A51, A52

Σχήμα 2 : Ετήσιος προϋπολογισμός των εξεταζόμενων υποδομών.

Όπως φαίνεται το άθροισμα των ετήσιων εξόδων για τις υποδομές των οδικών δικτύων που εξετάζονται κυμαίνεται από 12.124.000€ έως 13.119.000€.

Τα φυσικά δεδομένα των υποδομών εισέρχονται στο λογισμικό CAPTool ως δεδομένα εισόδου, ενώ ο ετήσιος προϋπολογισμός συγκρίνεται με τα τελικά αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων.

4.3 Η μεθοδολογία CAPTA

4.3.1 Γενικά

Το CAPTA (Costing Asset Protection: An All Hazards Guide for Transportation Agencies) είναι ένα σχεδιαστικό εργαλείο που εκτιμά τον προϋπολογισμό των ενεργειών που αποσκοπούν στην μείωση του κινδύνου των συγκοινωνιακών υποδομών. Αναπτύχθηκε στην Ουάσιγκτον το 2009 από την ομάδα Transportation Research Board of the National Academies.

Η ομάδα σχεδιασμού του προγράμματος CAPTA αποτελείται από αναλυτές, επιστήμονες, μηχανικούς του Science Applications International Corporation (SAIC) and PB Consult, καθώς και καταξιωμένα στελέχη της βιομηχανίας των υποδομών και των μεταφορών. Τα μέλη της ομάδας συνεργάστηκαν με εθνικούς οργανισμούς όπως ο οργανισμός American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ώστε να αναπτύξουν τους πιθανούς κινδύνους στις συγκοινωνιακές υποδομές και τις αντίστοιχες στρατηγικές ευαισθησίας.

Το CAPTA εξετάστηκε από πολλούς εθνικούς και τοπικούς φορείς. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης η μεθοδολογία CAPTA εφαρμόστηκε σε μεταφορικά δίκτυα στη Βιρτζίνια, στο Μέριλαντ, στο Κάνσας και στην Αρχή Μεταφορών της Μασαχουσέτης (MBTA) στη

Βοστώνη. Η μεθοδολογία CAPTA θεωρήθηκε καλά αποδεκτή και χαρακτηρίστηκε ως ένας σύνδεσμος μεταξύ των μεθοδολογιών εκτίμησης κινδύνου για συγκεκριμένες υποδομές οδικών δικτύων και του κεφαλαίου προτεραιοτήτων.

Οι τρέχουσες διαθέσιμες στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου αναλύουν το κίνδυνο ανά υποδομή ή ανά απειλή. Αυτές οι προσεγγίσεις συνήθως δεν εξυπηρετούν έναν υψηλού επιπέδου συνολικό προγραμματισμό που λαμβάνει υπόψη όλους τους κινδύνους, αλλά ειδικεύονται σε ανάλυση κινδύνου σε κάθε συγκοινωνιακή υποδομή ξεχωριστά και ανάλυση συγκεκριμένου τύπου κινδύνου. Το CAPTA αντιθέτως περιλαμβάνει μια πολυτροπική στρατηγική, υψηλού επιπέδου, η οποία λαμβάνει υπόψη όλα τα ζητήματα κινδύνου στο σύνολο των υποδομών ενός δικτύου, μέσα από ένα συνολικό προγραμματισμό . Επιτρέπει δηλαδή τη λήψη εσωτερικών αποφάσεων κατανομής πόρων μεταξύ πολλαπλών ενεργειών απομείωσης του κινδύνου.

Η μεθοδολογία CAPTA επιχειρεί να απαντήσει στο ερώτημα :

Ποιες επιπτώσεις δεν δύναται να αντιμετωπιστούν επαρκώς με τις τωρινές πολιτικές διαχείρισης χρηματικών πόρων στις υποδομές ενός οδικού δικτύου?

Με το CAPTA ο χρήστης δύναται να αναλύσει την κάθε υποδομή, τον κάθε σχετικό κίνδυνο που απειλεί την κάθε υποδομή και το επιτρεπτό όριο συνεπειών του εκάστοτε κινδύνου. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται μέσα από ένα υπολογιστικό φύλλο Microsoft Excel το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει και να προσαρμόσει το μοντέλο κατανομής πόρων στην εκάστοτε μελέτη εφαρμογής.

Ξεκινώντας από το βασικό ερώτημα, το οποίο αποσκοπεί στη θεσμοθέτηση ενός ορίου αποδεκτών συνεπειών(threshold), η ομάδα σχεδιασμού του CAPTA επιδίωξε να συμπεριλάβει στη μεθοδολογία της τα επακόλουθα ερωτήματα:

- Ποιες είναι οι απειλές και ποιοι οι κίνδυνοι που υπάρχουν στο μεταφορικό σύστημα.
- Ποια γεγονότα κινδύνου είναι πιο σημαντικά.
- Ποιες είναι οι υποδομές που παρουσιάζουν υπέρμετρες συνέπειες σε περίπτωση αστοχίας.
- Πως δύναται να αποφευχθούν οι απειλές και οι κίνδυνοι.
- Πως δύναται να προετοιμαστεί το μεταφορικό δίκτυο ώστε σε περίπτωση εμφάνισης κινδύνου να ανταποκριθεί επαρκώς.
- Σε ποιες ενέργειες πρέπει να κατανεμηθούν οι χρηματικοί πόροι ώστε να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις που συνεπάγονται οι κίνδυνοι.

Το τελευταίο ζήτημα αντιπροσωπεύει τον βέλτιστο τρόπο κατανομής των διαθέσιμων πόρων σε ένα περιοριστικό περιβάλλον, το οποίο συνιστά το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας
.
Οι διαθέσιμοι πόροι πρόκειται να κατανεμηθούν σε ενέργειες απομείωσης του κινδύνου. Οι ενέργειες αυτές ενσωματώνονται σε μια βάση δεδομένων που περιέχει το CAPTA με 31 αντίμετρα. Ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό και τα κριτήρια αξιολόγησης του κάθε αντίμετρου. Τόσο το κόστος όσο και η αποτελεσματικότητα του εκάστοτε αντίμετρου

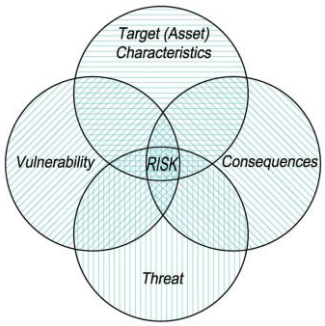
δύναται να προσαρμοστούν από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων στις τοπικές συνθήκες της μελέτης εφαρμογής.

Ο σκοπός του CAPTool είναι να παρέχει στον χρήστη ένα εργαλείο αρχικού σχεδιασμού και οικονομικού προϋπολογισμού που ενσωματώνει τους παρακάτω 5 στόχους.

1. Επιδεικνύει τις δημοσιονομικές επιπτώσεις των διαφόρων όριων επακόλουθων επιπτώσεων που επιλέχτηκαν από τον χρήστη.
2. Εξετάζει την αποτελεσματικότητα των διαφόρων αντιμέτρων τόσο μεμονωμένα όσο και στο συνολικό συνδυασμό τους.
3. Εκτιμά την τάξη μεγέθους της αποτελεσματικότητας των επιλεγμένων αντίμετρων στην απομείωση του κινδύνου
4. Καταδεικνύει τις υποδομές που απαιτούν πιο λεπτομερή ανάλυση κινδύνου.
5. Παρέχει οδηγίες με αντικειμενικό, διαφανή τρόπο.

Ο κίνδυνος ορίζεται στο CAPTA ως μια συνάρτηση πιθανότητας και συνέπειών μιας ανεπιθύμητης ενέργειας που επηρεάζει μια υποδομή.

Risk $= f\,(T,C,V)$



Όπου

Risk (Κίνδυνος): Η ποσοτική ή ποιοτική έκφραση πιθανής απώλειας που λαμβάνει υπόψη τόσο την πιθανότητα εμφάνισης ενός κινδύνου ή απειλής, όσο και τις συνέπειες αυτού του γεγονότος

T: Η πιθανότητα εμφάνισης ενός συγκεκριμένου κινδύνου ή απειλής, που χαρακτηρίζεται από σχετικές διαστάσεις (π.χ. μέγεθος, αντοχή).

C: Ένα οικονομικό μέτρο των συνεπειών της ζημιάς ή της καταστροφής ή άλλων λειτουργικών απωλειών σε μια υποδομή που προκύπτει από την εκδήλωση της διακινδύνευσης.

V: Το μέτρο της σχετικής ευαισθησίας της υποδομής στις συνέπειες ενός κινδύνου ή μιας απειλής.

Η συγκεκριμένη ποσοτική σχέση μεταξύ των μεταβλητών στην εξίσωση κινδύνου εξαρτάται από τον τρόπο που αναπτύσσονται και εκφράζονται οι μεταβλητές. Οι συνέπειες και η ευαισθησία των υποδομών μπορεί να κριθεί σε σχετική κλίμακα με άνω και κάτω όρια ή μέσω αναλυτικών μοντέλων που αξιολογούν την κρισιμότητα των υποδομών σε σχέση με τους σχετικούς κινδύνους.

Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η μεθοδολογία CAPTA ζητά από τον χρήστη να εντοπίσει τους κινδύνους και τις απειλές που συνεπάγονται υπέρμετρες επιπτώσεις χωρίς να απαιτεί την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης τους.
Κατά συνέπεια, το CAPTA δεν επιχειρεί να παράσχει μια επίσημη έκφραση κινδύνου όπως περιγράφεται στην εξίσωση κινδύνου που παρουσιάζεται παραπάνω. Η μεθοδολογία

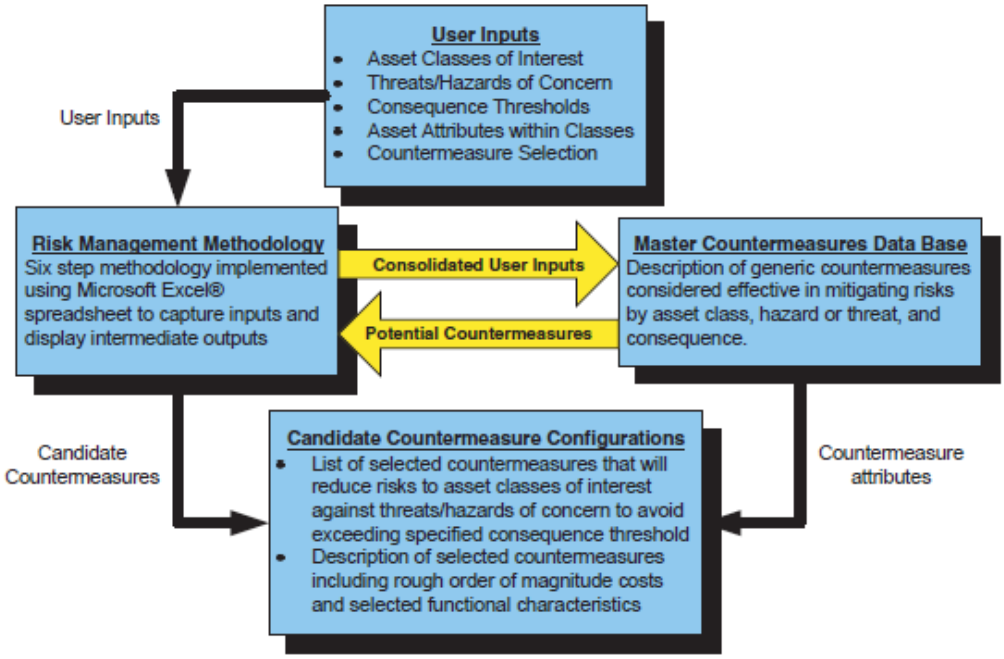
CAPTA προϋποθέτει ότι ο χρήστης είναι επαρκώς ενημερωμένος για τους πιθανούς κινδύνους και τις απειλές ώστε να λάβει τεκμηριωμένη απόφαση σχετικά με το ποιοι από αυτούς πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση.

Τα προτεινόμενα αντίμετρα που περιέχονται στο CAPTA μετριάζουν τον κίνδυνο, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης, την ευαισθησία της υποδομής στην εκδήλωση ενός κινδύνου και τις συνέπειες που σχετίζονται με τον κίνδυνο.

4.3.2 Το λογισμικό της μεθοδολογίας CAPTA

Το CAPTA αποτελείται από ένα γραπτό έγγραφο που περιγράφει τη μεθοδολογία και ένα ηλεκτρονικό υπολογιστικό φύλλο, το CAPTool (διαθέσιμο στην ιστοσελίδα ww.trb.org/news/blurb_detail.asp, που περιέχει τη διεπαφή του χρήστη με το μοντέλο δεδομένων.

Στο *Σχήμα 3* παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης του μοντέλου καθώς και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.



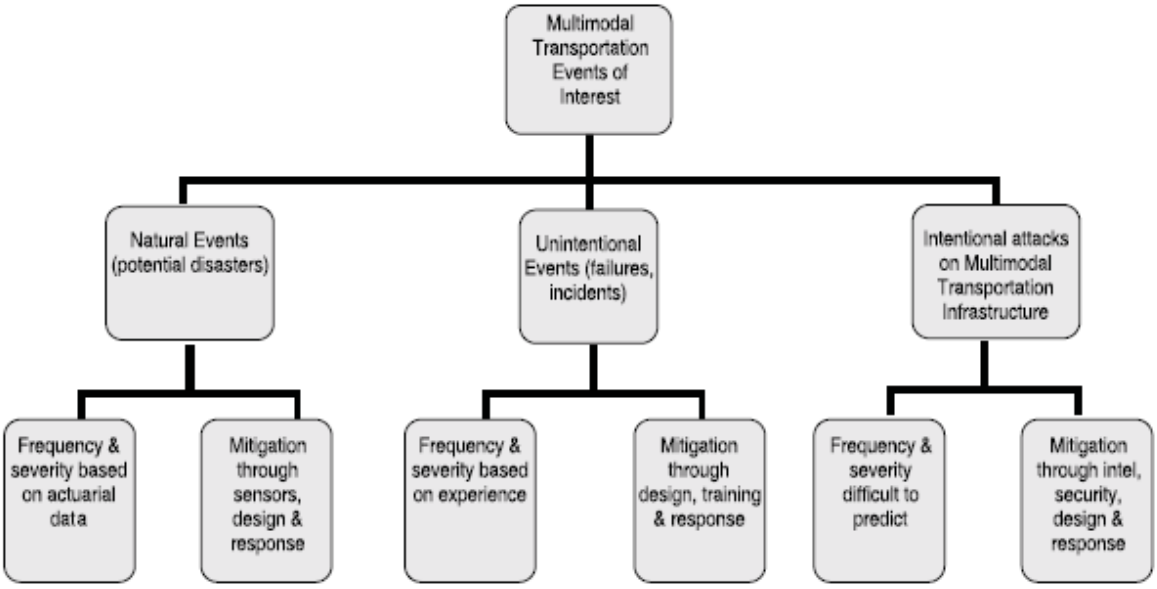
Σχήμα 3: Περιβάλλον μοντελοποίησης δεδομένων CAPTA

Το CAPTool είναι ένα λογισμικό στο οποίο ο χρήστης εισάγει ως δεδομένα

- Τους κινδύνους που απειλούν την κάθε υποδομή.
- Τα φυσικά χαρακτηρίστηκα των υποδομών ενός οδικού δικτύου (μήκος, αριθμός γραμμών, αριθμός διερχόμενων οχημάτων).
- Τα όρια συνεπειών για τις πρώτες τρεις από τις τέσσερις κατηγορίες συνεπειών.

4.3.3 Κίνδυνοι που περιλαμβάνονται στο CAPTool

Οι κίνδυνοί που περιέχονται στο CAPTool συνίστανται σε φυσικά γεγονότα, σκόπιμα γεγονότα και μη σκόπιμα γεγονότα (Σχήμα 4).



Σχήμα 4:Ταξινόμηση απειλών και κινδύνων για πολυτροπικά συστήματα μεταφοράς

Η διαχείριση κινδύνων για **φυσικά γεγονότα** βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα. Περιλαμβάνονται μετεωρολογικές και σεισμικές μετρήσεις, οι οποίες παρέχουν επαρκή στοιχεία για τη συχνότητα και τη σοβαρότητα γεγονότων για πολλές δεκαετίες. Τα ιστορικά δεδομένα επιτρέπουν επίσης μια λογική κατανόηση για τις πιθανές συνέπειες στις υποδομές και στις δραστηριότητες μεταφορών. Η συχνότητα και η σοβαρότητα των φυσικών εκδηλώσεων είναι, ως επί το πλείστον, ανεξέλεγκτη.

Οι στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου περιλαμβάνουν:

- Σχεδιαστικές αποφάσεις που αποφεύγουν τέτοια γεγονότα ή αντιμετωπίζουν τις συνέπειες τους.
- Προετοιμασία επιτυχούς ανταπόκρισης (προκαταβολικός σχεδιασμός, εξοπλισμός, εκπαίδευση και άσκηση ώστε το σύστημα να είναι σε θέση να ανταποκριθεί σωστά στην εμφάνιση του κινδύνου).
- Προειδοποίηση.
- Εκκένωση.
- Ανάκτηση.

- Παρακολούθηση των φαινομένων και των ταχέως εξελισσόμενων συνθηκών (π.χ. τα έντονα καιρικά φαινόμενα που συνδέονται με ολίσθηση εδάφους).

Τα **μη σκόπιμα γεγονότα** έχουν σημαντικές αρνητικές συνέπειες. Υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τη συχνότητα, τη φύση και άλλα χαρακτηριστικά αυτών των γεγονότων για τα οποία έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα αντίμετρα. Οι προσεγγίσεις για την άμβλυνση των συνεπειών περιλαμβάνουν τη μείωση της συχνότητα εμφάνισης, των αρνητικών επιπτώσεων μέσω του επανασχεδιασμού μιας ενισχυμένης και πιο ασφαλής υποδομής. Τα επιχειρησιακά μέτρα περιλαμβάνουν καλύτερη προετοιμασία, έγκαιρη ανταπόκριση και ορθή εφαρμογή σχεδίου.

Η διαχείριση κινδύνων για **σκόπιμα γεγονότα**, όπως οι επιθέσεις και η εγκληματικότητα βασίζεται σε πολλές από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους άλλους δύο τύπους κινδύνων, ενισχυμένες με την τεχνητή νοημοσύνη, την επιχειρησιακή ασφάλεια και μια καλά προγραμματισμένη απόκριση του συστήματος. Η απόκριση, συμπεριλαμβανομένης τόσο της διάσωσης όσο και της ενίσχυσης της νομοθεσίας, πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα δευτερογενών επιθέσεων στις δυνάμεις απόκρισης μετά από μια επιτυχή ανταπόκριση και αποφυγή της πρώτης απόπειρας.

Οι κίνδυνοι που περιλαμβάνει το CAPTool παρουσιάζονται ομαδοποιημένοι στις τρεις κατηγορίες που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 9 και είναι :

1. Μικρές εκρήξεις (μικρότερες από 250 lbs TNT)
2. Μεγάλες εκρήξεις (περισσότερο από 500 lbs TNT)
3. Χημικοί, βιολογικοί, ραδιενεργοί παράγοντες
4. Εγκληματικές πράξεις
5. Φωτιά
6. Απώλεια ισχύος
7. Αστοχία εξοπλισμού
8. Αστοχία κατασκευής
9. Επικίνδυνα υλικά
10. Πλημύρα
11. Σεισμός
12. Ακραία καιρικά φαινόμενα
13. Ολίσθηση εδάφους

Intent	Threats/Hazards
Intentional	Small explosive devices (fewer than 250 lbs TNT or equivalent)
	Large explosive devices (greater than 500 lbs TNT or equivalent)
	Chemical/biological/radiological agents
	Criminal acts
Unintentional	Fire
	Power loss
	Equipment breakdown
	Structural failure
	Hazardous Material
Natural	Flood
	Earthquake
	Extreme weather
	Mud/Landslide

Πίνακας 9: Πιθανοί κίνδυνοι/απειλές για τις συγκοινωνιακές υποδομές

4.3.4. Υποδομές που περιλαμβάνονται στο CAPTool

Οι κατηγορίες των υποδομών που εμφανίζονται στο μεταφορικό δίκτυο μπορεί να είναι:

- Οδική γέφυρα
- Οδική σήραγγα
- Σιδηροδρομική γέφυρα
- Σιδηροδρομική σήραγγα
- Διοικητικές εγκαταστάσεις
- Πορθμείο

4.3.5 Κατηγορίες επιπτώσεων

Ένας κίνδυνος μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε τέσσερις τομείς:

1. **Δυνητικά εκτεθειμένος πληθυσμός.** Συνίσταται στον αριθμό θανάτων και τραυματισμών που συνεπάγεται η εμφάνιση του κινδύνου.

2. **Απώλεια ιδιοκτησίας**. Αφορά το κόστος επισκευής ή ανακατασκευής της κατεστραμμένης υποδομής.

3. **Διαταραχή της αποστολής.** Αφορά τις δυσμενείς επιπτώσεις στο σύστημα μεταφορών λόγω της απώλειας της λειτουργικότητας μιας υποδομής.

4. **Κοινωνικές Επιδράσεις .** Οι κοινωνικές συνέπειες αντανακλούν τον τρόπο με τον οποίο ο πληθυσμός μπορεί να ανταποκριθεί στο γεγονός εμφάνισης κινδύνου μέσω σημαντικών αλλαγών συμπεριφοράς. Αυτές οι αλλαγές συμπεριφοράς μπορεί να περιλαμβάνουν το φόβο του ταξιδιού ή την αποφυγή ενός τρόπου μεταφοράς ή μιας διαδρομής. Ο φόβος και η αποφυγή της μεταφοράς αποτελούν κοινωνικές επιδράσεις, καθώς δύνανται να οδηγήσουν σε μείωση της εμπορικής δραστηριότητας. Το CAPTA δεν καθορίζει αυτή την συνέπεια άμεσα, αλλά δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να χαρακτηρίσει χειροκίνητα μια υποδομή ως «κρίσιμη». Η χειροκίνητη είσοδος αφήνεται στους χρήστες, καθώς μόνο αυτοί μπορούν να γνωρίζουν τις τοπικές συνθήκες, τη διάθεση και την έκκληση μιας υποδομής, όπως μια γέφυρα ορόσημο.

