



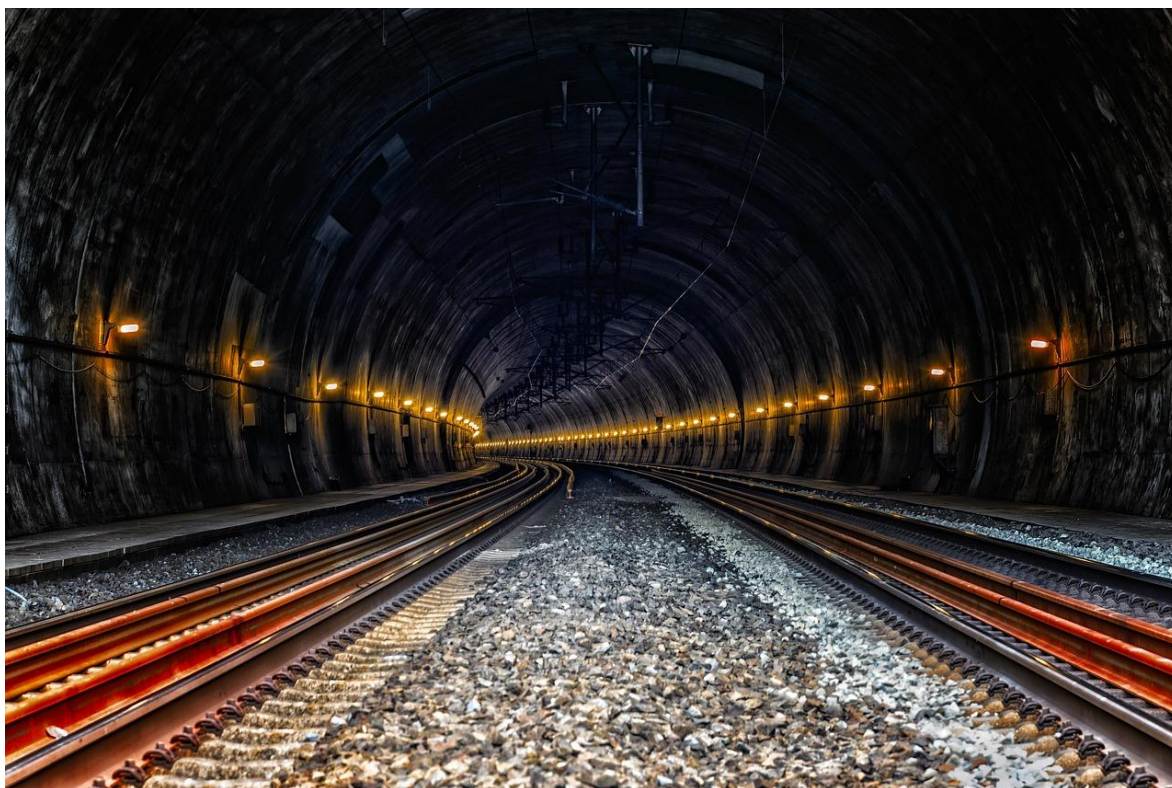
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΕΙΩΝ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ



ΓΚΟΝΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γκιτσιαλίτης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γκιοτσαλίτη Κωνσταντίνο, Επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη, την άριστη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που έδειξε ως προς το πρόσωπο μου, με την ανάθεση της εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον M.Sc. Νισύριο Εμμανουήλ, Ερευνητή-Υποψήφιο Διδάκτωρ, που μου παρείχε πολύτιμες συμβουλές, υποδείξεις και για το γενικότερο ενδιαφέρον του για την πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2023,

Γκόνου Νικολέττα,

ΕΜΠ

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο το βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης και συνεργείων μίας σιδηροδρομικής γραμμής. Κατά την διαμόρφωση του μοντέλου, βασικός στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους τόσο για τις εργασίες όσο και για τα πληρώματα εργασιών. Για να γίνει αυτό έπρεπε να πραγματοποιηθεί ένας βέλτιστος προγραμματισμός των ενεργειών συντήρησης για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή του δικτύου. Ο χρονικός ορίζοντας της προληπτικής συντήρησης αφορούσε πενήντα δύο εβδομάδες. Αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που βασίζεται στο πρόβλημα του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο σε λογισμικό βελτιστοποίησης GUROBI και έγιναν οι κατάλληλες επιλογές ώστε να προγραμματιστούν και συλλεχθούν τα απαραίτητα στοιχεία εξόδου που χρειάζονται. Έγινε σύγκριση του βασικού μοντέλου των Budai & Dekker (2004) με το διαμορφωμένο μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τα αποτελέσματα για τις εργασίες συντήρησης έδειξαν ότι οι παράμετροι του μοντέλου όσον αφορά τα ζεύγη εργασιών, την διάρκεια και την συχνότητα εργασιών τους, παίζουν βασικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Να αναφερθεί ότι η ένταξη βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης οδηγεί σε σημαντική ελαχιστοποίηση του κόστους αφού μειώνεται ο χρόνος κατοχής της γραμμής ομαδοποιώντας διάφορες εργασίες αλλά και βελτιώνει την διαχείριση των εργασιών από τα πληρώματα εργασιών. Τέλος, ένα επιπλέον θετικό στοιχείο είναι ότι οι φορείς εκμετάλλευσης βρίσκονται σε ετοιμότητα για τις προβλεπόμενες εργασίες ώστε να εγγυάται η καλύτερη λειτουργία του σιδηροδρόμου.

Λέξεις κλειδιά: Βελτιστοποίηση, προγραμματισμός συντήρησης σιδηροδρομική γραμμή, καθυστερήσεις, ελαχιστοποίηση κόστους

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη και η διερεύνηση σχετικά με την συντήρηση της γραμμής των τρένων, προβληματίζει αρκετά ως θέμα διότι πρέπει να παρέχεται η ασφάλεια, η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία των σιδηροδρομικών δικτύων. Η γραμμή των τρένων είναι θεμέλιος λίθος για τη λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος και η διατήρηση της σε καλή κατάσταση είναι απαραίτητη για την ασφαλή και ομαλή κίνηση των τρένων. Για το λόγο αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο το βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης και των συνεργείων. Η διαμόρφωση του μοντέλου στηρίχθηκε, αρχικά, στο να βρεθεί ένας αποδοτικός τρόπος για τον καταμερισμό των εργασιών συντήρησης, υπακούοντας περιορισμούς, ομαδοποιώντας διάφορες εργασίες και ελαχιστοποιώντας το κόστος. Ένα δεύτερο βήμα ήταν ο βέλτιστος προγραμματισμός των συνεργείων, με σκοπό την ένταξη διαφορετικών πληρωμάτων εργασίας, για την εκτέλεση των ήδη ορισμένων εργασιών καταμερίζοντας τον εργασιακό φόρτο. Έτσι αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης γραμμικού δυαδικού προγραμματισμού, δημιουργώντας τα απαραίτητα στοιχεία και εφαρμόζοντας ένα αριθμητικό παράδειγμα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλες παραδοχές, ώστε να προγραμματιστεί μια σειρά εργασιών και πληρωμάτων εργασιών για να υλοποιηθούν στην διάρκεια ενός χρόνου, χωρισμένο σε εβδομάδες και σε διάφορους συνδέσμους. Για την εφαρμογή, εκτελέστηκε το αριθμητικό παράδειγμα σε λογισμικό βελτιστοποίησης GUROBI. Έπειτα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του διαμορφωμένου μοντέλου με του βασικού μοντέλου Budai & Dekker (2004), που ασχολήθηκε η διπλωματική εργασία, και φάνηκε ότι όταν ομαδοποιούνται εργασίες μαζί, υπακούοντας τις προϋποθέσεις που ορίστηκαν τότε μειώνεται το συνολικό κόστος για τις εργασίες, αφού μειώνεται και ο χρόνος κατοχής της γραμμής για συντήρηση σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επίσης, στα πληρώματα εργασίας μοιράζεται ο εργασιακός φόρτος και καλύπτονται όλες οι απαραίτητες εργασίες από αυτά. Τέλος, ενδιαφέρον σημείο για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να είναι η διερεύνηση των ορίων του προβλήματος, ώστε να φανούν τα περιθώρια επίλυσής του σε εύλογο χρόνο.

ABSTRACT

The development and exploration regarding train line maintenance raises significant concerns since ensuring safety, efficiency, and reliability of railway networks is essential. The train line serves as a cornerstone for the operation of the railway system and its maintenance in a good condition is necessary for the safe and smooth movement of trains. Therefore, this thesis focusing on optimizing maintenance work and crews. Initially, the configuration of the model aimed to find an efficient way to allocate maintenance tasks, adhering to constraints, grouping various tasks, and minimizing costs. The second step involved optimizing crew scheduling by integrating different work crews to execute the predefined tasks, thereby distributing the workload effectively. For this reason, a mathematical model for linear binary programming optimization was developed, creating the necessary elements, and applying a numerical example while using suitable assumptions to schedule a series of tasks and work crews over a designated timeframe divided into weeks and different shifts. The numerical example was implemented using the GUROBI optimization software. Subsequently, the results of the configured model were compared with those of the basic model addressed in the dissertation, demonstrating that grouping tasks together, according to the defined conditions, reduces the overall cost of the tasks by minimizing the time required for maintenance during different time periods. Additionally, workload distribution among the work crews ensures that all necessary tasks are covered. Finally, an interesting area for further research could be exploring the boundaries of the problem to identify feasible solution spaces within a reasonable timeframe.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο	1
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	5
1.3 Δομή Διπλωματικής εργασίας	6
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
2.1 Εισαγωγή στην Βελτιστοποίηση	7
2.2 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικής γραμμής	8
2.3 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης για ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην κυκλοφορία	12
2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας	17
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	19
3.1 Περιγραφή προβλήματος	19
3.2 Βασικό Μοντέλο	20
3.3 Διαμόρφωση προτεινόμενου μοντέλου	26
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
4.1 Αριθμητικό παράδειγμα	31
4.2 Αποτελέσματα αριθμητικού παραδείγματος	35
4.3 Συγκριτική αξιολόγηση εφαρμογής μοντέλων	43
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	45
5.1 Σύνοψη	45
5.2 Βασικά συμπεράσματα	45
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	46
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1: Χρόνος κατοχής ανά δραστηριότητα συντήρησης και ορίζοντας προγραμματισμού Liden (2014)	3
Πίνακας 1-2: Σύνοψη κριτηρίων εκτίμησης φθοράς βάση του ΟΣΕ και Γερμανικών σιδηροδρόμων Λυμπέρης (2011)	5
Πίνακας 2-1 Βασικά στοιχεία βιβλιογραφίας.....	13
Πίνακας 4-1 Συχνότητα εργασιών ρουτίνας.....	32
Πίνακας 4-2 Χρονικός ορίζοντας εργασιών ρουτίνας.....	32
Πίνακας 4-3 Δήλωση μεγάλων εργασιών.....	33
Πίνακας 4-4 Νωρίτερα/αργότερα που ξεκινά μία εργασία.....	33
Πίνακας 4-5 Διάρκεια εργασιών με επιλογή Κ	33
Πίνακας 4-6 Κόστος ακύρωσης δρομολογίων	34
Πίνακας 4-7 Κόστος αναποτελεσματικής χρήσης πόρων	34
Πίνακας 4-8 Ζεύγη εργασιών συνδυασμών ρουτίνας	34
Πίνακας 4-9 Προγραμματισμένες εργασίες	35
Πίνακας 4-10 Πλήρωμα εργασίας 1	37
Πίνακας 4-11 Πλήρωμα εργασίας 2	38
Πίνακας 4-12 Πλήρωμα εργασίας 3	39
Πίνακας 4-13 Πλήρωμα εργασίας 4	40
Πίνακας 4-14 Πλήρωμα εργασίας 5	41
Πίνακας 4-15 Αντιστοιχία εργασιών και πληρωμάτων	42
Πίνακας 4-16 Εργασίες συντήρησης χωρίς τα πληρώματα εργασιών.....	44

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 3-1 Σιδηροδρομικό δίκτυο Ολλανδίας	19
Σχήμα 3-2 Railway operations, time-tabling and control	20

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας για μια κοινωνία, αφού επηρεάζουν τόσο την εξυπηρέτηση των πολιτών καθημερινά, όσο και στην οικονομία. Ο σιδηροδρομικός κλάδος καθίσταται από τα πιο ασφαλή και φιλικά προς το περιβάλλον μέσα μεταφοράς, αποτελούμενο κυρίως από εμπορευματικές και επιβατικές κινήσεις. Το παγκόσμιο σιδηροδρομικό δίκτυο εκτείνεται σε πάνω από 1,3 εκατομμύρια χιλιόμετρα διαδρομής παγκοσμίως, με τις Ηνωμένες Πολιτείες να λειτουργούν το μακρύτερο σιδηροδρομικό δίκτυο στον κόσμο, ενώ η Ιαπωνία κρίθηκε ως η χώρα με την υψηλότερη ποιότητα υποδομών για σιδηροδρόμους το 2019 (Erick Burgueno Salas 2022- Rail industry worldwide Statista). Βάση στατιστικών από το 2015 έως και το 2019 η ζήτηση για τις σιδηροδρομικές επιβατικές μεταφορές έχει αυξηθεί σημαντικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Eurostat, 2020). Για παράδειγμα το 2016 η Γερμανία είχε τον μεγαλύτερο αριθμό σιδηροδρομικών μεταφορών υπολογισμένο σε περίπου 2.8 δις επιβάτες (Statistical Office of the European Communities). Επίσης, αναφέρεται ότι η Rail freight Forward, όπου εκπροσωπεί το 90% της Ευρώπης στις σιδηροδρομικές εμπορευματικές μεταφορές, στοχεύει να αυξήσει το ποσοστό χρήσης σιδηροδρομικών μεταφορών από 18% σε 30% έως το 2030. Με αυτή την αύξηση θα μπορέσουν να μειωθούν οι εκπομπές CO₂, κατά προσέγγιση 25 εκ. τόνους (CER & Rail freight forward, 2020). Ωστόσο, οι σημερινές ανάγκες απαιτούν από τη σιδηροδρομική βιομηχανία αυξημένη χωρητικότητα, ύπαρξη περισσότερων αμαξοστοιχιών με μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερα φορτία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιδείνωση της σιδηροδρομικής υποδομής και το υψηλό κόστος συντήρησης της. Οι Ευρωπαϊκές χώρες διαθέτουν 15-25 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως για τη συντήρηση και τις ανανεώσεις για ένα σιδηροδρομικό σύστημα (EIM-EFRTC-CER Working Group, 2012).

Η σιδηροδρομική υποδομή πρέπει να παρέχει αξιόπιστες συνθήκες, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες διαταραχές στη λειτουργία των επιβατικών κινήσεων αλλά και των εμπορευματικών μεταφορών. Έτσι στόχος της συντήρησης μιας σιδηροδρομικής γραμμής είναι η εξασφάλιση υψηλών προτύπων ασφάλειας και λειτουργίας της σε

καθημερινή βάση, προγραμματίζοντάς την με βέλτιστο τρόπο τόσο χρονικά όσο και οικονομικά. Η κρισιμότητα της συντήρησης μπορεί να διαπιστωθεί και σε οικονομικό παράγοντα από το γεγονός ότι το 2016 οι δαπάνες των σιδηροδρομικών δικτύων στην Ευρώπη ξεπέρασαν τα 25 δισεκατομμύρια ευρώ, σε σύγκριση με το 2011 όπου είχαν δαπανηθεί 20 δισεκατομμύρια ευρώ. Παρά την αισθητή αύξηση του κόστους οι προϋπολογισμοί για τη συντήρηση των σιδηροδρόμων είναι πεισμένοι και οι φορείς εκμετάλλευσης υποδομών σε ολόκληρη την ήπειρο αναζητούν τρόπους να κάνουν περισσότερα με λιγότερα, καθώς και να αποκτήσουν τον έλεγχο του κόστους συντήρησης Clemens Kienzler et al. (2020)

Πιο συγκεκριμένα, η συντήρηση περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες: την επιθεώρηση με την οποία διαπιστώνεται και αξιολογείται η πραγματική κατάσταση της επιδομής και την αποκατάσταση των ήδη διαπιστωμένων σφαλμάτων. Οι εργασίες επιθεώρησης διακρίνονται σε τακτικές, οι οποίες επαναλαμβάνονται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, σε έκτακτες όπου πραγματοποιείται η πρόληψη από ενδεχόμενο συμβάν ή κατά την παρατήρηση μηχανοδηγών κατά την οδήγηση, και σε ειδικές οι οποίες πραγματοποιούνται σε σημεία όπου ενδέχεται να υπάρχουν ιδιαίτεροι κίνδυνοι όπως κατολισθήσεις. Όσον αφορά τη συχνότητα δύο διαδοχικών τακτικών επιθεωρήσεων, το χρονικό διάστημα είναι προκαθορισμένο. Αντίστοιχα και οι εργασίες της αποκατάστασης μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Επομένως, μια από τις εργασίες αφορά την συντήρηση υλικών, (π.χ. αντικατάσταση στρωτήρων, σιδηροτροχιών, σύσφιξη συνδέσμων). Επίσης, οι εργασίες διατήρησης της γεωμετρίας οι οποίες αφορούν την ανύψωση της γραμμής ή/και αναχάραξη ερυθράς είναι εξίσου σημαντικές. Τέλος, η τρίτη κατηγορία είναι οι εργασίες τρέχουσας συντήρησης, (π.χ. υψομετρική και οριζοντιογραφική τακτοποίηση της γραμμής, λίπανση γλίστρων αλλαγών τροχιάς). Με βάση τις δραστηριότητες της συντήρησης να αναφερθεί ότι οι Martins Ribeiro et al. (2011) ασχολήθηκαν με την προληπτική συντήρηση σιδηροδρομικών γραμμών με έρμα για τις εργασίες συμπίεσης. Ένα χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι επιτρέπει τις ενέργειες συντήρησης να αναλυθούν με την πάροδο του χρόνου, δείχνοντας ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος ανάλυσης τόσο καλύτερος μπορεί να είναι ο προγραμματισμός συντήρησης. Επίσης ο Lidén (2014), κατηγοριοποίησε διάφορες δραστηριότητες συντήρησης σε σύγκριση με τον απαιτούμενο χρόνο κατοχής ανά

βάρδια εργασίας, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό αφού τα χρονικά πλαίσια παίζουν κυρίαρχο ρόλο σε έναν προγραμματισμό συντήρησης ώστε να αποκατασταθεί η υποδομή εντός των προβλεπόμενων ορίων Πίνακας 1-1.

Πίνακας 1-1: Χρόνος κατοχής ανά δραστηριότητα συντήρησης και ορίζοντα προγραμματισμού (Liden 2014)

Possession time	Activity	Planning horizon
>8 hours	Catenary wire replacements	2-3 years /urgent
	Track/turnout replacement	2-3 years
	Tamping of tracks	1-2 years / 1 month
	Grinding	1-2 years
4-8 hours	Switch replacement	1-2 years
	Catenary inspection and maintenance	2-3 years
1-4 hours	Tamping of turnouts	1-2 years / 1 month
	Ultra-sonic testing	1-2 years
	Fasteners, joints, rail repair, etc.	1-2 months
0-1 hours	Inspection	1 year
	Grinding	1 year
	Signal repair, vegetation, etc.	0-2 months
1 hour- X days	Slippery rail, snow removal	0-2 months
	Accidents, urgent repair	1 year / 0-1 week

Ωστόσο, ο Lidén (2015) αναφέρει ότι υπάρχει μία σύγκρουση στην σιδηροδρομική υποδομή ως προς τον τρόπο διαχείρισης κυκλοφορίας των τρένων με τις δραστηριότητες συντήρησης καθώς, είναι κρίσιμη σε δίκτυα με υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας. Το ένα εξαρτάται από το άλλο και πολλές φορές η συντήρηση προγραμματίζεται σε περιόδους όπου δεν κυκλοφορεί κάποιο δρομολόγιο τρένου η προγραμματίζεται σε νυχτερινές ώρες, όπου δεν επηρεάζει τόσο τις επιβατικές κινήσεις. Βέβαια οι Dao et al. (2018) ασχολούνται και αναφέρουν ότι ο σχεδιασμός μιας μεγάλης και σημαντικής συντήρησης όπως και οι διαδικασίες ανανέωσης χρειάζονται περισσότερο χρόνο να εκτελεστούν. Έτσι είναι και πιο περίπλοκες καθώς εμπλέκονται περισσότεροι φορείς, δηλαδή ο διαχειριστής σιδηροδρομικής υποδομής, η εταιρεία εκμετάλλευσης τρένων, ο έλεγχος κυκλοφορίας και οι εργολάβοι συντήρησης. Ο Vansteenwegen et al. (2016) από την άλλη παρουσίασε έναν αλγόριθμο ο οποίος μπορούσε να προσαρμόσει τη διαδρομή και το χρονοδιάγραμμα του τρένου στις προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης, έτσι ώστε να διατηρηθεί το επίπεδο εξυπηρέτησης των επιβατών όσο το δυνατόν υψηλότερο. Ο αλγόριθμος είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του αριθμού ακυρώσεων δρομολογίων, καθώς τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτρέποντας μικρές τροποποιήσεις, λίγα δρομολόγια τρένων χρειαζόταν να ακυρωθούν.

Να σημειωθεί ότι η συχνότητα των ενεργειών που πρέπει να παρθούν στη συντήρηση επιθεώρησης και της αποκατάστασης, είτε είναι προκαθορισμένη, είτε όχι, εξαρτάται από ένα εύρος παραγόντων, με πιο κρίσιμους τον όγκο κυκλοφορίας του τρένου, την ταχύτητα και το βάρος. Επομένως όταν παρατηρηθεί υπέρβαση των οριακών τιμών επιδείνωσης της σιδηροδρομικής γραμμής, θα πρέπει να διορθωθεί άμεσα ή να επιβληθεί βραδυπορία ανάλογα με τον βαθμό φθοράς αυτών των σφαλμάτων, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο. Μία προσέγγιση για να εκτιμηθεί ο βαθμός φθοράς και το περιθώριο φθοράς του υλικού, είναι η σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με τα κριτήρια εκτίμησης. Λυμπέρης (2011) - Πίνακας 1-2.

Πίνακας 1-2: Σύνοψη κριτηρίων εκτίμησης φθοράς βάση του ΟΣΕ και Γερμανικών σιδηροδρόμων Λυμπέρης (2011)

Κριτήριο Εκτίμησης	Περιγραφή
ΚΕ 1	Οριακή τιμή παραλαβής, μετράτε μετά από νέα κατασκευή ή συντήρησης γραμμής
ΚΕ 2	Υπέρβαση τιμής που απαιτεί απόφαση με βάση τα οικονομικά κριτήρια για τον προγραμματισμό επιδιόρθωσης
ΚΕ 3	Η τιμή που περιγράφει τα τεχνικά και οικονομικά αποδεκτά περιθώρια φθοράς, αν γίνει υπέρβαση τότε απαιτείται επίσπευση επιδιόρθωσης
ΚΕ 4	Υπέρβαση τιμής σημαίνει περιορισμός λειτουργικότητας και απαιτείται επιδιόρθωση άμεσα
Οριακή Τιμή	Η υπέρβαση τιμής δημιουργεί επιτακτική ανάγκη για διακοπή κυκλοφορίας και άμεση επιδιόρθωση

1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση προγραμματισμού εργασιών συντήρησης και συνεργείων σε χρονικό ορίζοντα ενός έτους. Επίσης, λαμβάνεται υπόψιν και ελαχιστοποιείται το κόστος τους. Ερευνάται ο βέλτιστος τρόπος στον καταμερισμό αυτών των εργασιών, αλλά και ο φόρτος εργασίας για τα συνεργεία ώστε, η υποδομή να παρέχει τις καλύτερες συνθήκες αλλά και να μειωθούν οι επιβαρύνσεις στις καθυστερήσεις για τους φορείς εκμετάλλευσης. Για το λόγο αυτό δημιουργείται ένα μαθηματικό γραμμικό μοντέλο, στο οποίο υπάρχουν προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται και να εφαρμόζονται για την λειτουργία του σκοπού αυτού. Αυτό σημαίνει ότι ορίζονται συγκεκριμένες εργασίες και χρονικές διάρκειες με περιορισμούς στις συχνότητες και τον χρόνο έναρξής τους. Επιπρόσθετα, πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμα συνεργεία για την εκτέλεση των εργασιών που έχουν οριστεί και να καταμεριστούν βέλτιστα. Σημαντικό ρόλο για την αξιολόγηση και την ερμηνεία διαφόρων δεδομένων που σχετίζονται με το μαθηματικό μοντέλο που

δημιουργήθηκε ήταν η ένταξη πινάκων ως στοιχεία εξόδου αποτελεσμάτων για τις συνολικές εργασίες εντός χρονικού ορίζοντα ενός χρόνου και των πληρωμάτων εργασίας. Με αυτό τον τρόπο μπορούσε να υπάρχει μια πλήρης εποπτεία των όσων έπρεπε να εφαρμοστούν για την λειτουργικότητα του μοντέλου.

1.3 Δομή Διπλωματικής εργασίας

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, μπορεί να διαπιστωθεί η σημαντικότητα και η αναγκαιότητα της συντήρησης της σιδηροδρομικής γραμμής. Σε συνέχεια αυτού, τα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας είναι πέντε και διαμορφώνονται ως εξής:

- Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εκεί παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης προγραμματισμού συντήρησης για την κατανομή των εργασιών και των πληρωμάτων, η ελαχιστοποίηση του κόστους αυτών, αλλά και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων των υπηρεσιών των τρένων και τα διαθέσιμα χρονικά παράθυρα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφή του προβλήματος και η επιλεγείσα μεθοδολογία, η βάση του μοντέλου, οι προϋποθέσεις εφαρμογής του και οι διαμορφώσεις που έχουν γίνει.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η περιγραφή ενός αριθμητικού παραδείγματος για το μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του. Επίσης, επισημαίνονται τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό της συντήρησης.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της Διπλωματικής εργασίας και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή στην Βελτιστοποίηση

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο ως θεωρητικό υπόβαθρο συμπεριλαμβάνονται βασικές πληροφορίες για τα προβλήματα βελτιστοποίησης από το βιβλίο με τίτλο <<Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς>> με συγγραφείς τους Μ.Γ Καρλαύτη και Ν.Δ Λαγαρό (2010). Η πρόοδος της τεχνολογίας των υπολογιστών μεγαλώνει όλο και πιο πολύ με την πάροδο του χρόνου, δημιουργώντας όλο και περισσότερες απαιτήσεις για τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος. Με τον όρο σύστημα εννοείται, η χρήση του για την κάθε περίπτωση κατάλληλου μαθηματικού προτύπου στην οποία σημαντικές σχέσεις μεταξύ των πραγματικών χαρακτηριστικών έχουν αντικατασταθεί με αντίστοιχες σχέσεις μεταξύ μαθηματικών στοιχείων. Βασική προϋπόθεση του συστήματος είναι να σχεδιαστεί με τον βέλτιστο τρόπο εννοώντας, να ικανοποιεί τις λειτουργικές προδιαγραφές, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένα κριτήρια. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές οι οποίες ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού, ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Επίσης, απαραίτητοι είναι οι περιορισμοί οι οποίοι καθορίζουν το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού αλλά και άλλες συναρτήσεις περιορισμού οι οποίες καθορίζουν τον χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα οι περιορισμοί αποτελούν φυσικά όρια για την ολοκλήρωση του στόχου. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης για παράδειγμα γραμμικός προγραμματισμός, μη-γραμμικός προγραμματισμός, ακέραιος προγραμματισμός, γεωμετρικός σχεδιασμός και δυναμικός προγραμματισμός. Βέβαια εκτός από τις μαθηματικές μεθόδους βελτιστοποίησης υπάρχουν και οι μεταερευνητικές μέθοδοι όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, η μέθοδος προσομοίωσης απόπτησης και η στρατηγική εξέλιξη. Για τις συγκεκριμένες μεθόδους, η προσέγγισή τους αποδεικνύεται αποτελεσματική σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων.