4.4 Βήματα CAPTool

Τα βήματα που εφαρμόζονται στη μεθοδολογία CAPTA αναλύονται στις παρακάτω υποενότητες.

1. Σχετικό ρίσκο (Relevant risk).
2. Όρια επιπτώσεων (Threshold)
3. Υποδομές

4. Κρίσιμες υποδομές
5. Επιλογή αντιμέτρων
6. Σύνοψη αποτελεσμάτων

4.4.1 Βήμα 1: Σχετικό ρίσκο (Relevant risk)

Ο χρήστης καλείται να καθορίσει τους κινδύνους/απειλές που υπάρχουν στις υποδομές του μεταφορικού δικτύου.

Στο Σχήμα 5 εμφανίζεται το προγραμματιστικό περιβάλλον όπου ο χρήστης εισάγοντας "Y", yes ή "N", no, στο αντίστοιχο κελί, δηλώνει τους κινδύνους που απειλούν κάθε υποδομή.

	Road Bridges	Road Tunnels	Transit/Rail Station	Transit/Rail Bridges	Transit/Rail Tunnels	Admin & Support Facilities	Ferry
THREATS							
Small Explosives	Y	Y	N	N	N	N	N
Large Explosives	Y	Y	N	N	N	N	N
Chemical/Biological/Radiological	Y	Y	N	N	N	N	N
Criminal Acts	Y	Y	N	N	N	N	N
UNINTENTIONAL HAZARDS							
Fire	Y	Y	N	N	N	N	N
Struct. Failure	Y	Y	N	N	N	N	N
HAZMAT	Y	Y	N	N	N	N	N
NATURAL HAZARDS							
Flood	Y	Y	N	N	N	N	N
Earthquake	Y	Y	N	N	N	N	N
Extreme Weather	Y	Y	N	N	N	N	N
Mud/Landslide	Y	Y	N	N	N	N	N
ADDITIONAL							
User entered threat/hazard 1	N	N	N	N	N	N	N
User entered threat/hazard 2	N	N	N	N	N	N	N

Σχήμα 5:Οθόνη εισαγωγής υποδομών και αντίστοιχων απειλών.

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 4.3, στα οδικά δίκτυα που εξετάζονται σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία υπάρχουν μόνο γέφυρες και σήραγγες. Ακόμη, θεωρείται ότι οι υποδομές απειλούνται από όλους τους κινδύνους που περιλαμβάνει το CAPTA. Για το λόγο αυτό επιλέγεται το "Y" σε όλα τα κελιά που αφορούν τις οδικές γέφυρες και τις οδικές σήραγγες.

4.4.2 Βήμα 2: Όρια επιπτώσεων (Threshold)

THRESHOLD (όριο) είναι ο παράγοντας σχεδιασμού που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του επιπέδου των συνεπειών, στον δυνητικά εκτεθειμένο πληθυσμό, στην απώλεια περιουσίας και στη διαταραχή της αποστολής . Ο χρήστης καλείται να καθορίσει το όριο συνεπειών, το οποίο αν ξεπεραστεί, επιβάλλει την ενεργοποίηση ενεργειών απομείωσης του κινδύνου και μετριασμού των επιπτώσεων του.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η οθόνη εισαγωγής των ορίων. Το όριο στον δυνητικά εκτεθειμένο πληθυσμό ορίζεται μηδενικό, το όριο των οικονομικών συνεπειών λόγω απώλειας περιουσίας ορίζεται στα 5000 $ ενώ η διαταραχή της αποστολής τίθεται επιπέδου ένα . Οι τιμές αυτές είναι οι ελάχιστες δυνατές και επιλέχτηκαν ώστε όλες οι υποδομές των οδικών δικτύων που εξετάζονται να θεωρηθούν από το CAPTool ως «κρίσιμες».

	Category	Critical Threshold		Explanation
ROAD BRIDGE	Potentially Exposed Population	0		Potentially exposed population threshold
	Property Loss	$5,000		Replacement cost
	Mission Importance	Level I		Demand percentile for ADT * Detour Length
	Level I	29000	Restore Defaults	The default threshold values for ADT * detour length are taken from the 75th, 85th, and 95th percentiles for the U.S. If these are inappropriate for your state, enter different values in the appropriate fields to the left.
	Level II	68000		
	Level III	241000		
ROAD TUNNEL	Potentially Exposed Population	0		Potentially exposed population threshold
	Property Loss	$5,000		Replacement cost
	Mission Importance	Yes		Do you consider all road tunnels to be mission critical?

Σχήμα 6:Οθόνη εισαγωγής ορίων επιπτώσεων

4.4.3 Βήμα 3: Υποδομές

Στο βήμα τρία ο χρήστης εισάγει τα φυσικά δεδομένα των υποδομών, ώστε το μοντέλο να αξιολογήσει τις υποδομές σχετικά με τα όρια επιπτώσεων που τέθηκαν στο βήμα δύο. Τα δεδομένα που εισάγονται για τις οδικές γέφυρες και τις οδικές σήραγγες είναι :

1. Μέση ημερήσια κίνηση
2. Μήκος
3. Αριθμός γραμμών
4. Μέτρα παράκαμψης
5. Τύπος κατασκευαστικού υλικού

Σαν έξοδο το πρόγραμμα εμφανίζει αν η εκάστοτε εφαρμογή θεωρείται «κρίσιμη», δηλαδή αν οι επιπτώσεις των κίνδυνων ξεπερνούν τα όρια επιπτώσεων που τέθηκαν στο βήμα δύο. Ο χρήστης δύναται να ορίσει ως κρίσιμη μια υποδομή και χειροκίνητα, ενεργοποιώντας την ρύθμιση “Manual Override”.

Στο Σχήμα 7 και στο **Error! Reference source not found.**Σχήμα 8 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα των γεφυρών και των σηράγγων αντίστοιχα με τα φυσικά δεδομένα τους που εισάγονται στο CAPTool.

ROAD BRIDGES						CRITICALITY			
Asset ID	Quantity	ADT	Length (ft)	Lanes	Replacement Cost Per Asset (Optional)	Exposed Population	Property Loss	Mission Importance	Ma Ove
Ponte canale deviatore Olona	1	69,200	19	6		Y	Y	Y	
Ponte cavo Borromeo	1	69,200	15	6		Y	Y	Y	
Viadotto Binasco	1	50,000	54	6		Y	Y	Y	
Ponte Ticino	1	49,400	76	6		Y	Y	Y	
Ponte roggia Castellana	1	49,400	18	6		Y	Y	Y	
Ponte roggia Caselle	1	49,400	28	6		Y	Y	Y	
Ponte torrente Terdoppio	1	44,900	28	6		Y	Y	Y	
Ponte Po Carreggiata Nord	1	22,450	772	3		Y	Y	Y	
Ponte Po Carreggiata Sud	1	22,450	841	3		Y	Y	Y	
Ponte torrente Curone	1	44,900	33	6		Y	Y	Y	
Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord	1	26,200	285	3		Y	Y	Y	
Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud	1	26,200	285	3		Y	Y	Y	
Viadotto Tortona Carreggiata Nord	1	21,700	128	3		Y	Y	Y	

Σχήμα 7: Απόσπασμα οθόνης εισαγωγής φυσικών δεδομένων για τις οδικές γέφυρες.

ROAD TUNNELS							CRITICALITY		
Asset ID	Quantity	ADT	Length (ft)	Lanes	Detour (mi)	Replacement Cost Per Asset (Optional)	Potentially Exposed Population	Property Loss	Mission Importance
Galleria S. Rocco	1	70,600	500	4	2600		Y	Y	Y
Galleria	1	70,600	78	4	1000		Y	Y	Y
Galleria	1	70,600	46	4	1000		Y	Y	Y
Galleria De Amicis	1	70,600	120	4	1000		Y	Y	Y
Galleria Montegrappa	1	70,600	210	4	1000		Y	Y	Y
Galleria	1	70,600	39	4	1000		Y	Y	Y
Galleria	1	70,600	96	4	1000		Y	Y	Y
Galleria	1	70,600	104	4	1000		Y	Y	Y
Galleria Martiri di Boves	1	37,200	100	4	1000		Y	Y	Y
Galleria Vimercate Centro	1	37,200	867	4	1000		Y	Y	Y

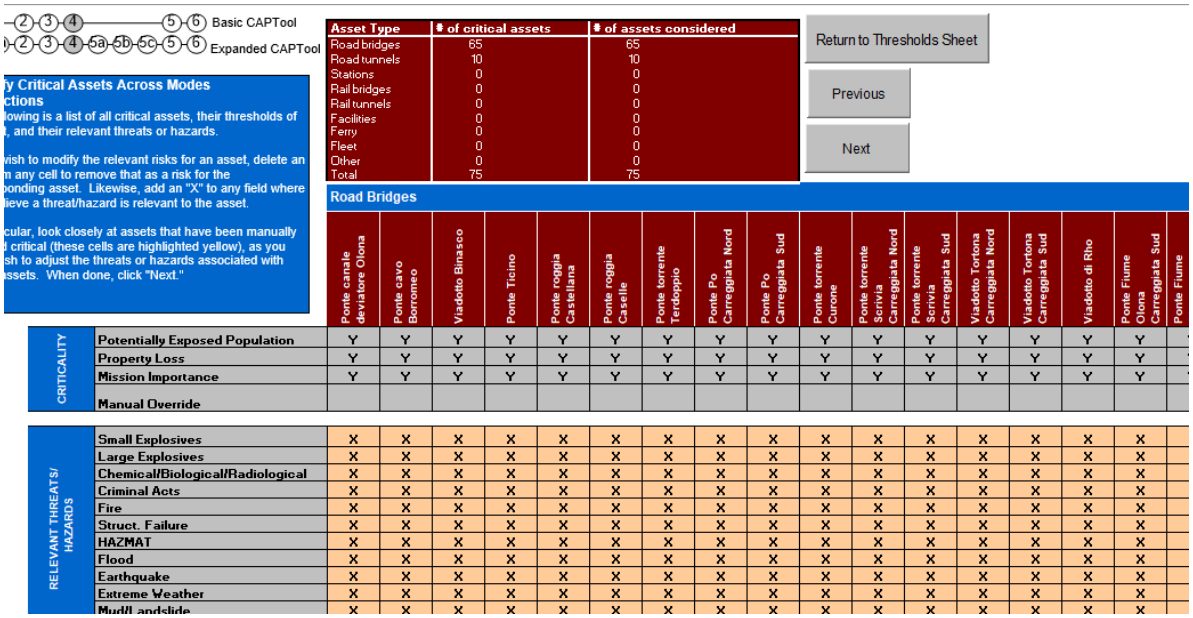
Σχήμα 8: Απόσπασμα οθόνης εισαγωγής φυσικών δεδομένων για τις οδικές σήραγγες.

Όπως παρατηρείται από τις δυο εικόνες ο κίνδυνος για τον δυνητικά εκτεθειμένο πληθυσμό, την απώλεια περιουσίας, και την διαταραχή της αποστολής ξεπερνά το όριο που ορίστηκε στο βήμα δύο σε όλες τις υποδομές.

4.4.4 Βήμα 4: Κρίσιμες υποδομές.

Στο βήμα τέσσερα, Το CAPTool κατατάσσει τις υποδομές ως προς τους κινδύνους και τις απειλές στις οποίες είναι ευάλωτοι. Για το σκοπό αυτό δημιουργεί έναν συγκεντρωτικό πίνακα, οι σειρές του οποίου αποτελούνται από τους κινδύνους και οι στήλες του από τις υποδομές του εξεταζόμενου οδικού δικτύου.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται απόσπασμα της οθόνης του βήματος τέσσερα. Το εκάστοτε «Χ» δηλώνει ότι η συγκεκριμένη υποδομή είναι ευαίσθητη (κρίσιμη) στον αντίστοιχο κίνδυνο. Όπως φαίνεται από το σχήμα, προκύπτει ότι όλες οι υποδομές είναι ευαίσθητες και άρα κρίσιμες σε όλους τους κινδύνους. Το γεγονός αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο καθώς τα όρια επιτρεπτών συνεπειών που τέθηκαν ήταν τα ελάχιστα δυνατά.



Σχήμα 9:Απόσπασμα από τον συγκεντρωτικό πίνακα στον οποίο απεικονίζονται όλες οι υποδομές και οι κίνδυνοι στους οποίους είναι ευάλωτες.

4.4.5 Βήμα 5: Επιλογή αντιμέτρων (Countermeasure Opportunities)

Στο βήμα πέντε καθορίζονται οι ενέργειες που δύνανται να μειώσουν την πιθανότητα εκδήλωσης των κινδύνων καθώς και τις συνέπειες αυτών. Η οθόνη του βήματος πέντε στο λογισμικό CAPTool παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.

Παραδοχές βήματος πέντε.

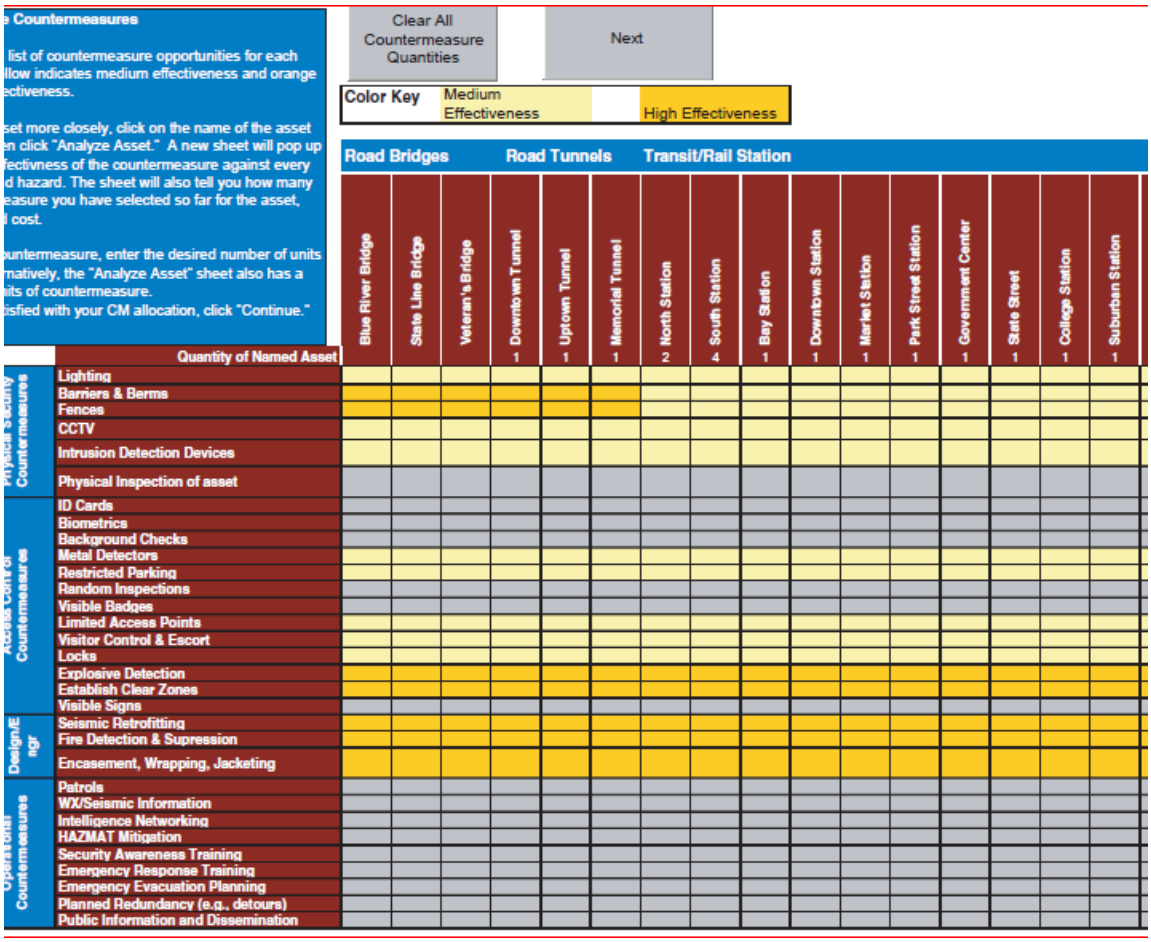
- Το CAPTool εμφανίζει όλα τα αντίμετρα που κρίνονται κατάλληλα για τους εξεταζόμενους κινδύνους και απειλές σε κάθε υποδομή.
- Το CAPTool χρησιμοποιεί έναν έγχρωμο κώδικα για να υποδείξει τα αντίμετρα υψηλής ή μέτριας αποτελεσματικότητας.
- Τα αντίμετρα προσδιορίζονται ανεξάρτητα από το κόστος τους.
- Το CAPTA επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει, από μία λίστα προκαθορισμένων ενεργειών, τα αντίμετρα που θεωρεί κατάλληλα σε κάθε υποδομή ξεχωριστά.
- Το κόστος του κάθε αντίμετρου παρουσιάζεται σε μια βάση δεδομένων, την οποία ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει.

Ο χρήστης επιλέγει την ποσότητα καθενός από τα εμφανιζόμενα αντίμετρα για κάθε υποδομή και το CAPTA αυτόματα εμφανίζει στο βήμα έξι το συνολικό κόστος εφαρμογής και υλοποίησης του συνδυασμού τους.

Τα 31 αντίμετρα που περιέχονται στο CAPTA είναι:

1. Lighting
2. Explosive Detection
3. Barriers & Berms
4. Established Clear Zones
5. Fences
6. Visible Signs
7. CCTV
8. Seismic Retrofitting
9. Intrusion Detection Devices
10. Fire Detection & Suppression
11. Physical Inspection of Asset
12. Encasement, Wrapping, Jacketing
13. ID Cards
14. Patrols
15. Biometrics
16. WX/Seismic Information
17. Background Checks
18. Intelligence Networking
19. Metal Detectors
20. HAZMAT Mitigation
21. Restricted Parking
22. Security Awareness Training
23. Random Inspections
24. Emergency Response Training
25. Visible Badges

26. Emergency Evacuation Planning
27. Limited Access Points
28. Planned Redundancy (e.g., detours)
29. Visitor Control & Escort
30. Public Information and Dissemination
31. Locks



Σχήμα 10: Οθόνη εισαγωγής αριθμού των αντιμέτρων στην εκάστοτε υποδομή.

4.4.5.1 Βήμα 5α: Κόστος ενεργειών απομείωσης κινδύνου.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει χειροκίνητα το κόστος κάθε αντιμέτρου.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται τα 31 αντίμετρα με το προεπιλεγμένο κόστος σε δολάρια μιας ενεργοποίησης.

		ESTIMATED PER-UNIT COST (x1000)	Comments	Unit of measure
Physical Security Countermeasures	1 Lighting	$11.30	one per 100 feet of road or perimeter. Assumes nearby power connection, no demolition or excavating.	1
	2 Barriers & Berms	$3.30	10 jersey barriers and two end planters to cover 100 feet of space	1
	3 Fences	$21.00	12 foot height security fence, in concrete with 4 gates (6 feet high, 3 feet wide). Infrared detection system. Power install, relay to central monitor. Excludes central monitoring station operation.	100 linear feet
	4 CCTV	$17.50	4 remote PTZ cameras, one control panel	1
	5 Intrusion Detection Devices	$0.90	1 burglar alarm with remote signal installed	1
	6 Physical Inspection of asset	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE employee per year
Access Control Countermeasures	7 ID Cards	$10.00	6 zone system with database, installed	6 zones
	8 Biometrics	$50.00	6 facial and fingerprint scanners, database, installed	6 zones
	9 Background Checks	$57.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	10 Metal Detectors	$138.00	6 portals, 4 handhelds, installed. Assumes no demolition and nearby power source	
	11 Restricted Parking	$18.45	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	12 Random Inspections	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	13 Visible Badges	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	14 Limited Access Points	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	15 Visitor Control & Escort	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	16 Locks	$1.20	1 cipher lockset, installed. Assumes no demolition or heavy construction	Each
	17 Explosive Detection	$257.00	2 portals, 2 handhelds, with power	2+2
	18 Establish Clear Zones	$0.10	100 sq yards. Assumes no demolition	100-SY
	19 Visible Signs	$0.09	1 aluminum sign 18 inches high, with base	Each
Asset Design/Engineering	20 Seismic Retrofitting	$10,000.00	Estimates must be changed to reflect local variation	Per application
	21 Fire Detection & Supression	$459.99	Class III standpipe system with Type 2 water supply to 10,000 sf building. System includes minimum 20 pull stations with master box, annunciator, and central station relay. Assumes minimal demolition.	
	22 Encasement, Wrapping, Jacketing	$0.60	Estimates must be changed to reflect local variation	100-SF
Operational Countermeasures	23 Patrols	$30.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	24 WX/Seismic Information	$100.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	25 Intelligence Networking	$100.00	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year
	26 HAZMAT Mitigation	$1,329.60	Assumes complete start up of hazmat remediation program providing 24 hour coverage. Mechanized crew of 8 persons. Excludes material dumping costs	1 crew
	27 Security Awareness Training	$100.00	Contracted	1 program
	28 Emergency Response Training	$100.00	Contracted	1 program
	29 Emergency Evacuation Planning	$100.00	Designed program for structures and stations	1 program
	30 Planned Redundancy (e.g., detours)	$220.00	Pre-staged and marked detours. Deploys one FT traffic engineer, 1 PT carpenter, 1 PT operating engineer,	$9,000 fixed cost - $211,000 per year
	31 Public Information and Dissemination	$150.00	1 PIO, 1 web technician.	2FT employee per year

Σχήμα 11: Πίνακας με το κόστος των 31 αντιμέτρων, το οποίο δύναται να τροποποιηθεί χειροκίνητα από τον χρήστη.