2.2 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικής γραμμής

Ένα βασικό ερώτημα είναι πότε πρέπει να πραγματοποιηθεί η συντήρηση, ώστε να μην υπάρχει διακοπή από και προς τα προγραμματισμένα δρομολόγια των τρένων και πως ο χρόνος κατοχής υποδομής για συντήρηση ελαχιστοποιείται, καθώς και το κόστος της συντήρησης να είναι το χαμηλότερο δυνατό. Με αναφορά αυτό παραθέτουμε μια πιο λεπτομερή επισκόπηση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό συντήρησης σιδηροδρομικής γραμμής. Η μελέτη του Higgins (1998) θέτει τη σύγκρουση μεταξύ του προγραμματισμού εργασιών συντήρησης και την ανάθεσή τους σε συνεργεία σε ένα δεδομένο πρόγραμμα κυκλοφορίας τρένων. Στόχος είναι η καλύτερη κατανομή των δραστηριοτήτων συντήρησης και πληρώματος, για την ελαχιστοποίηση της διακοπής των προγραμματισμένων δρομολογίων και τη μείωση ολοκλήρωσης τους. Η προσέγγιση του Higgins (1998) ήταν μια ευρετική αναζήτηση ταμπού για την αλλαγή σειράς των εργασιών και των συνεργείων συντήρησης. Το μοντέλο έχει συγκεκριμένους περιορισμούς οι οποίοι αφορούν τον διαθέσιμο προϋπολογισμό, την προτεραιότητα της δραστηριότητας συντήρησης, τη διαθεσιμότητα της γραμμής και τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού μεταξύ των γραμμών σύνδεσης.

Οι Cheung et al. (1999) ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση κατανομής των πόρων για την εκτέλεση των εργασιών. Χρησιμοποίησαν την γλώσσα περιορισμού CHIP για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων κατανομής πόρων. Το πρόβλημα είχε ως στόχο να αντιστοιχίσει τις σιδηροδρομικές γραμμές σε ένα δεδομένο σύνολο προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης, σύμφωνα με κάποιους περιορισμούς. Όσον αφορά τους περιορισμούς ως παράδειγμα του συγκεκριμένου μοντέλου, ένας αφορούσε τους πόρους και έπρεπε να διασφαλιστεί ότι οι πόροι έπρεπε να παραμείνουν εντός του διαθέσιμου ορίου. Επίσης, ένας στόχος τους ήταν η δημιουργία ενός πλαισίου που μεγιστοποιεί τα αιτήματα εργασιών βάση της υψηλότερης προτεραιότητας.

Μία άλλη προσέγγιση, από τους Budai & Dekker (2004), αναφέρεται στην προληπτική συντήρηση ερευνώντας τα βέλτιστα διαστήματα κατοχής της γραμμής για εκτέλεση εργασιών. Χρησιμοποίησαν κυρίως περιόδους χωρίς τρένα καταλήγοντας σε 33% μείωση της κατοχής της γραμμής και του κόστους, συνδυάζοντας εργασίες ρουτίνας. Επίσης οι Budai et al. (2004) έδωσαν έμφαση στην ομαδοποίηση μικρών εργασιών

ρουτίνας και μεγαλύτερων έργων μαζί προγραμματίζοντας αυτά σε μια συγκεκριμένη περίοδο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος συντήρησης, χωρίς να επιβαρυνθεί η κυκλοφορία του τρένου. Χρησιμοποιήθηκε διατύπωση μαθηματικού προγραμματισμού αλλά και ευρετικών λύσεων, καθώς είναι ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα. Σε αντίθεση με ότι αναφέρθηκε προηγουμένως οι Peng & Ouyang (2012) μελέτησαν τον προγραμματισμό μιας ομάδας συντήρησης όπου διάφορες εργασίες συντήρησης πρόκειται να προγραμματιστούν σε σύνολο ομάδων συντήρησης. Ένας από τους περιορισμούς αφορούσε την κατεύθυνση που ακολουθεί η ομάδα συντήρησης κατά την εκτέλεση ενός έργου, δηλαδή από το ένα έργο στο επόμενο. Επίσης, ως περιορισμός ορίστηκε ότι κάθε έργο μπορεί να εκτελείται ακριβώς μία φορά από ένα συνεργείο.

Επίσης οι Heinicke et al. (2015) επιχείρησαν μια τελείως διαφορετική προσέγγιση, όπου οι εργασίες συντήρησης επιβαρύνονται με ποινές σε κόστος μέχρι να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία. Όσο πιο αργός είναι ο χρόνος εκτέλεσης της εργασίας, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος ποινής. Επίσης, το είδος του προβλήματος επισημαίνεται ως δρομολόγηση οχημάτων (VRP), αναπτύσσοντας και συγκρίνοντας αυτό με διαφορετικά γραμμικά μοντέλα μικτού προγραμματισμού και κόστη πελατών αναφορικά με το χρόνο εκτέλεση τους. Να επισημανθεί ότι, το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων στην παρούσα διπλωματική σε αντίθεση με τα κοινά (VRP), ελαχιστοποιεί το άθροισμα των εξόδων ταξιδιού και του κόστους των πελατών που εξαρτώνται από το χρόνο.

Οι Van Zante-De Fokkert et al. (2007) έφτιαξαν ένα μοντέλο όπου κάθε τμήμα της υποδομής διατίθεται για συντήρηση τουλάχιστον μία φορά στις τέσσερις εβδομάδες. Ο κύριος στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης. Όρισαν πλέγμα μονής τροχιάς (STG) , δηλαδή ένα σύστημα διαχείρισης της κίνησης σε σιδηροδρομικές γραμμές που αποτελούνται από μία μόνο τροχιά. Σε αυτό το σύστημα διαχώρισαν τη σιδηροδρομική γραμμή σε ζώνες εργασίας μεταξύ των σταθμών με κάθε ζώνη εργασίας να ορίζει ένα τμήμα της γραμμής όπου μπορούν να εκτελούνται εργασίες συντήρησης και να τεθεί εκτός λειτουργίας για την κίνηση των τρένων. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed-Integer Programming- MIP) για να

οριστούν τα πλέγματα μονής τροχιάς σε νύχτες για να δημιουργηθεί το πρόγραμμα συντήρησης.

Μία ακόμη μελέτη για την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης ήταν από τους Lake et al. (2000), οι οποίοι μοντελοποίησαν τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό εργασιών συντήρησης τροχιάς σε ένα ήδη δεδομένο πρόγραμμα δρομολογίων και συντήρησης. Το μοντέλο εκτός από τις εργασίες, συμπεριλαμβάνει την ανάθεση των εργασιών στα συνεργεία συντήρησης. Υπάρχει η δυνατότητα διαφορετικών πληρωμάτων να ασχολούνται με την ίδια δραστηριότητα συντήρησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το μοντέλο ακολούθησε ευρετική λύση δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο δημιουργούσε μια εφικτή λύση, ενώ το δεύτερο στάδιο την υλοποιούσε μέσω προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing). Σχετικά με τα συνεργεία και την ασφάλεια των εργαζομένων θα ήταν σημαντικό να αναφερθεί η έρευνα των Den Hertog et al. (2005), όπου μελετήθηκε ο διαχωρισμός της σιδηροδρομικής υποδομής σε ζώνες εργασίας. Η συγκεκριμένη ζώνη συντήρησης θα έπρεπε να τεθεί εκτός λειτουργίας, με στόχο όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες να είναι ικανοποιημένοι. Στην έρευνα του άρθρου χρησιμοποιούνται κανόνες διαίρεσης που αναπτύχθηκαν στο δίκτυο της Ολλανδίας.

Οι Andrade & Fonseca Teixeira (2011) στην έρευνα τους έθεσαν δύο στόχους, το κόστος συντήρησης και τις καθυστερήσεις των τρένων. Επικεντρώθηκαν στο μοντέλο φθοράς και αποφάσιζαν εάν θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί η συντήρηση ή όχι. Χρησιμοποίησαν μια προσομοίωση βελτιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις (στόχους) απόπτωσης για την επίλυση του προβλήματος.

Σε πιο πρόσφατες έρευνες, οι Su et al. (2019), ανέπτυξαν έναν ελεγκτή πρόβλεψης μοντέλου (Model Predictive Control-MPC). Σε υψηλά επίπεδα καθορίζει το μακροπρόθεσμο σχέδιο συντήρησης ανά τμήμα και ελαχιστοποιεί το κόστος συντήρησης και την επιδείνωση της υποδομής για ένα πεπερασμένο χρόνο σχεδιασμού, διασφαλίζοντας το επίπεδο φθοράς κάθε τμήματος να παραμείνει πάνω από το όριο συντήρησης. Σε χαμηλότερο επίπεδο, οι βραχυπρόθεσμες εργασίες συντήρησης που πρότεινε ο ελεγκτής υψηλού επιπέδου και η βέλτιστη δρομολόγηση του αντίστοιχου συνεργείου συντήρησης διαμορφώθηκε ως πρόβλημα δρομολόγησης χωρητικότητας τόξου.

Οι Nijland et al. (2021) ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για το χρονοδιάγραμμα συντήρησης για τους φορείς εκμετάλλευσης αμαξοστοιχιών αλλά και για τα συνεργεία συντήρησης. Επίσης διαχώρισαν σε κατηγορίες τους τομείς μηχανικής συντήρησης, καθώς είναι εμπόδια για την κυκλοφορία των τρένων και την διαχείριση της συντήρησης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, είναι ένα μοντέλο νέου γραμμικού προγραμματισμού μεικτού ακέραιο προγραμματισμού (MILP). Επίσης, αξιολόγησαν το υπολογιστικό κόστος, χρησιμοποιώντας ακριβείς (branch-and-bound) ή μεταερευτικές λύσεις, για την επίλυση δικτύων σε έως και 25 ζώνες εργασίας.

Επίσης οι Oudshoorn et al. (2022) προσάρμοσαν ένα πραγματικό πρόβλημα προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικών μεταφορών για περίοδο ενός χρόνου προληπτικής συντήρησης. Ανέπτυξαν και συνέκριναν τρεις γενικές προσεγγίσεις, τη στρατηγική εξέλιξη, την άπληστη μεταερευτική, και τον συνδυασμό αυτών των δύο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα που παρέχει ένα χρονοδιάγραμμα υψηλής ποιότητας είναι ο συνδυασμός της στρατηγικής και της άπληστης μεταερευτικής προσέγγισης.

Οι Buurman et al. (2023) ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος συντήρησης για τους φορείς εκμετάλλευσης αμαξοστοιχιών αλλά και για τους εργολάβους συντήρησης με ευελιξία και των δύο. Οι κύριοι παράγοντες για την διευκόλυνση των εμποδίων ήταν η παράκαμψη, ο επαναπρογραμματισμός των αμαξοστοιχιών και η μετεγκατάσταση σταθμευμένων αποθεμάτων. Η διπλωματική τους ερεύνησε τη δημιουργία εβδομαδιαίου επαναλαμβανόμενου προγράμματος προληπτικής συντήρησης, κατά τη διάρκεια της νύχτας ώστε να αποφευχθούν όσο το δυνατόν μεγάλες καθυστερήσεις στην κυκλοφορία των τρένων. Χρησιμοποίησαν μεταερευτική προσέγγιση ώστε να ληφθούν εφικτές λύσεις σε μεγάλα δίκτυα, ενώ ε-constraint μέθοδο για μικρότερα δίκτυα.

2.3 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης για ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην κυκλοφορία

Εξίσου σημαντικές είναι οι τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στο να διαθέτουν χρονικά παράθυρα για τη συντήρηση της σιδηροδρομικής γραμμής, καθώς πολλά μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη την κυκλοφορία του τρένου. Για το λόγο αυτό οι Marcos et al. (2019) χρησιμοποίησαν μια λύση προσομοιωμένης ανόπτησης ως βάση για τον αλγόριθμο η οποία αποδίδει αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται τυχαία τοποθέτηση μπλοκ. Οι περιορισμοί αφορούσαν τον πρώτο αρχικό χρόνο για το μπλοκ πίστας (track blocks) και τον πιο πρόσφατο χρόνο τερματισμού μπλοκ πίστας, καθώς με αυτό τον τρόπο μπορούσε να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός στις ώρες εργασίας του πληρώματος.

Οι Lidén & Joborn (2017) αναφέρουν τη σημαντικότητα για τις σιδηροδρομικές υπηρεσίες καθώς και η συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου, καθώς απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη μαζί στον προγραμματισμό τους. Για αυτό το λόγο παρουσιάζουν ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP), για την επίλυση της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας και συντήρησης του δικτύου. Ως στόχο είχαν την εύρεση ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου, το οποίο προγραμματίζει με βέλτιστο τρόπο τα παράθυρα χωρίς τρένο για ένα συγκεκριμένο όγκο τακτικής συντήρησης, μαζί με την επιθυμητή κυκλοφορία αμαξοστοιχιών. Επίσης για τη χωρητικότητα του δικτύου χρησιμοποιήθηκε μια χωρική και χρονική συνάθροιση.

Οι D'Ariano et al. (2019) ασχολήθηκαν με πρόβλημα τακτικού προγραμματισμού με σκοπό τη βελτιστοποίηση των αποφάσεων δρομολογίων αμαξοστοιχιών, χρονικά συσχετισμένα με τις βραχυπρόθεσμες εργασίες συντήρησης σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέραιου αριθμού, ενσωματώνοντας σε στοχαστικό περιβάλλον τις μεταβλητές, τους περιορισμούς, τους στόχους της ροής κυκλοφορίας και της συντήρησης τροχιάς. Ως στόχοι τέθηκαν δύο: ο ένας αφορούσε την ελαχιστοποίηση αποκλίσεων ενός προγραμματισμένου χρονοδιαγράμματος, και ο δεύτερος την μεγιστοποίηση των συγκεντρωτικών εργασιών συντήρησης.

Σε σιδηροδρομικά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων είναι πολύπλοκος ο προγραμματισμός συντήρησης και ο προγραμματισμός δρομολογίων των τρένων, ιδιαίτερα σε δίκτυα

μονής γραμμής. Πάνω σε αυτό τον προβληματισμό οι Albrecht et al. (2013) ερεύνησαν την αναζήτηση χώρου προβλημάτων (PSS) μέσω της μετα-ευρετικής, δημιουργώντας γρήγορα έναν μεγάλο αριθμό εναλλακτικών δρομολογίων τρένων και ένα χρονοδιάγραμμα που περιλαμβάνει τη συντήρηση τροχιάς. Πολύ κοντά σε αυτή την προσέγγιση ήταν και οι Forsgren et al. (2013), ο οποίοι χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου προγραμματισμού (MIP), που βελτιστοποιεί το πρόγραμμα στα δρομολόγια τρένων και στην προληπτική συντήρηση. Επέτρεπε την επαναδρομολόγηση των τρένων ή την ακύρωσή τους με στόχο την καλύτερη δυνατή ροή κυκλοφορίας με δεδομένο ένα σταθερό σύνολο προγραμματισμένων δραστηριοτήτων συντήρησης.

Αρκετές μελέτες έχουν στραφεί στην υλοποίηση της συντήρησης των σιδηροδρόμων με διαφορετικές προσεγγίσεις στην επίλυση τους, τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν και τους περιορισμούς. Ο Πίνακας 2-1 αναφέρεται κάποια βασικά στοιχεία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης διευκρινίζοντας τους στόχους για κάθε μελέτη που αναφέρθηκε, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και τις μεθόδους επίλυσης.

Πίνακας 2-1 Βασικά στοιχεία βιβλιογραφίας

Συγγραφέας	Αντικειμενική συνάρτηση	Μαθηματικό μοντέλο	Μέθοδος επίλυσης
Higgins (1998)	Minimize a weighted combination of expected interference delays with the train schedule and prioritized finishing time	Integer programming	Tabu search Metaheuristics approaches
Cheung et al. (1999)	Maximizes the assignment of job requests based on priorities (as many higher priority job requests as possible)	Chip constraint programming language	Heuristics approaches

Budai et al. (2004)	Minimizes the track possession time or cost for routine maintenance works and projects	Mixed-integer programming	(Greedy) Heuristics approaches (Max to Min, Min to Max, combined all in first period)
Budai & Dekker, (2004)	Minimizes the time periods for maintenance work, possession cost and cost for scheduled projects	Integer-Linear programming	Exact solution (CPLEX)
Peng and Ouyang (2012)	Minimizes the summation of all costs	Mixed-integer programming and customized search algorithms	Heuristics approach
Heinicke et al. (2015)	The sum of the travel costs and the customer costs that have to be minimized	Mixed-integer-linear program	Exact Solution (CPLEX)
Van Zante-de fokkert et al. (2007)	Minimize: 1) the number of nights with planned maintenance in the schedule. 2) the sum of maximum scheduled workload of the contractors	Mixed-Integer programming	Exact solution (AIMMS, CPLEX)
Lake et al. (2000)	Minimization of the cost of conducting the track maintenance	Mixed-integer non-linear programming	Heuristic approaches [1) feasible solution, 2) Simulated Annealing]

Andrade & Fonseca Teixeira, (2011)	Minimized: 1) the total costs of planned maintenance and renewal actions. 2) the total number of train delays caused by speed restrictions.	Biobjective integer-nonlinear programming	Metaheuristics (Simulated annealing technique)
Su et al. (2019)	Minimize the trade-off between condition deterioration and maintenance costs	Mixed-integer-linear programming	Scenario-based approach, Robust scenario-based approach
Nijland et al. (2021)	Minimizes the workload for work crews and the hindrance for train operators by minimizing the maximum workload of all crews combined	Mixed-integer-linear programming	Exact solution (branch-and-bound) Metaheuristics (simulated annealing)
Oudshoorn et al (2021)	Representing total costs and explore trade-offs between this cost and the number of hard constraint violations	Constraint programming model	Evolution strategy, greedy metaheuristic, a hybrid of the two
Liden & Jorbon (2017)	A cost sum to be minimized for 5 cost components	Mixed-integer-linear programming	Exact solution (Gurobi solver)
D'Ariano et al. (2019)	Minimization of the total deviation from the nominal timetable. Maximization of the number of paired works	Mixed-integer-linear programming Bi-objective model	Exact solution (IBM-ILOG-CPLEX solver)

Albrecht et al. (2013)	Minimize the sum of train and maintenance delays	Problem space search (PSS)	Metaheuristics
Forsgren et al. (2013)	Minimize number of resource conflicts and canceled trains	Mixed-integer-programming	Exact solution (CPLEX)
Buurman et al. (2021)	Minimizes the cost caused by hindrance over all train operators. Maximizes the amount of scheduled slots in maintenance schedule.	Multi-objective model Integer linear programming	Metaheuristic and ϵ -constraint method
Dao et al. (2018)	Minimize total cost in the whole planning horizon	Integer-linear programming	Exact solution (CPLEX)
Vansteenwegen et al. (2016)	Minimize the number of trains that are canceled as much as possible, and minimize decrease in service level to the passengers	Linear programming	Robust approach
Our study	Minimizes the time periods for maintenance work, possession cost, cost for scheduled projects and cost for work crews	Integer-linear programming	Exact solution (GUROBI)

2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας

Ο προγραμματισμός συντήρησης των σιδηροδρόμων φέρνει προκλήσεις καθημερινά, στις υπηρεσίες διαχείρισης του και στους φορείς εκμετάλλευσης των τρένων αλλά είναι και ευκαιρία εύρεσης ενός βέλτιστου τρόπου προγραμματισμού για την ομαλή λειτουργία του σιδηροδρόμου. Αρκετές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο συνδυασμό του προγραμματισμού του χρονοδιαγράμματος των τρένων με τις εργασίες συντήρησης ώστε να μειωθούν οι καθυστερήσεις και να βελτιωθεί η απόδοση της συντήρησης. Όπως φαίνεται πολλές φορές αυτό γίνεται με τον κοινό προγραμματισμό της συντήρησης και του χρονοδιαγράμματος τρένων, είτε με την προσαρμογή των εργασιών σε ένα υφιστάμενο χρονοδιάγραμμα τρένου.

Κάθε μελέτη διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της συντήρησης, καθώς λαμβάνουν υπόψη διαφορετικούς παράγοντες όπως την ασφάλεια του πληρώματος κατά την διάρκεια συντήρησης για παράδειγμα η έρευνα των Den Hertog et al. (2005), ή την εξειδίκευση μιας εργασίας για παράδειγμα την γεωμετρία της σιδηροδρομικής γραμμής, Andrade & Fonseca Teixeira (2011). Επίσης, από τις αναφερόμενες μελέτες σημαντική προσέγγιση είναι εκείνη των Nijland et al. (2021) διότι είναι η μόνη που έλαβε υπόψη της και τα εμπόδια που αφορούν το σταθμευμένο απόθεμα και δεν επικεντρώθηκε μόνο στις καθυστερήσεις των δρομολογίων των τρένων.

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε, το άρθρο που θα μας απασχολήσει, είναι των Budai & Dekker (2004) το οποίο αφορά την καλύτερη αποδοτικότητα ενός προγράμματος συντήρησης, αναζητώντας τα βέλτιστα διαστήματα κατοχής της γραμμής για συντήρηση ομαδοποιώντας διάφορες εργασίες. Το συγκεκριμένο άρθρο επιλέχτηκε διότι πληρούσε τα κριτήρια που θέλαμε να εφαρμόσουμε όσο αφορά την βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης, δηλαδή καταμερίζοντας κάποιες προκαθορισμένες εργασίες σε χρονικό ορίζοντα ενός χρόνου προληπτικής συντήρησης. Ωστόσο, ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης. Επίσης, εντοπίστηκε ότι υπήρχαν περιθώρια εξέλιξης του αρχικού μοντέλου όπως και εφαρμόστηκε. Στην εργασίας μας θα τροποποιήσουμε και θα επεκτείνουμε το βασικό μοντέλο του Budai & Dekker (2004).

Οι τροποποιήσεις που θα πραγματοποιηθούν αφορούν τις παραμέτρους και είναι οι εξής:

- Στα ζεύγη συνδυασμένων εργασιών.
- Στη διάρκεια εκτέλεσης μιας μεγάλης εργασίας.
- Στον χρονικό ορίζοντα μιας ρουτίνας εργασίας.

Με αυτό τον τρόπο οι τροποποιήσεις θα αποτελέσουν συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο μοντέλα.

Η επέκταση του βασικού μοντέλου που πραγματοποιείται αφορά τα εξής:

- Ένταξη πληρώματος εργασίας για την εκτέλεση των προκαθορισμένων εργασιών.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους των πληρωμάτων εργασίας.
- Πλήρη γνώση της τοποθεσίας για τα πληρώματα εργασιών κατά την εκτέλεση των εργασιών συντήρησης στον προβλεπόμενο χρονικό ορίζοντα, δηλαδή ενός χρόνου.

Η επέκταση που αναφέρθηκε για τα πληρώματα εργασιών στην παρούσα εργασία, θα συμβάλλει στο να δοθεί μια καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση του κόστους του έργου αλλά και της διαχείρισης του πληρώματος. Με αυτό τον τρόπο οι φορείς εκμετάλλευσης και τα συνεργεία θα είναι σε ετοιμότητα για τις προκλήσεις που θα προκύψουν σε θέμα οργάνωσης, επικοινωνίας και συνεργασίας.

Μία δυσκολία που εντοπίστηκε στην έρευνα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι απαραίτητο να αναφερθεί. Στην αναζήτηση διάφορων ερευνών διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν λιγότερες έρευνες που αφορούν τις εμπορευματικές αμαξοστοιχίες σε σύγκριση με τις επιβατικές. Αυτό σημαίνει λιγότερη ανάλυση βελτιστοποίησης ενός προγράμματος συντήρησης και τις επιπτώσεις που μπορούν να επιφέρουν στα εμπορεύματα, για παράδειγμα καθυστερήσεις στην παράδοση τους.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 Περιγραφή προβλήματος

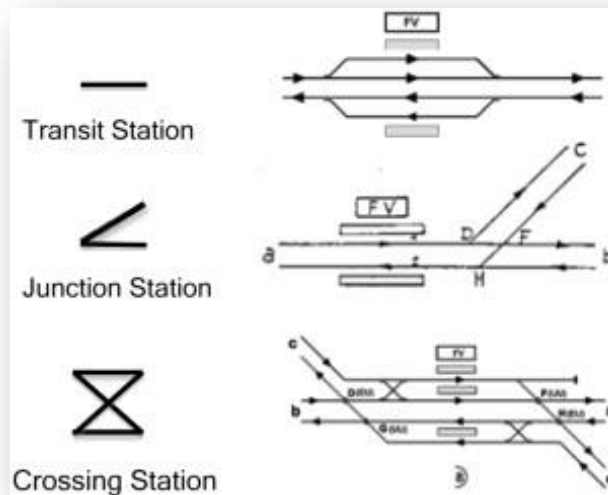
Ένα τυπικό σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από συνδεδεμένες γραμμές οι οποίες αναπαριστούνται στο Σχήμα 3-1, το οποίο αφορά το σιδηροδρομικό δίκτυο της Ολλανδίας. Σε χώρες με αυξημένη συχνότητα δρομολογίων τρένων όπως η Ολλανδία, λόγω του ότι υπάρχουν μικρά περιθώρια ελεύθερου χρονικού παραθύρου οι δραστηριότητες συντήρησης προγραμματίζονται συνήθως εντός της νύχτας για να μην προκαλέσουν μεγάλες διαταραχές.



Σχήμα 3-1 Σιδηροδρομικό δίκτυο Ολλανδίας

Επίσης, σε δίκτυα όπου η συχνότητα των δρομολογίων των τρένων δεν είναι τόσο συχνή, κάποιες δραστηριότητες συντήρησης μπορούν να εκτελεστούν εντός της ημέρας

κατά τη διάρκεια ελεύθερων χρονικών κενών μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων τρένων. Επιπρόσθετα, κάποιες εργασίες μεγάλης διάρκειας, όταν εκτελούνται, υποχρεώνουν το κλείσιμο της συγκεκριμένης διαδρομής και προγραμματίζονται συνήθως το βράδυ ή τα σαββατοκύριακα, ή γενικά όταν υπάρχει μικρός κυκλοφοριακός φόρτος. Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2, ένας διάδρομος τροχιάς (π.χ. ο a-D-C) αποτελείται από διάφορους συνδέσμους μονής ή διπλής/τριπλής γραμμής οι οποίοι ενώνονται μεταξύ τους διαδοχικά, (π.χ. οι a-D, DC, H-F, F-C), διασταυρώσεις, για παράδειγμα το σημείο D, και σταθμούς διέλευσης. Όταν κλείνει ο σύνδεσμος για κάποια εργασία συντήρησης θα πρέπει να προγραμματιστεί διαφορετικό δρομολόγιο, ή να γίνει κάποια παράκαμψη από τη βασική διαδρομή τροχιάς, ή να ακυρωθεί το δρομολόγιο τελείως.



Σχήμα 3-2 Railway operations, time-tabling and control

3.2 Βασικό Μοντέλο

Το πρόβλημα που αναλύεται σε αυτή την εργασία αφορά τον προγραμματισμό μιας προληπτικής συντήρησης ενός χρόνου. Θα καθοριστούν ποιες εργασίες και ποιες χρονικές περιόδους (μήνα/εβδομάδα) θα χρειαστούν για την ολοκλήρωσή τους, ώστε, να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος κατοχής της υποδομής για συντήρηση. Επιπλέον στόχος είναι να παρέχεται καλύτερη αποδοτικότητα εργασιών, ομαδοποιώντας αυτές με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ως προς το οικονομικό όφελος και την αποτελεσματικότητά

τους αλλά και εξισορροπώντας το φόρτο εργασίας για το συνεργείο συντήρησης. Οι εργασίες συντήρησης αφορούν δύο τύπους, μικρής διάρκειας (π.χ. αναθεώρηση τροχιάς και εναλλαγής, επιθεώρηση σιδηροτροχιάς, συστήματα σηματοδότησης, λίπανση γλίστρων) και μεγάλης διάρκειας (π.χ. καθαρισμός έρματος, λείανση σιδηροτροχιών, συμπύκνωση).

Συνεχίζοντας θα αναφερθεί το μοντέλο των Budai & Dekker (2004), καθώς θα επεκταθεί η διπλωματική με πρότυπο αυτό, και θα αναλυθεί περαιτέρω για τα σύνολα, τις παραμέτρους, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση. Να αναφερθεί ότι μοντελοποίησαν το πρόγραμμα συντήρησης σε GAMS ως μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, όπως και παρουσιάζεται παρακάτω. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστούν οι αλλαγές που θα γίνουν για την δημιουργία του προτεινόμενου μοντέλου της διπλωματικής για τον προγραμματισμό συντήρησης.