4.4.5.2 Βήμα 5β: Λεξικό αντίμετρων (Countermeasures dictionary)

Το CAPTool περιέχει μία προκαθορισμένη λίστα με τα αντίμετρα και τις συνεισφορές τους στην απομείωση του κινδύνου. Το cm dictionary περιέχει κατηγοριοποιημένη την αποτελεσματικότητα του κάθε αντίμετρου στον κάθε κίνδυνο μιας κατηγορίας υποδομών. Η σχετική αποτελεσματικότητα εμφανίζεται ως "L" (low) για την χαμηλή, "M" (medium) για την μέτρια και "H" (high) για την υψηλή επιρροή της ενέργειας στην μείωση του κινδύνου. Ο χρήστης δύναται να αλλάξει την ποιοτική τιμή της αποτελεσματικότητας της εκάστοτε ενέργειας βασιζόμενος σε πρόσθετες πληροφορίες και εμπειρία προσαρμοσμένες στην περίπτωση μελέτης.

Το CM Dictionary πρόκειται για έναν πίνακα οι στήλες του οποίου αντιπροσωπεύουν το κάθε αντίμετρο (31 στήλες) και οι γραμμές του, τους 8 κινδύνους κάθε υποδομής.

Στο Σχήμα 12, Σχήμα 13, Σχήμα 14 παρουσιάζονται οι προκαθορισμένες τιμές της αποτελεσματικότητας κάθε ενέργειας στους κινδύνους των οδικών γεφυρών και των οδικών σηράγγων.

		Physical Security Countermeasures					
		1	2	3	4	5	6
	Countermeasure	Lighting	Barriers & Berms	Fences	CCTV	Intrusion Detection Devices	Physical Inspection of asset
Road Bridges	Small Explosives	L	H	H	M	M	H
	Large Explosives	M	M	M	M	M	M
	Chemical/Biological/Radiological	M	L	L	L	M	H
	Criminal Acts	M	M	M	M	M	M
	Fire	M	M	L	M	L	L
	Struct. Failure	L	L	L	L	L	H
	HAZMAT	L	L	L	L	L	H
	Flood	L	M	L	L	L	H
	Earthquake	L	L	L	L	L	L
	Extreme Weather	L	M	L	L	L	H
	Mud/Landslide	L	M	L	L	L	H
Road Tunnels	Small Explosives	L	H	H	M	M	H
	Large Explosives	M	M	M	M	M	M
	Chemical/Biological/Radiological	M	L	L	L	M	H
	Criminal Acts	M	M	M	M	M	M
	Fire	M	M	L	M	L	L
	Struct. Failure	L	L	L	L	L	H
	HAZMAT	L	L	L	L	L	H
	Flood	L	M	L	L	L	H
	Earthquake	L	L	L	L	L	L
	Extreme Weather	L	M	L	L	L	H
	Mud/Landslide	L	M	L	L	L	H

Σχήμα 12:ποιοτικές τιμές της αποτελεσματικότητας των μέτρων ασφαλείας στις οδικές γέφυρες και σήραγγες.

		Access Control Countermeasures												
		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Countermeasure	ID Cards	Biometrics	Background Checks	Metal Detectors	Restricted Parking	Random Inspections	Visible Badges	Limited Access Points	Visitor Control & Escort	Locks	Explosive Detection	Establish Clear Zones	Visible Signs
Road Bridges	Small Explosives	L	M	L	M	L	H	L	M	M	M	H	H	L
	Large Explosives	L	M	L	L	M	M	M	M	M	M	H	M	L
	Chemical/Biological/Radiological	L	M	L	L	M	H	L	M	M	M	L	M	L
	Criminal Acts	L	L	M	L	M	M	M	M	M	H	L	H	M
	Fire	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	L
	Struct. Failure	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	HAZMAT	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	L
	Flood	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	L
	Earthquake	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Extreme Weather	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Mud/Landslide	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Road Tunnels	Small Explosives	L	M	L	M	L	H	L	M	M	M	H	H	L
	Large Explosives	L	M	L	L	M	M	M	M	M	M	H	M	L
	Chemical/Biological/Radiological	L	M	L	L	M	H	L	M	M	M	L	M	L
	Criminal Acts	L	L	M	L	M	M	M	M	M	H	L	H	M
	Fire	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	L
	Struct. Failure	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	HAZMAT	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	L
	Flood	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	L
	Earthquake	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Extreme Weather	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Mud/Landslide	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

Σχήμα 13: Ποιοτικές τιμές της αποτελεσματικότητας των μέτρων ελέγχου στις οδικές γέφυρες και σήραγγες.

		Asset Design/Engineering			Operational Countermeasures								
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	Countermeasure	Seismic Retrofitting	Fire Detection & Supression	Encasement, Wrapping, Jacketing	Patrols	WX/Seismic Information	Intelligence Networking	HAZMAT Mitigation	Security Awareness Training	Emergency Response Training	Emergency Evacuation Planning	Planned Redundancy (e.g., detours)	Public Information and Dissemination
Road Bridges	Small Explosives	H	H	H	H	L	M	L	H	H	H	H	H
	Large Explosives	H	M	H	H	L	M	L	M	M	M	M	H
	Chemical/Biological/Radiological	L	M	L	H	M	M	H	L	H	H	H	H
	Criminal Acts	M	M	H	H	L	L	L	H	M	M	M	H
	Fire	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H
	Struct. Failure	H	L	H	L	L	L	L	L	H	H	H	H
	HAZMAT	L	H	L	M	M	L	H	L	H	H	H	H
	Flood	H	L	L	H	H	L	L	L	H	H	H	H
	Earthquake	H	M	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H
	Extreme Weather	H	L	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H
	Mud/Landslide	H	L	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H
Road Tunnels	Small Explosives	H	H	H	H	L	M	L	H	H	H	H	H
	Large Explosives	H	M	H	H	L	M	L	M	M	M	M	H
	Chemical/Biological/Radiological	L	M	L	H	M	M	H	L	H	H	H	H
	Criminal Acts	M	M	H	H	L	L	L	H	M	M	M	H
	Fire	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H
	Struct. Failure	H	L	H	L	L	L	L	L	H	H	H	H
	HAZMAT	L	H	L	M	M	L	H	L	H	H	H	H
	Flood	H	L	L	H	H	L	L	L	H	H	H	H
	Earthquake	H	M	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H
	Extreme Weather	H	L	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H
	Mud/Landslide	H	L	H	M	H	L	L	L	H	H	H	H

Σχήμα 14: Ποιοτικές τιμές της αποτελεσματικότητας των μέτρων σχεδιασμού και λειτουργικού ελέγχου στις οδικές γέφυρες και σήραγγες.

4.4.6 Βήμα 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο βήμα το CAPTool παρέχει στον χρήστη μια περίληψη των αποτελεσμάτων με το τελικό κόστος των μέτρων που επιλέχτηκαν.

4.5 Αξιολόγηση CAPTool

Το αντικείμενο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η βέλτιστη επιλογή των αντίμετρων. Άρα δεν είναι ο χρήστης αυτός που επιλέγει τα μέτρα, αλλά η επιλογή των κατάλληλων μέτρων πρέπει να προκύπτει από το μοντέλο βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό το λογισμικό CAPTool τροποποιείται κατάλληλα.

4.5.1 Αξιολόγηση των 31 αντίμετρων του CAPTool

Πρώτα απ' όλα κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των 31 αντίμετρων που το πρόγραμμα παρέχει στο χρήστη.

Στον Πίνακας 10 παρουσιάζονται τα 31 αντίμετρα με το κόστος ενεργοποίησης μίας επιλογής για την αντίστοιχη μονάδα μέτρησης της επιλογής. Ο χρήστης συμπληρώνει τον αριθμό των μονάδων που επιθυμεί να ενεργοποιήσει σε κάθε συγκοινωνιακή υποδομή και το CAPTool υπολογίζει και εμφανίζει σε ένα νέο φύλλο excel το γινόμενο κόστος μίας ενεργοποιημένης επιλογής επί αριθμό μονάδων για κάθε αντίμετρο. Το γινόμενο αυτό αποτελεί το κόστος των επιλεγμένων ενεργειών.

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι ο βέλτιστος συνδυασμός αντίμετρων-υποδομών, δηλαδή αυτός που επιτυγχάνει τη μέγιστη απομείωση του κινδύνου. Αυτός ο συνδυασμός είναι το ζητούμενο του μοντέλου βελτιστοποίησης και συνεπώς, στο μοντέλο πρέπει να εισαχθεί ο αριθμός των μονάδων που απαιτούνται, αν επιλεγεί το εκάστοτε αντίμετρο στην εκάστοτε υποδομή.

Όπως φαίνεται από την περιγραφή του κάθε αντίμετρου, ο αριθμός των μονάδων που απαιτούνται είναι συνάρτηση του μήκους κάθε υποδομής. Στην στήλη *Number of units* του Πίνακας 10 συμπληρώνεται, μετά από κριτική αξιολόγηση και σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς για τις προδιαγραφές ασφαλείας των οδικών δικτύων **η εξίσωση εύρεσης των μονάδων για την ενεργοποίηση του κάθε αντίμετρου σε μια υποδομή**, ανάλογα με το μήκος της εκάστοτε υποδομής.

	Cost per unit (x1000)	**Comments**	**Unit of measure**	**Number of units**	**Modification**

Lighting	9.46	one per 30,48 m of road or perimeter. Assumes nearby power connection, no demolition or excavating.	1	length / 30,5	Round up the number of units
Barriers & Berms	2.76	10 jersey barriers and two end planters to cover 30,48 m of space	1	length / 30,5	Round up the number of units
Fences	17.58	3,65 m height security fence, in concrete with 4 gates (6 feet high, 3 feet wide). Infrared detection system. Power install, relay to central monitor. Excludes central monitoring station operation.	1	length	Round up the number of units
CCTV	14.65	4 remote PTZ cameras, one control panel	1	length / 600	Round up the number of units
Intrusion Detection Devices	0.75	1 burglar alarm with remote signal installed	1	length / 300	Round up the number of units
Physical Inspection of asset	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE employee per year	6 employees (3 in A7, 1 in A50, 1in A51 , 1 in A52)	
ID Cards	8.37	6 zone system with database, installed	6 zones	not including CM, unit =0	
Biometrics	41.85	6 facial and fingerprint scanners, database, installed	6 zones	2 (1set of 6 zones in A7 and 1 in the ring of Milan)	
Background Checks	47.71	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	2 (1 in A7 and 1 in the ring of Milan)	
Metal Detectors	115.51	6 portals, 4 handhelds, installed. Assumes no demolition and nearby power source	1 system	if length>350 then unit =1	
Restricted Parking	15.44	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	

Random Inspections	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	
Visible Badges	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	
Limited Access Points	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	
Visitor Control & Escort	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	
Locks	1.00	1 cipher lockset, installed. Assumes no demolition or heavy construction	One lock	not including CM, unit =0	
Explosive Detection	215.11	2 portals, 2 handhelds, with power	One placement	If length>350 then , unit =1	
Establish Clear Zones	0.08	84 sq m. Assumes no demolition	One applicatio n	not including CM, unit=0	
Visible Signs	0.08	1 aluminium sign 18 inches high, with base	One placement	length / 100	Round up the number of units
Seismic Retrofitting	6000.0	Estimates must be changed to reflect local variation	one applicatio n	1(for the whole region)	
Fire Detection & Suppression	385.01	water supply to 10,000 sf building. System includes minimum 20 pull stations with master box, annunciator, and central station relay. Assumes minimal demolition.	one system	units =6 (3 in A7, 1 in A50, 1in A51 , 1 in A52)	
Encasement , Wrapping, Jacketing	0.50	Estimates must be changed to reflect local variation	100-SF	not including CM, unit =0	
Patrols	25.11	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	not including CM, unit =0	

Weather Seismic Information	83.70	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 system	1 (for the whole region)	
Intelligence Networking	83.70	1 full time equivalent (FTE) contract employee dedicated to this task	1 FTE contract employee per year	1 (for the whole region)	
HAZMAT Mitigation	1112.88	Assumes complete start up of hazmat remediation program providing 24 hour coverage. Mechanized crew of 8 persons. Excludes material dumping costs	1crew	if length>1000 then unit =1	
Security Awareness Training	83.70	Contracted to a service provider	1 program for 1 year	unit=2, 1 in A7 and 1 in the ring of Milan	
Emergency Response Training	83.70	Contracted to a service provider	1 program with trainer	unit=2, 1 in A7 and 1 in the ring of Milan	
Emergency Evacuation Planning	83.70	Designed program for structures and stations	1 program with trainer	unit=2, 1 in A7 and 1 in the ring of Milan	
Planned Redundancy (e.g., detours)	184.14	Pre-staged and marked detours. Deploys one FT traffic engineer, 1 PT carpenter, 1 PT operating engineer,	1 unit= 3 engineers	unit=2, 1 in A7 and 1 in the ring of Milan	
Public Information and Dissemination	125.55	1 PIO, 1 web technician.	2 FT employee per year	unit=2, 1 in A7 and 1 in the ring of Milan	

Πίνακας 10: Περιγραφή των αντίμετρων και των εξισώσεων

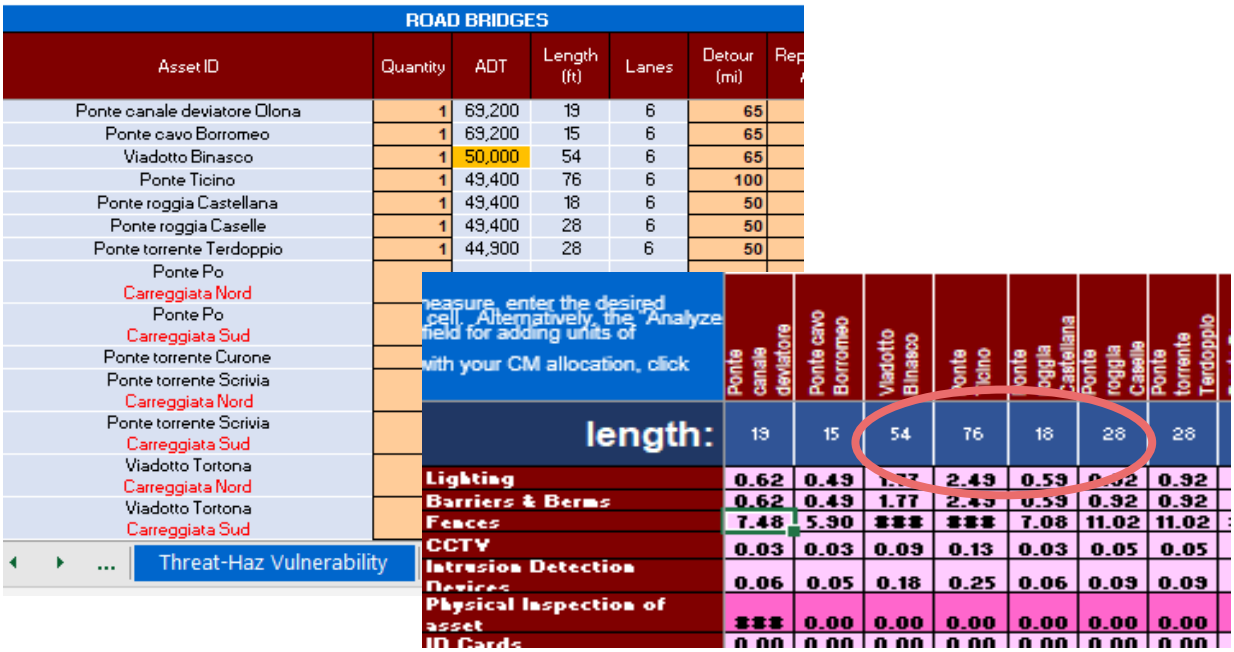
4.5.2 Συμπλήρωση του πίνακα CM Opportunities.

Οι εξισώσεις που περιγράφηκαν στον πίνακα 10 εισάγονται σε μια μακροεντολή, η οποία συμπληρώνει αυτόματα τον πίνακα CM Opportunities.

Καθώς ο αριθμός των μονάδων εγκατάστασης είναι συνάρτηση του μήκους της κάθε υποδομής, μια νέα γραμμή εισάγεται στο υπολογιστικό φύλλο CM Opportunities, στην οποία αναγράφεται το μήκος κάθε υποδομής. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται με μια μακροεντολή η οποία αντιγράφει την στήλη με το μήκος κάθε υποδομής από το φύλλο

εισαγωγής δεδομένων (βήμα 4) και το επικολλάει στην νέα γραμμή που εισάχθηκε στο φύλλο CM Opportunities.

Ο αλγόριθμος της μακροεντολής « showlengths » παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα από το αποτέλεσμα της μακροεντολής με την νέα σειρά που περιέχει το μήκος κάθε υποδομής.



ROAD BRIDGES					
Asset ID	Quantity	ADT	Length (ft)	Lanes	Detour (mi)
Ponte canale deviatore Olona	1	69,200	19	6	65
Ponte cavo Borromeo	1	69,200	15	6	65
Viadotto Binasco	1	50,000	54	6	65
Ponte Ticino	1	49,400	76	6	100
Ponte roggia Castellana	1	49,400	18	6	50
Ponte roggia Caselle	1	49,400	28	6	50
Ponte torrente Terdoppio	1	44,900	28	6	50
Ponte Po Carreggiata Nord					
Ponte Po Carreggiata Sud					
Ponte torrente Curone					
Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord					
Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud					
Viadotto Tortona Carreggiata Nord					
Viadotto Tortona Carreggiata Sud					

Threat-Haz Vulnerability

	Ponte canale deviatore	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Caselle	Ponte torrente Terdoppio
length:	19	15	54	76	18	28	28
Lighting	0.62	0.49	[illegible]	2.49	0.59	[illegible]	0.92
Barriers & Berms	0.62	0.49	1.77	2.49	0.59	0.92	0.92
Fences	7.48	5.90	###	###	7.08	11.02	11.02
CCTV	0.03	0.03	0.09	0.13	0.03	0.05	0.05
Intrusion Detection Devices	0.06	0.05	0.18	0.25	0.06	0.09	0.09
Physical Inspection of asset	###	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ID Cards	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Σχήμα 15: Απόσπασμα από το αποτέλεσμα της μακροεντολής «showlengths»

Στη συνέχεια δημιουργείται μια νέα μακροεντολή «siblirosiCMopp» η οποία εισάγει τις εξισώσεις του πίνακα 10. Το αποτέλεσμα είναι η συμπλήρωση του πίνακα CM Opportunities με τον κατάλληλο αριθμό μονάδων που πρέπει να ενεργοποιηθούν ανάλογα με το μήκος κάθε εφαρμογής.

Μετά την εκτέλεση της μακροεντολής siblirosiCMopp συμπληρώνεται αυτόματα ο πίνακας CM Opportunities, ο οποίος αντιγράφεται στη συνέχεια σε νέο φύλλο Excel με σκοπό να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες απλές στρογγυλοποιήσεις ή στρογγυλοποιήσεις στον πλησιέστερο ακέραιο όπως περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 4.5.1. Οι απαραίτητες στρογγυλοποιήσεις πραγματοποιούνται με τις εντολές “round” ή “round up” του προγράμματος Excel.

4.5.3 Δημιουργία του πίνακα κόστους

Στόχος είναι να δημιουργηθεί ένας πίνακας ο οποίος θα περιέχει το τελικό κόστος κάθε αντίμετρου αν αυτό επιλεγεί σε κάποια υποδομή.
Για το σκοπό αυτό δημιουργείται σε ένα νέο φύλλο Excel ένας πίνακας που περιέχει τα 31 αντίμετρα καθέτως και τις 75 υποδομές οριζοντίως. Τα κελιά αυτού του πίνακα συμπληρώνονται με το γινόμενο των κελιών του πίνακα CM Opportunities (αριθμός μονάδων που πρέπει να ενεργοποιηθούν σε κάθε υποδομή) πολλαπλασιασμένα με το κόστος ενεργοποίησης μιας μονάδας από την εκάστοτε ενέργεια.

Στο Σχήμα 16 Παρουσιάζεται απόσπασμα του πίνακα κόστους.

SUM =$A$8*'CM Opportunities'!CG37

price of CM		Road Bridges														
		Ponte canale deviatore Olona	Ponte ovvo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Tiolino	Ponte roggia Castiliana	Ponte roggia Casette	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Ponte torrente Curone	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud	Viadotto Tortona Carreggiata Nord	Viadotto Tortona Carreggiata Sud	Viadotto di Rho
7.92	Lighting	7.9	7.9	15.8	23.7	7.9	7.9	7.9	205.8	221.7	15.8	79.2	79.2	39.6	55.4	8
2.31	Barriers & Berms	2.3	2.3	4.6	6.9	2.3	2.3	2.3	60.1	64.7	4.6	23.1	23.1	11.6	16.2	2
14.71	Fences	117.7	88.3	323.7	441.4	=$A$8*'CM	176.5	176.5	4472.4	4869.7	191.3	1662.5	1662.5	750.3	1088.7	194
12.26	CCTV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
0.63	Intrusion Detection Devices	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.9	0.0	0.6	0.6	0.0	0.6	
21.02	Physical Inspection of asset	252.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7.01	ID Cards	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
35.03	Biometrics	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
39.93	Background Checks	79.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
96.68	Metal Detectors	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.7	96.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12.93	Restricted Parking	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21.02	Random Inspections	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21.02	Visible Badges	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21.02	Limited Access Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21.02	Visitor Control & Escort	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.84	Locks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
180.05	Explosive Detection	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	180.0	180.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.07	Establish Clear Zones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.06	Visible Signs	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
6000.00	Seismic Retrofitting	6000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
322.26	Fire Detection & Supression	1933.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.42	Encasement, Wrapping, Jacketi	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
21.02	Patrols	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
70.06	WX/Seismic Information	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
70.06	Intelligence Networking	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
931.48	HAZMAT Mitigation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
70.06	Security Awareness Training	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
70.06	Emergency Response Training	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
70.06	Emergency Evacuation Plannin	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Σχήμα 16:Απόσπασμα από τον πίνακα τελικού κόστους για κάθε αντίμετρο στην εκάστοτε υποδομή.

4.5.4 Δημιουργία του πίνακα αποτελεσματικότητας (effectiveness table).

Η αποτελεσματικότητα κάθε ενέργειας στην μείωση του κινδύνου βασίζεται στο φύλλο CM Dictionary- Λεξικό Αποτελεσματικότητας Αντίμετρων που παρέχει το CAPTool.