Σύνολα

Οι Budai & Dekker (2004) όρισαν κάποιες εργασίες και κάποιοι σύνδεσμοι της σιδηροδρομικής γραμμής. Οι εργασίες διαχωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες, μεγάλες και εργασίες ρουτίνας. Οι μεγάλες εργασίες αφορούσαν εργασίες που χρειάζονται αρκετό χρόνο ολοκλήρωσης και ο σύνδεσμος έπρεπε να τεθεί εκτός λειτουργίας ή να πραγματοποιηθούν στο μέγιστο μήκος ελεύθερης περιόδου αμαξοστοιχίας. Σε αντίθεση, οι εργασίες ρουτίνας αφορούσαν εργασίες με μικρό χρόνο ολοκλήρωσης και μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε χρονικά κενά μεταξύ της διέλευσης δύο διαδοχικών τρένων. Η χρονική περίοδος προγραμματισμού αφορούσε έναν χρόνο, δηλαδή $T=52$ εβδομάδες. Επίσης, δημιουργήθηκε ένα σύνολο συνδυαστικών εργασιών που μπορούσαν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα από τους δύο τύπους εργασιών αλλά και από τον ίδιο τύπο εργασίας. Τέλος, να αναφερθεί πως υπάρχει και ένα σύνολο τριών επιλογών όπου δηλώνει την επιλογή εκτέλεσης μιας μεγάλης εργασίας και θα αξιοποιηθεί στις παραμέτρους που θα ακολουθήσουν.

Τα σύνολα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

PA : σύνολο μεγάλων εργασιών

RA : σύνολο εργασιών ρουτίνας

L : σύνολο συνδέσμων

$A = PA \cup RA$ σύνολο όλων των εργασιών

T : περίοδος προγραμματισμού (χρόνος)

$K = \{1,2,3\}$: σύνολο επιλογών χρονικών περιόδων εκτέλεσης

$\text{Comb}\{(m, n, l)\}$: σύνολο συνδυαστικών έργων $m \in A$ και $n \in A$ στον σύνδεσμο $l \in L$

\max_l : δηλώνει το μέγιστο μήκος της ελεύθερης περιόδου αμαξοστοιχίας στον σύνδεσμο

$l \in L$

Παράμετροι

Να σημειωθεί ότι οι μεγάλες εργασίες και οι εργασίες ρουτίνας, έχουν διαφορετικές συχνότητες που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Έχουν επίσης διαφορετικό προγραμματισμό. Πρέπει αρχικά να οριστεί σε ποιο σύνδεσμο θα γίνει η μεγάλη εργασία που έχουμε επιλέξει και στη συνέχεια προσδιορίζεται το πόσο νωρίτερα/αργότερα μπορεί να ξεκινήσει. Επίσης, η διάρκεια που χρειάζεται προκειμένου να ολοκληρωθεί η μεγάλη εργασία ορίζεται από τρεις επιλογές του $k \in K$ και κάθε επιλογή δίνει διαφορετική διάρκεια. Η επιλογή $k=1$ επιτρέπει τα έργα να εκτελούνται στο μέγιστο μήκος ελεύθερης περιόδου αμαξοστοιχίας (μία φορά την ημέρα) σε αριθμό διαδοχικών ημερών, η επιλογή $k=2$ επιτρέπει τις μεγάλες εργασίες να εκτελούνται τα σαββατοκύριακα κλείνοντας τον σύνδεσμο για 48 ώρες και η επιλογή $k=3$ κλείνει τον σύνδεσμο για κάποιες ημέρες ή εβδομάδες. Επίσης, με βάση αυτές τις επιλογές δημιουργούνται τρία διαφορετικά κόσθη, ένα σταθερό κόστος για κάθε φορά που χρησιμοποιείται ο σύνδεσμος για συντήρηση και δύο επιπλέον κόσθη ως ποινές

που το ένα αφορά τις ακυρώσεις δρομολογίων με επιλογή $k=2$ ή 3 . Το πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η αποτελεσματική εκμετάλλευση των πόρων από τα συνεργεία. Το τρίτο κόστος αφορά την αναποτελεσματική χρήση των πόρων με επιλογή $k=1$ ή 2 , επειδή οι εργασίες σε αυτά τα δύο σενάρια μπορούν να διακοπούν και να χρειαστεί να μετακινηθεί ο εξοπλισμός από τα συνεργεία. Οι εργασίες ρουτίνας γίνονται συχνά και πρέπει να προσδιοριστεί από την αρχή η συχνότητά τους. Με βάση τη συχνότητα και την περίοδο προγραμματισμού ενός χρόνου, μπορούν οι εργασίες να καταμεριστούν εντός του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

G_{al} : συχνότητες ανά περίοδο προγραμματισμού T εργασιών $a \in RA$ στον σύνδεσμο

$l \in L$

$G_{al} = 0$ εάν η εργασία $a \in RA$ δεν είναι σχετική με τον σύνδεσμο $l \in L$

TW_{pl} : συνολικός φόρτος εργασίας (σε ώρες) για μία μεγάλη εργασία $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$

I_{pl} : 0-1 τιμές ανάλογα με το αν μία μεγάλη εργασία p θα πραγματοποιηθεί στον σύνδεσμο $l \in L$ κατά την διάρκεια της περιόδου προγραμματισμού $t \in T$

D_{kpl} : η διάρκεια μίας μεγάλης εργασίας $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$ χρησιμοποιώντας επιλογή $k \in K$

$D_{kpl} = \text{ceil}\left(\frac{TW_{pl}}{7 \cdot \max k}\right)$: εάν το $k=1$, $\text{ceil}(TW_{pl}/48)$ εάν το $k=2$ και $\text{ceil}(TW_{pl}/7 \cdot 24)$ εάν το $k=3$

LST_{pl} : η νωρίτερη περίοδος έναρξης μίας μεγάλης εργασίας $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$

UST_{pl} : η αργότερη περίοδος έναρξης μίας μεγάλης εργασίας $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$

$F_{al} = \text{ceil}(T/Gal)$: ο κύκλος σχεδιασμού για κάθε εργασία ρουτίνας $a \in RA$ σε κάθε διαφορετικό σύνδεσμο $l \in L$

C_{lt} : κόστος κατοχής συνδέσμου $l \in L$ σε χρονική περίοδο $t \in T$

$CCost_{kl}$: κόστος ακύρωσης στον σύνδεσμο $l \in L$ χρησιμοποιώντας την επιλογή $k \in K$

$MCost_{kpl}$: κόστος ποινής για τη χρήση πόρων, εάν επιλεγεί η επιλογή $k \in K$ για μια μεγάλη εργασία $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$

Μεταβλητές

Για να μπορεί να διακριθεί ποιες εργασίες θα εκτελεστούν, ποια χρονική στιγμή, σε ποιόν σύνδεσμο αλλά και αν χρησιμοποιείται ο σύνδεσμος για μία εργασία, υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές απόφασης.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

X_{alt} : 0-1 μεταβλητή απόφασης που υποδεικνύει εάν η εργασία $a \in RA$ στον σύνδεσμο $l \in L$ έχει αντιστοιχιστεί σε χρονική περίοδο $t \in T$ ή όχι

M_{lt} : 0-1 μεταβλητή απόφασης που υποδεικνύει εάν τη χρονική περίοδο $t \in T$ χρησιμοποιείται για προληπτική συντήρηση στον σύνδεσμο $l \in L$ ή όχι

Y_{kplt} : 0-1 εάν η εκτέλεση μίας μεγάλης εργασίας $p \in PA$ ξεκινά τη χρονική περίοδο $t \in T$ στον σύνδεσμο $l \in L$ εάν η επιλογή $k \in K$ έχει επιλεγεί ή όχι.

B_{kpl} : 0-1 εάν η εκτέλεση μίας μεγάλης εργασίας $p \in PA$ στον σύνδεσμο $l \in L$ έχει γίνει σύμφωνα με την επιλογή $k \in K$ ή όχι

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που εξηγήσαμε:

$$\text{Min} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} C_{lt} \cdot M_{lt} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} B_{kpl} \cdot D_{kpl} \cdot (CCost_{kl} + MCost_{kpl}) \quad s.t \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} X_{alt} = Gal \quad \forall a \in RA, l \in L \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} X_{plt} = \sum_{k \in K} I_{pl} \cdot D_{kpl} \cdot B_{kpl} \quad \forall p \in PA, l \in L \quad (3)$$

$$X_{mlt} + X_{nlt} \leq 1 \quad \forall \in T, (m, n, l) \notin Comb \quad (4)$$

$$\sum_{t=s}^{s+F_{al}} X_{alt} + \sum_{t=1}^{s+F_{al}-1} X_{alt} \leq 1 \quad \forall a \in RA, l \in L, s \in T \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^{|T|-D_{kpl}+1} Y_{kplt} = B_{kpl} \quad \forall p \in PA, l \in L, t \in (LST_{pl}, UST_{pl}) k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{s=t}^{t+D_{kpl}-1} X_{pls} \geq D_{kpl} * Y_{kplt} \quad \forall p \in PA, l \in L, t \in T, t \leq T - D_{kpl} + 1, I_{pl} = 1, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} B_{kpl} = 1 \quad \forall p \in PA, l \in L \quad (8)$$

$$M_{lt} \geq X_{alt} \quad \forall a \in A, l \in L, t \in T \quad (9)$$

$$X_{alt} \in \{0,1\}, M_{lt} \in \{0,1\}, Y_{kplt} \in \{0,1\}, B_{kpl} \in \{0,1\} \quad \forall a \in A, t \in T, l \in L, k \in K \quad (10)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (1) ελαχιστοποιεί τον αριθμό χρονικών περιόδων για τις οποίες προγραμματίζονται οι μεγάλες εργασίες συντήρησης ανά προγραμματικό ορίζοντα T και κατά συνέπεια το κόστος κατοχής και αφετέρου το κόστος για την πραγματοποίηση της προγραμματισμένης εργασίας. Οι περιορισμοί (2) και (3) διασφαλίζουν ότι όλες οι εργασίες ρουτίνας και οι μεγάλες εργασίες συντήρησης ανατίθενται αντίστοιχα στον σωστό αριθμό χρονικών περιόδων για κάθε σύνδεσμο. Ο

περιορισμός (4) διασφαλίζει ότι στον ίδιο χρόνο δε μπορούν να πραγματοποιηθούν οι συνδυαστικές εργασίες. Επίσης, ο περιορισμός (5) απαγορεύει τις εργασίες ρουτίνας συντήρησης να εκτελούνται σε κοντινά χρονικά διαστήματα το ένα με το άλλο και μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων της ίδιας εργασίας πρέπει να υπάρχουν χρονικές περίοδοι F_{al} μεταξύ τους. Ο περιορισμός (6) εγγυάται ότι ο χρόνος έναρξης για την εκτέλεση μεγάλης εργασίας είναι στο μεσοδιάστημα του νωρίτερου ή του αργότερου χρόνου έναρξης. Ο περιορισμός (7) διασφαλίζει ότι, αν ο χρόνος έναρξης εκτέλεσης για καθεμία μεγάλη εργασία έχει επιλεγεί, τότε οι μεγάλες εργασίες ανατίθενται σε επόμενα διαστήματα. Μία από τις τρεις επιλογές εκτέλεσης πρέπει να επιλεγεί για την εκτέλεση των προσδιορισμένων μεγάλων εργασιών. Αυτό διασφαλίζεται από τον περιορισμό (8). Ο περιορισμός (9) διασφαλίζει ότι η χρονική περίοδος $t \in T$ θα χρησιμοποιηθεί για εργασίες προληπτικής συντήρησης εάν και μόνο εάν για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο σε ένα από τα τμήματα υπάρχει τουλάχιστον ένα έργο σχεδιασμένο. Τέλος, ο περιορισμός (10) διασφαλίζει ότι οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι δυαδικές.

3.3 Διαμόρφωση προτεινόμενου μοντέλου

Με βάση το μοντέλο των Budai & Dekker (2004) και όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα θα επεκτείνουμε την διπλωματική εργασία. Αρχικά, για την εξέταση του διαμορφωμένου μοντέλου έπρεπε να επιλυθεί το βασικό μοντέλο και να εξεταστούν τα περιθώρια διαμόρφωσής του.

Ο κύριος σκοπός της διαμόρφωσης, ήταν η ένταξη και αντιστοίχιση πληρωμάτων εργασίας για την εκτέλεση των προγραμματισμένων εργασιών. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε εργασία όπου απαιτείται να γίνει, κάθε χρονική στιγμή και για κάθε σύνδεσμο, πρέπει να υπάρχει διαθέσιμο πλήρωμα εργασίας. Σε αυτό το πλαίσιο διαμόρφωσης, δημιουργήθηκε ένα σημείο αναφοράς για την έναρξη και την κατάληξη κάθε πληρώματος εργασίας. Με αυτό τον τρόπο, ανάλογα με την μετακίνηση των συνεργείων μετριέται το κόστος τους αλλά και η ακριβής τοποθεσία τους. Κάθε πλήρωμα εργασίας οφείλει να εκτελέσει μία από τις τρεις επιλογές όπου έχουν οριστεί. Οι επιλογές είναι οι εξής: να μείνει στον ίδιο σύνδεσμο εργασίας, να πάει σε διαφορετικό σύνδεσμο εργασίας ή να επιστρέψει στο αμαξοστάσιο. Αρκετά σημαντική είναι η προσθήκη του πληρώματος

εργασίας στο βασικό μοντέλο, καθώς δημιουργείται μια βελτιωμένη διαχείριση του ετήσιου προληπτικού προγράμματος συντήρησης. Αυτό συμβαίνει διότι διασφαλίζεται εξαρχής ο απαιτούμενος αριθμός πληρωμάτων εργασιών, η κοστολόγησή τους και σε συνδυασμό με τις προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα και χρόνος για τις απαραίτητες ενέργειες προς την υλοποίησή του. Για την ανάπτυξη του μοντέλου, χρειάστηκε να προστεθούν καινούρια σύνολα, παράμετροι, μεταβλητές και περιορισμοί που να καλύπτουν τις απαιτήσεις μας. Πραγματοποιήθηκε επίσης και διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης συμπεριλαμβάνοντας ένα καινούριο μέλος. Τέλος, η ανάλυση και η εξήγηση του κάθε παράγοντα ξεχωριστά θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Σύνολα

Το πρόβλημα μας αποτελείται από διαφορετικούς συνδέσμους L και κάθε σύνδεσμος την φορά, θα αντιστοιχείται σε ένα πλήρωμα εργασίας E όποτε είναι προγραμματισμένη μια εργασία. Για να γίνει πιο συγκεκριμένο το πρόβλημα, για την ένταξη του συνόλου πληρωμάτων εργασίας E , εισάγουμε τον διαθέσιμο αριθμό τους στο μοντέλο μας και ένα σύνολο με τους συνδέσμους του πληρώματος εργασίας LL , στο οποίο έχουμε λάβει υπόψη και το αμαξοστάσιο ως σημείο αναφοράς τους. Οι σύνδεσμοι του πληρώματος είναι όσοι και οι σύνδεσμοι στο βασικό μοντέλο με τη διαφορά ότι έχει προστεθεί και το αμαξοστάσιο. Το αμαξοστάσιο είναι ένα σημείο αναφοράς, ώστε όταν κάποιο πλήρωμα εργασίας δεν εκτελεί μια εργασία να πηγαίνει εκεί. Έτσι θα μπορούμε να ξέρουμε την τοποθεσία του κάθε πληρώματος ανά πάσα στιγμή.