Πιο συγκεκριμένα στο φύλλο CM Dictionary περιέχεται η αποτελεσματικότητα κάθε ενέργειας για κάθε έναν από τους οχτώ κινδύνους κάθε κατηγορίας υποδομών (Σχήμα 17). Το CAPTool δεν υπολογίζει την γενική αποτελεσματικότητα μίας ενέργειας στο σύνολο των οχτώ κινδύνων μίας υποδομή αλλά στον κάθε κίνδυνο ξεχωριστά. Η αποτελεσματικότητα δεν ποσοτικοποιείται, αλλά εκφράζεται σε μια ποιοτική κλίμακα "L", "M", "H", όπου :

- L = Low. Χαμηλή επίδραση στην απομείωση του κινδύνου
- M = Medium. Μεσαία επίδραση στην απομείωση του κινδύνου
- H = High. Υψηλή επίδραση στην απομείωση του κινδύνου.

		Physical Security Countermeasures						Access Control Countermeasures											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Countermeasure	Lighting	Barriers & Berms	Fences	CCTV	Intrusion Detection Devices	Physical Inspection of asset	ID Cards	Biometrics	Background Checks	Metal Detectors	Restricted Parking	Random Inspections	Visible Badges	Limited Access Points	Visitor Control & Escort	Locks	Explosive Detection	Establish Clear Zones
Road Bridges	Small Explosives	L	H	H	M	M	H	L	M	L	M	L	H	L	M	M	M	H	H
	Large Explosives	M	M	M	M	M	M	L	M	L	L	M	M	M	M	M	M	H	M
	Chemical/Biological/Radiological	M	L	L	L	M	H	L	M	L	L	M	H	L	M	M	M	L	M
	Criminal Acts	M	M	M	M	M	M	L	L	M	L	M	M	M	M	M	H	L	H
	Fire	M	M	L	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H
	Struct. Failure	L	L															L	L
	HAZMAT	L	L	L	L	L	H											L	M
	Flood	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L			L	L	L	L	L	M
	Earthquake	L	L	L	L	L	L											L	L
	Extreme Weather	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Mud/Landslide	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Road Tunnels	Small Explosives	L	H	H	M	M	H	L	M	L	M	L	H	L	M	M	M	H	H
	Large Explosives	M	M	M	M	M	M	L	M	L	L	M	M	M	M	M	M	H	M
	Chemical/Biological/Radiological	M	L	L	L	M	H	L	M	L	L	M	H	L	M	M	M	L	M
	Criminal Acts	M	M	M	M	M	M	L	L	M	L	M	M	M	M	M	H	L	H
	Fire	M	M	L	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H
	Struct. Failure	L	L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	HAZMAT	L	L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M
	Flood	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M
	Earthquake	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Extreme Weather	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
	Mud/Landslide	L	M	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

Ο αριθμός των περισσότερων L,M,H συνιστά την αποτελεσματικότητα του φωτισμού σε μια οδική γέφυρα

Σχήμα 17: Απόσπασμα του πίνακα CM Dictionary.

Για να εξαχθεί η αποτελεσματικότητα κάθε ενέργειας στο σύνολο των κινδύνων μίας υποδομής και όχι σε συγκεκριμένο κίνδυνο, αναπτύσσεται η μακροεντολή «riskmacro».

Αυτή η μακροεντολή μετράει τον αριθμό των “L”, “M”, “H”, για κάθε αντίμετρο σε με μια κατηγορία υποδομών και εμφανίζει σε ένα νέο φύλλο excel την ποιοτική τιμή που εμφανίζεται περισσότερες φορές.

Το αποτέλεσμα της μακροεντολής είναι ένας νέος πίνακα 31 x 75, στον οποίο κάθε αντίμετρο έχει συγκεκριμένη αποτελεσματικότητα σε ποιοτική κλίμακα L, M, H, στο σύνολο των κινδύνων μιας κατηγορίας υποδομών. Άρα το κάθε αντίμετρο έχει μια ποιοτική τιμή αν εφαρμοστεί γενικά σε μια οδική γέφυρα και μια ποιοτική τιμή αν εφαρμοστεί σε οδική σήραγγα. Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάζονται 65 οδικές γέφυρες, η ποιοτική τιμή του εκάστοτε αντιμέτρου θα είναι ίδια σε όλες τις εξεταζόμενες γέφυρες. Το ίδιο ισχύει και για τις 10 οδικές σήραγγες που εξετάζονται στην Διπλωματική Εργασία. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται απόσπασμα του πίνακα που δημιουργεί η μακροεντολή riskmacro.

Assets (all the bridges and the tunnels by

countermeasures

	Road Bridges																										
	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Calella	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Ponte torrente Curone	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud	Viadotto Tortona Carreggiata Nord	Viadotto Tortona Carreggiata Sud	Viadotto di Rho	Ponte Fiume Olona Carreggiata Sud	Ponte Fiume Olona Carreggiata Nord	Manufatto M1 - Carreggiata Nord	Manufatto M2 - Carreggiata Nord	Manufatto M3 - Carreggiata Nord	Manufatto M4 - Carreggiata Sud	Canale scolmatore	Viadotto SP 11	Viadotto Rivolta Baggio	Viadotto Lorenteggio
Lighting	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Barriers & Berms	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Fences	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
CCTV	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Intrusion Detection Devices	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Physical Inspection of asset	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
ID Cards	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Biometrics	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Background Checks	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Metal Detectors	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Restricted Parking	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Random Inspections	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Visible Badges	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Limited Access Points	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Visitor Control & Escort	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Locks	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Explosive Detection	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Establish Clear Zones	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Visible Signs	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Seismic Retrofitting	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Fire Detection & Supression	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Encasement, Wrapping, Jacketing	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Patrols	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
WX/Seismic Information	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Intelligence Networking	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
HAZMAT Mitigation	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Security Awareness Training	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Emergency Response Training	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Emergency Evacuation Planning	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Planned Redundancy (e.g., detours)	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Public Information and Dissemination	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H

Σχήμα 18: Απόσπασμα του πίνακα που δημιουργεί η μακροεντολή riskmacro.

Στη συνέχεια, δημιουργείται ακόμα μια μακροεντολή «effectmacro» η οποία ποσοτικοποιεί την κλίμακα μέτρησης της αποτελεσματικότητας κάθε ενέργειας, σύμφωνα με τη θεώρηση ότι:

“L” = 0,5
“M” = 1
“H” = 2
“VH” = 4

Η συγκεκριμένη θεώρηση προέκυψε μετά από δοκιμές διαφόρων ποσοτικών τιμών. Όπως θα αναλυθεί και στα συμπεράσματα της Διπλωματικής εργασίας η συγκεκριμένη θεώρηση βασίζεται στη παραδοχή ότι η αποτελεσματικότητα του κάθε αντιμέτρου είναι αναλογική του κόστους του. Η θεώρηση αυτή προσομοιάζει ορθά το 83.3% των σεναρίων που εξετάστηκαν, ενώ κρίνεται ανεπαρκής στην περίπτωση που το κόστος ενός αντίμετρου είναι υπέρμετρα υψηλό σχετικά με τα υπόλοιπα.

Πιο συγκεκριμένα, η μακροεντολή, ο κώδικας της οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α αντιγράφει τον πίνακα που δημιουργήθηκε από την μακροεντολή riskmacro σε ένα νέο φύλλο Excel, αντικαθιστώντας τη ποιοτική έκφραση της απομείωσης του κινδύνου με μια ποσοτική θεώρηση. Το τελικό αποτέλεσμα της μακροεντολής παρουσιάζεται στο Σχήμα 19.

Assets (all the bridges and the tunnels by name)

countermeasures

	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Caselle	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Ponte torrente Curone	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Nord	Ponte torrente Scrivia Carreggiata Sud	Viadotto Tortona Carreggiata Nord	Viadotto Tortona Carreggiata Sud	Viadotto di Rho	Ponte Fiume
Lighting	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Barriers & Berms	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Fences	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
CCTV	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Intrusion Detection Devices	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Physical Inspection of asset	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
ID Cards	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Biometrics	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Background Checks	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Metal Detectors	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Restricted Parking	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Random Inspections	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Visible Badges	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Limited Access Points	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Visitor Control & Escort	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Locks	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Explosive Detection	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Establish Clear Zones	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Visible Signs	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Seismic Retrofitting	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Fire Detection & Supression	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Encasement, Wrapping, Jacketing	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Patrols	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
WX/Seismic Information	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Intelligence Networking	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
HAZMAT Mitigation	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Security Awareness Training	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Emergency Response Training	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Emergency Evacuation Planning	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Planned Redundancy (e.g., detours)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Public Information and Dissemination	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

Σχήμα 19: Απόσπασμα του πίνακα που δημιουργεί η μακροεντολή effectmacro.

Τα δύο φύλλα που λαμβάνονται υπόψη για την τελική ανάπτυξη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι ο πίνακας που περιέχει το κόστος κάθε ενέργειας και ο πίνακας που περιέχει την ποσοτική επίδραση κάθε ενέργειας στη απομείωση του κινδύνου. Τα κελιά του πίνακα αποτελεσματικότητας αποτελούν τους συντελεστές αποτελεσματικότητας του κάθε αντίμετρου και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη αλλά και στην αξιολόγηση του μοντέλου βελτιστοποίησης

4.6 Περιγραφή προγραμματιστικού μοντέλου βελτιστοποίησης

4.6.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Περνώντας πλέον στο βασικό στόχο της Διπλωματικής Εργασίας, δηλαδή στη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων, η οποία με τη σειρά της οδηγεί και στην απομείωση του κινδύνου των συγκοινωνιακών υποδομών έγινε η προσπάθεια ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο βασίστηκε στις αρχές του γραμμικού προγραμματισμού. Το μοντέλο κατανομής πόρων που αναπτύσσεται περιγράφει ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και πιο συγκεκριμένα ακέραιου δυαδικού, στο οποίο οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τιμές 0 ή 1 , όπως περιγράφεται παρακάτω. Η αντικειμενική συνάρτηση που αναπτύχθηκε και επιδιώκεται να μεγιστοποιηθεί είναι:

$$\mathbf{MAX\ \Sigma\ (\ Xij \times EFFij\ ),}$$

όπου

- i= [1,31] (31 ενέργειες)

- j= [1,75] (75 υποδομές, 65 γέφυρες και 10 σήραγγες)

- Xij = όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ενεργειών (i-table cells)

- EFFij = ο συντελεστής αποτελεσματικότητα κάθε ενέργειας ως προς την απομείωση του κινδύνου (effectiveness -table cells)

4.6.2 Το μοντέλο βελτιστοποίησης γενικά

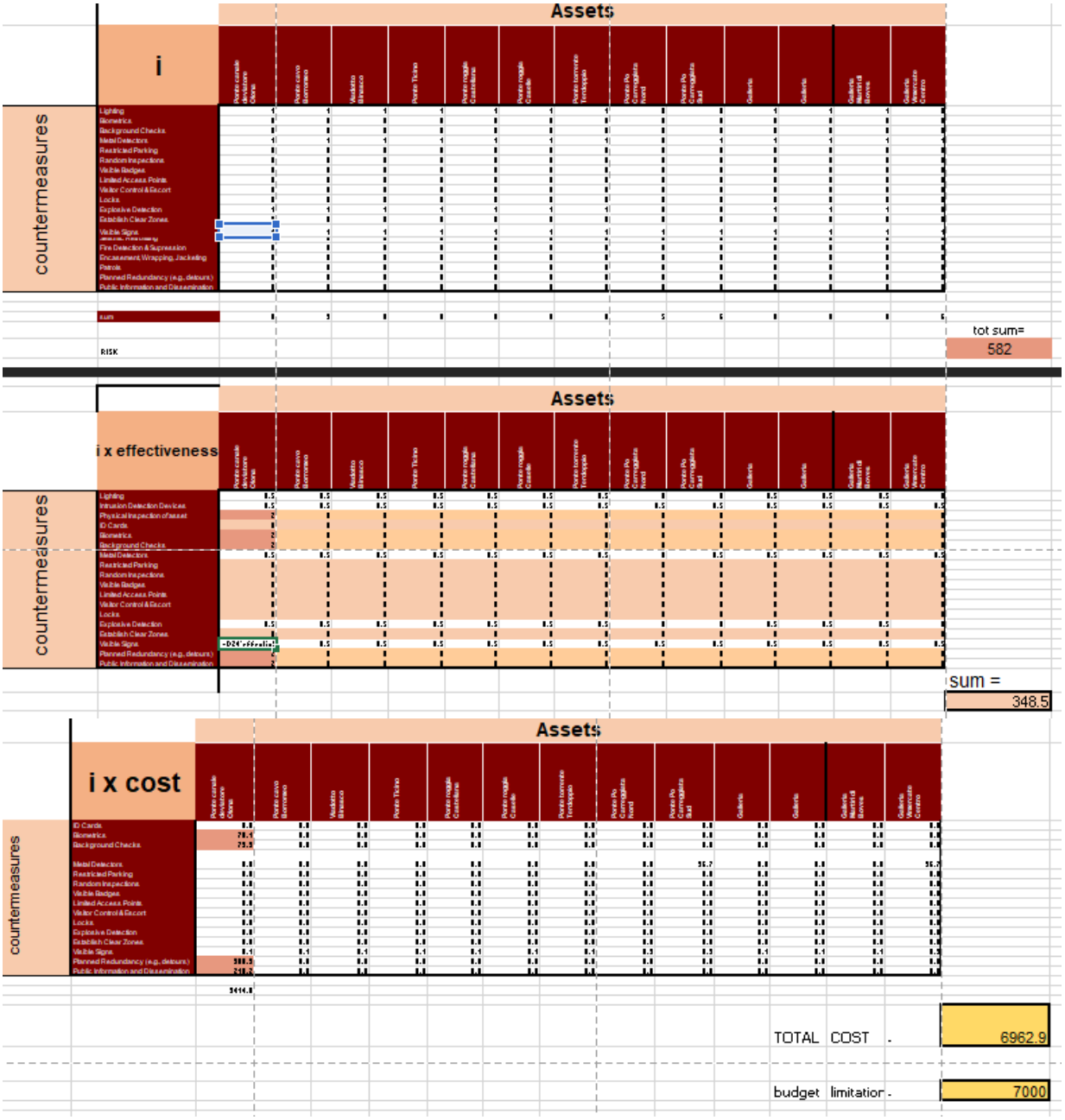
Για την ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων δημιουργήθηκαν τρεις πίνακες. Σε όλους τους πίνακες, τα αντίμετρα παρουσιάζονται στον κάθετο άξονα και οι υποδομές στον οριζόντια άξονα.

- Ο πρώτος πίνακας ονομάζεται i-table και αποτελεί τον **πίνακα απόφασης**. Τα κελιά του μπορούν να πάρουν μόνο την τιμή 0 ή 1 και αναφέρονται στην ενεργοποίηση ή όχι μιας ενέργειας/αντίμετρου σε μια υποδομή στο πλάνο σχεδιασμού τριών ετών.

- Ο δεύτερος είναι ο **πίνακας αποτελεσματικότητας** effect_table και είναι το αποτέλεσμα του γινομένου του πίνακα i-table επί τον πίνακα effect_table.Το άθροισμα των κελιών αυτού του πίνακα συνιστά την συνολική αποτελεσματικότητα των επιλεγμένων μέτρων i. Η μεγιστοποίηση του κελιού που αντιστοιχεί σε αυτό το άθροισμα, το οποίο ονομάζεται **objective cell** αποτελεί τον στόχο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

- Ο τρίτος είναι ο **πίνακας κόστους** και συνιστά το γινόμενο του πίνακα i-table επί τον πίνακα cost_table.Το άθροισμα των κελιών του πίνακα αυτού αποτελεί το συνολικό κόστος των επιλεγμένων μέτρων και πρέπει να είναι μικρότερο από το εκάστοτε διαθέσιμο κεφαλαίο.

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται απόσπασμα των τριών πινάκων όπως αυτοί περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 20 : Απόσπασμα των τριών πινάκων του μοντέλου βελτιστοποίησης.

4.6.3 Περιορισμοί

Στο μοντέλο βελτιστοποίησης πέρα από την αντικειμενική συνάρτηση ορίζονται και κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι δίνουν ρεαλιστική υπόσταση στο πρόβλημα και διευκολύνουν την επίλυση.

4.6.3.1 Περιορισμός Διαθέσιμου Κεφαλαίου

Προκειμένου να έχει νόημα η κατανομή του προϋπολογισμού στις ενέργειες πρέπει να μην είναι εφικτή η υλοποίηση του συνόλου των ενεργειών, ώστε να δοθεί προτεραιότητα σε κάποιες ενέργειες και σε κάποιες άλλες όχι.

Ο βασικός περιορισμός διαθέσιμου κεφαλαίου όπως απεικονίζεται στο μοντέλο βελτιστοποίησης είναι:

$$\Sigma (x_{ij} * c_{ij}) \leq M ,$$ όπου:

x_{ij}: η μεταβλητή που παίρνει τιμές 1 ή 0 αναλόγως με την πραγματοποίηση μιας ενέργειας ή όχι.

c_{ij} : το κόστος κάθε ενέργειας που ενεργοποιείται

M : Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το άθροισμα του κόστους όλων των ενεργειών που ενεργοποιούνται ανά έτος να μην υπερβαίνει το κεφάλαιο που είναι διαθέσιμο ανά έτος. Η μεταβλητή c_{ij} μεταβάλλεται στις διάφορες επιλύσεις όπως θα επεξηγηθεί παρακάτω εξαρτώμενη από τρεις θεωρήσεις.

4.6.3.2 Περιορισμός υλοποίησης ενεργειών απομείωσης κινδύνου στον πλάνο σχεδιασμού τριών ετών.

Στη Διπλωματική Εργασία η εφαρμογή των ενεργειών απομείωσης του κινδύνου πραγματοποιείται σε ένα πλάνο σχεδιασμού τριών ετών.

Τον δεύτερο περιορισμό που εισάγεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί η κατηγοριοποίηση των ενεργειών σε :

- Ενέργειες που πραγματοποιούνται κάθε έτος.
- Ενέργειες που πραγματοποιούνται μια φορά στον χρονικό κύκλο της τριετίας.

Συγκεκριμένα, οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιούνται κάθε έτος συνίστανται σε:

1. Physical Inspection of asset
2. Background Checks
3. Intelligence Networking
4. Security Awareness Training
5. Emergency Response Training
6. Planned Redundancy
7. Public Information and Dissemination

Ο περιορισμός αυτός ικανοποιείται στο μοντέλο βελτιστοποίησης με την βοήθεια μια νέας μακροεντολής η οποία ενεργοποιείται αφού γίνει η επιλογή των μέτρων του εκάστοτε

χρόνου. Η μακροεντολή αντικαθιστά την τιμή των μη μηδενικών κελιών στους πίνακες cost_table, και effect_table με την τιμή 0 και αλλάζει το χρώμα των κελιών, που αντιστοιχούν στις ενέργειες που ενεργοποιήθηκαν τον πρώτο χρόνο σε πράσινο για να διευκολύνει το χρήστη να διακρίνει τις ενέργειες που έχουν ήδη ενεργοποιηθεί. Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μετά την εκτέλεση της μακροεντολής.

i x effectiveness	Ponte canale deviatore Olona	Ponte canale Borromeo	Viadotto Bisnasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Casale	Ponte torrente Tenzoppio	Ponte Po Carnagnata nord	Ponte Po Carnagnata sud	Ponte torrente Caronna	Ponte torrente Scrivia Carnagnata nord	Ponte torrente Scrivia Carnagnata sud	Viadotto Tortona Carnagnata nord	Viadotto Tortona Carnagnata sud	Viadotto di Rho	Ponte Fiume Po Carnagnata sud	Ponte Fiume Po Carnagnata nord	Manufatto M1 - Ghiaia Carnagnata nord	Manufatto M2 - Ghiaia Carnagnata nord	Manufatto M3 - Ghiaia Carnagnata sud	Manufatto M4 - Ghiaia Carnagnata sud	Casale scolmatore
Lighting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Barriers & Berms	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fences	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CCTV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intrusion Detection Devices	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Physical Inspection of asset	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ID Cards	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biometrics	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Background Checks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metal Detectors	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Restricted Parking	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Random Inspections	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Badges	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Limited Access Points	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visitor Control & Escort	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Locks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Explosive Detection	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Establish Clear Zones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Signs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Seismic Retrofitting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fire Detection & Supression	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Encasement, Wrapping, Jacketing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Patrols	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WX/Seismic Information	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intelligence Networking	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HAZMAT Mitigation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Security Awareness Training	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emergency Response Training	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Emergency Evacuation Planning	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Redundancy (e.g., detours)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Information and Dissemination	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 21: απόσπασμα του πίνακα αποτελεσματικότητα μετά την ενεργοποίηση της μακροεντολής.

4.6.3.3 Περιορισμός προτεραιότητας επιλεγμένων ενεργειών.

Ο τρίτος περιορισμός αφορά τη σειρά προτεραιότητας των ενεργειών απομείωσης του κινδύνου. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε ότι η πραγματοποίηση κάποιων ενεργειών προηγείται από την ενεργοποίηση κάποιων άλλων λόγω μεγαλύτερης σπουδαιότητας.

Οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιούνται με προτεραιότητα συνίστανται σε:

1. Physical Inspection of asset
2. Background Checks
3. Intelligence Networking
4. Security Awareness Training
5. Emergency Response Training
6. Planned Redundancy
7. Public Information and Dissemination
8. Seismic Retrofitting
9. Fire Detection & Suppression

Αναφορικά με τις **επτά πρώτες ενέργειες**, η ενεργοποίηση τους συνίσταται οικονομικά ως το σύνολο των μισθών ενός εργαζομένου για ένα χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο χρονικός ορίζοντας των ενεργειών είναι τρία έτη, και ότι τα αντίμετρα αυτά πρέπει να ενεργοποιούνται κάθε χρόνο, προκύπτει ότι το κόστος και η ποσοτική έκφραση της αποτελεσματικότητας αυτών των ενεργειών εισάγονται στο CAPTool τριπλάσια.

Σχετικά με τις δυο τελευταίες ενέργειες θεωρούνται ως αντίμετρα πολύ υψηλής αποτελεσματικότητας. Για το λόγο αυτό η ποσοτική έκφραση της απομείωσης του κινδύνου λαμβάνει την αριθμητική τιμή τέσσερα.

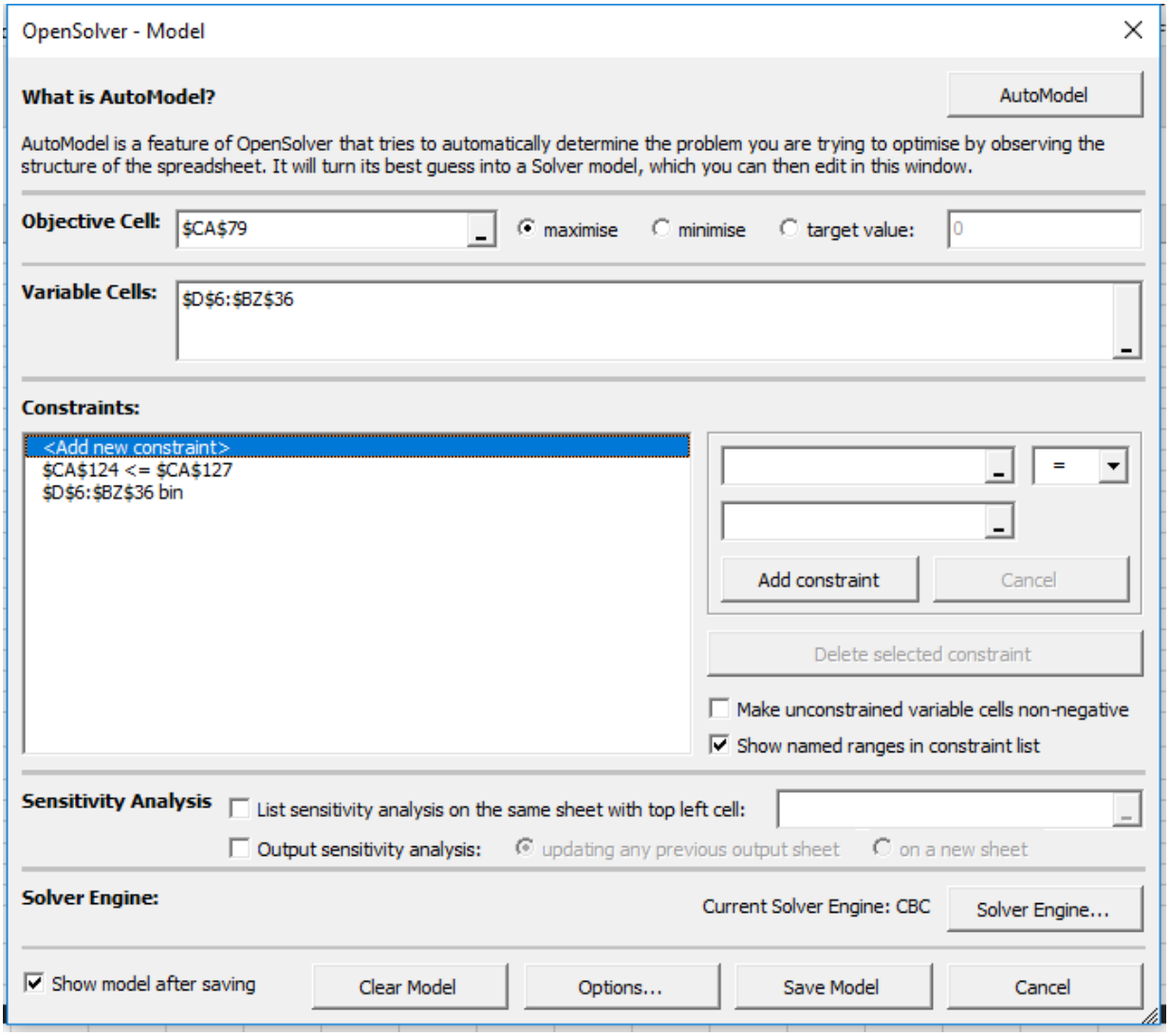
5.Εφαρμογή μεθοδολογίας – Αποτελέσματα

5.1 Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel – Open Solver

Το μοντέλο βελτιστοποίησης και η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκουν εφαρμογή μέσω ενός εργαλείου προγραμματισμού σχεδιασμένο για το λογισμικό Microsoft Excel. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται Open Solver, είναι βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και είναι σχεδιασμένο για την επίλυση μεγάλων γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Δεν υπάρχουν τεχνητοί περιορισμοί στην εφαρμογή του συγκεκριμένου εργαλείου και συνεπώς ο αριθμός των δεδομένων που εισάγονται στο πρόβλημα μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. Το εργαλείο Open Solver εισάγεται στο Microsoft Excel ως προσθήκη κάτω από το Data Section. Η προσθήκη του εργαλείου φαίνεται στο Σχήμα 22:

Σχήμα 22: Προσθήκη Open Solver στο Microsoft Excel.

Προτού γίνει η επίλυση με τη βοήθεια του Solver πρέπει να οριστούν τα κελιά, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Ύστερα, ακολουθεί η χρήση του Excel Solver. Η ενεργοποίησή του γίνεται από το μενού Tools και την επιλογή Solver. Το βασικό πλαίσιο διαλόγου του εργαλείου παρουσιάζεται στο Σχήμα 23Error! Reference source not found.



Σχήμα 23: Το πλαίσιο διαλόγου του Open Solver για την εισαγωγή τη αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών.

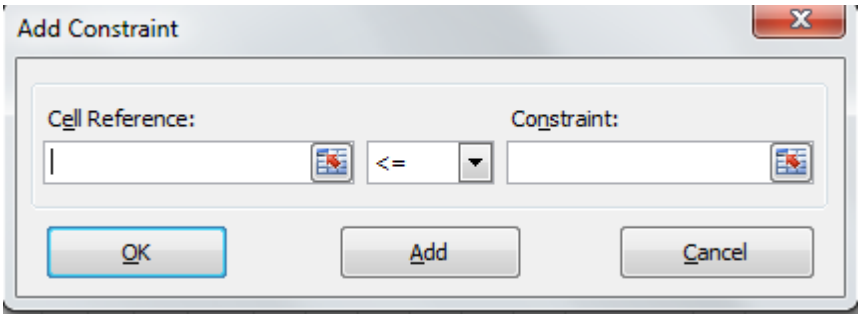
Για την ανεύρεση της άριστης λύσης στο πρόβλημα ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- **Objective cell:** Εισάγεται το κελί που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση. Το κελί αυτό είναι το CA79 και αποτελεί το άθροισμα SUMPRODUCT των κελιών του πίνακα αποτελεσματικότητας effect_table.

- Δίπλα από το objective cell επιλέγεται το είδος της αριστοποίησης ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα (μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση ή ορισμός συγκεκριμένης τιμής). Στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία αναζητείται η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας άρα μεγιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση και για το λόγο αυτό ενεργοποιείται η επιλογή Max.

- **Variable cells:** Εισάγονται τα κελιά που αντιστοιχούν στις μεταβλητές απόφασης. Αυτά είναι τα Xijk, τα κελιά του πίνακα i_table τα οποία αριθμούνται σε 2325 και παίρνουν ακέραιες τιμές 0 ή 1, αντιπροσωπεύοντας την ενεργοποίηση μιας ενέργειας ή όχι στο χρονικό ορίζοντα των τριών ετών.

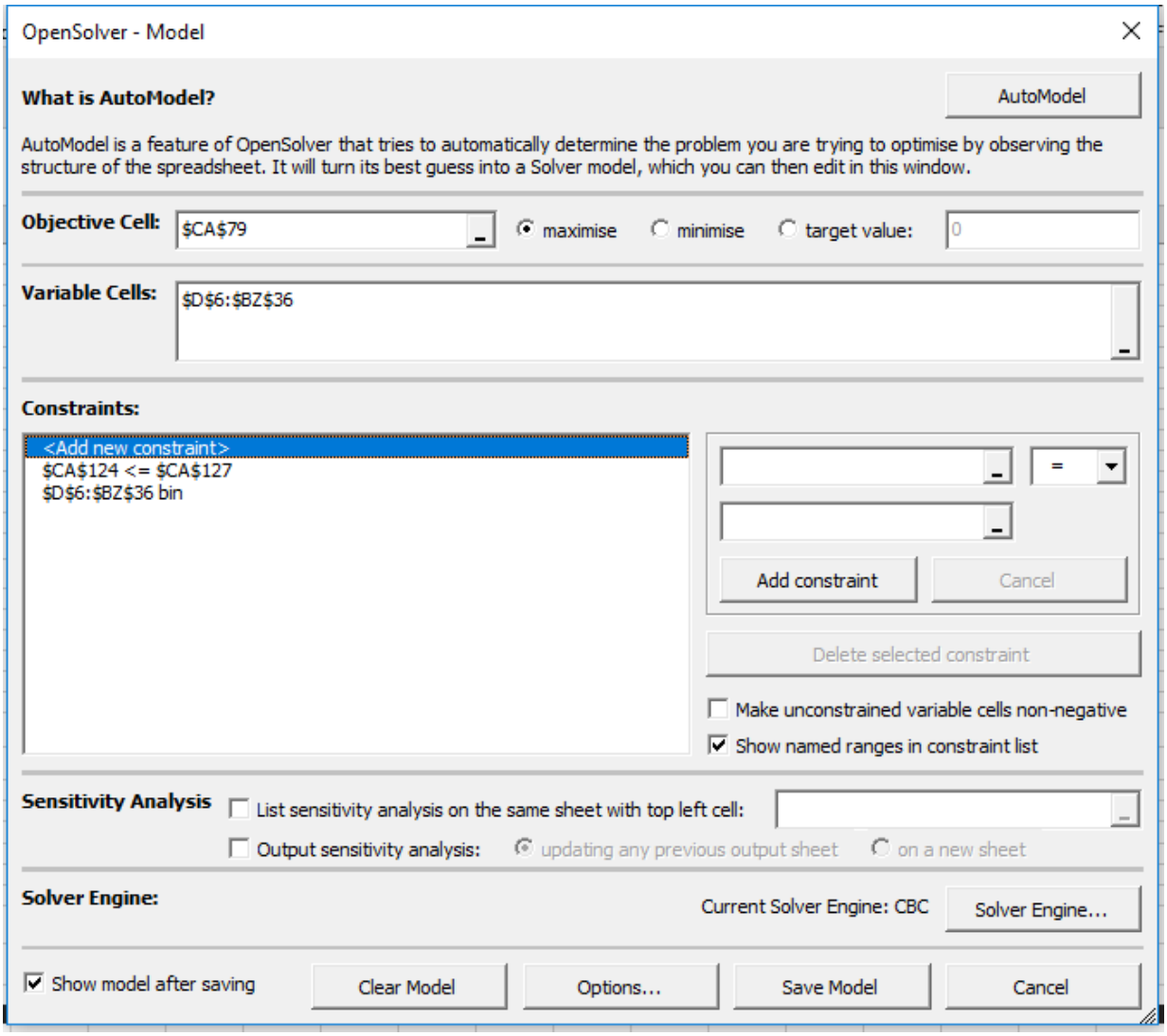
- **Constraints:** Εισάγονται οι περιορισμοί του προβλήματος όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο τέσσερα. Πατώντας το κουμπί Add εμφανίζεται ο διάλογος εισαγωγής περιορισμών, με τη βοήθεια του οποίου καταστρώνονται οι περιορισμοί του προβλήματος. (Σχήμα 24)



Σχήμα 24:Το πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής περιορισμών

Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών και πατώντας αρχικά την επιλογή Save Model ώστε να σωθεί η εικόνα των συνθηκών και έπειτα την επιλογή Solve, με την βοήθεια του Open Solver επιλύεται το πρόβλημα εφαρμόζοντας μία επαναληπτική μαθηματική διαδικασία, ώστε τα κελιά που αντιστοιχούν στα Xijk να παίρνουν τις βέλτιστες τιμές.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα από μία επίλυση του μοντέλου για το πώς στήθηκε στο Σχήμα 25 :



Σχήμα 25: Εικόνα εισαγωγής αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επίλυσης ενεργοποιείται η εντολή maximize καθώς επιζητείται μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Έπειτα από την ενεργοποίηση της εντολής SOLVE ο πίνακας των κελιών απόφασης (i_table) λαμβάνει δυαδικές τιμές (Σχήμα 26) και το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης μεγιστοποιείται. Στο Σχήμα 27 και στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται αποσπάσματα από την μορφή των πινάκων effect_table και cost_table αντίστοιχα.

countermeasures \ i	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Casella	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Galleria	Galleria	Galleria Martiri di Boves	Galleria Vimercate Centro
	Assets												
binary													
Lighting	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
Biometrics	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Background Checks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metal Detectors	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Restricted Parking	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Random Inspections	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Badges	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Limited Access Points	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visitor Control & Escort	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Locks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Explosive Detection	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
Establish Clear Zones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Signs	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Seismic Retrofitting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fire Detection & Supression	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Encasement, Wrapping, Jacketing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Patrols	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Redundancy (e.g., detours)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Information and Dissemination	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sum	8	9	8	8	8	8	8	5	6	8	8	8	6

Σχήμα 26 :Απόσπασμα i_table μετά την επίλυση του OpenSolver.

countermeasures \ i x effectiveness	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Casella	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Galleria	Galleria	Galleria Martiri di Boves	Galleria Vimercate Centro
	Assets												
Lighting	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0
Intrusion Detection Devices	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Physical Inspection of asset	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ID Cards	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biometrics	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Background Checks	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metal Detectors	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Restricted Parking	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Random Inspections	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Badges	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Limited Access Points	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visitor Control & Escort	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Locks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Explosive Detection	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0
Establish Clear Zones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Signs	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Planned Redundancy (e.g., detours)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Information and Dissemination	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

sum =
348.5

Σχήμα 27 : Απόσπασμα της μορφή του effect_table μετά την εύρεση της βέλτιστης λύσης, όπου φαίνεται το objective cell.

	Road Bridges												
	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana	Ponte roggia Casella	Ponte torrente Terdoppio	Ponte Po Carreggiata Nord	Ponte Po Carreggiata Sud	Galleria	Galleria	Galleria Martiri di Boves	Galleria Vimercate Centro
Lighting	7.9	7.9	15.8	23.7	7.9	7.9	7.9	0.0	0.0	31.7	31.7	31.7	0.0
Barriers & Berms	2.3	2.3	4.6	6.9	2.3	2.3	2.3	60.1	64.7	9.2	9.2	9.2	67.0
Fences	0.0	88.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CCTV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	12.3	0.0	0.0	0.0	12.3
Intrusion Detection Devices	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Physical Inspection of asset	252.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ID Cards	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Biometrics	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Background Checks	79.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Metal Detectors	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.7	0.0	0.0	0.0	96.7
Restricted Parking	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Random Inspections	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visible Badges	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Limited Access Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visitor Control & Escort	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Locks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Explosive Detection	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Establish Clear Zones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visible Signs	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3
Seismic Retrofitting	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fire Detection & Supression	1933.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Encasement, Wrapping, Jacketing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Patrols	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
WX/Seismic Information	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Intelligence Networking	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HAZMAT Mitigation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Security Awareness Training	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Emergency Response Training	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Emergency Evacuation Planning	140.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Planned Redundancy (e.g., detour	300.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Public Information and Dissemina	210.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3414.8												

TOTAL COST . 6962.9

budget limitation . ≤ 7000

Σχήμα 28: Απόσπασμα μορφής του πίνακα cost_table, όπου διακρίνεται ο περιορισμός του κεφαλαίου.

Προκειμένου να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, το μοντέλο βελτιστοποίησης στο open solver επιλύεται για διάφορα σενάρια προϋπολογισμού και απαιτούμενου κόστους υλοποίησης ενεργειών για τις διάφορες ενέργειες.

Αρχικά επιζητείται η εύρεση του βέλτιστου διαθέσιμου κεφαλαίου και η σύγκριση του με τα οικονομικά δεδομένα της εταιρίας Milano Serravale.

Το πρόγραμμα εκτελείται 37 φορές μεταβάλλοντας σταδιακά το κελί του οικονομικού περιορισμού και συγκρίνοντας τον αριθμό των ενεργειών που ενεργοποιούνται για κάθε μεταβολή του προϋπολογισμού, με τη συνολική ποσοτική επίδραση των ενεργειών αυτών στην απομείωση του κινδύνου.

Στην πρώτη θεώρηση που αφορά τα πρώτα 19 σενάρια, η προτεραιότητα των αντίμετρων είναι απόρροια του μοντέλου βελτιστοποίησης, ενώ στη δεύτερη θεώρηση, που περιλαμβάνει τα επόμενα 18 σενάρια, ενεργοποιείται ο περιορισμός προτεραιότητας των ενεργειών.

5.2 Αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης

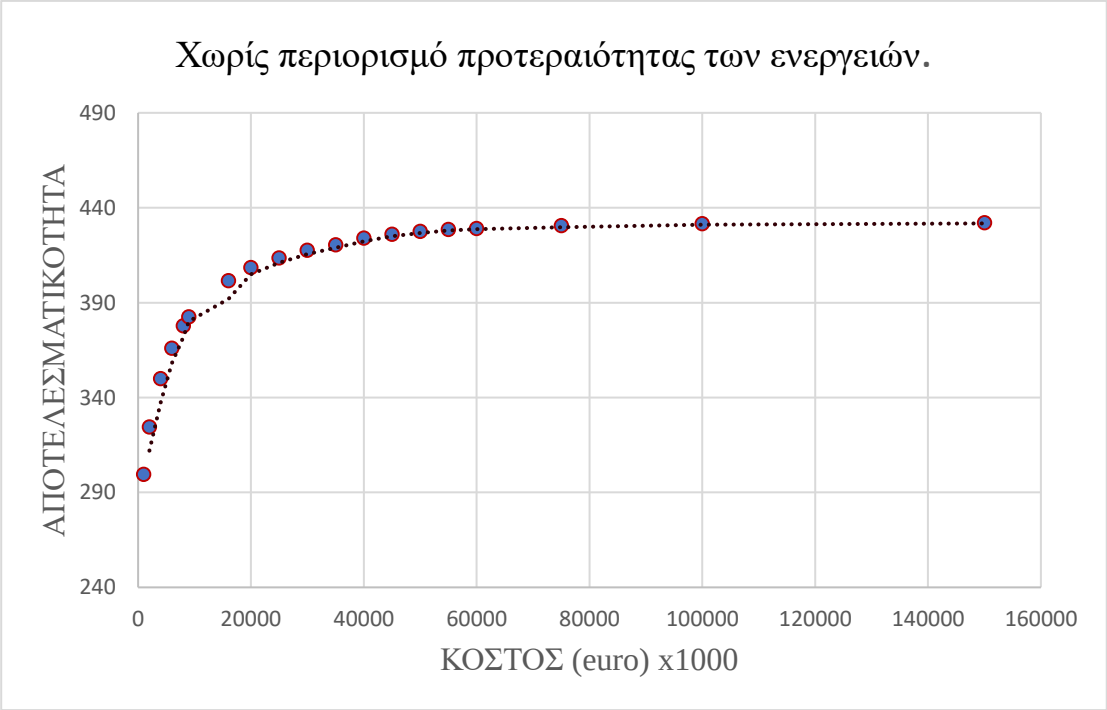
5.2.1 Αποτελέσματα για το σενάριο 1: Εύρεση αρχικού προϋπολογισμού χωρίς προεπιλεγμένες ενέργειες

Στον Πίνακας 11 Παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια προϋπολογισμού που ελέγχτηκαν ξεκινώντας από 500.000€ μέχρι 150.000.000€ . Για το κάθε σενάριο καταχωρήθηκε στο πίνακα 11 ο αριθμός των αντιμέτρων που ενεργοποιούνται και η συνολική αποτελεσματικότητα που συνεπάγονται τα ενεργοποιημένα αντίμετρα.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το Διάγραμμα 1 το οποίο συσχετίζει τον εκάστοτε προϋπολογισμό με την αντίστοιχη αποτελεσματικότητα των αντίμετρων που ενεργοποιούνται για αυτό το διαθέσιμο κεφάλαιο.

budget	reduction of risk	number of CM
1000	299.5	532
2000	324.5	551
4000	350	567
6000	366	582
8000	377.8	594
9000	382.5	602
16000	401.5	640
20000	408.5	647
25000	413.5	657
30000	417.5	665
35000	420.5	664
40000	424	671
45000	426	675
50000	427.5	678
55000	428.5	680
60000	429	681
75000	430.5	684
100000	431.5	686
150000	432	687

Πίνακας 11: Σενάρια αρχικού διαθέσιμου κεφαλαίου με τον αντίστοιχο αριθμό ενεργειών που ενεργοποιούν και την συνολική αποτελεσματικότητα των ενεργοποιημένων ενεργειών.



Διάγραμμα 1:Συσχέτιση του διαθέσιμου κεφαλαίου με την αποτελεσματικότητα των αντίμετρων που ενεργοποιούνται.

Από το Διάγραμμα 1 παρατηρείται ότι η απόδοση που επιφέρει η υλοποίηση των ενεργειών στα έργα υποδομής των οδικών δικτύων δεν αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του διαθέσιμου κεφαλαίου. Στο πρώτο στάδιο αύξησης του κεφαλαίου αυξάνεται σχεδόν αναλογικά αλλά στη συνέχεια επιβραδύνεται και τελικά σταθεροποιείται.

Το βέλτιστο αρχικά διαθέσιμο κεφάλαιο αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο η εξίσωση της εφαπτομένης της καμπύλης ισούται με τη μονάδα. Μέχρι το σημείο αυτό, όσο αυξάνεται το διαθέσιμο κεφάλαιο η αποτελεσματικότητα αυξάνεται σχεδόν αναλογικά με τον προϋπολογισμό. Μετά το σημείο αυτό, η αποτελεσματικότητα συνεχίζει να αυξάνεται αλλά με αρνητικό ρυθμό.

Με βάση την παραπάνω θεώρηση, το σημείο στο οποίο η εφαπτομένη της καμπύληςισούται με τη μονάδα ($\frac{deff}{dcost} = 1$) αντιστοιχεί σε διαθέσιμο κεφάλαιο ίσο με 25.000.000€.

5.2.2. Αποτελέσματα για το σενάριο 2: Εύρεση αρχικού προϋπολογισμού με τον περιορισμό προτεραιότητας των ενεργειών απομείωσης του κινδύνου

Ο περιορισμός προτεραιότητας των αντιμέτρων όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 εισάγεται στο μοντέλο το οποίο επιλύεται για 18 διαφορετικά σενάρια αρχικού κεφαλαίου με σκοπό να βρεθεί το βέλτιστο.