Τα σύνολα που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής:

E : σύνολο πληρωμάτων εργασίας

LL : σύνολο των συνδέσμων των πληρωμάτων εργασίας

Παράμετροι

Διαφορετικά από το βασικό μοντέλο, το πρόβλημα τώρα αναζητά και λαμβάνει αποφάσεις για τα πληρώματα εργασίας. Για την εκτέλεση των εργασιών συντήρησης $a \in A$ από το πλήρωμα εργασίας $e \in E$ είναι προκαθορισμένη εξαρχής η διαθεσιμότητά

τους για το σύνδεσμο $l \in L$ κάθε χρονική στιγμή $t \in T$ με την παράμετρο Z_{ealt} . Επίσης, για τη μετακίνηση από έναν σύνδεσμο σε έναν διαφορετικό, έχει οριστεί μία απόσταση W_{lq} μεταξύ των συνδέσμων $l \in L$ και των συνδέσμων του πληρώματος εργασίας $q \in LL$. Βέβαια σε περίπτωση ταύτισης αυτών των δύο συνδέσμων η παράμετρος W_{lq} θα παίρνει την τιμή 0, διότι δε μετρείται κάποια απόσταση στον ίδιο σύνδεσμο αφού δεν δημιουργείται κάποια μετακίνηση. Διαφορετικά θα παίρνει την τιμή 1, που αντιστοιχεί στην χιλιομετρική απόσταση που έχει οριστεί με αποτέλεσμα προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση που θα αναφερθεί παρακάτω.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Z_{ealt} : 0-1 τιμές ανάλογα με το εάν ένα πλήρωμα εργασίας $e \in E$ μπορεί να εξυπηρετήσει έναν σύνδεσμο $l \in L$ την χρονική στιγμή $t \in T$.

W_{lq} : απόσταση μεταξύ δύο συνδέσμων

Μεταβλητές

Στο διαμορφωμένο μοντέλο προστέθηκε μία μεταβλητή απόφασης h_{ealt} για μίας προγραμματισμένες εργασίες που θα εκτελεστούν από κάποιο πλήρωμα. Η μεταβλητή απόφασης είναι δυαδική, και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βελτίωση απόφασης στην υλοποίηση μίας εργασίας από ένα συγκεκριμένο πλήρωμα εργασίας. Εάν δεν αποφασιστεί να εκτελεστεί από το συγκεκριμένο πλήρωμα μία εργασία σε ένα σύνδεσμο εκείνη την χρονική στιγμή θα πάρει τιμή 0, διαφορετικά όταν είναι ίση με 1 το πλήρωμα εργασίας θα πρέπει να εκτελέσει την συγκεκριμένη εργασία.

Η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

h_{ealt} : 0-1 μεταβλητή απόφασης που υποδεικνύει εάν το πλήρωμα εργασίας $e \in E$ εξυπηρετεί τον σύνδεσμο $l \in LL$ τη χρονική στιγμή $t \in T$ για την εργασία $a \in A$.

Περιορισμοί

$$\sum_{a \in A} \sum_{l \in LL} H_{ealt} \leq 1 \quad \forall t \in T, e \in E \quad (11)$$

$$X_{alt} = \sum_{e \in E} H_{ealt} * Z_{ealt} \quad \forall l \in L, t \in T, a \in A \quad (12)$$

$$\left| \sum_{a \in A} H_{ea0t} - \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} H_{ealt} \right| = 1 \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13)$$

Όσο αφορά τους περιορισμούς θα αναλυθεί η σημασία τους. Ένα πλήρωμα εργασίας μπορεί να είναι μόνο σε ένα σημείο εργασίας. Αυτό το διασφαλίζει ο περιορισμός (11), δηλαδή η εκτέλεση μίας εργασίας από ένα συγκεκριμένο πλήρωμα εργασίας συντήρησης $e \in E$ στο σύνδεσμο $l \in LL$, μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα και μόνο πλήρωμα μια χρονική στιγμή $t \in T$. Ο περιορισμός (12) δηλώνει ότι κάθε προγραμματισμένη εργασία $a \in A$ συντήρησης όπου είχαμε παρουσιάσει στο βασικό μοντέλο, πρέπει να είναι ίση και να αντιστοιχείται σε ένα πλήρωμα εργασίας $e \in E$ σε κάθε σύνδεσμο $l \in L$, κάθε χρονική στιγμή $t \in T$. Για να συμβεί αυτό πρέπει να υπάρχει διαθέσιμο πλήρωμα εργασίας και να του έχει ανατεθεί από την μεταβλητή απόφασης να εκτελέσει την εργασία. Τέλος, ο περιορισμός (13) διασφαλίζει ότι, κάθε πλήρωμα εργασίας $e \in E$ κάθε χρονική στιγμή $t \in T$ υποχρεώνεται είτε να πηγαίνει σε έναν σύνδεσμο $l \in L$, είτε να μένει στο αμαξοστάσιο. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να παρακολουθηθεί η γενική μετακίνηση του κάθε πληρώματος εργασίας από την αρχή μέχρι το τέλος. Στην ένταξη του συγκεκριμένου περιορισμού, έπρεπε να γίνει μετασχηματισμός της σχέσης (13) ο οποίος παρουσιάζεται μετέπειτα και η επίλυση του συγκεκριμένου περιορισμού πραγματοποιήθηκε με τον μετασχηματισμό που δημιουργήθηκε. Ο λόγος του μετασχηματισμού είναι ότι θέλαμε να διατηρήσουμε το μοντέλο μας γραμμικό ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η ολικά βέλτιστη λύση του. Για να πραγματοποιηθεί αυτό έπρεπε να γίνει αλλαγή από την υπάρχουσα μορφή διατηρώντας ωστόσο τις βασικές ιδιότητες.

Για τον μη γραμμικό περιορισμό (13) θα αναφερθεί ο μετασχηματισμός ως εξής:

Χρειάστηκε να προστεθεί ένας μεγάλος θετικός ακέραιος αριθμός $Mbig=1000$ και δύο μεταβλητές. Οι μεταβλητές είναι η $DELTA_{et}$ ως δυαδική μεταβλητή απόφασης 0-1 και η $RASBOLUTE_{et}$ ως συνεχής. Στη συνέχεια θα αναφερθεί ο μετασχηματισμός του περιορισμού που αντικαθιστά τον περιορισμό (13).

$$RASBOLUTE_{et} \geq \sum_{a \in A} H_{ea0t} - \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} H_{ealt} \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13.1)$$

$$RASBOLUTE_{et} \geq - \sum_{a \in A} H_{ea0t} - \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} H_{ealt} \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13.2)$$

$$RASBOLUTE_{et} \geq DELTA_{et} * Mbig + \sum_{a \in A} H_{ea0t} - \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} H_{ealt} \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13.3)$$

$$RASBOLUTE_{et} \geq 1 - DELTA_{et} * Mbig + \sum_{a \in A} H_{ea0t} - \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} H_{ealt} \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13.4)$$

$$RASBOLUTE_{et} = 1 \quad \forall t \in T, e \in E \quad (13.5)$$

Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου μας, στοχεύει να ελαχιστοποιήσει και να καταμερίσει το φόρτο εργασίας για τα συνεργεία μέσα από την μεταβλητή απόφασης H_{ealt} αλλά και το κόστος που απαιτείται για τις μετακινήσεις τους από δύο διαδοχικούς συνδέσμους της γραμμής. Σε αυτό συμβάλλει η παράμετρος W_{lq} , και να σημειωθεί ότι στην τρέχουσα διατύπωση δεν περιλαμβάνεται κάποια ποινή για την μετακίνηση των συνεργείων από ένα σύνδεσμο σε έναν άλλο, αλλά υπάρχει μία σταθερή τιμή που προστίθεται κάθε φορά όταν εκτελείται μία εργασία και γίνεται μετακίνηση του πληρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων.

Η αντικειμενική συνάρτηση διατυπώθηκε ως εξής:

$$Minimize \sum_{e \in E} \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{l \in LL} \sum_{q \in LL \neq l} W_{lq} * \left[1 - \left(\sum_{a \in A} H_{ealt} - \sum_{a \in A} H_{eal(t+1)} \right) \right] \quad (14)$$

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αριθμητικό παράδειγμα

Ο στόχος του αριθμητικού παραδείγματος είναι να δοκιμασθεί το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά του. Το πρόγραμμα συντήρησης προγραμματίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python 3.7 ως μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και επιλύθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό βελτιστοποίησης GUROBI. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πιο βασικά στοιχεία που έπρεπε να εισαχθούν για την διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου.

Ξεκινώντας να αναφερθεί ότι το αριθμητικό παράδειγμα αφορά ένα σιδηροδρομικό δίκτυο όπου ο κυκλοφοριακός φόρτος των αμαξοστοιχιών δεν είναι τόσο συχνός, και κάθε σύνδεσμος γραμμής έχει μήκος 8-10km. Για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής ορίστηκε το μήκος κάθε συνδέσμου ίσο με $\max l = \{10\}$. Επιπλέον, εντάχθηκαν κάποια σύνολα, όπως οι σύνδεσμοι της γραμμής οι οποίοι ήταν πέντε $L = \{L1, L2, L3, L4, L5\}$. Όσον αφορά τις εργασίες συντήρησης θεωρήθηκαν πέντε, εκ των οποίων οι δύο αφορούσαν τις μεγάλες εργασίες $PA = \{P1, P2\}$, και οι άλλες τρεις αφορούσαν τις εργασίες ρουτίνας $RA = \{R3, R4, R5\}$. Το σύνολο και των δύο μαζί είναι το $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Η χρονική περίοδος προγραμματισμού συντήρησης αφορά $T = 1$ έτος, και αναλύεται σε εβδομάδες, δηλαδή μία εργασία συντήρησης αντιστοιχεί σε διάρκεια μίας εβδομάδας. Το γεγονός αυτό δεν αναιρεί την παράλληλη διεξαγωγή δύο εργασιών συντήρησης την ίδια εβδομάδα. Επίσης, εντάσσεται και το $K = \{1, 2, 3\}$ για τον τρόπο εκτέλεσης της κάθε μεγάλης εργασίας όπως είχε αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα. Όσον αφορά τον αριθμό των πληρωμάτων εργασίας, γίνεται υπόθεση πέντε πληρωμάτων $E = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Για τα πληρώματα εργασίας διαμορφώθηκε και το σύνολο $LL = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, το οποίο αφορά τους συνδέσμους γραμμής των πληρωμάτων εργασίας, οι οποίοι είναι ίδιοι με τους συνδέσμους $l \in L$, προσθέτοντας έναν ακόμα για τιμή $LL = 0$ που αφορά το αμαξοστάσιο που έχουμε αναφέρει.

Στη συνέχεια για τις παραμέτρους, θα παρουσιαστούν κάποιοι πίνακες για την καλύτερη διαχείριση και κατανόηση των στοιχείων του μαθηματικού μοντέλου που χρειάστηκαν για την εκτέλεση του αριθμητικού παραδείγματος. Για αρχή ο Πίνακας 4-1 συνοψίζει την

συχνότητα εργασιών ρουτίνας που γίνονται εντός ενός χρόνου για κάθε σύνδεσμο και ο Πίνακας 4-2 συνοψίζει για τις ίδιες εργασίες τον χρονικό ορίζοντα που μπορεί να προγραμματιστεί ξανά κάθε εργασία ξεχωριστά για την εκτέλεση της.

Πίνακας 4-1 Συχνότητα εργασιών ρουτίνας

Εργασίες	Σύνδεσμοι	Συχνότητα (Gal)
R3	L1	2
	L2	4
	L3	2
	L4	2
	L5	4
R4	L1	13
	L2	13
	L3	4
	L4	13
	L5	4
R5	L1	4
	L2	2
	L3	4
	L4	2
	L5	4

Πίνακας 4-2 Χρονικός ορίζοντας εργασιών ρουτίνας

Εργασίες	Σύνδεσμοι	Χρονικός ορίζοντας (Fal)
R3	L1	2
	L2	2
	L3	2
	L4	2
	L5	2
R4	L1	2
	L2	2
	L3	2
	L4	2
	L5	2
R5	L1	2
	L2	2
	L3	2
	L4	2
	L5	2

Σε συνέχεια θα παρουσιαστούν οι πίνακες για τις μεγάλες εργασίες που χρειάστηκαν. Ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει ποιες μεγάλες εργασίες θα γίνουν και σε ποιο σύνδεσμο. Ο Πίνακας 4-4 αποτυπώνει τις τιμές για το νωρίτερα και το αργότερα σε εβδομάδα που μπορεί να ξεκινήσει μια μεγάλη εργασία σε κάθε σύνδεσμο.

Πίνακας 4-3 Δήλωση μεγάλων εργασιών

Εργασίες	Σύνδεσμοι	Δήλωση εργασιών (IP)
P1	L1	1
	L2	0
	L3	0
	L4	0
	L5	0
P2	L1	0
	L2	1
	L3	0
	L4	1
	L5	0

Πίνακας 4-4 Νωρίτερα/αργότερα που ξεκινά μια εργασία

Εργασίες	Σύνδεσμοι	Νωρίτερα να ξεκινήσει σε εβδομάδες	Αργότερο να ξεκινήσει σε εβδομάδες
P1	L1	12	14
	L2	0	0
	L3	0	0
	L4	0	0
	L5	0	0
P2	L1	0	0
	L2	2	12
	L3	0	0
	L4	1	5
	L5	0	0

Επίσης, ο Πίνακας 4-5 δηλώνει τη διάρκεια σε εβδομάδες που απαιτεί κάθε μεγάλη εργασία για κάθε επιλογή K όπως είχε αναλυθεί στο προηγούμενο μοντέλο.

Πίνακας 4-5 Διάρκεια εργασιών με επιλογή K

Εργασίες	Σύνδεσμοι	Διάρκεια (Dkpl_k=1)	Διάρκεια (Dkpl_k=2)	Διάρκεια (Dkpl_k=3)
P1	L1	3	3	3
	L2	0	1	0
	L3	0	0	0
	L4	0	1	0
	L5	0	0	0
P2	L1	0	0	0
	L2	1	1	3
	L3	0	0	0
	L4	1	1	1
	L5	0	0	0

Επιπρόσθετα, οι Πίνακες 4-6 και 4-7 συνοψίζουν τα δύο σενάρια κόστη εκ των τριών που αφορούν την ακύρωση δρομολογίων και την αναποτελεσματική χρήση των πόρων σε κάθε σύνδεσμο για κάθε μεγάλη εργασία. Το τρίτο κόστος είναι σταθερό ίσο με 100 ευρώ, για κάθε φορά που χρησιμοποιείται η γραμμή.

Πίνακας 4-6 Κόστος ακύρωσης δρομολογίων

Επιλογές	Σύνδεσμοι	Κόστος ακύρωσης δρομολογίων
Κ1	L1	0
	L2	0
	L3	0
	L4	0
	L5	0
Κ2	L1	22
	L2	50
	L3	0
	L4	20
	L5	0
Κ3	L1	30
	L2	30
	L3	0
	L4	35
	L5	0

Πίνακας 4-7 Κόστος αναποτελεσματικής χρήσης πόρων

Επιλογές	Σύνδεσμοι	Αναποτελεσματική χρήση πόρων
Κ1	L1	30
	L2	30
	L3	0
	L4	30
	L5	0
Κ2	L1	20
	L2	20
	L3	0
	L4	20
	L5	0
Κ3	L1	10
	L2	10
	L3	0
	L4	10
	L5	0

Τέλος, ο Πίνακας 4-8 αφορά τους συνδυασμούς εργασιών που ορίστηκαν για κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά, δηλαδή ζεύγη από τις εργασίες ρουτίνας και τις μεγάλες εργασίες.

Πίνακας 4-8 Ζεύγη εργασιών συνδυασμών ρουτίνας

Σύνδεσμοι	L1	L2	L3	L4	L5
Συνδυασμοί εργασιών	(P1,R4)	(P1,R4)	(P1,R4)	(P1,R4)	(P1,R4)
	(P1,R3)	(P1,R3)	(P1,R3)	(P1,R3)	(P1,R3)
	(P1,R5)	(P1,R5)	(P1,R5)	(P1,R5)	(P1,R5)
	(P1,R2)	(P1,P2)	(P1,P2)	(P1,P2)	(P1,P2)
	(P2,R4)	(P2,R4)	(P2,R4)	(P2,R4)	(P2,R4)
	(P2,R3)	(P2,R3)	(P2,R3)	(P2,R3)	(P2,R3)
	(P2,R5)	(P2,R5)	(P2,R5)	(P2,R5)	(P2,R5)
	(R3,R4)	(R3,R4)	(R3,R4)	(R3,R4)	(R3,R4)
	(R3,R5)	(R3,R5)	(R3,R5)	(R3,R5)	(R3,R5)
	(R4,R5)	(R4,R5)	(R4,R5)	(R4,R5)	(R4,R5)
	(R3,P1)	(R5,P2)		(R4,P2)	

Σε συνέχεια οι παράμετροι για το πλήρωμα εργασίας ήταν δύο. Η πρώτη παράμετρος αφορούσε την διαθεσιμότητα του πληρώματος που τέθηκε σε όλους τους συνδέσμους και σε όλες τις διαθέσιμες εργασίες και έπαιρνε τιμή ίση με $Z_{ealt} = 1$, όταν το πλήρωμα $e \in E$ ήταν διαθέσιμο, διαφορετικά έπαιρνε τη τιμή 0. Η δεύτερη, αφορούσε την

απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων και τέθηκε σταθερή ίση με $W_{lq} = 10$ χιλιόμετρα.

4.2 Αποτελέσματα αριθμητικού παραδείγματος

Το αριθμητικό παράδειγμα πραγματοποιήθηκε σε Η/Υ με επεξεργαστή AMD Ryzen 7 5800H και μνήμη RAM 16GB, και επιλύθηκε σε 24 δευτερόλεπτα. Για να γίνουν κατανοητά και σαφή τα όσα παρουσιάστηκαν παραπάνω, πρέπει να συγκεντρωθούν σε κατάλληλους πίνακες τα αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο τρία, προέκυψαν αποτελέσματα για τις εργασίες συντήρησης και για κάθε πλήρωμα εργασίας ξεχωριστά.

Για αρχή ο Πίνακας 4-9 αφορά τις μεγάλες εργασίες (P1,P2) και τις εργασίες ρουτίνας (R3,R4,R5) που πρέπει να καταμεριστούν σε κάθε σύνδεσμο (L1,L2,L3,L4,L5) με βέλτιστο τρόπο εντός διαστήματος ενός χρόνου, δηλαδή πενήντα δύο εβδομάδων. Τα χρωματισμένα σημεία του πίνακα απεικονίζουν τις εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν για κάθε κατηγορία ανά πάσα στιγμή. Βασικό στοιχείο στα αποτελέσματα ήταν να υπακούει το μοντέλο στους διάφορους περιορισμούς που είχαν οριστεί, όπως η χρονική στιγμή που θα ξεκινήσει μια εργασία, οι συχνότητές τους και η διάρκειά τους.

Πίνακας 4-9 Προγραμματισμένες εργασίες

Weeks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52				
P1	L1																																																							
	L2																																																							
	L3																																																							
	L4																																																							
	L5																																																							
P2	L1																																																							
	L2																																																							
	L3																																																							
	L4																																																							
	L5																																																							
R3	L1																																																							
	L2																																																							
	L3																																																							
	L4																																																							
	L5																																																							
R4	L1																																																							
	L2																																																							
	L3																																																							
	L4																																																							
	L5																																																							
R5	L1																																																							
	L2																																																							
	L3																																																							
	L4																																																							
	L5																																																							

Σε συνέχεια του μοντέλου που διαμορφώθηκε, έπρεπε να αντιστοιχηθούν οι εργασίες που παρουσιάστηκαν με τα πληρώματα εργασιών. Έχουν καταμεριστεί σε πέντε διαφορετικά πληρώματα εργασίας, τα οποία εκτός από τους βασικούς συνδέσμους, υπάρχει και ο σύνδεσμος {L0}, ο οποίος παριστάνει το αμαξοστάσιο. Όπως είχε αναφερθεί, αν τα πληρώματα εργασίας δεν εκτελούν προγραμματισμένες εργασίες καταλήγουν στο αμαξοστάσιο, καθώς με αυτό τον τρόπο γνωρίζουμε την συνολική μετακίνηση κάθε πληρώματος ανά πάσα στιγμή. Το αμαξοστάσιο είναι κοινό για όλα τα πληρώματα και αποτελεί ένα σημείο αναφοράς. Στη συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες για κάθε πλήρωμα εργασίας όπου αντιστοιχίζονται οι εργασίες συντήρησης για κάθε σύνδεσμο γραμμής και το αμαξοστάσιο. Οι αριθμοί στα χρωματισμένα σημεία, υποδεικνύουν το πλήρωμα εργασίας που εκτελεί μία εργασία. Βασικές προϋποθέσεις καλύπτονται ώστε, κάθε εβδομάδα να είναι απαραίτητο κάθε πλήρωμα εργασίας να βρίσκεται σε μία εργασία ή στο αμαξοστάσιο. Επίσης για μία συγκεκριμένη εργασία δε μπορούν να υπάρχουν δύο διαφορετικά πληρώματα και ταυτόχρονα πρέπει να καλύπτονται όλες οι εργασίες. Ο εργασιακός φόρτος των πληρωμάτων εργασίας καταμερίζεται με τρόπο ώστε όλα τα συνεργεία να εργάζονται σχετικά το ίδιο.

Ο Πίνακας 4-10 που ακολουθεί απεικονίζεται το πλήρωμα εργασίας ένα το οποίο και εκτελεί δεκατέσσερις εργασίες συντήρησης. Όπως παρατηρείται, το συνεργείο στην αρχή των εβδομάδων μέχρι και την έβδομη εβδομάδα εκτελεί μία εργασία και έπειτα καταλήγει στο αμαξοστάσιο. Επίσης, το μεγαλύτερο χρόνο που παραμένει το πλήρωμα εργασίας στο αμαξοστάσιο, δηλαδή δώδεκα εβδομάδες εμφανίζεται την εβδομάδα τριανταδύο έως και τη σαραντατρία.

Πίνακας 4-11 Πλήρωμα εργασίας 2

Weeks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52			
P1	L0			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
P2	L0		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	L1																																																						
	L2		2																																																				
	L3																																																						
	L4																																																						
R3	L0			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	L1																																																						
	L2		2																																																				
	L3																																																						
	L4																																																						
R4	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
R5	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
L5																																																							

Επίσης το πλήρωμα εργασίας τρία εκτελεί δεκατρείς εργασίες συντήρησης και απεικονίζεται στον Πίνακα 4-12. Στην αρχή εκτελεί δύο συνεχόμενες και έπειτα παραμένει στο αμαξοστάσιο για δεκαοχτώ εβδομάδες. Οι περισσότερες εργασίες που εκτελούνται χωρίς μεγάλη παραμονή στο αμαξοστάσιο είναι την εβδομάδα εικοσιένα, μέχρι και την τριάντα εννέα και εκτελούνται επτά εργασίες συντήρησης σε τακτά διαστήματα παραμονής του αμαξοστασίου μίας εβδομάδας, δύο η και καμίας.

Πίνακας 4-14 Πλήρωμα εργασίας 5

Weeks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52			
P1	L0																																																						
	L1																																																						
	L2												5	5																																									
	L3																																																						
	L4																																																						
P2	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
R3	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
R4	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						
R5	L0																																																						
	L1																																																						
	L2																																																						
	L3																																																						
	L4																																																						

Επιπλέον, σημαντικό αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ο ακόλουθος Πίνακας 4-15, διότι παρουσιάζονται οι συνολικές εργασίες συντήρησης και ταυτόχρονα η αντιστοίχιση σε πληρώματα εργασίας. Έτσι υπάρχει και εποπτεία στα πληρώματα εργασίας που θα τις εκτελέσουν. Οι αριθμοί στα χρωματισμένα σημεία αφορούν τα πληρώματα εργασίας. Να σημειωθεί ότι, οι συνολικές προγραμματισμένες εργασίες στους διαφορετικούς συνδέσμους που προέκυψαν είναι 82 εκ των οποίων οι 3 αφορούν την μεγάλη εργασία P1, οι 2 την εργασία P2 και οι υπόλοιπες είναι εργασίες ρουτίνας με αριθμό R3 ίσο 14, R4 ίσο με 47 και R5 ίσο με 16. Οι εργασίες ρουτίνας R4 μπορεί να φαίνεται μεγάλος αριθμός αλλά εξαρτάται από την συχνότητα εργασιών που έχουμε ορίσει στον Πίνακα 4-1 και επαληθεύονται οι φορές που έχουν ζητηθεί να πραγματοποιηθεί. Αντίστοιχα, οι μεγάλες εργασίες ανάλογα με την διάρκεια στον Πίνακα 4-5 και το πότε μπορούν να λάβουν έναρξη από τον Πίνακα 4-4, καταμερίζονται με βέλτιστο τρόπο και επαληθεύονται. Η εργασία P1 έχει εκτελεστεί με επιλογή K ίσο 1 την δωδέκατη έως δέκατη τέταρτη εβδομάδα, αντίστοιχα η P2 με K ίσο με 1 την δεύτερη εβδομάδα, αλλά την πέμπτη εβδομάδα με την επιλογή K ίσο με 3. Επίσης, τα συνδυασμένα ζεύγη

εργασιών που προέκυψαν σε διαφορετικούς συνδέσμους την ίδια εβδομάδα είναι τα εξής {[R3,R4] , [P2,R3,R4], [R4,R5], [P2,R4], [P1,R4], [R3,R4,R5]}. Με βάση των όσων ορίσαμε στις παραμέτρους, στον ίδιο σύνδεσμο την ίδια χρονική στιγμή δεν εκτελείται καμία εργασία ταυτόχρονα αλλά μόνο σε διαφορετικούς συνδέσμους, το οποίο παίζει ρόλο στην επιβάρυνση κόστους κατοχής της γραμμής που θα αναφερθεί παρακάτω. Επίσης, τα πληρώματα εργασίας όπως φαίνονται, έχουν μοιραστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε ο εργασιακός φόρτος να είναι σχεδόν κοινός για όλα τα πληρώματα εργασίας και να μην επιβαρύνεται κάποιο υπερβολικά παραπάνω. Οι μετακινήσεις των πληρωμάτων εργασιών, είναι προγραμματισμένες με βέλτιστο τρόπο, ώστε να μειώνεται το κόστος τους.

Πίνακας 4-15 Αντιστοιχία εργασιών και πληρωμάτων

Weeks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52					
P1	L1											5	5	1																																											
	L2																																																								
	L3																																																								
	L4																																																								
	L5																																																								
P2	L1																																																								
	L2		2																																																						
	L3																																																								
	L4					5																																																			
	L5																																																								
R3	L1	1																				4																																			
	L2	2																						1					2																												
	L3	4																																																							
	L4																																																								
	L5		3																				4																																		
R4	L1		4		1				2				5								4			1		3		2			1		5				4		2			5		4													
	L2			5					5			4			2		2						5						2			5				3		3		5			1			5											
	L3			5																																																					
	L4	5			4		1		4				4										3						5			3		3					2			2					1										
	L5	3						5																																																	
R5	L1																					1						2																													
	L2																																																								
	L3					5																																																			
	L4																																																								
	L5				1																																																				

4.3 Συγκριτική αξιολόγηση εφαρμογής μοντέλων

Να αναφερθεί ότι σε σύγκριση με την παρούσα διπλωματική εργασία από το βασικό μοντέλο του Budai & Dekker (2004), η αντικειμενική συνάρτηση έχει προκύψει επιβαρυνμένη. Αυτό βέβαια οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν συμπεριληφθεί διαφορετικές τιμές για κάποιες παραμέτρους, (π.χ. διάρκεια μεγάλων εργασιών, ζεύγη συνδυασμένων εργασιών, περίοδος προγραμματισμού ρουτίνας εργασιών).

Για την εξέταση της σύγκρισης λύθηκε το μοντέλο χωρίς να συμπεριληφθούν τα πληρώματα εργασιών καθώς επηρεάζουν τον καταμερισμό των εργασιών συντήρησης και έπρεπε να τηρούνται ακριβώς ίδιες προϋποθέσεις με το βασικό μοντέλο αλλά οι τροποποιήσεις που τέθηκαν στο μοντέλο μας. Σε συνέχεια επιλύθηκε το μοντέλο με το λογισμικό βελτιστοποίησης GUROBI και καταγράφηκαν αποτελέσματα με στοιχεία εξόδου τον Πίνακα 4-16 που απεικονίζει τις εργασίες συντήρησης. Όσον αφορά το συνολικό κόστος για τις εργασίες συντήρησης που θα παρθούν ανέρχεται στα 8333€ και μοιράζεται σε κόστος κατοχής της γραμμής για κάθε φορά που γίνεται μία εργασία στα 8200€, καθώς τα 133€ αφορούν τις ακυρώσεις των δρομολογίων και την ανεκμετάλλευτη χρήση πόρων. Στο βασικό μοντέλο αναφέρεται το κόστος κατοχής της γραμμής για εργασίες 5700€ και 165€ για ακυρώσεις δρομολογίων και αναποτελεσματική χρήση πόρων. Η διαφορά αυτή σε σύγκριση με εκείνη του αριθμητικού παραδείγματος στην παρούσα διπλωματική, οφείλεται στα διαφορετικά συνδυασμένα ζεύγη εργασιών που έχουν ληφθεί διότι επηρεάζουν άμεσα το κόστος κατοχής της γραμμής. Αυτό συμβαίνει διότι τα ζεύγη εργασιών που δεν μπορούν να γίνουν ταυτόχρονα στον ίδιο σύνδεσμο στην παρούσα διπλωματική είναι περισσότερα και έτσι αναγκάζονται οι εργασίες να προγραμματίζονται σε άλλες εβδομάδες μεγαλώνοντας το κόστος. Για το δεύτερο κόστος το οποίο έχει προκύψει ελάχιστα μειωμένο στην παρούσα διπλωματική, κυρίαρχο ρόλο έχει η διάρκεια που απαιτείται να γίνει μία μεγάλη εργασία το οποίο έχει ληφθεί με διαφορετική τιμή από το βασικό μοντέλο αλλά και η επιλογή που θα εκτελεστεί η συγκεκριμένη εργασία με βέλτιστο τρόπο. Η ευαισθησία του κόστους είναι σημαντική και αντιληπτή στο μοντέλο που διαμορφώθηκε, καθώς και κρίσιμη για τους φορείς εκμετάλλευσης.

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σκοπός είναι να παρουσιαστεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης, το οποίο αφορά εργασίες προληπτικής συντήρησης με ορίζοντα ενός χρόνου και στόχος είναι να βελτιώσει τις αποφάσεις των σιδηροδρόμων για συντήρηση της σιδηροδρομικής γραμμής αλλά και τις αποφάσεις για την καλύτερη κατανομή των πληρωμάτων εργασιών μειώνοντας το κόστος τους. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο επιλύθηκε σε λογισμικό βελτιστοποίησης GUROBI. Ως εισαγωγικά δεδομένα τέθηκαν κάποια από το βασικό μοντέλο που βασίστηκε η παρούσα εργασία, αλλά διαμορφώθηκαν και προστέθηκαν καινούρια. Τα καινούρια δεδομένα αφορούσαν την εξέλιξη του μοντέλου για τα πληρώματα εργασίας, τόσο στην ένταξη τους με σύνολα και παραμέτρους, όσο και στους περιορισμούς που έπρεπε να τεθούν για να είναι λειτουργικά και να υπακούν σε αυτούς. Επίσης, διαφοροποιήθηκαν στοιχεία από το βασικό μοντέλο για την συχνότητα, τη διάρκεια και τα ζεύγη εργασιών, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για την ευαισθησία του κόστους. Ως τελικό βήμα εφαρμόστηκε το αριθμητικό παράδειγμα και τα δεδομένα εξόδου αφορούσαν το ετήσιο πρόγραμμα συντήρησης εργασιών, πληρωμάτων εργασίας και το συνολικό κόστος που απαιτείται για τις εργασίες και τα συνεργεία. Φτιάχτηκαν κατάλληλοι πίνακες για την πλήρη κατανόηση και διερεύνηση του μοντέλου ώστε να κριθεί η λειτουργικότητα του αλλά και να σχολιαστούν σημαντικές παρατηρήσεις. Τα αποτελέσματα από το μοντέλο κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος κατοχής του ίδιου συνδέσμου με παραπάνω από μία εργασία να εκτελείται, μειώνει αισθητά το κόστος και τα συνεργεία καταμερίζονται με τρόπο ώστε να καταμερίζεται ο εργασιακός φόρτος.

5.2 Βασικά συμπεράσματα

Το μοντέλο αναπτύχθηκε με διαφοροποιημένες παραμέτρους απ' ότι το βασικό μοντέλο και εξελίχθηκε με την προσθήκη των συνεργείων. Με αυτό το τρόπο αναδείχθηκε και η ευαισθησία που υπάρχει σε κάποια στοιχεία του μοντέλου και την κρισιμότητά τους στο να τεθεί μια διαφορετική λύση. Οι εργασίες συντήρησης όπως και τα πληρώματα

εργασίας, προγραμματίζονται με βέλτιστο τρόπο ώστε να είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο αλλά και προσδίδουν καλύτερη διαχείριση του κόστους που απαιτείται για να πραγματοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που διαμορφώθηκε καταμέρισε τις εργασίες συντήρησης με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος. Σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο το κόστος είναι επιβαρυνόμενο και ευθύνονται οι διαφοροποιήσεις που πάρθηκαν διότι στο μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λιγότερες εργασίες ομαδοποιούνται στον ίδιο σύνδεσμο και αυξάνεται το κόστος κατοχής της γραμμής. Επίσης τα πληρώματα εργασιών καταμερίστηκαν με εργασιακό φόρτο αρκετά ίδιο για όλα και έγινε καταγραφή της συνολικής τους τοποθεσίας ανά πάσα στιγμή. Η διαχείριση ενός τέτοιου ετήσιου προγράμματος βοηθάει βραχυπρόθεσμα την υποδομή της σιδηροδρομικής γραμμής στην μείωση τυχόν βλαβών της γραμμής. Όταν η γραμμή συντηρείται τακτικά όπως προβλέπεται και εποπτεύεται η υποδομή, έχει ως αποτέλεσμα να είναι στις καλύτερες δυνατές της συνθήκες διότι προλαμβάνονται τυχόν φθορές. Παράλληλα με τον βέλτιστο προγραμματισμό, μειώνεται το κόστος αλλά και οι φορείς εκμετάλλευσης είναι έτοιμοι να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις που θα δημιουργηθούν για την μείωση τυχόν καθυστερήσεων ή ακυρώσεων των δρομολογίων των τρένων.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία κατά την διάρκεια πραγματοποίησης της, για περαιτέρω έρευνα θα παρουσίαζαν ενδιαφέρον τα όρια αναζήτησης μιας βέλτιστης λύσης. Αυτό σημαίνει ότι αν μεγαλώσει το πρόβλημα, όσον αφορά από θέμα εργασιών, από μεγαλύτερο δίκτυο και γενικότερων προσθηκών, αν θα μπορεί να επιλυθεί επιτυχώς σε εύλογο χρονικό διάστημα το πρόβλημα μέσω προγράμματος.

Ένα άλλο ζήτημα προς διερεύνηση που προκαλεί ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι , παρότι έχει δημιουργηθεί ένα ετήσιο πρόγραμμα συντήρησης και έχουν καθοριστεί οι εβδομάδες που θα γίνει η κάθε εργασία, δεν γνωρίζουμε την ακριβή ώρα που θα εκτελεστεί η κάθε εργασία ξεχωριστά. Θα μπορούσε να ενταχθεί το χρονοδιάγραμμα των δρομολογίων των τρένων ώστε να παρέχονται πιο λεπτομερή αποτελέσματα.

Τέλος, να αναφερθεί ότι χρήσιμο θα ήταν να δοκιμαστούν σενάρια με περισσότερες μεγάλες εργασίες ώστε να διερευνηθεί το κόστος αλλά και ο τρόπος που θα καταμεριστούν, ώστε να αξιολογηθεί η λειτουργικότητα της συντήρησης σε σύγκριση με τους φορείς εκμετάλλευσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Albrecht, A. R., Panton, D. M., & Lee, D. H. (2013). Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search Computers & Operations Research, 40(3), 703–712. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2010.09.001>

Andrade, A. R., & Fonseca Teixeira, P. (2011). Biobjective Optimization Model for Maintenance and Renewal Decisions Related to Rail Track Geometry SMaRTE View project. *Article in Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.3141/2261-19>

CER & Rail freight forward (2020). *How rail freight achieves its goals*.

https://www.railfreightforward.eu/sites/default/files/downloadcenter/rff_cer_position_paper.pdf

Budai, G., & Dekker, & R. (2004). *A dynamic approach for planning preventive railway maintenance activities*. www.witpress.com.

Budai, G., Huisman, D., & Dekker, R. (2004). *Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities*. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602085>

Buurman, B., Gkiotsalitis, K., & van Berkum, E. C. (2023). Railway maintenance reservation scheduling considering detouring delays and maintenance demand. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 25, 100359. <https://doi.org/10.1016/J.JRTPM.2022.100359>

Cheung, B. S. N., Chow, K. P., Hui, L. C. K., & Yong, A. M. K. (1999). Railway track possession assignment using constraint satisfaction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(5), 599–611. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(99\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(99)00025-1)

Clemens Kienzler, Carsten Lotz, & Sebastian Stern. (2020). *Using analytics to get European rail maintenance on track | McKinsey*. <https://www.mckinsey.com/industries/public-sector/our-insights/using-analytics-to-get-european-rail-maintenance-on-track#/>

Dao, C. D.; Basten, R., Hartmann, A., Dao, C., Basten, R., & Hartmann, A. (2018). *Maintenance scheduling for railway tracks under limited possession time Item Type Technical Paper Maintenance Scheduling for Railway Tracks under Limited Possession Time*. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000163>

D'Ariano, A., Meng, L., Centulio, G., & Corman, F. (2019). Integrated stochastic optimization approaches for tactical scheduling of trains and railway infrastructure maintenance.

Computers & Industrial Engineering, 127, 1315–1335.

<https://doi.org/10.1016/J.CIE.2017.12.010>

Den Hertog, D., Van Zante-De Fokkert, J. I., Sjamaar, S. A., & Beusmans, R. (2005). Optimal working zone division for safe track maintenance in The Netherlands. *Accident Analysis & Prevention*, 37(5), 890–893. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2005.04.006>

EIM-EFRTC-CER Working Group. (2012). *Report from the EIM-EFRTC-CER Working Group on Market Strategies for Track Maintenance & Renewal*. <https://www.cer.be/cer-reports/report-from-the-eim-efrtc-cer-working-group-on-market-strategies-for-track-maintenance-renewal?highlight=WyJlaW0iXQ==>

Erick Burgueno Salas 2022- Rail industry worldwide Statista. (n.d.). *Rail industry worldwide - Statistics & Facts | Statista*. Retrieved June 15, 2023, from <https://www.statista.com/topics/1088/rail-industry/#topicOverview>.

Eurostat 2020 Railway passenger transport statistics - quarterly and annual data - *Statistics Explained*. Retrieved June 15, 2023, from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data.

Forsgren, M., Aronsson, M., & Gestrelus, S. (2013). Maintaining tracks and traffic flow at the same time. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 3(3), 111–123. <https://doi.org/10.1016/J.JRTPM.2013.11.001>

Heinicke, F., Simroth, A., Scheithauer, G., & Fischer, A. (2015). A railway maintenance scheduling problem with customer costs. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(1), 113–137. <https://doi.org/10.1007/S13676-014-0071-3>

Higgins, A. (1998). Scheduling of railway track maintenance activities and crews. *Journal of the Operational Research Society*, 49(10), 1026–1033. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600612>

Lake, M., Ferreira, L., & Murray, M. (2000). *Minimising costs in scheduling railway track maintenance*. www.witpress.com

Lidén, T. (2014). Survey of railway maintenance activities from a planning perspective and literature review concerning the use of mathematical algorithms for solving such planning and scheduling problems (diva-portal.org)

Lidén, T. (2015). Railway Infrastructure Maintenance - A Survey of Planning Problems and Conducted Research. *Transportation Research Procedia*, 10, 574–583.

<https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2015.09.011>

Lidén, T., & Joborn, M. (2017). An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 74, 327–347. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2016.11.016>

Marcos, P., Bueno, S., Vilela, P., Bueno, P. M. S., Christofolletti, L. M., & Vieira, A. P. (2019). *Optimizing Railway Track Maintenance Scheduling to Minimize Circulation Impacts Development of new testing techniques-PhD Program View project Development of technological improvements on View project OPTIMIZING RAILWAY TRACK MAINTENANCE SCHEDULING TO MINIMIZE CIRCULATION IMPACTS*. <https://doi.org/10.1115/JRC2019-1298>

Martins Ribeiro, I., Vale, C., Ribeiro, I. M., & Calçada, R. (2011). *Integer Programming to Optimize Tamping in Railway Tracks as Preventive Maintenance*.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000296)

Nijland, F., Gkiotsalitis, K., & van Berkum, E. C. (2021). Improving railway maintenance schedules by considering hindrance and capacity constraints. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 126, 103108. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2021.103108>

Oudshoorn, M., Koppenberg, T., & Yorke-Smith, N. (2022). Optimization of annual planned rail maintenance. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(6), 669–687.

<https://doi.org/10.1111/MICE.12764>

Peng, F., & Ouyang, Y. (2012). Track maintenance production team scheduling in railroad networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), 1474–1488.

<https://doi.org/10.1016/J.TRB.2012.07.004>

Statistical Office of the European Communities. (n.d.). *Transport statistics: 2018 edition*.

Retrieved June 15, 2023, from <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-catalogues/-/ks-02-18-078>.

Su, Z., Jamshidi, A., Núñez, A., Baldi, S., & De Schutter, B. (2019). Integrated condition-based track maintenance planning and crew scheduling of railway networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105, 359–384.

<https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.05.045>

Van Zante-De Fokkert, J. I., Den Hertog, D., Van Den Berg, F. J., & Verhoeven, J. H. M. (2007). The Netherlands schedules track maintenance to improve track workers' safety. *Interfaces*, 37(2), 133–142. <https://doi.org/10.1287/inte.1060.0246>

Vansteenwegen, P., Dewilde, T., Burggraeve, S., & Cattrysse, D. (2016). An iterative approach for reducing the impact of infrastructure maintenance on the performance of railway systems. *European Journal of Operational Research*, 252(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.12.037>

Λυμπέρης. (2011). *Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές*. Συμμετρία

Μ.Γ Καρλαύτη και Ν.Δ Λαγαρό (2010). *Εισαγωγή στην επιχειρησιακή βελτιστοποίηση*