Στο Σχήμα 29 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα του πίνακα κόστους όπου παρατηρείται ότι το κόστος υλοποίησης των ενεργειών προτεραιότητας είναι 12096800€.

i x cost	Ponte canale deviatore Olona	Ponte cavo Borromeo	Viadotto Binasco	Ponte Ticino	Ponte roggia Castellana
Lighting	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Barriers & Berms	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fences	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CCTV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Intrusion Detection Devices	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Physical Inspection of asset	756.6	0.0	0.0	0.0	0.0
ID Cards	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Biometrics	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Background Checks	239.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Metal Detectors	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Restricted Parking	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Random Inspections	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visible Badges	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Limited Access Points	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visitor Control & Escort	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Locks	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Explosive Detection	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Establish Clear Zones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Visible Signs	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Seismic Retrofitting	6000.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fire Detection & Supression	1933.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Encasement, Wrapping, Jacketing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Patrols	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
WX/Seismic Information	70.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Intelligence Networking	210.3	0.0	0.0	0.0	0.0
HAZMAT Mitigation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Security Awareness Training	420.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Emergency Response Training	420.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Emergency Evacuation Planning	420.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Planned Redundancy (e.g., detours)	924.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Public Information and Disseminatior	630.6	0.0	0.0	0.0	0.0
sum of stable CM	12096.8				

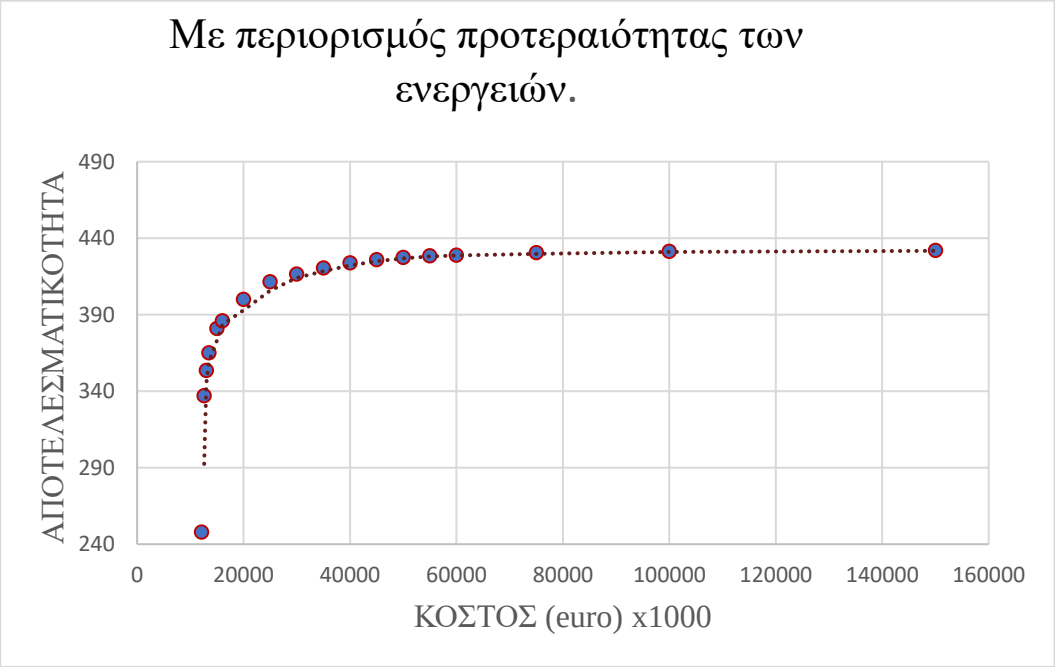
Σχήμα 29 : Απόσπασμα πίνακα κόστους όπου διακρίνεται το κόστος ενεργοποίησης των προεπιλεγμένων ενεργειών.

Η διερεύνηση του βέλτιστου αρχικά διαθέσιμου κεφαλαίου ξεκίνησε με αρχικό προϋπολογισμό ίσο με 12.100.000 €, ώστε να συμπεριληφθούν τα 9 σταθερά αντίμετρα.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης του βέλτιστου αρχικού κεφαλαίου για το σενάρια 2 παρουσιάζονται στον Πίνακας 12 και στο Διάγραμμα 2.

budget	reduction of risk	number of CM
12100	248	394
12600	337	511
13000	353.5	538
13500	365	558
15000	381	587
16000	386	597
20000	400	623
25000	411.5	646
30000	416.5	656
35000	420.5	664
40000	424	671
45000	426	675
50000	427.5	678
55000	428.5	680
60000	429	681
75000	430.5	684
100000	431.5	686
150000	432	687

Πίνακας 12: Σενάρια αρχικού διαθέσιμου κεφαλαίου με τον αντίστοιχο αριθμό ενεργειών που ενεργοποιούνται και την συνολική αποτελεσματικότητα των ενεργοποιημένων ενεργειών με τη θεώρηση προτεραιότητας των προεπιλεγμένων αντιμέτρων.



Διάγραμμα 2:Συσχέτιση του διαθέσιμου κεφαλαίου με την αποτελεσματικότητα των αντίμετρων που ενεργοποιούνται με τη θεώρηση προτεραιότητας των προεπιλεγμένων αντιμέτρων.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μεθοδολογία εύρεσης του βέλτιστου αρχικού κεφαλαίου, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 5.2.1. Το σημείο στο οποίο η εφαπτομένη της καμπύλης ισούται με τη μονάδα αντιστοιχεί σε διαθέσιμο κεφάλαιο ίσο με 30.000.000€.

5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Με δεδομένο ότι τα πραγματικά έξοδα για τις υποδομές των οδικών δικτύων που εξετάζονται κυμαίνονται από 12.124.000€ έως 13.119.000€ ετησίως (πίνακας 8), και το βέλτιστο αρχικό διαθέσιμο κεφάλαιο όπως προέκυψε από το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι 30.000.000€, συνεπάγεται ότι η χρονική κλίμακα τριών ετών για την ολοκλήρωση των ενεργειών προσεγγίζει πολύ καλά τα πραγματικά έξοδα συντήρησης των υποδομών των οδικών δικτύων.

Θεωρώντας ότι ο συνολικός πραγματικός προϋπολογισμός για τρία έτη λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των ακραίων τιμών του πραγματικού προϋπολογισμού όπως παρουσιάζονται στο πίνακα 8 προκύπτει ότι:

$$M=\frac{1212400+1319900}{2}\ x\ 3 = 37.864.500\ €$$

Το αποτέλεσμα του δεύτερου σεναρίου βελτιστοποίησης (30.000.000€) προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κατάσταση καθώς έχει μικρότερη διαφορά από τη θεώρηση του πραγματικού προϋπολογισμού και θεωρείται ορθότερο καθώς λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό προτεραιότητας ορισμένων ενεργειών.

Για την Διπλωματική Εργασία ορίζεται τελικά ένας χρονικός ορίζοντας **τριών ετών** για την ολοκλήρωση των ενεργειών που απομειώνουν την πιθανότητας εμφάνισης κινδύνου ή τις επιπτώσεις του κινδύνου αυτού. Στη χρονική διάρκεια των τριών ετών και με ενεργοποιημένο τον περιορισμό προτεραιότητας ενεργειών εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια αρχικά διαθέσιμου κεφαλαίου τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια.

5.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Προκειμένου να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας, το μοντέλο βελτιστοποίησης επιλύεται με το open solver για διάφορα σενάρια αρχικού κεφαλαίου και απαιτούμενου κόστους υλοποίησης ενεργειών .
Αξιολογώντας ως καλύτερο το δεύτερο σενάριο με την σταθερή ενεργοποίηση των εννιά ενεργειών, ο περιορισμός προτεραιότητας ενεργειών λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις υπόλοιπες επιλύσεις.

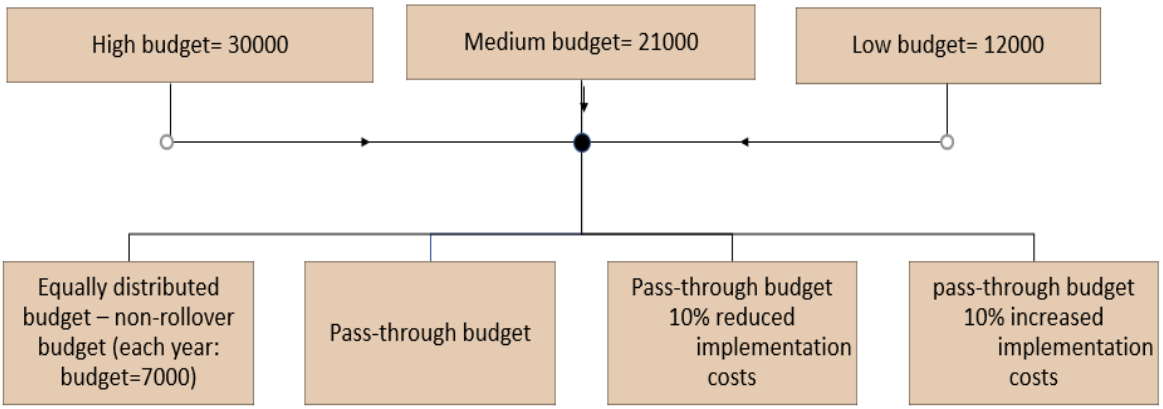
Με βάση τα συμπεράσματα για το βέλτιστο προϋπολογισμό του δεύτερου σεναρίου επιλέγονται τρία διαφορετικά σενάρια αρχικού κεφαλαίου για τον χρονικό ορίζοντα των τριών ετών.

- ΧΑΜΗΛΟΣ ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ : 12.000.000 €
- ΜΕΣΑΙΟΣ ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ : 21.000.000 €
- ΥΨΗΛΟΣ ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ : 30.000.000 €

Για τα τρία σενάρια αρχικού κεφαλαίου, θεωρήθηκε ότι εκτός από την ομοιόμορφη κατανομή του αρχικού κεφαλαίου στη διάρκεια 3 ετών, για κάθε περίπτωση χαμηλού, μεσαίου και υψηλού προϋπολογισμού το μοντέλο θα επιλύεται δύο φορές. Μια φορά χωρίς μετακύληση προϋπολογισμού που αντιστοιχεί σε ισόποσο καταμερισμό του κεφαλαίου ανά έτος και μια φορά με μετακύλιση προϋπολογισμού. Όπου δεν υπάρχει μετακύλιση το κεφάλαιο που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα τρία έτη δε μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί τον επόμενο χρόνο, ενώ στην περίπτωση της μετακύλισης το διαθέσιμο χρηματικό ποσό μεταβιβάζεται στον επόμενο χρόνο.

Επιπροσθέτως, για τα τρία σενάρια διατιθέμενου προϋπολογισμού, εξετάζεται η περίπτωση αύξησης του κόστους ενεργοποίησης των ενεργειών κατά 10%, καθώς και η περίπτωση μείωσης του κόστους ενεργοποίησης των ενεργειών κατά 10%. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται καθώς είναι σύνηθες να αλλάζει η τιμή του αρχικά υπολογισμένου κόστους των ενεργειών από δευτερογενείς παράγοντες.

Συγκεντρωτικά, για χαμηλό, μέσο και υψηλό προϋπολογισμό το πρόβλημα επιλύεται για τέσσερις διαφορετικές θεωρήσεις. Τα διαφορετικά σενάρια που εξετάζονται στην Διπλωματική εργασία παρουσιάζονται στο Σχήμα 30.



Σχήμα 30 : Σχηματική απεικόνιση των σεναρίων που εξετάστηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας της Διπλωματικής Εργασίας.

5.4.1 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για υψηλό προϋπολογισμό.

Σε όλα τα σενάρια του υψηλού προϋπολογισμού ο περιορισμός των προεπιλεγμένων ενεργειών ικανοποιείται.

Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του σεναρίου μετακύλισης κεφαλαίου και ισόποσου καταμερισμού του κεφαλαίου στα τρία έτη. Και στις δύο περιπτώσεις ενεργοποιούνται 656 ενέργειες, δηλαδή το 95,5% των ενεργειών ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα αντιστοιχεί σε 416.5 μονάδες (Πίνακας 13).

without budget transfer					with budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**		**budget**	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9943.34	382	596	**year 1**	10000	9943.34	382	596
year 2	10000	9926.5	18	27	**year 2**	10000	9926.5	18	27
year 3	10000	9775.5	16.5	33	**year 3**	10130.2	9775.5	16.5	33
sum		29645.27	416.5	656	**sum**		29645.27	416.5	656

Πίνακας 13: Αποτελέσματα σεναρίου1,2 για ισόποσο καταμερισμό και για μετακύλιση του υψηλού προϋπολογισμού.

Στο τρίτο σενάριο με την μειωμένη τιμή ενεργοποίησης των αντιμέτρων ενεργοποιούνται 662 από τις 687 ενέργειες, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 96,3%, ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα των ενεργειών είναι 419,5.

Όπως είναι φυσικό, η μείωση του κόστους των αντιμέτρων συνεπάγεται μεγαλύτερο αριθμό ενεργειών και κατ' αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη απομείωση του κινδύνου (Πίνακας 14).

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9952.24	387	604
year 2	10000	9985.0	19	31
year 3	10062.8	9815.1	13.5	27
sum		29752.26	419.5	662

Πίνακας 14: Αποτελέσματα σεναρίου 3 για υψηλό προϋπολογισμό και μειωμένο κόστος αντίμετρων.

Στο τέταρτο σενάριο, που αντιστοιχεί στην αύξηση του κόστους των αντιμέτρων είναι επόμενο να ενεργοποιούνται λιγότερες ενέργειες και η συνολική αποτελεσματικότητα να είναι εξίσου πιο χαμηλή. Συγκεκριμένα ενεργοποιούνται 651 ενέργειες , 94,76%, ενώ η αποτελεσματικότητα στην απομείωση του κινδύνου είναι 414 μονάδες (Πίνακας 15).

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9980.13	377.5	587
year 2	10000	9951.2	17.5	26
year 3	10068.6	9949.5	19	38
sum		29880.83	414	651

Πίνακας 15: Αποτελέσματα σεναρίου 4 για υψηλό προϋπολογισμό και αυξημένο κόστος αντίμετρων.

Στον Πίνακας 16 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τα τέσσερα σενάρια με υψηλό προϋπολογισμό.

Budget=30000000

without budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9943.34	382	596
year 2	10000	9926.5	18	27
year 3	10000	9775.5	16.5	33
sum		29645.27	416.5	656

with budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9943.34	382	596
year 2	10000	9926.5	18	27
year 3	10130.2	9775.5	16.5	33
sum		29645.27	416.5	656

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9952.24	387	604
year 2	10000	9985.0	19	31
year 3	10062.8	9815.1	13.5	27
sum		29752.26	419.5	662

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	10000	9980.13	377.5	587
year 2	10000	9951.2	17.5	26
year 3	10068.6	9949.5	19	38
sum		29880.83	414	651

Πίνακας 16: Αποτελέσματα των σεναρίων με υψηλό προϋπολογισμό.

5.4.2 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για μεσαίο προϋπολογισμό.

Σε όλα τα σενάρια του μεσαίου προϋπολογισμού ο περιορισμός των προεπιλεγμένων ενεργειών ικανοποιείται.

Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του σεναρίου μετακύλισης κεφαλαίου και ισόποσου διαχωρισμού του κεφαλαίου στα τρία έτη. Και στις δύο περιπτώσεις ενεργοποιούνται 629 ενέργειες, δηλαδή το 91,5% των ενεργειών ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα αντιστοιχεί σε 403 μονάδες (Πίνακας 17).

without budget transfer					**with budget transfer**				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**		**budget**	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6987.84	349.5	537	**year 1**	7000	6987.84	349.5	537
year 2	7000	6989.55	23	34	**year 2**	7000	6989.55	23	34
year 3	7000	6983.90	30.5	58	**year 3**	7022.60	6983.90	30.50	58
sum		20961.30	403	629	**sum**		20961.30	403	629

Πίνακας 17: Αποτελέσματα σεναρίου1,2 για ισόποσο καταμερισμό και για μετακύλιση του μεσαίου προϋπολογισμού.

Στο τρίτο σενάριο με την μειωμένη τιμή εγκατάστασης των αντιμέτρων ενεργοποιούνται 640 από τις 687 ενέργειες, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 93,1%, ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα των ενεργειών είναι 408,5 μονάδες.

Όπως είναι φυσικό, η μείωση του κόστους των αντιμέτρων συνεπάγεται μεγαλύτερο αριθμό ενεργειών και μεγαλύτερη απομείωση του κινδύνου (Πίνακας 18).

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6990.73	365.5	565
year 2	7000	6922.88	18	27
year 3	7086	6999.06	25	48
sum		20912.67	408.5	640

Πίνακας 18: Αποτελέσματα σεναρίου 3 για μεσαίο προϋπολογισμό και μειωμένο κόστος αντίμετρων

Στο τέταρτο σενάριο, που αντιστοιχεί στην αύξηση του κόστους των αντιμέτρων είναι επόμενο να ενεργοποιούνται λιγότερες ενέργειες και η συνολική αποτελεσματικότητα να είναι εξίσου πιο χαμηλή. Συγκεκριμένα ενεργοποιούνται 618 ενέργειες, 89,9%, ενώ η αποτελεσματικότητα στην απομείωση του κινδύνου είναι 397,5 μονάδες (Πίνακας 19).

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6998.89	315.5	483
year 2	7000	6996.49	28.5	38
year 3	7004.63	6890.78	53.5	97
sum		20886.16	397,5	618

Πίνακας 19: Αποτελέσματα σεναρίου 4 για μεσαίο προϋπολογισμό και αυξημένο κόστος αντίμετρων.

Στον Πίνακας 20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τα τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης με μεσαίο προϋπολογισμό.

Budget=21000

without budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6987.84	349.5	537
year 2	7000	6989.55	23	34
year 3	7000	6983.90	30.5	58
sum		20961.30	403	629

with budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6987.84	349.5	537
year 2	7000	6989.55	23	34
year 3	7022.60	6983.90	30.50	58.00
sum		20961.30	403.00	629.00

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6990.73	365.5	565
year 2	7000	6922.88	18	27
year 3	7086	6999.06	25	48
sum		20912.67	408.5	640

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	7000	6998.89	315,5	483
year 2	7000	6996.49	28.5	38
year 3	7004.63	6890.78	53.5	97
sum		20886.16	397,5	618

Πίνακας 20: Αποτελέσματα σεναρίων βελτιστοποίησης με μεσαίο προϋπολογισμό.

5.4.3 Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για χαμηλό προϋπολογισμό.

Το κόστος των προεπιλεγμένων ενεργειών ανέρχεται σε 12.096.800€, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τον συνολικά διαθέσιμο προϋπολογισμό. Συνεπώς είναι αδύνατο να ικανοποιηθεί ο περιορισμός των προεπιλεγμένων ενεργειών με τον χαμηλό προϋπολογισμό. Το ερώτημα που τίθεται είναι πιο από τα προκαθορισμένα αντίμετρα δεν θα συμπεριληφθεί στην ανάλυση.

Το κόστος της ενέργειας seismic retrofitting ανέρχεται σε 6.000.000€ και συνεπώς είναι αδύνατο να επιλεγεί στη περίπτωση ισόποσου καταμερισμού του προϋπολογισμού, καθώς το ετήσιο κεφάλαιο είναι 4.000.000€.

Για το πρώτο σενάριο βελτιστοποίησης συμπεριλαμβάνονται όλα τα προεπιλεγμένα αντίμετρα , εκτός από εκείνο που αφορά το σεισμό και το αποτέλεσμα είναι η ενεργοποίηση 611 ενεργειών (88,9%) με συνολική αποτελεσματικότητα ίση με 390,5 (Πίνακας 21).

without budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	4000.00	264	436
year 2	4000	3993.27	104.5	134
year 3	4000	3964.73	22	41
sum		11958.00	390.5	611

Πίνακας 21: Αποτελέσματα σεναρίου 1 για ισόποσο καταμερισμό του χαμηλού προϋπολογισμού.

Σχετικά με το δεύτερο σενάριο με την μετακύλιση κεφαλαίου, με σκοπό να συμπεριληφθεί η ενέργεια της σεισμικής αναγνώρισης, η οποία θεωρείται ύψιστης σπουδαιότητας το αντίμετρο «Inteligence networking» επιλέγεται ως εκείνο το οποίο δεν θα συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Συνεπώς και με την θεώρηση ότι τον πρώτο χρόνο διατίθεται 4.000.000€ και το δεύτερο χρόνο 2.000.000€ παραμένουν 6.000.000 € για τον τρίτο χρόνο, στον οποίο δύναται να ενεργοποιηθεί μόνο η ενέργεια seismic retrofitting. Ο συνολικός αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται για το δεύτερο σενάριο μετακύλισης κεφαλαίου για χαμηλό προϋπολογισμό είναι 460 αντίμετρα (66,95 %) και η συνολική αποτελεσματικότητα ανέρχεται σε 291,5 (Πίνακας 22).

with budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	4000.00	264	436
year 2	2000.0	1998.90	23.5	23
year 3	6001.1	6000.00	4	1
sum		11998.90	291.5	460

Πίνακας 22: Αποτελέσματα σεναρίου 2 για μετακύληση του χαμηλού προϋπολογισμού.

Στο τρίτο σενάριο, με την μειωμένη τιμή εγκατάστασης των αντιμέτρων, το κόστος των προεπιλεγμένων ενεργειών είναι 10.887.120 €. Με την κατάλληλη κατανομή του διαθέσιμου κεφαλαίου είναι εφικτή η ενεργοποίηση όλων των προεπιλεγμένων ενεργειών. Ο καταμερισμός του κεφαλαίου πραγματοποιείται όπως και στο σενάριο δύο (τον πρώτο χρόνο 4.000.000€, το δεύτερο χρόνο 2.000.000€ και τον τρίτο χρόνο 6.000.000.) Συνολικά ενεργοποιούνται 554 από τις 687 ενέργειες, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 80.6%, ενώ η συνολική αποτελεσματικότητα των ενεργειών είναι 362,5 (Πίνακας 23).

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	3997.15	313	483
year 2	2000.0	1997.43	24	34
year 3	6005.4	5998.80	25.5	37
sum		11993.38	362.5	554

Πίνακας 23: Αποτελέσματα σεναρίου 4 για χαμηλό προϋπολογισμό και μειωμένο κόστος αντίμετρων.

Στο τέταρτο σενάριο, με την αυξημένη τιμή εγκατάστασης των αντιμέτρων, το κόστος των προεπιλεγμένων ενεργειών ανέρχεται σε 13306480 €. Η ενέργεια seismic retrofitting επιλέγεται ως εκείνη που δεν θα συμπεριληφθεί στο μοντέλο.

Ο καταμερισμός του κεφαλαίου που πραγματοποιείται αντιστοιχεί σε 4.000.000€ τον πρώτο χρόνο, 3.000.000€ το δεύτερο χρόνο και 5.000.000 τον τρίτο χρόνο.

Ειδικότερα τον πρώτο χρόνο ενεργοποιούνται όλες οι προεπιλεγμένες ενέργειες εκτός από την ενέργεια seismic retrofitting, που δεν συμπεριλαμβάνεται καθόλου στο μοντέλο βελτιστοποίησης, την ενέργεια public information και την ενέργεια fire detection. Το κόστος των δύο τελευταίων ενεργειών ανέρχεται σε 2.820.500€ και συμπεριλαμβάνεται στους πόρους που διατίθενται για το δεύτερο έτος.

Τελικά ενεργοποιούνται 602 ενέργειες, με ποσοστό 87,63%, ενώ η αποτελεσματικότητα στην απομείωση του κινδύνου είναι 385.5 (Πίνακας 24).

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	3999.03	281	456
year 2	3000.0	2999.86	34	27
year 3	5001.1	4906.04	70.5	119
sum	12001.11	11904.92	385.5	602

Πίνακας 24: Αποτελέσματα σεναρίου 4 για χαμηλό προϋπολογισμό και αυξημένο κόστος αντίμετρων.

Στον Πίνακας 25 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τα τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης με χαμηλό προϋπολογισμό.

Budget=12000

without budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	4000.00	264	436
year 2	4000	3993.27	104.5	134
year 3	4000	3964.73	22	41
sum		11958.00	390.5	611

with budget transfer				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	4000.00	264	436
year 2	2000.0	1998.90	23.5	23
year 3	6001.1	6000.00	4	1
sum		11998.90	291.5	460

with budget transfer & 10% ↓ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	3997.15	313	483
year 2	2000.0	1997.43	24	34
year 3	6005.4	5998.80	25.5	37
sum		11993.38	362.5	554

with budget transfer & 10% ↑ the price of th CM				
	budget	**cost**	**effectiv**	**number of CM**
year 1	4000	3999.03	281	456
year 2	3000.0	2999.86	34	27
year 3	5001.1	4906.04	70.5	119
sum		11904.92	385.5	602

Πίνακας 25: Αποτελέσματα σεναρίων βελτιστοποίησης με χαμηλό προϋπολογισμό.

Από τον συγκεντρωτικό πίνακα 6 προκύπτει ότι στο σενάριο 2 και 3 όπου ενεργοποιείται το αντίμετρο seismic retrofitting η αποτελεσματικότητα είναι πολύ πιο χαμηλή συγκριτικά με τα σενάρια 1, 4 όπου το πιο σημαντικό αντίμετρο δεν ενεργοποιείται.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς το αντίμετρο seismic retrofitting κοστίζει 6.000.000€ και έχει συντελεστή αποτελεσματικότητας 4. Στα σενάρια που δεν δύναται να ενεργοποιηθεί το αντίμετρο, το κεφάλαιο των 6.000.000€ διατίθεται για την ενεργοποίηση άλλων αντίμετρων τα οποία έχουν χαμηλότερο συντελεστή αποτελεσματικότητας. Στην κλίμακα μέτρησης της αποτελεσματικότητας 0,5 1, 2, 4 η αποτελεσματικότητα του seismic retrofitting ισούται με την ενεργοποίηση δύο αντίμετρων υψηλής αποτελεσματικότητας ή τεσσάρων αντιμέτρων μεσαίας αποτελεσματικότητας ή οχτώ αντιμέτρων χαμηλής αποτελεσματικότητας. Άρα με διαθέσιμο το ποσό των 6.000.000€ δύναται να ενεργοποιηθούν περισσότερα αντίμετρα που δεν έχουν πολύ υψηλή αποτελεσματικότητα αλλά λόγω χαμηλού κόστους ενεργοποίησης , στο σύνολο τους ξεπερνούν την τιμή της συνολικής αποτελεσματικότητας που θα ήταν απόρροια της ενέργειας seismic retrofitting.

6. Συμπεράσματα

6.1 Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης, με στόχο την κατανομή των διαθέσιμων πόρων για την απομείωση του κινδύνου στις υποδομές οδικών δικτύων. Συγκεκριμένα, με βασικό περιορισμό αυτόν της διάθεσης των πόρων επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός προγράμματος βέλτιστης αποτελεσματικότητας των διαθέσιμων αντιμέτρων, που παρέχονται στο λογισμικό CAPTool, σε χρονικό ορίζοντα τριών ετών.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών και μεθοδολογιών παρόμοιων με το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων για τις υποδομές επιτεύχθηκε κυρίως μέσω της εταιρίας Milano Serravalle. Τα στοιχεία οργανώθηκαν, ομαδοποιήθηκαν κατάλληλα και εισάχθηκαν στο πρόγραμμα CAPTA, το οποίο τροποποιήθηκε ώστε να ποσοτικοποιήσει την αποτελεσματικότητα της κάθε ενέργειας στην απομείωση του κινδύνου.

Ακολούθως αναπτύχθηκε η **αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου βελτιστοποίησης**, η οποία μεγιστοποιείται με γραμμικό ακέραιο δυαδικό προγραμματισμό μέσω του βοηθήματος του Excel (Excel Solver). Αναπτύχθηκαν διάφορα σενάρια τόσο για την εύρεση του βέλτιστου προϋπολογισμού όσο και για διαφορετικά σενάρια προϋπολογισμού. Σε αυτά τα σενάρια επιχειρήθηκαν μεταβολές στο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών και στον τρόπο καταμερισμού του αρχικά διαθέσιμου κεφαλαίου. Τέλος, εξετάστηκε και το σενάριο της μετακύλισης του διατιθέμενου προϋπολογισμού σε επόμενο έτος, εφόσον αυτός δεν αξιοποιείται στο τρέχον έτος που παρέχεται.

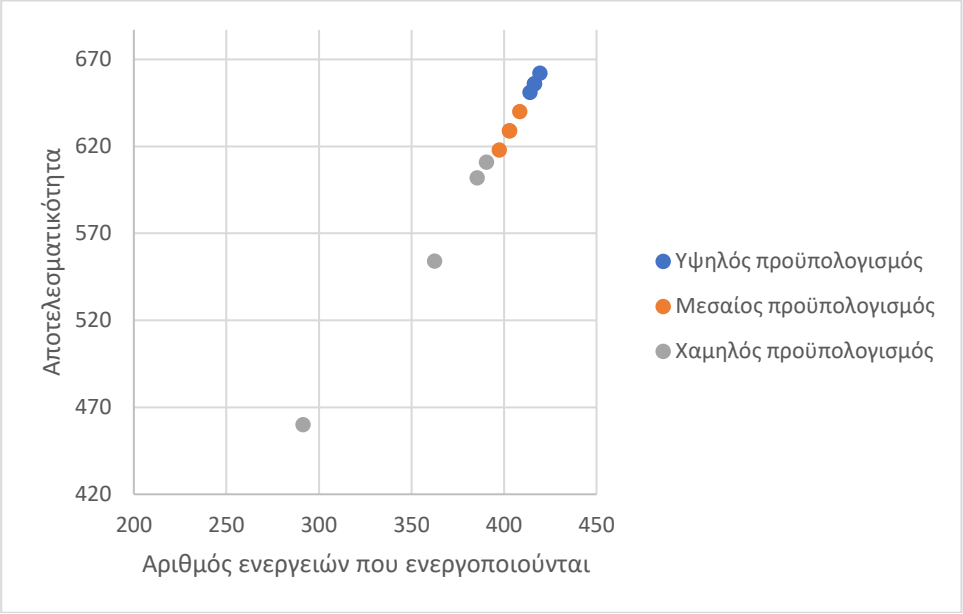
Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε ο Πίνακας 26 για κάθε σενάριο και συνδυασμό περιπτώσεων με εισαγωγή των σημαντικότερων στοιχείων από την εφαρμογή των διαφορετικών σεναρίων.

Αρχικά διαθέσιμο κεφάλαιο	Συγκριτικά στοιχεία / Προβλήματα βελτιστοποίησης	Μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. (Αποτελεσματικότητα)	Συνολικό αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται	Κόστος (€)	Κόστος ανά αριθμός υλοποιήσιμων ενεργειών
30,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	416.5	656	29645270	45.19
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	416.5	656	29645270	45.19
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	419.5	662	29752260	44.94
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	414	651	29880830	45.90
21,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	403	629	20961300	33.32
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	403	629	20961300	33.32
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	408.5	640	20912670	32.68
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	397.5	618	20886160	33.80
12,000,000 €	**ΣΕΝΑΡΙΟ 1** Ίσος καταμερισμός του κεφαλαίου στα τρία έτη	390.5	611	11958000	19.57
	ΣΕΝΑΡΙΟ 2 μετακύλιση κεφαλαίου	291.5	460	11998900	26.08
	ΣΕΝΑΡΙΟ 3 Μειωμένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	362.5	554	11993380	21.65
	ΣΕΝΑΡΙΟ 4 Αυξημένο κόστος ενεργοποίησης των ενεργειών απομείωσης κινδύνου	385.5	602	11904920	19.78

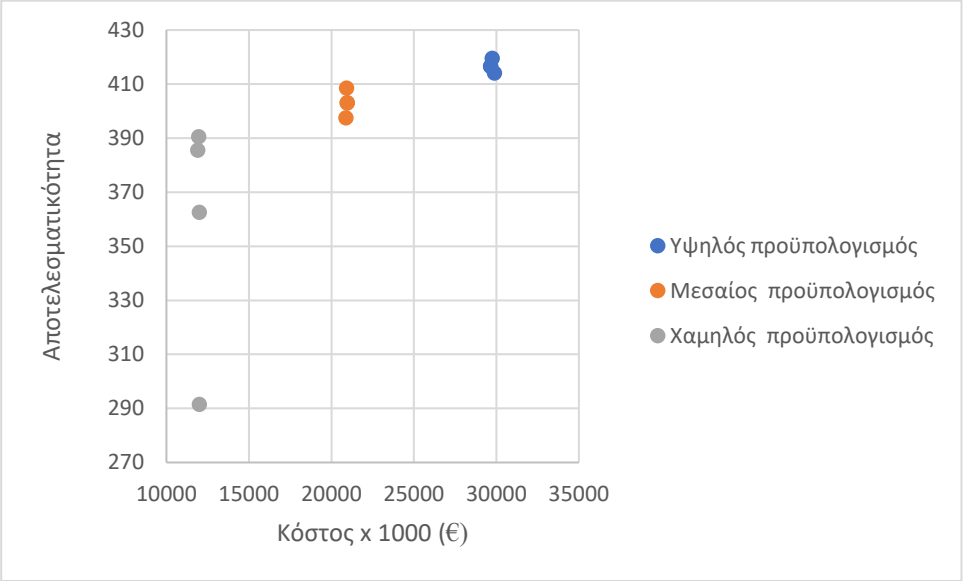
Πίνακας 26: Συνολικά αποτελέσματα

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται ο αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται συναρτήσει της αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνουν (Διάγραμμα 3) καθώς και το

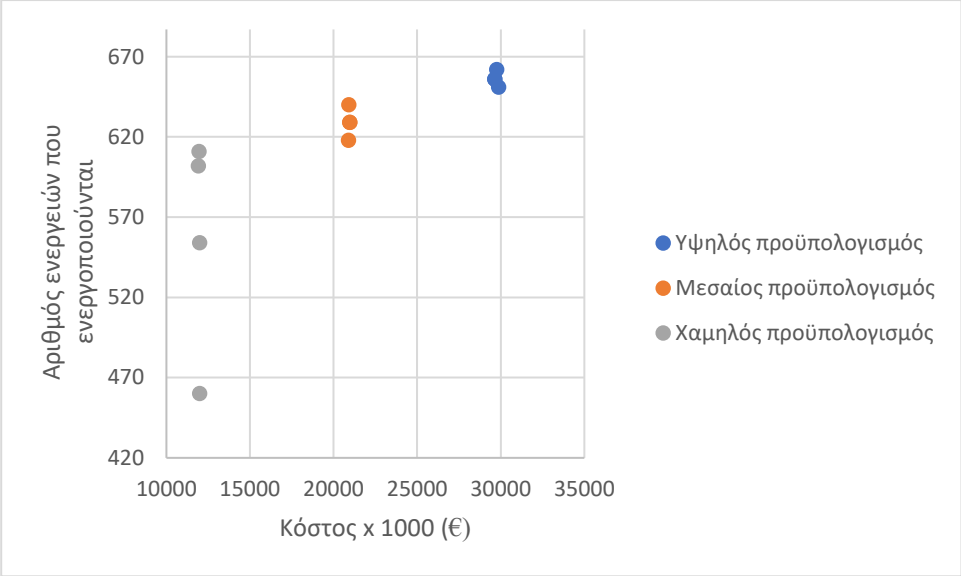
κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει της αποτελεσματικότητας (Διάγραμμα 4) και του αριθμού ενεργειών που εφαρμόζονται (Διάγραμμα 5).



Διάγραμμα 3: Αριθμός ενεργειών που ενεργοποιούνται συναρτήσει της αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνουν.



Διάγραμμα 4: Κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει της αποτελεσματικότητας.



Διάγραμμα 5:Κόστος των ενεργοποιήσιμων ενεργειών συναρτήσει του αριθμού ενεργειών που εφαρμόζονται.

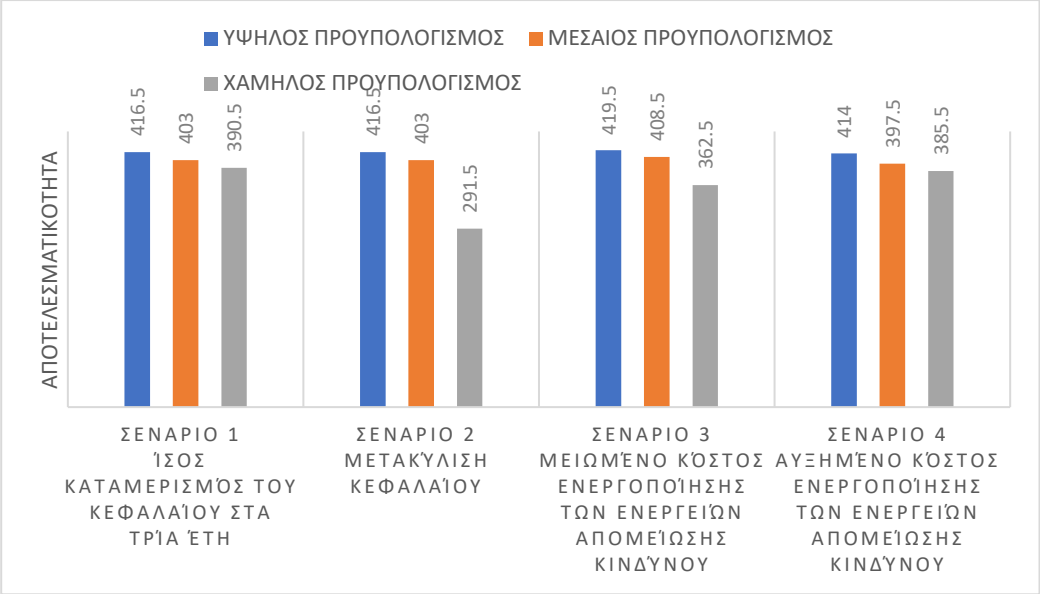
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται όπως είναι φυσικό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των ενεργειών αυξάνεται η συνολική αποτελεσματικότητα.

Επιπροσθέτως η αποτελεσματικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται το διαθέσιμο κεφάλαιο καθώς η αύξηση του προϋπολογισμού συνεπάγεται και την ενεργοποίηση μεγαλύτερου αριθμού ενεργειών.

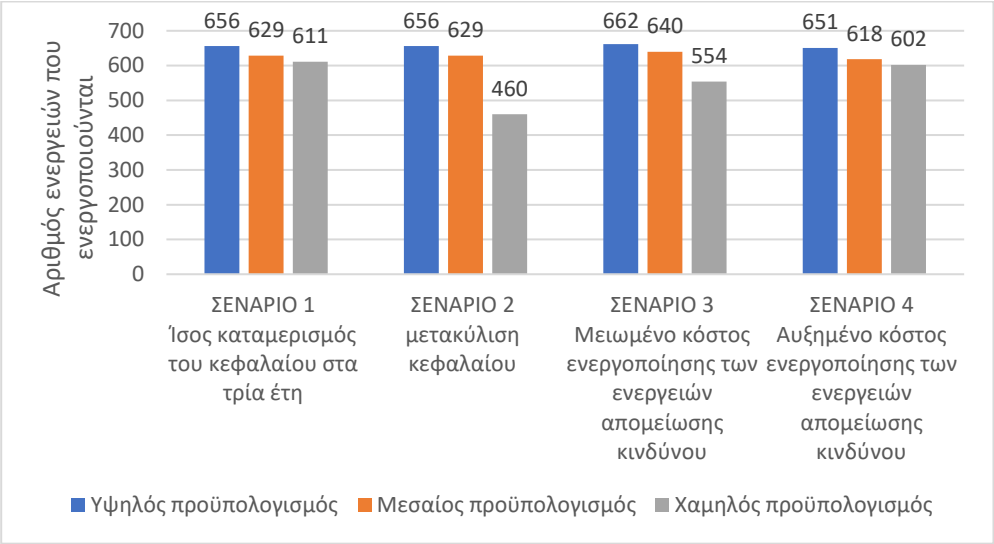
Στο σενάριο του χαμηλού προϋπολογισμού εμφανίζεται μεγαλύτερη διακύμανση στην συνολική αποτελεσματικότητα και στον αριθμό των ενεργοποιήσιμων ενεργειών, γεγονός που οφείλεται στην αδυναμία υλοποίησης του αντίμετρου seismic retrofitting.

Για τα σενάρια υψηλού και μεσαίου προϋπολογισμού απεικονίζονται τρία σημεία καθώς τα αποτελέσματα του σεναρίου για ισόποσο καταμερισμού και για μετακύλιση του αρχικά διαθέσιμου κεφαλαίου στα τρία έτη ταυτίζονται.

Τέλος στο Διάγραμμα 6 και στο Διάγραμμα 7 φαίνεται η αποτελεσματικότητα και ο αριθμός των αντιμέτρων που ενεργοποιούνται για το κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια για τις τρεις θεωρήσεις αρχικού διαθέσιμου κεφαλαίου.



Διάγραμμα 6: Αποτελεσματικότητα ανά σενάριο για υψηλό, μεσαίο και χαμηλό προϋπολογισμό.



Διάγραμμα 7: Αριθμός των αντιμέτρων που ενεργοποιούνται ανά σενάριο για υψηλό, μεσαίο και χαμηλό προϋπολογισμό.

Από τα διαγράμματα 6 και 7 παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι λογικά, καθώς για το κάθε σενάριο η αποτελεσματικότητα και ο αριθμός των ενεργειών αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του προϋπολογισμού. Στο σενάριο 2 και 3 παρατηρείται αισθητά χαμηλότερη αποτελεσματικότητα και αριθμός ενεργοποιήσιμων ενεργειών για τον χαμηλό προϋπολογισμό, καθώς στα σενάρια αυτά συμπεριλαμβάνεται το αντίμετρο seismic retrofitting που έχει υπέρμετρα υψηλό κόστος ενεργοποίησης συγκριτικά με τον συντελεστή αποτελεσματικότητας του.

6.2 Συμπεράσματα

Από τα διάφορα στάδια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας προέκυψαν επιμέρους χρήσιμα αποτελέσματα, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον κύριο στόχο που τέθηκε αρχικά. Στο παρόν υποκεφάλαιο, επιχειρείται να δοθεί απάντηση στα ερωτήματα που τέθηκαν αρχικά με τη σύνθεση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων. Τα συνολικά συμπεράσματα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

1. Με βάση την εκτενή ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την κατανομή πόρων για την απομείωση του κινδύνου στις υποδομές οδικών δικτύων, φαίνεται ότι για πρώτη φορά αναπτύσσεται ένα μοντέλο βέλτιστης κατανομής πόρων βασισμένο στη μεθοδολογία CAPTA.

2. Η επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού που αποδείχθηκε κατάλληλη για τέτοιου είδους προβλήματα, διότι επιτρέπει στον εκάστοτε διαχειριστή δικτύου να διερευνήσει με αποτελεσματικό τρόπο το σύνολο των πιθανών στρατηγικών διαχείρισης. Επιπλέον, η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού που επιλέχθηκε διαθέτει μια καλά ανεπτυγμένη θεωρία για την ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να καθοριστεί η επίδραση των παραμέτρων εισόδου σε μια δεδομένη λύση του προβλήματος.

3. Η αντικειμενική συνάρτηση που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει συντελεστές αποτελεσματικότητας για την κάθε ενέργεια που σχετίζονται με την επίδρασης της εκάστοτε ενέργειας στην απομείωση του κινδύνου.

4. Καθοριστικός παράγοντας για την απομείωση του κινδύνου αποτελεί η επάρκεια του προϋπολογισμού. Ωστόσο, εφόσον ο διατιθέμενος προϋπολογισμός επαρκεί, προτεραιότητα δίνεται στα αντίμετρα που έχουν μεγαλύτερο συντελεστή αποτελεσματικότητας.

5. Η απόδοση που επιφέρει η υλοποίηση των ενεργειών στα έργα υποδομής των οδικών δικτύων δεν αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του διαθέσιμου κεφαλαίου. Στο πρώτο στάδιο αύξησης του κεφαλαίου αυξάνεται σχεδόν αναλογικά αλλά στη συνέχεια επιβραδύνεται.

6. Η μετακύλιση του χαμηλού προϋπολογισμού σε επόμενα έτη καθιστά εφικτή την ικανοποίηση του περιορισμού των προεπιλεγμένων ενεργειών καθώς επιτρέπει τον καταμερισμό του κεφαλαίου με τρόπο που επιτυγχάνει την ενεργοποίηση όλων των προεπιλεγμένων ενεργειών.

7. Τα αποτελέσματα για σταθερό και μεταβαλλόμενο ετήσιο υψηλό και μεσαίο προϋπολογισμό δεν διαφοροποιούνται αισθητά. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για ίσους διατιθέμενους συνολικούς προϋπολογισμούς στις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρατηρείται ότι:

   - Ο αριθμός των υποδομών στις οποίες ενεργοποιούνται ενέργειες είναι ίδιος τόσο για σταθερό όσο και για μεταβαλλόμενο ετήσιο προϋπολογισμό.

- Το ποσοστό εκμετάλλευσης του διατιθέμενου προϋπολογισμού στην περίπτωση του μεταβαλλόμενου ετήσιου προϋπολογισμού είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με εκείνο του σταθερού ετήσιου προϋπολογισμού.

8. Οι μεταβολές των απαιτούμενων δαπανών είτε με την αύξηση 10% είτε με τη μείωση 10% του κόστους ενεργοποίησης των αντιμέτρων δεν σημαίνει ότι θα επιφέρει αισθητή αντίστοιχη αύξηση/μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτηση ή του συνολικού αριθμού των υλοποιήσιμων ενεργειών. Είναι λογικό ωστόσο να ενεργοποιούνται λιγότερες ενέργειες καθώς αυξάνονται οι δαπάνες των αντιμέτρων και περισσότερες ενέργειες καθώς μειώνονται οι δαπάνες των αντιμέτρων.

9. Το μέσο κόστος ανά υλοποιήσιμη ενέργεια ελαχιστοποιείται για το σενάριο χαμηλού προϋπολογισμού χωρίς μετακύλιση αν ληφθεί υπόψη ο λόγος διαθέσιμος προϋπολογισμός / σύνολο υλοποιήσιμων ενεργειών. Συνεπώς το κόστος δεν μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των υλοποιήσιμων ενεργειών αλλά επηρεάζεται περισσότερο από τον προϋπολογισμό που είναι διαθέσιμος.

10. Τα ποσοστά των πιο σημαντικών ενεργειών που υλοποιούνται ως προς το σύνολο των ενεργοποιήσιμων ενεργειών είναι μικρότερα για τα σενάρια χαμηλού προϋπολογισμού. Συνεπώς επιβεβαιώνεται ότι αν η απόδοση κρίνεται από αυτούς τους δείκτες είναι πιο αποδοτικά τα σενάρια υψηλού προϋπολογισμού.

11. Σχεδόν σε όλα τα σενάρια υπάρχει συμμετρία στα αποτελέσματα σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, μόνο τα αποτελέσματα για τα σενάρια χαμηλού προϋπολογισμού στα οποία δεν καθίσταται δυνατή η ενεργοποίηση του μέτρου seismic retrofitting παρουσιάζουν ασσυμετρία. Άρα επιβεβαιώνεται ότι η απόδοση είναι συνάρτηση των συντελεστών αποτελεσματικότητας, για τους οποίους η ποσοτική εκτίμηση 0,5 , 1, 2, 4 κρίνεται ικανοποιητική για το 82,3 % των σεναρίων.

12. Υπό προϋποθέσεις, μπορεί να καταστεί δυνατή η γενίκευση του μοντέλου βελτιστοποίησης της Διπλωματικής αυτής Εργασίας και για περιοχές εκτός από την περιοχή μελέτης.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το πρόβλημα, το οποίο καλείται να επιλύσει η παρούσα εργασία, βασίστηκε σε ορισμένες **παραδοχές** και απλοποιήσεις, οι οποίες θα ήταν σκόπιμο σε επόμενο στάδιο να διερευνηθούν και να εξεταστεί η επιρροή τους στην επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων και στα αποτελέσματα των εφαρμογών.

- Καταρχάς, καθορίστηκε εκ των προτέρων ότι η αρχική κατάσταση των 75 υποδομών είναι ίδια και ότι δεν υπάρχουν υποδομές που παρουσιάζουν μεγαλύτερο κίνδυνο λόγω της υφιστάμενης κατάστασης. Μια ενδιαφέρουσα πρόκληση θα αποτελούσε ο χαρακτηρισμός της κατάστασης, στην οποία βρίσκονται οι υποδομές, αφού πρώτα καθορίζονταν για αυτά κάποιοι τυποποιημένοι δείκτες αξιολόγησης με βάση διάφορες συνιστώσες αναφοράς. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η βαθύτερη διερεύνηση του προκειμένου θέματος με σκοπό να διαπιστωθεί σε τι βαθμό επηρεάζει τα αποτελέσματα των εφαρμογών.

- Ένα επιπλέον ζήτημα που χρήζει περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να είναι ο διαφορετικός καθορισμός του συντελεστή ποσοτικοποίησης της αποτελεσματικότητας του εκάστοτε αντίμετρου, ο οποίο κρίνεται ως ο πιο σημαντικός παράγοντας για την μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Επίσης σημαντική έρευνα μπορεί να αποτελέσει το γεγονός ότι η απομείωση του κινδύνου λόγω της ενεργοποίησης πολλών ενεργειών σε μια υποδομή δεν συνίσταται στο άθροισμα της αποτελεσματικότητας της κάθε ενέργειας, αν αυτή εφαρμοστεί μεμονωμένα. Ο ρυθμός απομείωσης του κινδύνου μειώνεται αναλογικά με το πόσα αντίμετρα ενεργοποιούνται, καθώς τα διαφορετικά αντίμετρα δύναται να έχουν συνδυαστική δράση. Άρα, η εμβάθυνση σε μια **ισοβαρώς σταθμισμένη**, ανάλογα με τον αριθμό των ενεργοποιήσιμων ενεργειών αποτελεσματικότητα, κρίνεται απαραίτητη και δύναται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην κατανομή των πόρων.

- Τέλος, το συγκεκριμένο πρόβλημα θα ήταν σκόπιμο να λυθεί και με δυναμικό προγραμματισμό, εκτός από γραμμικό προγραμματισμό με τον οποίο λύθηκε στην παρούσα έρευνα, ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών τύπων προγραμματισμού.

7. Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- Albright, S.C., Winston, W.L, and Zappe, C., Data Analysis & Decision Making with Microsoft Excel, Duxbury Press, USA, 1999.

- Belton V. and Stewart T.J., "Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach", Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2002.

- BETHUYNE, G. Optimal replacement under variable intensity of utilization and technological progress. The Engineering Economist, 1998

- Bosurgi G. and Trifiro F., "Pavement design and maintenance via genetic algorithms", 4th International SIIV Congress, Palermo, Italy, 2007.

- EILON, S., J. R. KING, AND D. E HUTCHINSON A Study in Equipment Replacement; Operational Research Society,1966

- Elhadidy, E. Elbeltagi, A. Ammar, Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms, 2014.

- F.Liu, K.Wang, Pavement performance-oriented network optimization system, Transportation Research Record 1524 86-93, 1996.

- Herabat P. and Tangphaisankum A., "Multi-Objective optimization model using constraint-based genetic algorithms for Thailand pavement management", Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp. 1137-1152, 2005.

- I. Benekos , D. Diamantidis, On risk assessment and risk acceptance of dangerous goods transportation through road tunnels in Greece, Safety Science 91,2017

- Jiang Y. and Sinha C., Dynamic Optimization Model for Bridge Management Systems, 1989.

- J. Mbwana, M. Turnquist, Optimization modeling for enhanced network-level pavement management system, Transportation Research Record 1524 76-85, 1996.

- J. Tack, E. Chou, Multiyear pavement repair scheduling optimization by preconstrained genetic algorithm, Transportation Research Record 1592 8-16, 1997.

- K.A. Abaza, S.A. Ashur, I. AI-Khatib, An integrated pavement management system with a markovian prediction model, Journal of Transportation Engineering, ASCE 130 24-33, 2004.
- K.Berdica. An introduction to road vulnerability: what has been,is done and should be done
- Lagaros N., D., Ph.D., M. ASCE; Kepaptsoglou K., Ph.D., M.ASCE; and Karlaftis M., G., Ph.d., M.ASCE, Fund Allocation for Civil Infrastructure Security Upgrade, Journal of Management in Engineering, 29:172-182, 2013.
- Karabakal, N., Lohmann, J. R., and Bean, J. C. Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints. Management Science, 1994
- Karlaftis Matthew G, Lagaros Nikos. (ed) (2010). *Operations Research and Optimization for engineers*. Symmetria Editions. Athens
- Michael J. Garvin & Charles Y. J. Cheah (2004) Valuation techniques for infrastructure investment decisions, Construction Management and Economics,
- Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network**,** Official Journal of the European Union,2004
- R. Chootiman, A. Chen, M. R. Horrocks, D. Bolling, A multi-year pavement maintenance program using a stochastic simulation-based genetic algorithm approach, 2005. Journal of Transport Policy 9, Sweden 2012
- Scheinberg T. and Anastasopoulos P., "Pavement preservation programming: a multi-year, multi-constraint optimization methology", TRB 89th Annual Meeting, 2010.
- Shantec Consulting Ing., Development and Implementation of Arizona Department of Transportation (ADOT) Pavement Management System (PMS)", Final report 494, Phoenix, Arizona, 2006.
- Y.Haimes and P.Jiang, Model Of Risk In Complex Interconnected Infrastructures, Journal infrastructure system, 2001
- V. Ravirala, D. Grivas, S. Arminio, R. Garrabrant, Goal-oriented optimization procedure for long-term highway investment planning, Transportation Research Record 1592 17-25, 1997.
- Wayne S. Ferguson, Daniel S. RooseveltRISK-BASED ASSET MANAGEMENT METHODOLOGY FOR HIGHWAY INFRASTRUCTURE SYSTEMS, February 2014, Virginia R12EN-Managing-Operational-Risks-Road-Operations-World-Road-Association
- Zanakis S., H., Mandakovic T., Gupta S., K., Sahay S. and Hong S., A Review of Program Evaluation and Fund Allocation Methods within the service and Government Sectors, Socio-Econ. Plann. Sci. Vol. 29, No. 1, pp.59-79, 1995.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Γεώργιος Α. Λεβεντάκης «Ασφάλεια Συστημάτων και Κρίσιμων Υποδομών Εφαρμογή σε Ετερογενή και Διασυνδεδεμένα Δίκτυα Μεταφορών» διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών συστημάτων, 2013.

- Γιαννής Γ., *Παράμετροι της στρατηγικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη των μεταφορών στην Ευρώπη και στην Ελλάδα*, Περιβάλλον και Δίκαιο, Τόμος 7ος, Τεύχος 24, 2003 σελ. 324-332.

- Δούμπος Μ., «ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ-Σημειώσεις Μαθήματος», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2007.

- Μητρόπουλος Π., Α., «Πολυκριτηριακή ανάλυση στη λήψη αποφάσεων για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων και την κατανομή πόρων»., διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων, 2007.

- Οικονόμου, Γ.Σ., και Γεωργίου, Α.Κ., Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων, Εκδόσεις Ευγ. Μπένου, Αθήνα, 1999.

Δικτυακοί Τόποι

- Ευρωπαική Στατιστική Υπηρεσία, www.eurostat.com

- https://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/infrastructure/tunnels_en

- http://www.serravalle.it/it/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΩΝ ΣΕ VISUAL BASIC FOR APPLICATION

```
Sub showlengths()
Application.ScreenUpdating = False
Dim oppSheet, brSheet, tunSheet
oppSheet = "CM Opportunities"
brSheet = "Road Bridge"
tunSheet = "Road Tunnel"
Dim i
For i = 21 To 85
Sheets(oppSheet).Cells(34, i - 17) = Sheets(brSheet).Cells(i, 4)
Next i
Dim j
For j = 21 To 30
Sheets(oppSheet).Cells(34, j + 48) = Sheets(tunSheet).Cells(j, 4)
Next j
End Sub


Sub siblirosiCMopp()
Dim oppSHeets
oppSHeets = "CM Opportunities"
Dim j
For j = 4 To 79
Sheets(oppSHeets).Cells(35, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 30.5)
Sheets(oppSHeets).Cells(36, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 30.5)
Sheets(oppSHeets).Cells(37, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) * 12 / 30.5)
Sheets(oppSHeets).Cells(38, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 600)
Sheets(oppSHeets).Cells(39, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 300)
Sheets(oppSHeets).Cells(51, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 300)
Sheets(oppSHeets).Cells(53, j) = (Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) / 200)
Sheets(oppSHeets).Cells(41, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(45, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(46, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(47, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(48, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(49, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(50, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(52, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(56, j) = 0
Sheets(oppSHeets).Cells(57, j) = 0
If Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) > 350 Then
Sheets(oppSHeets).Cells(44, j) = 1
Else
Sheets(oppSHeets).Cells(44, j) = 0
End If
```

```
If Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) > 350 Then
Sheets(oppSHeets).Cells(51, j) = 1
Else
Sheets(oppSHeets).Cells(51, j) = 0
End If
If Sheets(oppSHeets).Cells(34, j) > 1000 Then
Sheets(oppSHeets).Cells(60, j) = 1
Else
Sheets(oppSHeets).Cells(60, j) = 0
End If
Next j
End Sub
Sub COST()
Dim oppSheet, costSh, dictSh
oppSheet = "CM Opportunities"
costSh = "cost"
dictSh = "CM Dictionary"
Dim i, j
For i = 35 To 65
For j = 81 To 156
Sheets(costSh).Cells(i - 29, j - 77) = 0.837 * Sheets(oppSheet).Cells(i, j - 4) *
Sheets(dictSh).Cells (12, i - 31)
Next j
Next i
End Sub


Sub riskmacro()
Application.ScreenUpdating = False
'Names of relevant worksheets
Dim cmDict, riskSh
cmDict = "CM Dictionary"
riskSh = "Risk"
Dim i, j
Dim f
For i = 4 To 34
For j = 22 To 32
Dim ch, cm, cl
ch = 0
cm = 0
cl = 0
If Sheets(cmDict).Cells(j, i) = "H" Then
ch = ch + 1
ElseIf Sheets(cmDict).Cells(j, i) = "M" Then
cm = cm + 1
Else:
cl = cl + 1
End If
Next j
If ch > cm And ch > cl Then
```

```
f = "H"
ElseIf cm > ch And cm > cl Then
f = "M"
ElseIf cl > ch And cl > cm Then
f = "L"
End If
Sheets(riskSh).Cells(i + 2, 4) = f
Next i
'do the same for the tunnels
Dim i1, j1
Dim f1
For i1 = 4 To 34
For j1 = 33 To 43
Dim ch1, cm1, cl1
ch1 = 0
cm1 = 0
cl1 = 0
If Sheets(cmDict).Cells(j1, i1) = "H" Then
ch1 = ch1 + 1
ElseIf Sheets(cmDict).Cells(j1, i1) = "M" Then
cm1 = cm1 + 1
Else:
cl1 = cl1 + 1
End If
Next j1
If ch1 > cm1 And ch1 > cl1 Then
f1 = "H"
ElseIf cm1 > ch1 And cm1 > cl1 Then
f1 = "M"
ElseIf cl1 > ch1 And cl1 > cm1 Then
f1 = "L"
End If
Sheets(riskSh).Cells(i1 + 2, 69) = f1
Next i1
End Sub


Sub effectmacro()
Dim cmDict, riskSh, effSh
cmDict = "CM Dictionary"
riskSh = "Risk"
effSh = "effectiv"
Dim i, j
Dim eff
For i = 6 To 36
For j = 4 To 78
If Sheets(riskSh).Cells(i, j) = "L" Then
eff = 0.5
ElseIf Sheets(riskSh).Cells(i, j) = "M" Then
eff = 1
```

```
ElseIf Sheets(riskSh).Cells(i, j) = "H" Then
eff = 2
End If
Sheets(effSh).Cells(i, j) = eff
Next j
Next i
End Sub
```

```
Sub metakilisi()
Dim isheet
isheet = "isheet"
Dim i, j
For i = 47 To 77
For j = 4 To 79
If Sheets(isheet).Cells(i, j) <> 0 Then
Sheets(isheet).Cells(i, j) = 0
Cells(i, j).Interior.ColorIndex = 4
End If
Next j
Next i
Dim k, l
For k = 90 To 120
For l = 4 To 79
If Sheets(isheet).Cells(k, l) <> 0 Then
Sheets(isheet).Cells(k, l) = 0
Cells(k, l).Interior.ColorIndex = 4
End If
Next l
Next k
End Sub
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.- 3 -

ΣΧΗΜΑ 2 : ΕΤΗΣΙΟΣ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ. .....- 30 -

ΣΧΗΜΑ 3: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ CARTA.....- 33 -

ΣΧΗΜΑ 4:ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΠΕΙΛΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΓΙΑ ΠΟΛΥΤΡΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....- 34 -

ΣΧΗΜΑ 5:ΟΘΟΝΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΑΠΕΙΛΩΝ. .....- 37 -

ΣΧΗΜΑ 6:ΟΘΟΝΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΟΡΙΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ .....- 38 -

ΣΧΗΜΑ 7: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΟΘΟΝΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ.....- 38 -

ΣΧΗΜΑ 8: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΟΘΟΝΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ.....- 39 -

ΣΧΗΜΑ 9:ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ ΣΤΟΝ ΟΠΟΙΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΟΛΕΣ ΟΙ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΣΤΟΥΣ ΟΠΟΙΟΥΣ ΕΙΝΑΙ ΕΥΑΛΩΤΕΣ. .....- 39 -

ΣΧΗΜΑ 10: ΟΘΟΝΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΥΠΟΔΟΜΗ.....- 41 -

ΣΧΗΜΑ 11: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ 31 ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΔΥΝΑΤΑΙ ΝΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΘΕΙ ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ. .....- 42 -

ΣΧΗΜΑ 12:ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΚΑΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ. .....- 43 -

ΣΧΗΜΑ 13: ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΚΑΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ. .....- 44 -

ΣΧΗΜΑ 14: ΠΟΙΟΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΚΑΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ.....- 44 -

ΣΧΗΜΑ 15: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΗΣ «SHOWLENGTHS»- 49 -

ΣΧΗΜΑ 16:ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΝΤΙΜΕΤΡΟ ΣΤΗΝ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΥΠΟΔΟΜΗ. .....- 50 -

ΣΧΗΜΑ 17: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ CM DICTIONARY.....- 51 -

ΣΧΗΜΑ 18: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙ Η ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΗ RISKMACRO.- 52 -

ΣΧΗΜΑ 19: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙ Η ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΗ EFFECTMACRO. .....- 53 -

ΣΧΗΜΑ 20 : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ. .....- 55 -

ΣΧΗΜΑ 21: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΕΝΤΟΛΗΣ.....- 57 -

ΣΧΗΜΑ 22: ΠΡΟΣΘΗΚΗ OPEN SOLVER ΣΤΟ MICROSOFT EXCEL. .....- 59 -

ΣΧΗΜΑ 23: ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΛΟΓΟΥ ΤΟΥ OPEN SOLVER ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ. .....- 60 -

ΣΧΗΜΑ 24:ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΛΟΓΟΥ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ .....- 61 -

ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΜΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΠΩΣ ΣΤΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 25 : .....- 61 -

ΣΧΗΜΑ 26 :ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ I_TABLE ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ OPENSOLVER. .....- 63 -

ΣΧΗΜΑ 27 : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ EFFECT_TABLE ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ, ΟΠΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΤΟ OBJECTIVE CELL.....- 63 -

ΣΧΗΜΑ 28: ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΜΟΡΦΗΣ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ COST_TABLE, ΟΠΟΥ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ. .....- 63 -

ΣΧΗΜΑ 29 : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΠΙΝΑΚΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΟΠΟΥ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ. .....- 66 -

ΣΧΗΜΑ 30 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. .....- 69 -

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1:ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ ΚΑΤΑ ΑΥΞΟΥΣΑ ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ. .....- 11 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΡΦΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ .....- 15 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 3:ΕΙΔΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΥΦΛΗΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ .....- 21 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 4:ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ Α7. .....- 25 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 5:ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ Α50 .....- 26 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ Α51.....- 28 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ Α52.....- 28 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΤΗΣΙΑ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΤΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ Α7, Α50, Α51, Α52 .....- 29 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΠΙΘΑΝΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ/ΑΠΕΙΛΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ.....- 35 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....- 48 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΑΡΙΘΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ.....- 65 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΑΡΙΘΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 67 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ1,2 ΓΙΑ ΙΣΟΠΟΣΟ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΕΤΑΚΥΛΙΣΗ ΤΟΥ ΥΨΗΛΟΥ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ. .....- 70 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 3 ΓΙΑ ΥΨΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 70 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 4 ΓΙΑ ΥΨΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΥΞΗΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 71 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΜΕ ΥΨΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ. .....- 71 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ1,2 ΓΙΑ ΙΣΟΠΟΣΟ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΕΤΑΚΥΛΙΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ. .....- 72 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 3 ΓΙΑ ΜΕΣΑΙΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 72 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 4 ΓΙΑ ΜΕΣΑΙΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΥΞΗΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 73 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΜΕΣΑΙΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ. .....- 73 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 1 ΓΙΑ ΙΣΟΠΟΣΟ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....- 74 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 2 ΓΙΑ ΜΕΤΑΚΥΛΗΣΗ ΤΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....- 75 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 4 ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 75 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 4 ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΥΞΗΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 76 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ.....- 76 -

ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....- 79 -

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1:ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ. .....- 65 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2:ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ.....- 67 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΕΠΙΤΥΓΧΑΝΟΥΝ. .....- 80 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. .....- 80 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5:ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ. .....- 81 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΓΙΑ ΥΨΗΛΟ, ΜΕΣΑΙΟ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ.....- 82 -

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΓΙΑ ΥΨΗΛΟ, ΜΕΣΑΙΟ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟ. .....- 82 -