



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ  
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ**

**ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΛΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γκιοτσαλίτης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2026



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και του κύκλου προπτυχιακών σπουδών μου στο Πολυτεχνείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι υπήρξαν πολύτιμοι αρωγοί στην προσπάθειά μου.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γκιτσιάλιτη Κωνσταντίνο, επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και την ευκαιρία που προσέφερε να εκπονήσω την εργασία αυτή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Matina Lai-Ying Chau, για την υποστήριξη, τις συμβουλές και το γενικότερο ενδιαφέρον καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Και βεβαίως ευχαριστώ την οικογένεια μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για την στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Μάρτιος 2026

Θεοδωροπούλου Παρασκευή



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συντήρηση σιδηροδρομικών γραμμών αποτελεί ένα ευρύ και σύνθετο πεδίο έρευνας και πρακτικής. Σε ένα σύγχρονο σιδηροδρομικό σύστημα, η συντήρηση δε θεωρείται πλέον απλώς ως μια αναγκαία λειτουργική δαπάνη αλλά ως μια στρατηγική επένδυση που στοχεύει στη διασφάλιση λειτουργικής αξιοπιστίας και μέγιστης ασφαλείας. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του σιδηροδρομικού δικτύου, η συντήρηση της επιδομής και συναφών στοιχείων είναι μια πολυδάπανη και λειτουργικά απαιτητική διαδικασία. Κατά συνέπεια, η ελαχιστοποίηση του κόστους των απαιτούμενων παρεμβάσεων παράλληλα με τη διατήρηση επαρκών επιπέδων απόδοσης έχουν καταστεί κρίσιμος στόχος για τους διαχειριστές υποδομών. Έτσι, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον βέλτιστο προγραμματισμό της συντήρησης των σιδηροδρόμων, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα της φθοράς της σιδηροδρομικής γραμμής. Ένα στοχαστικό μοντέλο προσαρμόστηκε ντετερμινιστικά και αναπτύχθηκε περαιτέρω ώστε να δημιουργήσει το προτεινόμενο μοντέλο της παρούσας μελέτης, με σκοπό την παροχή ενός γενικεύσιμου και υπολογιστικά αποδοτικού εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων που αφορούν τη συντήρηση. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος Βελτιστοποίησης Προγραμματισμού Συντήρησης και Επισκευής (MRPO) αναπτύχθηκε με τη μέθοδο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) και επιλύθηκε σε λογισμικό Gurobi με χρήση της μεθοδολογίας διακλάδωσης και οριοθέτησης (Branch-and-Bound). Υποθέσεις και παράμετροι που αφορούν οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες ενσωματώθηκαν στους περιορισμούς του μοντέλου. Για την περαιτέρω ανάλυση του συνόλου των λύσεων Pareto που παράχθηκαν με τη μέθοδο περιορισμού έψιλον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων. Η ανάλυση αυτή, παράλληλα με μια σύγκριση αποτελεσμάτων, διευκόλυνε την αξιολόγηση της επιρροής και της κρισιμότητας των μεταβλητών του μοντέλου και της αντίστοιχης ανθεκτικότητάς του. Οι λύσεις Pareto που προέκυψαν για τα διάφορα σενάρια στη σιδηροδρομική γραμμή υπογραμμίζουν τους συμβιβασμούς (trade-offs) μεταξύ οικονομικού και τεχνικού στόχου, παρέχοντας πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων, προσδιορίζοντας τα κύρια ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι διαχειριστές του δικτύου κατά τον σχεδιασμό στρατηγικών συντήρησης.

## ABSTRACT

Railway line maintenance constitutes a broad and complex field of research and practice. In modern railway systems, maintenance is no longer considered merely as a necessary operational expense but as a strategic investment targeting operational reliability and maximum safety. Due to the technical complexity of railway infrastructure, the maintenance of lines and associated assets is both costly and operationally demanding. Consequently, minimising the cost of required interventions while maintaining adequate performance levels has become a critical objective for infrastructure managers. Thus, this thesis focuses on the optimal planning of railway maintenance while accounting for variability of railway track wear. A stochastic model was deterministically adapted and further developed to create the proposed model of this study, intended to provide infrastructure managers with a generalisable and computationally efficient decision-support tool, providing a globally optimal set of solutions to a multi-objective problem. The mathematical formulation of this thesis' Maintenance and Repair Planning Optimisation Problem (MRPOP) was developed and linearised into a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model, solved on Gurobi using the Branch-and-Bound methodology. Assumptions and parameters encompassing technical and economic factors were incorporated by the constraints of the model. To further analyse the Pareto set of solutions generated by the  $\epsilon$ -constraint method, a sensitivity analysis was performed. This, alongside a benchmark comparison of results, facilitated the evaluation of the influence and criticality of the model's variables and its respective robustness. The Pareto curves that emerged for the various scenarios on the railway line highlight the trade-offs between financial and technical objective, providing insights for decision-making, identifying the main issues that the infrastructure managers must address when planning maintenance strategies.



## Πίνακας Περιεχομένων

---

1.Εισαγωγή.....	10
1.1 Αντικείμενο .....	10
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	13
2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	14
2.1 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση .....	14
2.2 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικής γραμμής .....	15
2.3 Σύνοψη και Βασικά Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας .....	21
3. Μεθοδολογική προσέγγιση .....	27
3.1 Περιγραφή του Προβλήματος Φθοράς Έρματος .....	27
3.2 Περιγραφή Μοντέλου .....	30
4. Εφαρμογή Μοντέλου και Αποτελέσματα .....	31
4.1 Μαθηματικό Μοντέλο.....	31
Σύνολα.....	31
Παράμετροι .....	32
Μεταβλητές απόφασης.....	33
Αντικειμενικές συναρτήσεις .....	34
Περιορισμοί.....	34
4.2 Εφαρμογή μεθόδου περιορισμού έψιλον ( $\epsilon$ -constrained).....	36
4.3 Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου .....	38
4.4 Ανάλυση Ευαισθησίας και Αξιολόγηση Σεναρίων .....	46
4.5 Συμπεράσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας.....	57
5.Επίλογος.....	59
5.1 Βασικά Συμπεράσματα .....	59
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	63
Παράρτημα Α .....	67

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1-ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Εκτίμηση κατάστασης και περιθωρίου φθοράς της επιδομής.....	11
Πίνακας 3-1: Κυριότεροι Παράγοντες Φθοράς έρματος.....	29
Πίνακας 4-1: Τιμές αναφοράς παραμέτρων .....	37
Πίνακας 4-2: Τιμές μετώπου Pareto για $\varepsilon \in [5,10]$ .....	41

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2-ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4-1 : Επαναληπτική Βελτιστοποίηση του προβλήματος MRPO για $\varepsilon \in [1,19]$ για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας .....	39
Διάγραμμα 4-2 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου διαθέσιμου προϋπολογισμού $\lambda\{B_r^{\max}\}$ for $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%. .....	48
Διάγραμμα 4-3 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου διαθέσιμου προϋπολογισμού $\lambda\{B_r^{\max}\}$ for $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%. .....	49
Διάγραμμα 4-4 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου παραμέτρου λειτουργίας φθοράς $\lambda\{DF_r\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%. .....	50
Διάγραμμα 4-5 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου παραμέτρου λειτουργίας φθοράς $\lambda\{DF_r\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%. .....	50
Διάγραμμα 4-6 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου προεξοφλητικού επιτοκίου $\lambda\{d_r\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%. .....	52
Διάγραμμα 4- 7 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου προεξοφλητικού επιτοκίου $\lambda\{d_r\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%. .....	53
Διάγραμμα 4-9 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου ορίου φθοράς $\lambda\{Y_r^{\max}\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%. .....	55
Διάγραμμα 4-8 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου ορίου φθοράς $\lambda\{Y_r^{\max}\}$ για $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9,1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%. .....	55

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3-ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-Δομή σιδηροδρομικής γραμμής .....	27
Εικόνα 2- Κύκλος υποβάθμισης σιδηροδρομικής γραμμής .....	28

# 1.Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Οι μεταφορές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο την οικονομία όσο και την προσβασιμότητα των υπηρεσιών που παρέχονται στους πολίτες μιας κοινωνίας. Μεταξύ των διάφορων υποδομών μεταφορών, ο σιδηρόδρομος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη χερσαία μεταφορά ανθρώπων και αγαθών σε μία χώρα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα σιδηροδρομικά δίκτυα εκτείνονται σε πάνω από 1,3 εκατομμύρια χιλιόμετρα, με τις Ηνωμένες Πολιτείες να κατέχουν το μεγαλύτερο σε μήκος σιδηροδρομικό δίκτυο παγκοσμίως. Υποστηρίζοντας 458 δισεκατομμύρια επιβατικά χιλιόμετρα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), η ζήτηση στις επιβατικές σιδηροδρομικές μεταφορές αυξήθηκε κατά ποσοστό 5,8% το 2024, από περίπου 419 δις επιβατικά χιλιόμετρα το 2023 (Eurostat 2020). Το έτος 2024, η Γερμανία σημείωσε τον μεγαλύτερο αριθμό σιδηροδρομικών μεταφορών στην Ευρώπη, καταγράφοντας περίπου 2,9 δισεκατομμύρια επιβάτες, με την Γαλλία να ακολουθεί με περίπου 1,3 δισεκατομμύρια επιβάτες (Eurostat 2025).

Σε επίπεδο περιβαλλοντικού αποτυπώματος, τα προληπτικά μέτρα ενάντια στην υπερθέρμανση του πλανήτη έχουν καταστεί κεντρικά για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής κρίσης την τελευταία δεκαετία, θέτοντας τους στόχους για την υποστήριξη της βιωσιμότητας στην πρώτη γραμμή των δράσεων σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι σιδηροδρομικές μεταφορές ειδικότερα, αποτελούν μια ασφαλή και παράλληλα φιλική προς το περιβάλλον λύση, διασφαλίζοντας το δικαίωμα στην κινητικότητα για όλους τους κατοίκους με σχετικά χαμηλό κόστος όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων. Αυτό το ζήτημα έχει ληφθεί υπόψη από φορείς που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 25 εκατομμύρια τόνους αυξάνοντας το μερίδιο των σιδηροδρομικών μεταφορών από 18% σε 30% έως το 2030 (CER & Rail freight forward 2020).

Η αυξημένη χρήση του συγκεκριμένου μέσου μεταφοράς απαιτεί και την αύξηση τόσο της χωρητικότητας όσο και την εφαρμογή αμαξοστοιχιών μεγαλύτερων ταχυτήτων και χωρητικότητας. Αυτή η αυξημένη ζήτηση και σημαντική χρήση, ωστόσο, σταδιακά οδηγεί σε επιδείνωση της κατάστασης της σιδηροδρομικής επιδομής ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τα απαιτούμενα έξοδα συντήρησης για την υποστήριξη τρένων υψηλών ταχυτήτων. Ως αποτέλεσμα, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ξοδεύουν 15-25 δις ευρώ

κάθε χρόνο στη συντήρηση και ανανέωση της σιδηροδρομικής επιδομής (EIM-EFRTC-CER Working Group 2012). Βάσει στοιχείων του 2023 (ReportLinker 2023) για τις δαπάνες συντήρησης σιδηροδρομικών υποδομών, το Ηνωμένο Βασίλειο κατέχει την πρώτη θέση με δαπάνες ύψους 8.170 δις ευρώ, ακολουθούμενο από την Ιταλία (5.295 δις) και τη Γαλλία (3.575 δις).

Μέσω της συντήρησης εξασφαλίζεται σε καθημερινή βάση η ασφαλής λειτουργία της επιδομής του δικτύου. Στο πλαίσιο της συντήρησης, περιλαμβάνονται όλα τα μέτρα και οι διεργασίες που απαιτούνται για να διατηρείται η επιδομή στην οφειλόμενη κατάσταση και μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες εργασιών, την επιθεώρηση και τις επεμβάσεις συντήρησης (Λυμπέρης, 2011).

Η επιθεώρηση περιλαμβάνει τον έλεγχο και την αξιολόγηση της τρέχουσας κατάστασης για τον προσδιορισμό της παρούσας/πραγματικής κατάστασης της επιδομής ενώ η συντήρηση την αποκατάσταση των ήδη υφιστάμενων προβλημάτων στο δίκτυο (Liden 2018). Η συχνότητα των παρεμβάσεων που πρέπει να εκτελεστούν στα πλαίσια της συντήρησης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, με τους κρισιμότερους να είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, η μέγιστη/επιτρεπόμενη ταχύτητα του εκάστοτε τμήματος γραμμής, και το βάρος του συρμού. Οπότε, όταν οι οριακές τιμές φθοράς της γραμμής υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, θα πρέπει να διορθωθούν άμεσα ή να επιβληθεί βραδυπορία ανάλογη του βαθμού φθοράς. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει μια προσέγγιση εκτίμησης της κατάστασης της επιδομής και το περιθώριο φθοράς κάθε υλικού (Λυμπέρης 2011) .

**Πίνακας 1-1: Εκτίμηση κατάστασης και περιθωρίου φθοράς της επιδομής**

Κριτήριο Επιλογής	Περιγραφή
KE1	Οριακή τιμή παραλαβής επιμετρούμενη μετά από νέα κατασκευή ή συντήρηση
KE2	Υπέρβαση τιμής που απαιτεί λήψη απόβαση βάση οικονομικών κριτηρίων για τον προγραμματισμό επιδιόρθωσης
KE3	Περιγράφει τεχνικά και οικονομικά περιθώρια φθοράς και η υπέρβαση της απαιτεί επίσπευση επιδιόρθωσης
KE4	Υπέρβαση τιμής σημαίνει περιορισμός λειτουργικότητας και απαίτηση για άμεση επιδιόρθωση

Οριακή Τιμή	Υπέρβαση τιμής απαιτεί διακοπή κυκλοφορίας και άμεση επιδιόρθωση
-------------	--

Η συντήρηση ενός σιδηροδρομικού δικτύου στοχεύει στην εξασφάλιση υψηλών προτύπων ασφαλείας και ικανότητας λειτουργίας του δικτύου, μέσω βέλτιστου προγραμματισμού της συντήρησης από άποψη χρόνου και οικονομικού αντίκτυπου. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζονται προληπτικά μέτρα για την ελαχιστοποίηση και την αποφυγή διαταραχών στην ομαλή λειτουργία της επιβατικής και εμπορευματικής κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο. Η σημασία αυτών των προσπαθειών είναι εμφανής, για παράδειγμα στην συντήρηση των ιταλικών σιδηροδρόμων όπου το 2023 δαπανήθηκαν περίπου 5.3 δις ευρώ (€) στη συντήρησή τους, ενώ στην Ευρώπη το συνολικό ποσό ξεπέρασε τα 25 δις ευρώ (€). Σε όλη την Ευρώπη οι προϋπολογισμοί για τη συντήρηση των σιδηροδρόμων είναι περιορισμένοι και οι φορείς εκμετάλλευσης των σιδηροδρόμων αναζητούν τρόπους να πράξουν περισσότερα με λιγότερους οικονομικούς πόρους (Clemens Kienzler 2020).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η πολυπλοκότητα του σύγχρονου σιδηροδρόμου επιβάλλει τη χρήση στρατηγικών λήψης αποφάσεων που δεν περιορίζονται μόνο στην τεχνική αρτιότητα των υποδομών. Η διαχείριση της σιδηροδρομικής επιδομής μετασχηματίζεται πλέον από το καθαρά τεχνικό κομμάτι της συντήρησης σε ένα μοντέλο ολιστικής διαχείρισης του προβλήματος. Η λήψη αποφάσεων για τη συντήρηση δεν αποτελεί απομονωμένη τεχνική διαδικασία, αλλά ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό διάφορους περιορισμούς που εστιάζουν, εκτός από τεχνικά, και σε κοινωνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα. Ως αποτέλεσμα, η κρισιμότητα των παραπάνω δεδομένων πρέπει να ενσωματώνεται στην στρατηγική λήψης αποφάσεων. Η ανάλυση επικινδυνότητας, η βελτιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής του μέσου και η διαθεσιμότητα/χωρητικότητα της γραμμής αποτελούν τους βασικούς άξονες του γενικότερου προβλήματος. Η μετάβαση από την εμπειρική στην αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων στη διαμόρφωση βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας έρευνας.

Με γνώμονα την ανάγκη για ένα σφαιρικό πλαίσιο συντήρησης, η εργασία αναπτύσσεται σε τέσσερις διαφορετικές ενότητες. Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο προσφέρει μια εικόνα σχετική με το πλαίσιο του προβλήματος και αναδεικνύει την αναγκαιότητα

συντήρησης μιας σιδηροδρομικής γραμμής. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου καλύπτει διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης προγραμματισμού της συντήρησης και ελαχιστοποίησης κόστους. Στην τρίτη ενότητα γίνεται περιγραφή του προβλήματος φθοράς του έρματος και παρουσιάζεται η επιλεγείσα μεθοδολογία ανάπτυξης του προβλήματος, η διαμόρφωσή του, καθώς και οι προϋποθέσεις εφαρμογής του. Στην τέταρτη ενότητα πραγματοποιείται η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου του προβλήματος, για να διατυπωθεί επίσημα το πρόβλημα Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Συντήρησης και Επισκευής (Maintenance and Repair Planning Optimisation Problem, MRPO) της παρούσας διπλωματικής. Το μοντέλο MRPO δοκιμάστηκε σε ένα αριθμητικό παράδειγμα και αξιολογήθηκε συγκριτικά με τη μελέτη αναφοράς. Ακολουθεί η διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων και τέλος ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και ο εντοπισμός των κρισιμότερων παραμέτρων. Στην τελευταία ενότητα γίνεται παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων που απορρέουν της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία μελετά τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού της συντήρησης σιδηροδρόμων, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα και τη μεταβλητότητα της φθοράς του σιδηροδρομικού υποστρώματος, βελτιστοποιώντας τις παρεμβάσεις συντήρησης ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη και να πληρούνται τα απαραίτητα πρότυπα συντήρησης των σιδηροδρομικών γραμμών. Το στοχαστικό μοντέλο βελτιστοποίησης της συντήρησης των Bressi et al (2021) προσαρμόζεται χρησιμοποιώντας μια ντετερμινιστική μέθοδο για να διαμορφώσει τους περιορισμούς υποβάθμισης και τους οικονομικούς περιορισμούς του μοντέλου Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Program MILP) του MRPO, που μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις ακριβούς λύσης. Λόγω των πολλαπλών στόχων του μοντέλου, χρησιμοποιείται η μέθοδος περιορισμού έψιλον ( $\epsilon$ -constrained) για να δημιουργηθεί ένα σύνολο λύσεων Pareto, εξετάζοντας τις συμβιβαστικές λύσεις μεταξύ των οικονομικών δεικτών και του κόστους συντήρησης. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για να εξεταστεί η εφαρμοσιμότητα του μοντέλου, καθώς το ντετερμινιστικό πλαίσιο έχει σχεδιαστεί για γενίκευση, έτσι ώστε να

μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα συντήρησης σιδηροδρομικών γραμμών.

## 2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση

Το παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι πληροφορίες βασίστηκαν στο βιβλίο «Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για Μηχανικούς» των Μ. Καρλαύτη και Ν. Λαγαρό (2010). Η επιστήμη του μηχανικού έχει ως κύριο στόχο τον σχεδιασμό και την κατασκευή συστημάτων όπως είναι τα κτήρια, οι γέφυρες, οι δρόμοι, τα σιδηροδρομικά δίκτυα, κλπ. Τη σήμερα ημέρα η τεχνολογική πρόοδος οδηγεί στην αύξηση των απαιτήσεων και έτσι κρίνεται απαραίτητο το εκάστοτε σύστημα να σχεδιασθεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Με τον όρο «βέλτιστος» χαρακτηρίζεται ο σχεδιασμός που ικανοποιεί τις λειτουργικές προδιαγραφές και πληροί ταυτόχρονα συγκεκριμένα κριτήρια.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εξεύρεση ενός συνδυασμού ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές και οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές απόφασης (decision variables), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) που ορίζει το πρόβλημα. Επίσης, απαραίτητη είναι η ύπαρξη περιορισμών που καθορίζουν το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού και τον χώρο αναζήτησης και άλλες συναρτήσεις περιορισμού (constraint functions) οι οποίες καθορίζουν το χώρο των εφικτών λύσεων του προβλήματος.

Υπάρχουν πέντε βασικές τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές μαθηματικού προγραμματισμού και είναι ο γραμμικός προγραμματισμός, ο μη-γραμμικός προγραμματισμός, ο ακέραιος προγραμματισμός, ο γεωμετρικός προγραμματισμός και ο δυναμικός προγραμματισμός. Σνηθέστερη μέθοδος μαθηματικού προγραμματισμού είναι ο γραμμικός προγραμματισμός με τη βοήθεια του οποίου βελτιστοποιείται η τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εφικτό σύνολο ενός γραμμικού προγράμματος είναι κυρτό, το οποίο εξασφαλίζει ολικά βέλτιστη λύση όταν επιλύεται με ακριβείς μεθόδους (π.χ. τη μέθοδο Simplex ή Branch and Bound). Εκτός από τις ακριβείς μαθηματικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης

προγραμματισμού υπάρχουν επίσης και οι μεταευριστικές μέθοδοι (metaheuristics) όπως η στρατηγική εξέλιξη, η μέθοδος προσομοίωσης ανόπτησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι κ.α., με την εφαρμογή τους να αποδεικνύεται αποτελεσματική σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων.

## **2.2 Βελτιστοποίηση προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικής γραμμής**

Η συντήρηση ενός σιδηροδρομικού δικτύου αποτελεί ένα ζήτημα που παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για τους ερευνητές με βασικό ερώτημα το πότε πρέπει να πραγματοποιηθεί η συντήρηση. Η ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου διακοπής λειτουργίας της εκάστοτε γραμμής για συντήρηση είναι σημαντικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού της συντήρησης. Αυτό εξετάστηκε από τον Higgins (1998), που πρότεινε ένα μοντέλο που έχει ως στόχο να ορίσει την καλύτερη κατανομή των δραστηριοτήτων συντήρησης και συνεργείων παράλληλα με την ελαχιστοποίηση της διακοπής των προγραμματισμένων δρομολογίων καθώς και τη μείωση του χρόνου αποπεράτωσής τους. Λήφθηκαν υπόψη περιορισμοί για τον διαθέσιμο προϋπολογισμό, την προτεραιότητα των εργασιών συντήρησης, τη διαθεσιμότητα της γραμμής και τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού. Η προσέγγιση μέσω μιας μεταευριστικής αναζήτησης οδήγησε σε ένα πρόγραμμα εργασιών που είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των μη αναμενόμενων καθυστερήσεων κατά ποσοστό 6.3%.

Οι Cheung et al (1999) σε αντίθεση, ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση του προβλήματος κατανομής πόρων για την εκτέλεση ορισμένων εργασιών, με τη χρήση της γλώσσας περιορισμού CHIP. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα συγκροτείται από την ανάθεση των σιδηροδρομικών γραμμών σε ένα δεδομένο σύνολο προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης βάσει κάποιων περιορισμών. Παράλληλα, δημιουργήθηκε ένα σύστημα για να εκτελεί τις εργασίες χρησιμοποιώντας τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών (EWTPAS). Ύστερα από δοκιμή ενός έτους προέκυψε ότι το σύστημα αυτό κατάφερε να αντικαταστήσει τη χειροκίνητη ανάθεση των εργασιών και εν τέλει ήταν δέκα φορές πιο αποτελεσματικό από το υφιστάμενο.

Οι Lake et al (2000) δημιούργησαν ένα μοντέλο για τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης σιδηροδρομικής τροχιάς σε ένα υφιστάμενο πρόγραμμα συντήρησης με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης. Η

σύνθεση του προγράμματος επιτρέπει διαφορετικά συνεργεία να απασχολούνται για την ίδια δραστηριότητα συντήρησης σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα ενώ παράλληλα ενσωματώνει μεμονωμένους χρόνους εγκατάστασης και αφαίρεσης που απαιτούνται ανά περίπτωση. Χρησιμοποίησαν ευρετική μέθοδο αποτελούμενη από δύο στάδια, στο πρώτο εξάγεται μία εφικτή λύση ενώ στο δεύτερο γίνεται εφαρμογή προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing), δηλαδή μια επαναληπτική τεχνική η οποία εξετάζει ένα σύνολο λύσεων του προβλήματος, κινούμενη από τη μία λύση στην άλλη, μέχρι τελικώς να βρεθεί η βέλτιστη ή σχεδόν βέλτιστη λύση. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τη μέθοδο του Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP).

Σε μία μελέτη των Budai & Dekker (2004) δημιουργήθηκαν μέθοδοι για την εύρεση των βέλτιστων διαστημάτων κατάληψης της γραμμής για εκτέλεση εργασιών στα πλαίσια προληπτικής συντήρησης. Κατά την ανάπτυξη των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν κυρίως περίοδοι χωρίς κίνηση τρένων και η προσέγγιση έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο ανατέθηκαν εργασίες σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και διαφορετικά τμήματα της γραμμής, ενώ στο δεύτερο προκαθορισμένες εργασίες ανατίθενται σε χρονικά διαστήματα χωρίς τρένα. Προέκυψε ότι ο συνδυασμός εργασιών ρουτίνας με άλλες εργασίες οδήγησε σε μείωση κατά 33% του χρόνου κατάληψης γραμμής και σε κόστος. Σε άλλη μελέτη τους, οι Budai et al. (2005) στόχευσαν στην ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και της επιβάρυνσης των χρηστών και της κυκλοφορίας. Αυτό επιτεύχθηκε με τη δημιουργία Προγράμματος Προληπτικής Συντήρησης (Preventive Maintenance Scheduling Problem, PMSP), το οποίο εστίασε στην ομαδοποίηση μικρών εργασιών και την ανάθεση τους σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Το πρόγραμμα υλοποιήθηκε με τη δημιουργία μαθηματικού μοντέλου και ευρετικών λύσεων.

Οι Podofillini et al. (2005) στη μελέτη τους έθεσαν ως στόχο τη μείωση κόστους διαχείρισης και συντήρησης της σιδηροδρομικής επιδομής σύμφωνα με τα υπάρχοντα επίπεδα ασφαλείας. Έθεσαν τους βασικούς πυλώνες που αποτρέπουν μια επερχόμενη αστοχία να καταλήξει σε εκτροχιασμό, οι οποίοι ήταν η ποιότητα των γραμμών, η ultrasonic επιτήρηση, τα φυσικά εμπόδια και ο εντοπισμός του κυκλώματος παρακολούθησης. Το μοντέλο που ανέπτυξαν για την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας στο δίκτυο βασίστηκε στην αρχή της PF-interval, δηλαδή τον χρόνο μεταξύ εντοπισμού και εμφάνισης της βλάβης.

Με αφορμή τον μεγάλο αριθμό θανατηφόρων εργατικών ατυχημάτων που έχουν σημειωθεί στην Ολλανδία ανά περιόδους, οι Den Hertog et al (2005) ανέπτυξαν βασικούς κανόνες διαίρεσης του σιδηροδρομικού δικτύου σε ζώνες εργασίας. Μελέτησαν τον διαχωρισμό της υποδομής σε ζώνες για την αποτελεσματικότερη δραστηριότητα των συνεργείων σε αυτές. Οι κανόνες διαίρεσης αναπτύχθηκαν στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Ολλανδίας. Εν συνεχεία, οι van Zante de Fokkert et al. (2007) με απώτερο στόχο την μείωση του κόστους συντήρησης σε συνδυασμό με την ασφάλεια των εργαζομένων, παρουσίασαν ένα σύστημα προγραμματισμένης συντήρησης διάρκειας τεσσάρων εβδομάδων και διαίρεσαν την επιδομή σε διαφορετικές ζώνες εργασίας. Αρχικά, προσδιόρισαν τα Πλέγματα Σταθερής Τροχιάς (Single-Track Grids, STG) τα οποία στη συνέχεια αναθέτονται στην αντίστοιχη ζώνη συντήρησης. Ορίστηκαν δηλαδή οι ζώνες εργασίας της σιδηροδρομικής γραμμής που μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας ταυτόχρονα. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming, MIP) για την αντιστοίχιση των πλεγμάτων σταθερής τροχιάς σε νύχτες για να δημιουργηθεί το τελικό πρόγραμμα συντήρησης της γραμμής. Αυτό οδήγησε στην πτώση του ατομικού κινδύνου από 3.4 σε 2.0 θανάτους ανά 10000 εργαζομένους για το χρονικό διάστημα 1999-2004.

Στην ερευνά τους οι Andrade and Teixeira (2011) ανέπτυξαν ένα μοντέλο αντικειμενικής βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια (bi-objective optimization) για τον προγραμματισμό παρεμβάσεων συντήρησης και ανανέωσης, συσχετισμένες με τη γεωμετρία της σιδηροδρομικής γραμμής. Το πρόβλημα διατυπώθηκε ως πρόβλημα ακέραιης βελτιστοποίησης και επικεντρώθηκε στη μείωση του κόστους συντήρησης και των καθυστερήσεων των αμαξοστοιχιών. Για την αξιολόγηση του μοντέλου εφαρμόστηκε σε ένα απλοποιημένο δίκτυο η τεχνική προσομοιωμένης απόπτησης.

Οι Peng and Ouyang (2012) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τον χωροχρονικό αντικειμενικό στόχο του Προβλήματος Προγραμματισμού Ομάδων (Production Team Scheduling Problem, PTSP), δηλαδή πότε θα πραγματοποιηθεί μία εργασία συντήρησης και σε ποιο συνεργείο θα ανατεθεί. Στο πρόβλημα επιβλήθηκαν αρκετοί περιορισμοί, κάποιιοι από τους οποίους αφορούσαν τα χρονοπαράθυρα, τις προτιμήσεις χρήσης ορισμένων συνεργείων για συγκεκριμένες εργασίες, καθώς και ότι κάθε εργασία μπορεί να εκτελεστεί από ένα μόνο συνεργείο.

Μια διαφορετική προσέγγιση ήταν αυτή από τους Heinicke et al (2015) οι οποίοι επέλυσαν ένα Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem, VRP) συγκρίνοντας παράλληλα το πρόβλημα με άλλα γραμμικά μοντέλα μικτού προγραμματισμού. Στο πρόβλημα οι εργασίες συντήρησης επιβαρύνονται με ποινές έως ότου ολοκληρωθούν, δηλαδή όσο πιο πολύ αργεί ο χρόνος περάτωσης κάποιας εργασίας συντήρησης, τόσο αυξάνεται και το ύψος της ποινής σε κόστος.

Σε πιο πρόσφατες έρευνες, οι Sharma et al (2017) ασχολήθηκαν με την προληπτική και επιτόπια συντήρηση χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων χρονικής διάρκειας 33 μηνών. Αρχικά, διέκριναν τα δεδομένα βάσει των χρονικών διαστημάτων τους, έκαναν συνάθροιση του δείκτη ποιότητας τροχιάς (train quality index, TQI), ο οποίος έδειξε αν γραμμή μπορούσε να υποστηρίξει την κίνηση των σιδηροτροχιών, και στη συνέχεια έκαναν πρόβλεψη εμφάνισης πιθανών ατελειών στο δίκτυο. Για τον προγραμματισμό της συντήρησης χρησιμοποίησαν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά Markov και για τη διαίρεση σε διαστήματα επιθεώρησης διαφορετικής χρονικής διάρκειας δημιούργησαν ένα διακριτό μοντέλο DTMC (Discrete-Time Markov Chain). Από τη μελέτη προέκυψε το βέλτιστο αποτέλεσμα για μία συγκεκριμένη ενέργεια σε μια συγκεκριμένη κατάσταση για ένα συγκεκριμένο διάστημα επιθεώρησης, ενώ παράλληλα επιτεύχθηκε περίπου 10% οικονομία στα συνολικά κόστη που αφορούν τη συντήρηση ανά μίλι σιδηροτροχιάς.

Οι Sun et al. (2017) επέλεξαν μια διαφορετική προσέγγιση εστιάζοντας στη χρήση της συσκευής σύνδεσης γραμμής (turnout) στη συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου και στο πρόβλημά τους ενσωμάτωσαν τα χρονοπαράθυρα, την ώρα έναρξης των εργασιών συντήρησης, καθώς και την ανάθεση των συνεργείων στην εκάστοτε εργασία. Πραγματοποίησαν πειράματα για την αξιολόγηση της ευαισθησίας και επίδρασης των διάφορων παραμέτρων στο πρόβλημα. Τέλος, χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming, MILP) για την περιγραφή των χαρακτηριστικών αποτυχίας.

Οι Su et al (2019) πραγματοποίησαν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση μακροπρόθεσμου προγραμματισμού συντήρησης και βραχυπρόθεσμης δρομολόγησης των συνεργείων συντήρησης. Δημιούργησαν έναν ελεγκτή πρόβλεψης μοντέλου (Model Predictive Control, MPC) για υβριδικά συστήματα με συνεχή και διακριτή δυναμική. Στόχος τους ήταν η ελαχιστοποίηση της επιδείνωσης της κατάστασης του δικτύου και του κόστους συντήρησης αυτού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε ξανά με τη χρήση MILP

ενώ τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσέγγισης έδειξαν μία ισορροπία μεταξύ ασφάλειας και κόστους δικτύου.

Οι Nijland et al. (2021) στην έρευνά τους εστίασαν στην βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων συντήρησης του δικτύου τόσο για τους φορείς εκμετάλλευσης των αμαξοστοιχιών όσο και για τα διάφορα συνεργεία συντήρησης. Εξέτασαν τα εμπόδια από σταθμευμένες επιβατικές αμαξοστοιχίες, προγραμματισμένες εμπορευματικές, και τον φόρτο εργασίας των εργαζομένων και διέκριναν τους τομείς μηχανικής συντήρησης σε διάφορα επίπεδα καθώς επηρεάζουν το εύρος των εμποδίων. Το πρόβλημα αναπτύχθηκε ομοίως με τη χρήση μοντέλου MILP. Ακριβείς και μεταερευτικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν τα εμπόδια, τον φόρτο εργασίας και το υπολογιστικό κόστος.

Μια ακόμα έρευνα που εστιάζει στο κόστος και τη σκοπιμότητα του προγραμματισμού της συντήρησης του δικτύου είναι αυτή των Oudshorn et al (2022), οι οποίοι εξέτασαν ένα πραγματικό πρόβλημα προγραμματισμού εργασιών συντήρησης σιδηροδρομικών μεταφορών. Ανέπτυξαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις του προβλήματος μέσω των ακόλουθων αλγορίθμων: τη στρατηγική εξέλιξη, την άπληστη μεταερευτική, και τον συνδυασμό των δύο. Ο προγραμματισμός αφορούσε την προληπτική συντήρηση της σιδηροδρομικής επιδομής για χρονική διάρκεια ενός έτους. Αποφάνθηκε ότι συγκριτικά με την υφιστάμενη (χειροκίνητη) προσέγγιση, οι προσεγγίσεις με χρήση αλγορίθμου απέδωσαν καλύτερα. Κατέληξαν στο ότι ο συνδυασμός στρατηγικής και άπληστης μεταερευτικής προσέγγισης δίνει χαμηλότερα κόστη, λιγότερες παραβιάσεις σχεδιασμού και διευκολύνει τη συνολική διαδικασία του σχεδιασμού του χρονοδιαγράμματος.

Πρόσφατα, οι Bressi et al (2021) πρότειναν ένα πλαίσιο στοχαστικού προγραμματισμού της συντήρησης του σιδηροδρομικού δικτύου με στόχο τη βελτιστοποίηση του κόστους των κύκλων εργασιών και της ποιότητας του έρματος, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας. Πιο συγκεκριμένα, η φθορά των σιδηροδρομικών τροχιών σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα (μετρούμενη σε κύκλους λειτουργίας) μοντελοποιήθηκε με τη χρήση μοντέλου Markov προκειμένου να ενσωματώσει την αβεβαιότητα και την μεταβλητότητα της φθοράς. Εξετάστηκε η πιθανότητα υπέρβασης ενός ορίου βλάβης πριν από την επόμενη επιθεώρηση. Έτσι, το πολυκριτηριακό πρόβλημα MINLP αξιολογήθηκε σε διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας, ώστε η τιμή να αποτυπώνει την πιθανότητα το εξεταζόμενο υπόστρωμα να μην υπερβαίνει αυτό το όριο και έτσι να

μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο. Εξετάστηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα: 75%, 85%, 95%. Με τη χρήση πραγματικών δεδομένων της γραμμής Lucca-Pistoria (Ιταλία) το μοντέλο MINLP αναδιαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σταθμισμένου αθροίσματος και επιλύθηκε χρησιμοποιώντας έναν γενετικό αλγόριθμο. Έτσι αναπτύχθηκε ένα σύστημα υποστήριξης αποβάσεων για την αντιστάθμιση των αρχικών στόχων της μελέτης.

Οι Buurman et al (2022) ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος συντήρησης για τους φορείς εκμετάλλευσης των αμαξοστοιχιών και για τα διάφορα συνεργεία συντήρησης. Δημιούργησαν ένα εβδομαδιαίο πρόγραμμα επαναλαμβανόμενης προληπτικής συντήρησης που αντικατοπτρίζει τις απαιτήσεις των φορέων εκμετάλλευσης αμαξοστοιχιών και των εργαλάβων συντήρησης και στοχεύει στην αποφυγή καθυστερήσεων στην κυκλοφορία. Για τη λύση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος  $\epsilon$ -constrained για μικρότερα δίκτυα ενώ μεταευρετικά μοντέλα (NSGA-II) για εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα.

Οι Gkonou et al. (2023) πρότειναν ένα βελτιωμένο μαθηματικό μοντέλο για τον συνδυαστικό προγραμματισμό εργασιών συντήρησης και συνεργείων σε σιδηροδρομικά δίκτυα με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους και την αποδοτικότερη κατανομή πόρων. Το μοντέλο χρησιμοποιεί δυαδικό γραμμικό προγραμματισμό επεκτείνοντας ένα υπάρχον μοντέλο με την ενσωμάτωση του προγραμματισμού των συνεργείων, τη διαθεσιμότητα, τις διαδρομές μετακίνησης και το κόστος. Περιλαμβάνονται διαφορετικοί τύποι εργασιών, εναλλακτικές διάρκειες εκτέλεσης, συνδυασμοί δραστηριοτήτων παρέμβασης που μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα καθώς και περιορισμοί που σχετίζονται με τη συχνότητα και τα χρονικά παράθυρα συντήρησης. Το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε ως MILP και επιλύθηκε με το λογισμικό Gurobi. Τα αποτελέσματά του ανέδειξαν τη σημασία της βελτιστοποίησης του κόστους κατάληψης της γραμμής και την ισορροπία φόρτου γραμμής-συνεργείων στο πλαίσιο της διαχείρισης της προληπτικής συντήρησης σιδηροδρομικών δικτύων.

Οι Forsgren et al. (2013) εστίασαν στη βελτιστοποίηση της δημιουργίας δρομολογίων των τρένων και την προληπτική συντήρηση. Για το πρόβλημά τους χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο MIP που επιτρέπει την επαναδρομολόγηση των τρένων με στόχο την όσο τον δυνατόν μικρότερη διαταραχή της υφιστάμενης κυκλοφορίας της γραμμής παράλληλα με τις προγραμματισμένες διεργασίες συντήρησης. Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφάρμοσαν δύο διαφορετικά σενάρια προγραμμάτων. Οι Liden and

Joborn (2017) ασχολήθηκαν ομοίως με τη δημιουργία ενός μοντέλου MIP με στόχο την βελτιστοποίηση του προγραμματισμού συντήρησης ενός σιδηροδρομικού δικτύου δίνοντας έμφαση και στην υφιστάμενη κυκλοφορία του δικτύου. Θεώρησαν ότι η συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου και η διατήρηση της κυκλοφορίας στα φυσιολογικά όρια είναι δύο αλληλένδετα προβλήματα που πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα. Έθεσαν ως στόχο την εύρεση ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου για τον βέλτιστο προγραμματισμό των χρονοπαραθύρων συντήρησης χωρίς την παρουσία τρένων στο δίκτυο παράλληλα με την υπάρχουσα κυκλοφορία των αμαξοστοιχιών.

Επιλύοντας ένα πρόβλημα τακτικού προγραμματισμού οι D'Agiano et al. (2019) έθεσαν ως στόχο την βελτιστοποίηση των αποφάσεων που λαμβάνονται για τα δρομολόγια των αμαξοστοιχιών και τα χρονικά περιθώρια για τις διάφορες βραχυπρόθεσμες εργασίες συντήρησης. Το μοντέλο MILP που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος ενσωματώνει τις μεταβλητές, τους περιορισμούς και τους στόχους σε ένα στοχαστικό περιβάλλον. Οι στόχοι που έθεσαν ήταν η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων ενός υπάρχοντος χρονοδιαγράμματος και η μεγιστοποίηση των εργασιών συντήρησης. Η αξιολόγηση της μεθόδου αυτής έδειξε ότι η εισαγωγή του παράγοντα σταθερότητας της δρομολόγησης των αμαξοστοιχιών μειώνει την ευελιξία δρομολόγησης και βελτιστοποίησης των δύο στόχων σε στοχαστικό περιβάλλον.

### **2.3 Σύνοψη και Βασικά Συμπεράσματα Βιβλιογραφίας**

Ο Πίνακας 2-1 συνοψίζει τις μελέτες που συζητήθηκαν στην βιβλιογραφική ανασκόπηση και τις κατηγοριοποιεί σύμφωνα με τους αντίστοιχους αντικειμενικούς στόχους, τις μαθηματικές μοντελοποιήσεις, τις εφαρμοσμένες μεθόδους επίλυσης που αφορούν την κάθε μελέτη, εάν χρησιμοποιήθηκε μια προσέγγιση ακριβούς λύσης, καθώς και εάν η μαθηματική διατύπωση της μελέτης είχε πολλαπλούς στόχους ή όχι (Multiobjective optimization).

Συνοψίζοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η παραπάνω κατηγοριοποίηση των αναλυθέντων ερευνών αναθεωρείται και αναλύεται περαιτέρω. Παρατηρείται μία αναλυτική, σταδιακή αλλά ανομοιόμορφη εξέλιξη σε βάθος δεκαετιών, η οποία αντανακλά τη δυσκολία της συντήρησης και την ποικιλία συνθηκών. Οι πρώτες μελέτες εστίασαν κυρίως στη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού και την ελαχιστοποίηση της διάρκειας κατοχής γραμμής, χρησιμοποιώντας συχνά σχετικά

απλοποιημένα μοντέλα και προσεγγίζοντας το πρόβλημα κυρίως από λειτουργική σκοπιά.

Πίνακας 2-1: : Συνοπτική παρουσία Βιβλιογραφίας

Συγγραφέας	Αντικειμενική συνάρτηση	Μαθηματικό Μοντέλο	Μέθοδος επίλυσης	Ακριβής λύση	Multiobjective Optimisation
<b>Higgings (1998)</b>	Minimize a weighted combination of expected interference delays with the train schedule and prioritized finishing time	Integer programming	Tabu search Metaheuristics approaches		
<b>Cheung et al (1999)</b>	Maximizes the assignment of job requests based on priorities (as many higher priority job requests as possible)	Chip constraint programming language	Heuristics approaches		
<b>Lake et al (2000)</b>	Minimization of the cost of conducting the track maintenance	Mixed Integer Non Linear programming (MINLP)	Heuristic approaches (feasible solution, Simulated Annealing)		
<b>Budai &amp; Dekker (2004)</b>	Minimizes the time periods for maintenance work, possession cost and cost for scheduled projects	Integer Linear Programming (ILP), Markov model	Exact solution (CPLEX)	✓	
<b>Budai et al. (2005)</b>	Minimizes track possession time or cost for routine maintenance works and projects	Mixed Integer Programming (MIP)	(Greedy)Heuristics approaches		
<b>Podofilini et (2005)</b>	Minimizes the management and maintenance costs in accordance with existing safety levels	non-homogeneous Markov process	Multi-Objective Genetic Algorithm		✓
<b>Den Hertog et al (2005)</b>	Minimization of inconvenience, cost efficiency and maximization of Safety	Scenario-Based Model	Deterministic logical rule		
<b>Van Zante–de Fokkert (2007)</b>	Minimize: 1) the number of nights with planned maintenance in the schedule. 2) the sum	MIP	Exact solution (AIMMS, CPLEX)	✓	

	of maximum scheduled workload of the contractors			
<b>Andrade and Teixeira (2011)</b>	Minimized: 1) the total costs of planned maintenance and renewal actions. 2) the total number of train delays caused by speed restrictions.	Integer Nonlinear Programming	Metaheuristics (Simulated annealing technique)	✓
<b>Peng and Ouyang (2012)</b>	Minimizes the summation of all costs	MIP and customized search algorithms	Heuristics approach	
<b>Heinicke et al (2015)</b>	The sum of the travel costs and the customer costs that have to be minimized	Mixed Integer Linear Program (MILP)	Exact Solution (CPLEX)	✓
<b>Sharma et al (2017)</b>	Minimizes the maintenance costs in accordance with track quality	Discrete-time Markov decision process model	Value Iteration Algorithm, Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	
<b>Sun et al (2017)</b>	Turnout maintenance scheduling problem	MILP	Exact solution (CPLEX)	✓
<b>Su et al (2019)</b>	Minimize the trade-off between condition deterioration and maintenance costs	MILP	Scenario-based approach, Robust scenario-based approach	
<b>Nijland et al (2021)</b>	Minimizes the workload for work crews and the hindrance for train operators by minimizing the maximum workload of all crews combined	MILP	Exact solution (branch-and-bound) Metaheuristics (simulated annealing)	✓
<b>Oudshorn et al (2022)</b>	Representing total costs and exploring trade-offs between this cost and the number of hard constraint violations	Constraint programming model	Evolution strategy, greedy metaheuristic, a hybrid of the two	
<b>Bressi et al (2021)</b>	Minimizes present value of maintenance costs and maximizes the quality of the track-bed	MINLP	Genetic Algorithm Weighted-sum method Markov chain model	✓

<b>Buurman et al. (2022)</b>	Minimizes the cost caused by hindrance over all train operators. Maximizes the amount of scheduled slots in maintenance schedule.	ILP	Metaheuristic and $\epsilon$ constraint method	✓	
<b>Forsgren et al. (2013)</b>	Minimize number of resource conflicts and canceled trains	MIP	Exact solution (CPLEX)	✓	
<b>Liden and Joborn (2017)</b>	A cost sum to be minimized for 5 cost components	MILP	Exact solution (Gurobi solver)	✓	
<b>D'Ariano et al. (2019)</b>	Minimization of the total deviation from the nominal timetable. Maximization of the number of paired works	MILP	Exact solution (IBM ILOG-CPLEX solver)	✓	✓
<b>Albrecht et al (2013)</b>	Minimize the sum of train and maintenance delays	Problem space search	Metaheuristics		
<b>Gkonou et al (2023)</b>	Minimize the sum of track possession costs, cancellation penalties, inefficient resource usage costs, and crew movement costs across the planning horizon.	MILP	Gurobi Optimizer	✓	
<b>This Study</b>	Minimize the maintenance cost and degradation in the analysis period	MILP	Branch and Bound using Gurobi Optimizer	✓	✓

Η ασφάλεια των σιδηροδρόμων οφείλει να βελτιώνεται και να διατηρείται συνεχώς σε υψηλά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό η συντήρηση ενός σιδηροδρομικού δικτύου και συνάμα ο προγραμματισμός αυτής φέρουν καθημερινά προκλήσεις στους διαχειριστές του σιδηροδρομικού δικτύου. Ως αποτέλεσμα, οι προσεγγίσεις ακριβούς λύσης υιοθετούνται ευρέως, όπως αποτυπώνεται στον Πίνακα 2-1, για την εξαγωγή αποφάσεων συντήρησης με βέλτιστο τρόπο. Αυτό οφείλεται στην εγγύηση που παρέχουν όσον αφορά την εύρεση ολικά βέλτιστης λύσης, προσφέροντας τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων του προγραμματισμού των εργασιών παρέμβασης για την εδραίωση μιας ασφαλούς σιδηροδρομικής επιδομής.

Μελέτες των Higgings et al. (1998) και Lake et al (2000) αποτέλεσαν τις πρώτες προσπάθειες τυποποίησης του προβλήματος, δίνοντας έμφαση στις καθυστερήσεις και στη διαχείριση χρονικών παραθύρων εργασιών. Τέτοιες προσεγγίσεις, παρότι θεμελιώδεις, αντιμετώπισαν τη συντήρηση ως ένα κυρίως λειτουργικό πρόβλημα προγραμματισμού, με περιορισμένη σύνδεση με την πραγματική υποβάθμιση της γραμμής. Η περιορισμένη εξέταση της διατύπωσης των προηγούμενων μελετών αντικατοπτρίζεται στην πρώιμη απόφαση επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης μονού στόχου.

Η έρευνα τελικά μετατοπίστηκε προς μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη και άλλους σημαντικούς παράγοντες, όπως τους διαθέσιμους πόρους και τα εργατικά συνεργεία, καθώς φαίνεται στις μελέτες των Cheung et al. (1999), Heinicke et al. (2015) και άλλων. Ωστόσο, οι μελέτες αυτές εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα ως μια σειρά αποφάσεων με βάση τη διαθεσιμότητα και όχι την τεχνική κατάσταση της γραμμής. Οι Sharma et al. (2017), Podofilini et al. (2005) και Den Hertog et al. (2005) προσέγγισαν το πρόβλημα ως ένα πρόβλημα διαχείρισης κινδύνου και ενσωμάτωσαν την υποβάθμιση της γραμμής, την αξιοπιστία και άλλα πιθανοτικά στοιχεία, οδηγώντας ωστόσο σε μη ολοκληρωμένα εφαρμόσιμα συστήματα. Συνολικά, το αυξημένο ενδιαφέρον για την πολυδιάστατη φύση του βέλτιστου σχεδιασμού της συντήρησης και επισκευής αντικατοπτρίζεται στη σταδιακή αύξηση υιοθέτησης πολυκριτηριακών στόχων στη μαθηματική διατύπωση των μεταγενέστερων μελετών.

Η εργασία των Bressi et al. (2021) ξεχωρίζει ως μία πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια της σύγχρονης βιβλιογραφίας. Η μελέτη ενσωματώνει πιθανοτικά μοντέλα Markov, πραγματικά δεδομένα υποβάθμισης της σιδηροδρομικής γραμμής και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική βάση για την λήψη αποφάσεων. Ταυτόχρονα αναδεικνύει τα θεμελιώδη όρια των μέχρι τώρα προσεγγίσεων, καθώς η πολυεπίπεδη φύση των τεχνικών και οικονομικών πτυχών περικλείεται από τη διατύπωση των πολλαπλών στόχων τους. Ωστόσο, λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της μη γραμμικής διατύπωσης MINLP, χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν μεταερευτικές μεθοδολογίες για την επίλυση του μοντέλου τους. Επιπλέον, λόγω της πιθανοτικής φύσης του, η ανάπτυξη του στοχαστικού μοντέλου τους έγινε ειδικά για τον δικό τους χώρο δοκιμών, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη γενίκευση του μοντέλου τους σε άλλες σιδηροδρομικές εγκαταστάσεις που χρειάζονται συντήρηση.

Συνολικά η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει μια σαφή μετατόπιση από απλά λειτουργικά μοντέλα προγραμματισμού προς πιο ολοκληρωμένες, τεχνικά ρεαλιστικές προσεγγίσεις του προβλήματος. Παρά την αυξημένη προσοχή που έχει δοθεί στην έννοια της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στις ανασκοπούμενες έρευνες των τελευταίων ετών, πολύ λίγες έχουν προσεγγίσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού συντήρησης πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις ακριβούς λύσης. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την περαιτέρω διερεύνηση και βελτίωση των υφιστάμενων μοντέλων, με την προσέγγιση των Bressi et al. (2021) να επιλέγεται ως αφετηρία, καθώς και ένα συγκριτικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική.

Μέχρι σήμερα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-1, η πιο σύνθετη αναπαράσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης της συντήρησης που αποτυπώνει τις φυσικές και οικονομικές πτυχές του ως ένα πολυκριτηριακό μοντέλο, έχει λυθεί με χρήση μεταερευτικών μεθοδολογιών. Για να εξασφαλισθεί ωστόσο η βέλτιστη λύση, θα πρέπει να εξετασθεί μια προσέγγιση ακριβούς λύσης. Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση μοντελοποίησης και επίλυσης αναγνωρίζεται ως κενό στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε.

Επιπλέον, λόγω της έλλειψης διαθέσιμων/προσβάσιμων δεδομένων μακροπρόθεσμων αρχείων φθοράς της σιδηροδρομικής επιδομής, η παρούσα διατριβή αποσκοπεί να παρουσιάσει ένα βέλτιστα γενικευμένο πλαίσιο για την ελαχιστοποίηση τόσο του οικονομικού κόστους όσο και του κόστους που σχετίζεται με τη φθορά της γραμμής. Έτσι, το μοντέλο των Bressi et al. (2021) έχει προσαρμοστεί σε ένα υπολογιστικά πιο αποτελεσματικό ντετερμινιστικό ισοδύναμο, ώστε το αρχικά στοχαστικό πλαίσιο να αντικατασταθεί με ντετερμινιστική εισαγωγή δεδομένων και νέους περιορισμούς καταγράφοντας τη φθορά του σιδηροδρομικού έρματος με λιγότερες παραμέτρους. Το μοντέλο επιπλέον γραμμικοποιήθηκε, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4, για να εξασφαλιστεί η κυρτότητα, και ως εκ τούτου, η δυνατότητα υπολογισμού ολικά βέλτιστης λύσης.

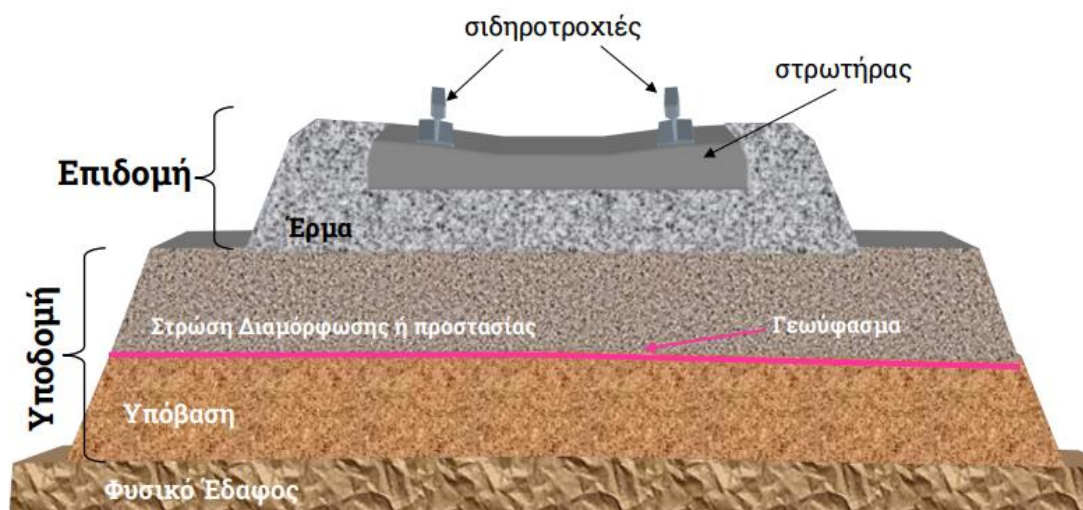
## 3. Μεθοδολογική προσέγγιση

### 3.1 Περιγραφή του Προβλήματος Φθοράς Έρματος

Ο σιδηρόδρομος ως μέσο μεταφοράς αποτελείται από δύο συνιστώσες: το τροχαίο υλικό και την σιδηροδρομική επιδομή. Μια σιδηροδρομική γραμμή (Εικόνα 1) αποτελείται από τα υλικά (επιδομή) τα οποία μεταβιβάζουν τα στατικά και δυναμικά φορτία των κυκλοφορούντων συρμών στο έδαφος (υπόβαση), και η κατασκευή της οφείλει να έχει ελαστική συμπεριφορά (Λυμπέρης 2011).

Αναλυτικότερα, η επιδομή μιας σιδηροδρομικής γραμμής αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Σιδηροτροχιές
- Στρωτήρες
- Μικρό Υλικό (σύνδεσμοι, πλάκες έδρασης, ελικωτά, αμφιδέτες)
- Συσκευές γραμμής (αλλαγές τροχιάς, συσκευές διαστολής)
- Έρμα



Εικόνα 1-Δομή σιδηροδρομικής γραμμής

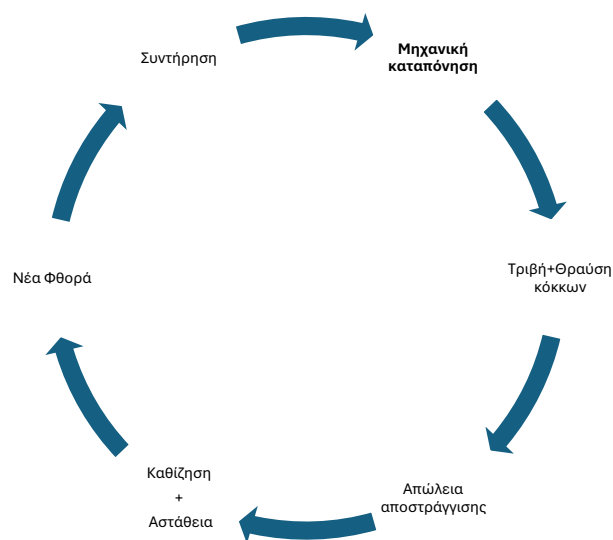
Μια συμβατική σιδηροδρομική γραμμή διπλής κατεύθυνσης περιλαμβάνει 3.000-5.000 m<sup>3</sup> έρματος και η οικονομική διαχείριση αυτών των ποσοτήτων υλικού είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα που απασχολούν τις σιδηροδρομικές βιομηχανίες. Η φθορά του έρματος σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελεί μια σύνθετη και εξελισσόμενη διεργασία που ενεργοποιείται από τη διαρκή καταπόνηση της σιδηροτροχιάς και από έναν συνδυασμό διαφόρων γεωμετρικών, δομικών και λειτουργικών παραγόντων που

οδηγούν στην επιτάχυνση της υποβάθμισης του υλικού από το οποίο αποτελείται. Οι Karimi et al. (2024) ανέλυσαν της συσχέτιση της ευθυγράμμισης με την ακαμψία του έρματος, συμπεραίνοντας ότι η υψηλή ακαμψία παρότι αυξάνει την φέρουσα ικανότητα του έρματος, αυξάνει τις δυναμικές πιέσεις στο σημείο διεπαφής τροχού σιδηροτροχιάς και οδηγεί σε αύξηση την υποβάθμισης των διάφορων εξαρτημάτων.

Το έρμα ως δομικό στοιχείο έδρασης της σιδηροτροχιάς υπόκειται σε μηχανικές και φυσικές διεργασίες που οδηγούν στη βαθμιαία απώλεια της αρχικής του λειτουργικότητας και αντοχής και για αυτό πρέπει να πληροί τις ελάχιστες απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες. Η αντοχή και η σταθερότητα της σιδηροτροχιάς εξαρτώνται άμεσα από τη σωστή λειτουργία του έρματος και αυτό καθιστά το έρμα το κύριο συστατικό σε κάθε συντήρηση σιδηροδρομικής γραμμής (Sadeghi 2018).

Οι καταπονήσεις, ειδικά κάτω από τους στρωτήρες, οι οποίοι συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες τάσεις, προκαλούν τη θραύση των κόκκων των αδρανών, είτε με απώλεια των γωνιών τους είτε με διάσπαση των κόκκων (Indraratna et al. 2005). Η θραύση αυτή οδηγεί τελικώς στη μείωση της γωνιώδους μορφής των κόκκων (angularity) και της τραχύτητας, καθοριστικά χαρακτηριστικά της αντοχής του υλικού (Selig & Waters 1994).

Εν συνεχεία, εάν στο όριο έρματος-υπεδάφους υπάρξει υπέρβαση του ορίου διατμητικής τάσης παρουσιάζεται θραύση η οποία, σε συνδυασμό με την τριβή των κόκκων, οδηγεί στην παραγωγή λεπτόκοκκου υλικού το οποίο συσσωρεύεται ενδιάμεσως των κενών μεταξύ του χονδρόκοκκου υλικού του έρματος (Λυμπέρης 2011). Αυτό το λεπτόκοκκο



Εικόνα 2- Κύκλος υποβάθμισης σιδηροδρομικής γραμμής

υλικό αποτελεί «ξένο σώμα» για το έρμα και μειώνει την αποστραγγιστική ικανότητα της

στρώσης με αποτέλεσμα τη συσσώρευση υγρασίας. Η παρουσία λοιπόν νερού εντός των πόρων του έρματος προκαλεί μείωση της εσωτερικής τριβής, αύξηση της καθίζησης και τελικώς συνθήκες αστάθειας της σιδηροτροχιάς.

Καθώς το σύστημα χάνει τη μηχανική σταθερότητά του δημιουργείται το φαινόμενο των «πλωτών στρωτήρων», δηλαδή την απώλεια συνεχούς επαφής μεταξύ στρωτήρα-έρματος. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε επιπλέον ταλαντώσεις, αύξηση δυναμικής καταπόνησης, δημιουργώντας ένα περιβάλλον επιταχυνόμενης υποβάθμισης της γραμμής και ανάγκης για συχνότερη συντήρηση (Lundqvist 2005). Ο μηχανισμός αυτός εξελίσσεται τοπικά ή εκτεταμένα, ανάλογα με τις επιμέρους συνθήκες του δικτύου (επιδομή, ποιότητα υλικού, υγρασία, συχνότητα συντήρησης) και επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια της σιδηροδρομικής επιδομής.

Οι κυριότεροι παράγοντες φθοράς που έχουν εντοπιστεί μέσω πειραματικών μετρήσεων και οπτικής παρακολούθησης διακρίνονται σε μηχανικούς, γεωμετρικούς και περιβαλλοντικούς, με τους κυριότερους να αναλύονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Κυριότεροι Παράγοντες Φθοράς έρματος

<b>Κατηγορία</b>	<b>Παράγοντες</b>	<b>Συνέπεια</b>
<b>Λειτουργικοί, Συντήρησης</b>	Υψηλές ταχύτητες, Αυξημένο αξονικό φορτίο Συχνό Tamping	Αύξηση δυναμικών πιέσεων Μηχανική θρυμματοποίηση αδρανών.
<b>Κατασκευαστικοί</b>	Γεωμετρικές ανωμαλίες, Κακή ποιότητα αδρανών Κακή συγκόλληση σιδηροτροχιάς Ζώνες μετάβασης	Τοπική συγκέντρωση τάσεων, Επιδείνωση δυναμικής καταπόνησης, Θραύση κόκκων αδρανών
<b>Περιβαλλοντικοί</b>	Υγρασία, Εισχώρηση σκόνης/άμμου	Μείωση αποστράγγισης (pumping)

Η συνδυαστική λοιπόν δράση όλων αυτών των μηχανισμών συμβάλλει με την πάροδο του χρόνου στην επιτάχυνση της φθοράς του έρματος και δημιουργεί έναν αυτοτροφοδοτούμενο κύκλο υποβάθμισης (Εικόνα 2). Καθώς κατάσταση της επιδομής χειροτερεύει, οι δυναμικές καταπονήσεις κλιμακώνονται καθιστώντας την επιδομή ευάλωτη σε γεωμετρικές αστοχίες οι οποίες αυξάνουν το κόστος συντήρησης. Υπό αυτό το πρίσμα η κατανόηση των μηχανισμών φθοράς της σιδηροδρομικής γραμμής δεν αποτελεί απλώς μια θεωρητική προσέγγιση αλλά και την βάση για τον στρατηγικό σχεδιασμό εργασιών συντήρησης. Η μετάβαση από την καθαρά τεχνική αποκατάσταση

στη δημιουργία ενός προγνωστικού μοντέλου διαχείρισης, το οποίο θα συνυπολογίζει τον ρυθμό υποβάθμισης του έρματος και τις τοπικές συνθήκες, κρίνεται πλέον επιβεβλημένη για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας και την ασφάλεια ενός σύγχρονου σιδηροδρομικού δικτύου.

### **3.2 Περιγραφή Μοντέλου**

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αφορά το πρόβλημα του στρατηγικού σχεδιασμού των εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης ενός σιδηροδρομικού δικτύου. Το πρόβλημα αυτό διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με στόχο τη βελτιστοποίηση του κόστους που δαπανάται στη συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου και της φθοράς του έρματος, ικανοποιώντας παράλληλα διάφορους περιορισμούς σχετικούς με τεχνικά και οικονομικά ζητήματα. Συγκεκριμένα, τα επίπεδα φθοράς του έρματος ανά κύκλο εργασιών και δυο διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας ενσωματώνονται στο μοντέλο μας.

Τα διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας εισάγονται στο πρόβλημα συντήρησης των σιδηροδρομικών γραμμών με σκοπό την ποσοτικοποίηση της κατάστασης της γραμμής και τον κίνδυνο αστοχίας της Bressi et al (2021). Αρχικά, τα επίπεδα αυτά ενσωματώνονται άμεσα στην μέθοδο Markov, η οποία μοντελοποιεί τη μετάβαση της γραμμής από ένα επίπεδο αξιοπιστίας σε ένα άλλο προβλέποντας έτσι την υποβάθμιση εντάσσοντας την αβεβαιότητα της πιθανοτικής ποσοτικοποίησης στο πρόβλημα. Στο πρόβλημα MRPO, τα επίπεδα αξιοπιστίας επιτρέπουν την εκτίμηση της μεταβολής κατάστασης της γραμμής στο χρόνο και καθορίζουν τις κατάλληλες ενέργειες συντήρησης με βάση το κόστος και τον κίνδυνο.

Επιπλέον, ορίζεται ως ένας κύκλος εργασιών το χρονικό περιθώριο των τριών μηνών, για το οποίο λαμβάνονται πραγματικά δεδομένα για τη φθορά του έρματος η οποία αποτυπώνεται μέσω της κάθετης ευθυγράμμισης (vertical alignment, VA). Κύριος στόχος είναι η εφαρμογή προληπτικής συντήρησης πριν ακόμα επέλθει πλήρης φθορά των υλικών της επιδομής και καθίσταται μη αποδεκτή. Το κύριο σύνολο μεταβλητών απόφασης αφορά τις εργασίες συντήρησης που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κάθε κύκλο εργασιών της κάθε περιόδου ανάλυσης. Οι μεταβλητές αυτές σχετίζονται κυρίως με την αποτίμηση της ποιότητας του έρματος σε κάθε κύκλο, με τη διαδικασία υποβάθμισης του έρματος να περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

## 4. Εφαρμογή Μοντέλου και Αποτελέσματα

### 4.1 Μαθηματικό Μοντέλο

Η συγκεκριμένη μελέτη προσαρμόζει το πρόβλημα MINLP διπλού στόχου (bi-objective) του στοχαστικού μοντέλου προγραμματισμού συντήρησης σιδηροδρομικών γραμμών των Bressi et al. (2021) για να αναπτύξει ένα υπολογιστικά πιο αποτελεσματικό πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων, που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή ως Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Συντήρησης και Επισκευής (Maintenance and Repair Planning Optimisation, MRPO). Για να γίνει αυτό, το πιθανοτικό μοντέλο MINLP μετατράπηκε ντετερμινιστικά με την εισαγωγή νέων περιορισμών και μεταβλητών απόφασης, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Οι αλλαγές επιτρέπουν η επίλυση του προβλήματος MRPO διπλού στόχου να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ακριβών μεθόδων επίλυσης, αντί μεταευρετικών, εξασφαλίζοντας ένα σύνολο λύσεων Pareto. Αυτό διευκολύνεται περαιτέρω με την αναδιατύπωσή του, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο περιορισμού έψιλον καθώς και τη γραμμικοποίηση του προβλήματος MRPO διπλού στόχου σε ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) μέσω της τεχνικής Big-M του Dantzig (1963). Η μέθοδος Big-M επιβάλλει ποινή στο μοντέλο εισάγοντας μια μεγάλη τιμή ποινής  $M$  παράλληλα με τις τεχνητές μεταβλητές απόφασης. Αυτό θα εξετασθεί περαιτέρω στις επόμενες ενότητες. Για να παρουσιάσουμε επίσημα το πρόβλημα «Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Συντήρησης και Επισκευής», παρουσιάζονται πρώτα τα σύνολα του προβλήματος.

Στο πρόβλημα MRPO το κύριο σύνολο μεταβλητών απόφασης αντιπροσωπεύει όλες τις εφικτές εργασίες που μπορούν να εφαρμοσθούν σε κάθε κύκλο λειτουργίας της καθορισμένης περιόδου ανάλυσης. Παρουσιάζονται λοιπόν οι συνιστώσες του προβλήματος ως εξής:

#### Σύνολα

Σχετικά με τη φθορά του έρματος ορίστηκαν δύο διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας για κάθε κύκλο εργασίας και δραστηριότητα παρέμβασης, όπου το επίπεδο αξιοπιστίας  $R$  χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσουμε ότι η λύση παραμένει ικανοποιητική με μια συγκεκριμένη πιθανότητα, παρά την αβεβαιότητα των παραμέτρων. Η περίοδος ανάλυσης  $T$  ορίστηκε σε είκοσι (20) έτη ενώ ένας κύκλος εργασιών θεωρείται το διάστημα τριών (3) μηνών. Τέλος, το σύνολο δραστηριοτήτων παρέμβασης  $M$

αποτελείται από την επιλογή μηδενικής παρέμβασης στο δίκτυο και την επιλογή κανονικής παρέμβασης, δηλαδή εφαρμογή εργασίας συντήρησης (π.χ., tamping).

Τα σύνολα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο είναι τα εξής:

**R**: επίπεδο αξιοπιστίας  $R = \{75\%, 85\%\}$ ,  $r \in R$

**T**: περίοδος ανάλυσης (20 έτη) εκφρασμένη σε κύκλους εργασιών (ανά 3 μήνες), έτσι  $t \in T = \{1, \dots, 80\}$

**M**: δραστηριότητα παρέμβασης  $m$  στο έρμα με  $M = \{1,2\} = \{\text{Επιθεώρηση, Εργασία Συμπύεσης}\}$

Και οι αντίστοιχοι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι  $t$  για την εκάστοτε χρονική περίοδο/κύκλο,  $m$  για την εκτέλεση παρέμβασης στο τμήμα που εξετάζεται και  $r$  για το εκάστοτε επίπεδο αξιοπιστίας που χρησιμοποιείται στο μοντέλο.

## Παράμετροι

Ανάλογα την κατάσταση της σιδηροδρομικής γραμμής ορίζεται η αντίστοιχη ανάγκη παρέμβασης καθώς και το σημείο του δικτύου που πρέπει να πραγματοποιηθεί η παρέμβαση όπως και το κόστος αυτής. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν αντικατοπτρίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της φθοράς και διάφορους οικονομικούς περιορισμούς που πρέπει να συνυπολογιστούν. Αρχικά το κόστος των παρεμβάσεων συντήρησης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα αποτιμάται μέσω της μεταβλητής  $MC_{mt}$ , ενώ η μελλοντική χρηματική ροή προσαρμόζεται με βάση το προεξοφλητικό επιτόκιο  $d$  που είναι ίσο με 3,5% προκειμένου να αποδοθεί η παρούσα αξία των σχετικών δαπανών για τις διάφορες εργασίες που θα εκτελεστούν. Παράλληλα, το συνολικό σχέδιο συντήρησης του δικτύου υπόκειται πάντα σε ορισμένους περιορισμούς προϋπολογισμού. Συγκεκριμένα, ο προϋπολογισμός καθορίζεται από το μέγιστο διαθέσιμο κεφάλαιο  $B_r^{\max}$  για επισκευές συναρτήσει του επιλεγμένου επιπέδου αξιοπιστίας **R**. Όσον αφορά τη φθορά, πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψιν η αρχική φθορά του δικτύου  $Y_{0r}$  για κάθε υπό εξέταση τμήμα και το μέγιστο όριο επιτρεπόμενης φθοράς  $Y_r^{\max}$  πέραν του οποίου θεωρείται ότι απαιτείται άμεση παρέμβαση στο δίκτυο για λόγους ασφαλείας και λειτουργικότητας. Τέλος, στο πρόβλημα προστίθεται και η παράμετρος λειτουργίας φθοράς  $DF_r$ , η οποία ποσοτικοποιεί τη διαδικασία υποβάθμισης της γραμμής καθώς και

η παράμετρος  $G$  που χρησιμοποιείται στη μέθοδο γραμμικοποίησης big-M που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Συνοπτικά, οι παράμετροι συγκεντρώνονται ως εξής:

$MC_{mt}$ : Κόστος συντήρησης λόγω εκτέλεσης της παρέμβασης συντήρησης  $m$  στο τμήμα του έρματος σε χρόνο  $t \in T$

$d$ : Τιμή προεξοφλητικού επιτοκίου,  $d=3,5\%$

$B_r^{\max}$ : Μέγιστος διαθέσιμος προϋπολογισμός για επισκευές, για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας  $r \in R$

$Y_{0r}$ : Αρχική φθορά την χρονική στιγμή  $t=0$  για το αντίστοιχο θεωρούμενο επίπεδο αξιοπιστίας  $r \in R$

$Y_r^{\max}$ : Μέγιστο όριο αντοχής φθοράς

$DF_r$ : Παράμετρος λειτουργίας φθοράς για επίπεδο αξιοπιστίας  $r \in R$

$G$ : πολύ μεγάλο βαθμωτό μέγεθος για γραμμικοποίηση,  $G=1.000,000$

### Μεταβλητές απόφασης

Οι άγνωστες ποσότητες του προβλήματος MRPO για τις οποίες πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη λύση είναι η φθορά και η παρέμβαση που πρέπει να γίνει. Η τιμή της φθοράς  $Y_{tr}$  δόθηκε αρχικά ως συνάρτηση φθοράς που περιοριζόταν από εξισώσεις που αρχικά προέκυψαν στοχαστικά (Bressi et al. 2021). Η νέα διατύπωση της μελέτης μας αντικατέστησε αυτούς τους περιορισμούς για να συμπεριληφθούν μη στοχαστικά δεδομένα εισόδου. Οι νέες εξισώσεις παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Η παρέμβαση συντήρησης  $X_{mt}$ , δηλαδή η όποια δραστηριότητα συντήρησης ή αποκατάστασης εφαρμόζεται στο σημείο του δικτύου σε κάθε χρονική περίοδο  $t$ ,  $X_{mt} \in \{0,1\}$ , όπου ισούται με ένα όταν η δραστηριότητα εφαρμόζεται στο σημείο, αλλιώς ισούται με μηδέν. Επίσης, η τεχνητή μεταβλητή απόφασης  $Q$  χρησιμοποιείται για την γραμμικοποίηση του περιορισμού πολλών μεταβλητών με αποτέλεσμα το πρόβλημα MRPO της παρούσας μελέτης.

$Y_{tr}$  = τιμή φθοράς για  $t \in T$  και  $r \in R$

$X_{mt}$  = παρέμβαση συντήρησης που εφαρμόζεται σε κάθε χρονική περίοδο για  $t \in T$  και  $r \in R$ ,  $m \in M$  έτσι ώστε  $X_{mt} \in \{0,1\}$

$Q_{t,r}$  = βοηθητική μεταβλητή απόφασης για τη γραμμικοποίηση του μοντέλου για  $t \in T$  και  $r \in R$

### Αντικειμενικές συναρτήσεις

1<sup>η</sup> Αντικειμενική Συνάρτηση: Ελαχιστοποιεί τη μέση κάθετη ευθυγράμμιση (VA) κατά την διάρκεια της περιόδου ανάλυσης και περιγράφεται από την εξίσωση (1).

$$\min \text{OF}_1 = \frac{\sum_{t=1}^T Y_{tr}}{|T|} \text{ για } r \in R = \{75\%, 85\%\} \text{ (1)}$$

Ως  $Y_{tr}$  ορίζεται η τιμή της συνάρτησης υποβάθμισης για κάθε χρονική στιγμή  $t$  (κύκλος εργασιών) για επίπεδο εμπιστοσύνης/αξιοπιστίας  $r \in R = \{75\%, 85\%\}$  και  $T$  είναι η περίοδος ανάλυσης εκφρασμένη σε κύκλους εργασιών διάρκειας τριών μηνών. Η  $\text{OF}_1$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τη μέση κάθετη ευθυγράμμιση του έρματος.

2<sup>η</sup> Αντικειμενική Συνάρτηση: Ελαχιστοποιεί την παρούσα αξία του συνολικού κόστους των εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης κατά την περίοδο ανάλυσης. Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται από την εξίσωση (2).

$$\min \text{OF}_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+d)^t} \times X_{mt} \text{ (2)}$$

Ως  $MC_{mt}$  ορίζεται το κόστος συντήρησης λόγω εκτέλεσης παρέμβασης συντήρησης στο τμήμα του έρματος σε χρόνο  $t \in T$ . Το  $X_{mt}$  ισούται με ένα αν η παρέμβαση  $m$  εφαρμόζεται σε χρόνο  $t$  αλλιώς μηδέν,  $d$  ισούται με την τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου,  $T$  είναι η περίοδος ανάλυσης όπως ορίστηκε και για την πρώτη αντικειμενική συνάρτηση και  $\text{OF}_2$  η αντικειμενική συνάρτηση της παρούσας αξίας του κόστους συντήρησης.

### Περιορισμοί

Οι περιορισμοί που ορίζουν το πρόβλημα MRSOP παρατίθενται στις εξισώσεις (3)-(9).

$$Y_{1,r} = Y_{0,r} + DF_r * (1 - X_{21}), \forall r \in R \text{ (3)}$$

$$Y_{t,r} = Y_{0,r}(X_{2t}) + (Y_{t-1,r} + DF_r) * (1 - X_{2t}), \forall r \in R, \forall t \in T, s.t., t \geq 2 \text{ (4)}$$

$$Y_{tr} \leq Y_r^{\max}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{mt} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+d)^t} \times X_{mt} \leq B_r^{\max} \quad \forall r \in R \quad (7)$$

$$X_{mt} \in \{0,1\}, \quad Y_{tr} \in \mathbb{R} \quad (8)$$

Πιο συγκεκριμένα, το έρμα της σιδηροτροχιάς υπόκειται σε έναν διαρκή μηχανισμό καταπόνησης, όπως περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, που προκαλεί τελικώς τη φθορά και την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του. Η κατάσταση λειτουργίας του έρματος περιγράφεται από την εξίσωση (3), δηλαδή είναι η εξίσωση που περιγράφει την τιμή της φθοράς για μια χρονική στιγμή  $t=1$  για  $r \in R$  το οποίο είναι σύνολο συναρτήσεων της αρχικής κατάστασης του έρματος και των δραστηριοτήτων συντήρησης που εφαρμόζονται στο τμήμα. Ο περιορισμός (4) περιγράφει τη συνάρτηση φθοράς της σιδηροδρομικής γραμμής. Η μέγιστη τιμή ( $Y_r^{\max}$ ) της μεταβλητής φθοράς της σιδηροδρομικής επιδομής ( $Y_{t,r}$ ) περιγράφεται από τον περιορισμό της εξίσωσης (5). Ο περιορισμός (6) ορίζει ότι μόνο μία εργασία συντήρησης πρέπει να πραγματοποιηθεί σε κάθε κύκλο εργασιών  $T$ . Ο περιορισμός (7) αποτελεί περιορισμό εξόδων που καθορίζει τον μέγιστο προϋπολογισμό ( $B_r^{\max}$ ) που είναι διαθέσιμος να διατεθεί σε δραστηριότητες συντήρησης ( $X_{mt}$ ) κατά την διάρκεια της συνολικής περιόδου ανάλυσης. Ο περιορισμός (8) ορίζει τη μεταβλητή απόφασης  $X_{mt}$  ως δυαδική και τη μεταβλητή απόφασης  $Y_{t,r}$  ως συνεχή.

Με τον πολλαπλασιασμό της δυαδικής μεταβλητής  $X_{2t}$  και της συνεχούς μεταβλητής  $Y_{t-1,r}$  στον περιορισμό (4) εισάγεται η διγραμμικότητα στο μοντέλο, με αποτέλεσμα ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επομένως, για να διευκολυνθεί η κυρτότητα του προβλήματος MRPO ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακριβής μέθοδος επίλυσης «διακλάδωση και οριοθέτηση / Branch and Bound», χρησιμοποιείται η μέθοδος Big-M για να αναδιατυπωθεί ο περιορισμός (4). Η βοηθητική μεταβλητή  $Q_{t,r}$  εισάγεται για να αναπαραστήσει την ποσότητα  $(Y_{t-1,r}) * (1 - X_{2t})$  στον περιορισμό (4), δηλαδή  $Q_{t,r} = (Y_{t-1,r})(1 - X_{2t})$ . Για να προσομοιωθεί αυτή η ισότητα εισήχθησαν οι ακόλουθοι περιορισμοί στο πρόβλημα MRPO για γραμμικοποίηση :

$$Q_{t,r} \leq Y_{t-1,r}, \forall r \in R, \forall t \in T, .t \geq 2 \quad (9a)$$

$$Q_{t,r} \leq G(1 - X_{2,t}) \quad \forall r \in R, \forall t \in T, s.t., t \geq 2 \quad (9b)$$

$$Q_{t,r} \geq (Y_{t-1,r} - G * X_{2,t}) \quad \forall r \in R, \forall t \in T, s.t., t \geq 2 \quad (9c)$$

$$Q_{t,r} \geq 0, \quad \forall t \in T, \forall r \in R \quad (9d)$$

$$Y_{t,r} = Y_{0,r}(X_{2,t}) + Q_{t,r} + (DF_r) * (1 - X_{2,t}) \quad \forall r \in R, \forall t \in T, s.t., t \geq 2 \quad (9)$$

Οι παραπάνω γραμμικοί περιορισμοί που παρουσιάστηκαν στις (9) και (9a)-(9b) σε συνδυασμό με τη μεγάλη βαθμωτή τιμή της παραμέτρου  $G$  διευκολύνουν την τεχνική big-M της γραμμικοποίησης, μετατρέποντας ένα αρχικά μη γραμμικό πρόβλημα σε ένα μοντέλο MILP όταν εξετάζεται ταυτόχρονα με τους παρακάτω στόχους του προβλήματος MRPO.

#### 4.2 Εφαρμογή μεθόδου περιορισμού έψιλον ( $\epsilon$ -constrained)

Εξαιτίας των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων που ορίζουν το πρόβλημα MRPO, πρέπει να ληφθεί υπόψη η έννοια της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Για να εξεταστεί καλύτερα η συμβατότητα και οι συμβιβασμοί (trade-offs) μεταξύ τεχνικού στόχου της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης (OF1) για τη βελτιστοποίηση της μέσης κάθετης ευθυγράμμισης της σιδηροδρομικής γραμμής και του οικονομικού στόχου της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης (OF2) για τη βελτιστοποίηση παρούσας αξίας του συνολικού κόστους συντήρησης και επισκευής, χρησιμοποιείται η μέθοδος  $\epsilon$ -constraint για τον συνδυασμό των δύο στόχων σε ένα ενοποιημένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο στόχων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και προσεγγίζει ένα υποσύνολο μετώπου Pareto, υποδεικνύοντας σε ποιο βαθμό οι δύο στόχοι έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους και αναδεικνύοντας εναλλακτικές λύσεις. Το μέτωπο Pareto αντιπροσωπεύει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων εντός της εφικτής περιοχής ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (Multi-Objective Optimization Problem, MOOP), όπου μπορούν να επιτευχθούν οι καλύτεροι δυνατοί συμβιβασμοί μεταξύ ανταγωνιστικών στόχων (Gkiotsalitis 2022).

Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της συντήρησης των σιδηροδρόμων, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους συντήρησης και ανανέωσης (M&R costs) (OF2) αποτελεί συχνά τον πρωταρχικό οικονομικό στόχο, καθώς επηρεάζει άμεσα τον προϋπολογισμό και τη μακροπρόθεσμη οικονομική βιωσιμότητα της επιδομής. Ωστόσο, η διατήρηση

αποδεκτής απόδοσης των σιδηροδρομικών γραμμών, που εκφράζεται με τη μέση κατακόρυφη ευθυγράμμιση (OF1), είναι μια τεχνική και λειτουργική απαίτηση που πρέπει να πληροί συγκεκριμένα πρότυπα αξιοπιστίας για να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η ποιότητα της επιδομής.

Θεωρώντας το OF1 ως περιορισμό, το μοντέλο διασφαλίζει ότι η κατάσταση της επιδομής (επίπεδο υποβάθμισης) δεν υπερβαίνει ένα επιτρεπόμενο όριο ( $\varepsilon$ ), που αντιστοιχεί σε αποδεκτά όρια απόδοσης ή αξιοπιστίας (δηλαδή αξιοπιστία 75% ή 85%). Αυτό εγγυάται ότι οποιαδήποτε λύση ελαχιστοποίησης του κόστους εξακολουθεί να παρέχει μια κατάσταση επιδομής που ικανοποιεί τα πρότυπα λειτουργίας και ασφάλειας. Εν τω μεταξύ, διατηρώντας την OF2 ως στόχο βελτιστοποίησης το μοντέλο μπορεί να αναζητήσει τη στρατηγική συντήρησης με το χαμηλότερο κόστος εντός της εφικτής περιοχής που ορίζεται από τους περιορισμούς απόδοσης της τροχιάς.

Για να εφαρμοσθεί η μέθοδος  $\varepsilon$ -constraint πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι στόχοι όσο και οι αντίστοιχες διατυπώσεις τους στις εξισώσεις (1) και (2). Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων έχουν συνήθως ένα ελάχιστο όριο, δηλαδή έναν περιορισμό, για το τι μπορεί να γίνει αποδεκτό ως προς τη διατήρηση της απόδοσης της σιδηροδρομικής γραμμής, με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν το κόστους υπό τις απαιτούμενες συνθήκες συντήρησης. Αυτό καθιστά την εξίσωση (1) της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης (OF1) κατάλληλη για εξέταση ως περιορισμό ώστε να προσδιορισθεί στη συνέχεια το σχέδιο με το χαμηλότερο κόστος για την ικανοποίηση του.

Βάσει των ανωτέρω, η αναδιατύπωση των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων παρουσιάζεται παρακάτω:

**Min.**  $\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+d)^t} \times X_{mt}$  για  $(Y, X) \in F(Y, X) = \{(Y, X) \in R \mid (Y, X) \text{ που ικανοποιούν τους περιορισμούς (3) – (9)}\}$

Έτσι ώστε  $\frac{\sum_{t=1}^T Y_{tR}}{T} \leq \varepsilon$  για  $r \in R = \{75\%, 85\%\}$  (10)

Η τιμή  $\varepsilon$  στον πρόσφατα προστιθέμενο περιορισμό (10) περιορίζει τη μέση τιμή της κάθετης ευθυγράμμισης του έρματος ώστε να μην υπερβαίνει την τιμή  $\varepsilon$ , παρέχοντας ένα ανώτατο όριο στον προηγούμενο αντικειμενικό στόχο. Χρησιμοποιήθηκε μια εκ των υστέρων προσέγγιση γεννήτριας της μεθοδολογίας  $\varepsilon$ -constraint για να μεταβληθεί η τιμή

της σταθεράς  $\varepsilon$ , επιλύοντας το μοντέλο επαναληπτικά για να προσεγγίσει ένα υποσύνολο του μετώπου Pareto (Gkiotsalitis 2022).

### 4.3 Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου

Ο πίνακας 4-1 παρουσιάζει τις τιμές εισόδου των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, προσαρμοσμένες από την πραγματική μελέτη περίπτωσης της συντήρησης της γραμμής Lucca-Pistoria (Ιταλία), η οποία συγκεντρώθηκε και αναλύθηκε από τους Bressi et al. (2021). Με σκοπό να διευκολυνθεί η σύγκριση μεταξύ του προβλήματος MRPO της παρούσας μελέτης και της αναφοράς απόδοσης του MINLP. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές, με εξαίρεση την παράμετρο  $DF_r$ , όπου το MINLP έθεσε μια στοχαστική διακύμανση της συνάρτησης υποβάθμισης χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση Markov. Αντίθετα, το μοντέλο MRPO που αναπτύχθηκε σε αυτήν τη διπλωματική χρησιμοποιεί ένα σταθερό  $DF_r$ , όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 4-1, το οποίο προήλθε από τις κλίσεις των αντίστοιχων επιπέδων αξιοπιστίας των συναρτήσεων υποβάθμισης των Bressi et al. (2021). Η χρονική διακύμανση της υποβάθμισης που αρχικά προέκυψε πιθανοτικά στο μοντέλο MINLP μετατράπηκε ντετερμινιστικά με την εισαγωγή, μεταξύ των νέων περιορισμών του MRPO, των (3), (4) και (9).

Πίνακας 4-1 : Τιμές αναφοράς παραμέτρων

Παράμετροι	Συμβολισμός	Τιμή
Μέγιστος διαθέσιμος προϋπολογισμός	$B_{max}$	120.000 €/km
Προεξοφλητικό επιτόκιο	d	3,50 %
Κόστος εκτέλεσης εργασιών συντήρησης	$MC_{1t}$	111 €/km
	$MC_{2t}$	7200 €/km
Μέγιστο όριο αντοχής φθοράς	$Y_{rmax}$	14,5 mm
Αρχική φθορά	$Y_{075}$	4,19 mm
	$Y_{085}$	4,79 mm
Παράμετρος λειτουργίας φθοράς	$DF_{75}$	0,21
	$DF_{85}$	0,22

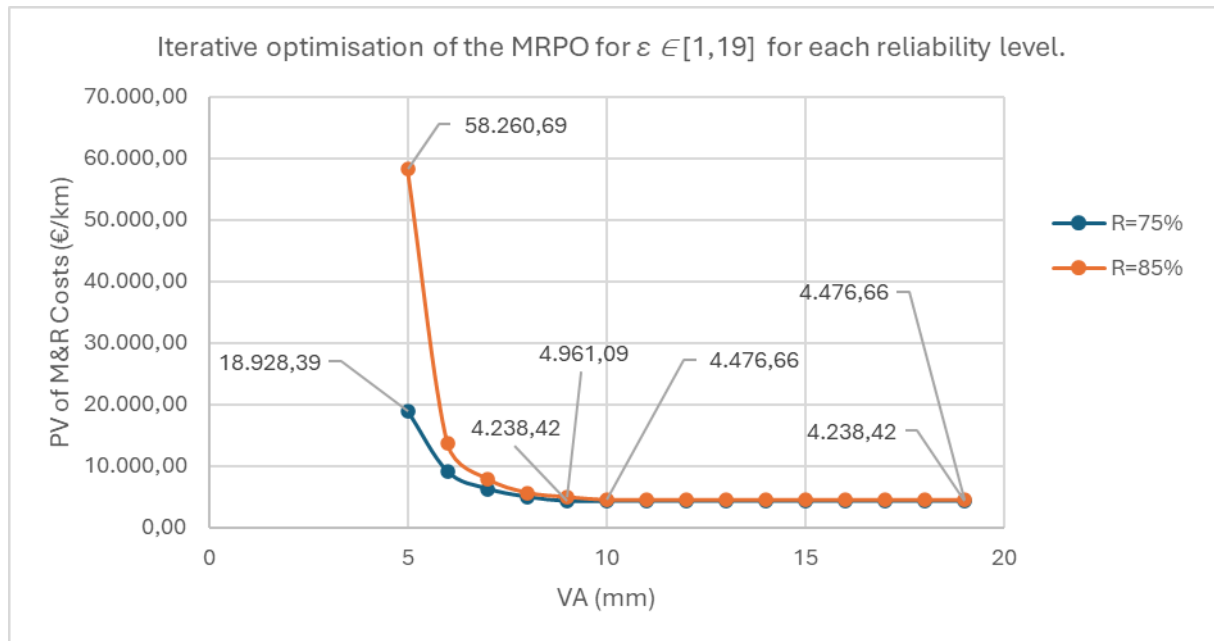
Για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας  $R= 75\%$  και  $R= 85\%$ , το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης του προβλήματος MRPO με αντικειμενικές συναρτήσεις (1) και (10), υπό τους περιορισμούς (3)-(9) που εφαρμόστηκε με την μέθοδο  $\varepsilon$ -constrained, προγραμματίστηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python 3.13 και επιλύθηκε με το

λογισμικό Gurobi χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επίλυσης Branch and Bound (B&B) ελαχιστοποιώντας τα έξοδα συντήρησης που προέκυψαν για τις απαιτούμενες παρεμβάσεις συντήρησης στα τμήματα της σιδηροδρομικής γραμμής κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης.

Συνολικά, για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας, πραγματοποιήθηκαν 19 πειραματικές επαναλήψεις για κάθε αύξηση συν ένα βαθμό της σταθεράς  $\varepsilon$ , που κυμαίνονται από 1 έως 19. Η υπολογιστική αποδοτικότητα του MILP του μοντέλου MRPO επέτρεψε σε αυτό το εύρος να καθοριστεί με την επίλυση αρχικά του MOOP για ένα ευρύ φάσμα τιμών [0,200]. Αυτό έθεσε το σημείο εκκίνησης της σκοπιμότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης καθώς και του συνόλου Pareto.

Στη συνέχεια, για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας, βελτιστοποίησης του πολυαντικειμενικού προβλήματος MRPO για  $\varepsilon \in [1,19]$ , απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4-1 και αναλύεται περαιτέρω ακολούθως.

Διάγραμμα 4-1 : Επαναληπτική Βελτιστοποίηση του προβλήματος MRPO για  $\varepsilon \in [1,19]$  για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας



Για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας για τιμή  $\varepsilon \in [0,4]$ , το μοντέλο ήταν μη επιλύσιμο λόγω έλλειψης εφικτής λύσης. Στο Διάγραμμα 4-1 παρατηρείται εκθετική μείωση κόστους με την αύξηση της επιτρεπόμενης υποβάθμισης. Για αυστηρά όρια όπου απαιτούνται συχνές παρεμβάσεις, τα έξοδα συντήρησης είναι τα μέγιστα. Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4-1, για το ελάχιστο όριο φθοράς που ισούται με 5 mm, δηλαδή  $\varepsilon=5$ , η Παρούσα αξία (Present Value, PV) του κόστους Συντήρησης και

Επισκευής ανέρχεται στις **18.928,39 €/km** για R=75% και **58.260,69 €/km** για R=85%, περίπου τρεις φορές υψηλότερο. Στο διάστημα  $\varepsilon \in [5,9]$ , η μεγαλύτερη διακύμανση στο κόστος συντήρησης και επισκευής εμφανίζεται και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας του Διαγράμματος 4-1. Στο τμήμα των διαγραμμάτων όπου γίνεται χαλάρωση των ορίων για  $\varepsilon \in [10,20]$ , δηλαδή για  $\varepsilon \geq 10\text{mm}$ , παρατηρείται σύγκλιση για ένα υποσύνολο λύσεων. Για R=75% η βέλτιστη τιμή Pareto συγκλίνει σε **4.238,42 €/km** ενώ για R=85% το κόστος συγκλίνει στην τιμή **4.476,66 €/km**.

Αυτή η σύγκλιση είναι αποτέλεσμα της υπεροχής του οικονομικού στόχου της ελαχιστοποίησης των δαπανών συντήρησης έναντι του τεχνικού στόχου συντήρησης, όπου, πέραν της μέσης κατακόρυφης ευθυγράμμισης της τροχιάς (VA) με  $\varepsilon = 10 \text{ mm}$  και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας, η περαιτέρω αύξηση της ανεκτής μέσης κατακόρυφης ευθυγράμμισης της τροχιάς δεν είχε καμία επίδραση στη βελτίωση της παρούσας συνολικής αξίας των δαπανών συντήρησης και επισκευής. Όπως αναφέρεται στην ενότητα «Αντικειμενική συνάρτηση» του κεφαλαίου 4.1, το μέτωπο Pareto είναι εξ ορισμού ένα σύνολο εντός της εφικτής περιοχής του πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης, όπου μπορεί να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός συμβιβασμός μεταξύ ανταγωνιστικών στόχων. Αυτό σημαίνει ότι το σύνολο των βέλτιστων λύσεων Pareto πρέπει να είναι μη κυριαρχούμενο. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα σύνολο λύσεων με τον καλύτερο συμβιβασμό, όπου η βελτίωση ενός στόχου θα απαιτούσε τη θυσία ενός άλλου (Gkiotsalitis 2022). Επομένως, οποιαδήποτε λύση εντός του εύρους της σύγκλισης και πέραν αυτού δε μπορεί να συμπεριληφθεί στο κατά προσέγγιση μέτωπο Pareto του MOOP, καθώς η συνεχιζόμενη επιδείνωση του στόχου συντήρησης δε βελτιώνει περαιτέρω τον οικονομικό στόχο. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, το σύνολο των λύσεων που παρέχονται από το  $\varepsilon \in [5,9]$  του Διαγράμματος 4-1 και του Πίνακα 4-1 για το επίπεδο αξιοπιστίας R = 75% αντιπροσωπεύει το βέλτιστο σύνολο λύσεων του μετώπου Pareto του MRPO. Ομοίως, το σύνολο λύσεων Pareto περιέχεται εντός του  $\varepsilon \in [5,10]$  για επίπεδο αξιοπιστίας R = 85%.

Οι τιμές για  $\varepsilon \in [5,10]$  του μετώπου Pareto του προβλήματος MRPO των επιπέδων αξιοπιστίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

Πίνακας 2-2: Τιμές μετώπου Pareto για  $\varepsilon \in [5,10]$

$\varepsilon$ -value= VA/mm	MRPO	
	R = 75%	R = 85%
	PV of M&R Costs (€/km)	PV of M&R Costs (€/km)
5	18.928,39	58.260,69
6	9.062,55	13.677,00
7	6.266,29	7.949,29
8	4.920,76	5.662,28
9	4.238,42	4.961,09
10	4.238,42	4.476,66

Κατά την αξιολόγηση των μετώπων Pareto που απεικονίζονται στο Διάγραμμα 4-1 και στον Πίνακα 4-2, τα δύο σύνολα λύσεων δείχνουν ότι η συντήρηση λειτουργεί υπό καθεστώς εκθετικού κόστους ασφαλείας και η επιλογή του R αποτελεί καθοριστική απόφαση για τον διαχειριστή λήψης αποφάσεων ιδιαίτερα για τα χαμηλότερα όρια του  $\varepsilon$ , δηλαδή την ελαχιστοποίηση της κάθετης ευθυγράμμισης. Έτσι, κατά τη λήψη απόφασης σχετικά με το αν η πρόσθετη απαίτηση ασφαλείας αξίζει την υπέρογκη αύξηση κόστους για αυστηρά όρια ασφαλείας, όσον αφορά τα επίπεδα αξιοπιστίας, καθώς και την προτεραιοποίηση μια ελάχιστης VA, οι λύσεις του  $\varepsilon = 9$  mm εξετάζονται περαιτέρω.

Και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας του MRPO, η τιμή  $\varepsilon = 9$  mm παρουσιάζει το κατώτατο όριο της μέσης κάθετης ευθυγράμμισης του έρματος που δεν πρέπει να ξεπεραστεί με τη μικρότερη διαφορά στο οικονομικό κόστος μεταξύ των επιπέδων αξιοπιστίας. Για να αξιολογηθεί η επίδραση του R στη βελτιστοποίηση του μοντέλου λεπτομερέστερα, οι μεταβλητές απόφασης που προκύπτουν για  $\varepsilon = 9$  mm και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας παρουσιάζονται στο τμήμα A του Παραρτήματος.

Στον Πίνακα A-1 του Παραρτήματος παρουσιάζονται οι βελτιστοποιημένες μεταβλητές απόφασης  $Y_{t75}^*$  και  $X_{mt}^*$  για  $t \in T$ ,  $m \in M$  και επίπεδο αξιοπιστίας  $r = 75\%$ . Για να συνοψίσουμε τις βέλτιστες αποφάσεις διατήρησης μιας μέσης VA ύψους 9 mm κατά τη διάρκεια της περιόδου συντήρησης  $t \in T$  για αυτό το επίπεδο αξιοπιστίας, για  $t \in [1, 49]$ , η ενέργεια επιθεώρησης  $X_{1t} = 1$  εφαρμόζεται καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Στη συνέχεια, για  $t = 50$ ,  $X_{2t} = 1$ , δηλαδή πραγματοποιείται συμπύκνωση (tamping), καθώς  $Y_{49,75} = 14,48$  mm, δηλαδή η κατάσταση της σιδηροδρομικής επιδομής ακριβώς πριν από αυτόν τον χρονικό κύκλο έχει επιδεινωθεί σε σημείο που για τον

χρονικό κύκλο  $t = 50$ , το όριο VA για  $Y_{75}^{\max} = 14,5 \text{ mm}$  θα είχε ξεπεραστεί, παραβιάζοντας τον περιορισμό (5) του MRPO. Εφαρμόζοντας συμπύκνωση, η  $Y_{50,75}$  έχει μειωθεί σε βελτιωμένη κατάσταση 4,19 mm. Για το υπόλοιπο της χρονικής περιόδου συντήρησης  $t \in [51, 80]$ , εφαρμόζεται μόνο η επιθεώρηση  $X_{1t} = 1$ .

Για να επαληθευτεί ο τρόπος με τον οποίο οι βελτιστοποιημένες μεταβλητές απόφασης μεταφράζονται στην αξιολόγηση του οικονομικού στόχου του OF2, παρουσιάζεται ο παρακάτω υπολογισμός.

Για  $R = 75\%$ :

$$\sum_{t=1}^{49} \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1 + 0.035)^t} \times X_{mt} + \frac{MC_{2,50}}{(1 + 0.035)^{50}} \times X_{2,50} + \sum_{t=51}^{80} \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1 + 0.035)^t} \times X_{mt}$$

$= 2583.699\text{€/km} + 1289.184\text{€/km} + 365.5405\text{€/km} = 4238.423 \text{ €/km}$ , όπως απεικονίζεται και στο Διαγράμματα 4-1 και τον Πίνακα 4-2 για  $\varepsilon = 9 \text{ mm}$ .

Αντίθετα, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα A-2 του Παραρτήματος A, οι βελτιστοποιημένες μεταβλητές απόφασης  $Y_{t85}^*$  και  $X_{mt}^*$  για  $t \in T$ ,  $m \in M$  και επίπεδο αξιοπιστίας  $r = 85\%$  διατηρούν μια μέση VA = 9mm για τον στόχο της OF1 του MRPO κάνοντας τα εξής: κατά τη διάρκεια της περιόδου συντήρησης  $t \in [1, 44]$ , εφαρμόζεται η ενέργεια επιθεώρησης  $X_{1t} = 1$ . Στη συνέχεια, για  $t = 45$ , λαμβάνει χώρα συμπίεση, για  $X_{2t} = 1$ , καθώς  $Y_{44,85} = 14,47\text{mm}$ , δηλαδή, η κατάσταση της σιδηροδρομικής επιδομής ακριβώς πριν από αυτόν τον χρονικό κύκλο έχει επιδεινωθεί σε σημείο που για τον χρονικό κύκλο  $t = 45$ , το όριο VA για  $Y_{75}^{\max} = 14,5\text{mm}$  θα είχε ξεπεραστεί, παραβιάζοντας τον περιορισμό (5) του MRPO. Με την εφαρμογή συμπύκνωσης, το  $Y_{45,85}$  έχει επισκευαστεί σε βελτιωμένη κατάσταση 4,79 mm. Η επιθεώρηση  $X_{1t} = 1$  συνεχίζει να εφαρμόζεται για την χρονική περίοδο  $t \in [46, 77]$ , καθώς το έρμα της σιδηροδρομικής γραμμής πληροί τα κριτήρια των προτύπων ασφαλείας. Μέχρι το  $t = 78$ , η φθορά υπερβαίνει το όριο του  $Y_{75}^{\max}$  για άλλη μια φορά, απαιτώντας περαιτέρω συμπύκνωση  $X_{2t} = 1$ . Για άλλη μια φορά, το υλικό του έρματος της σιδηροδρομικής γραμμής έχει βελτιωθεί επιστρέφοντας στην απαραίτητη κατάστασή του, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται μόνο οι ενέργειες επιθεώρησης  $X_{1t} = 1$  για την υπόλοιπη χρονική περίοδο  $t \in [79, 80]$ .

Ομοίως, οι βελτιστοποιημένες μεταβλητές απόφασης του Πίνακα Α-2 του Παραρτήματος Α επικυρώνονται αξιολογώντας τον οικονομικό στόχο του OF2 παρακάτω.

Για R = 85%:

$$\sum_{t=1}^{44} \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+0.035)^t} \times X_{mt} + \frac{MC_{2,45}}{(1+0.035)^{45}} \times X_{2,45} + \sum_{t=46}^{77} \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+0.035)^t} \times X_{mt} + \frac{MC_{2,78}}{(1+0.035)^{78}} \times X_{2,78} + \sum_{t=79}^{80} \sum_{m=1}^M \frac{MC_{mt}}{(1+0.035)^t} \times X_{mt}$$

$$= 2473.39€/km + 1531.147€/km + 450.1239€/km + 492.0228 €/km + 14.41€/km = 4961.093€/km, \text{ όπως απεικονίζεται για } \varepsilon = 9 \text{ mm στο Διαγράμματα 4-1 και τον Πίνακα 4-2}$$

Συγκρίνοντας τις βελτιστοποιημένες αποφάσεις μεταξύ των επιπέδων αξιοπιστίας, για R = 75%, το MRPO απαιτεί μία χρήση συμπίεσεως παράλληλα με 79 ελέγχους καθ' όλη τη διάρκεια της εικοσαετούς περιόδου ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο, η πιθανότητα διατήρησης μιας μέσης VA = 9mm είναι 75% για κόστος 4238,423€/km. Αντίθετα, για να διατηρηθεί η μέση VA = 9mm κατά επίπεδο αξιοπιστίας 85%, απαιτούνται 2 εργασίες συμπίεσεως επιπλέον των 78 ελέγχων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα κόστος συντήρησης και επισκευής **4961,093€/km**.

Για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που πρέπει να αντιστοιχίσουν την καταλληλότητα των επιπέδων αξιοπιστίας με την κατάσταση της επιδομής τους, μπορούν να λάβουν υπόψη ότι όπου δεν παρατηρείται τόσο μεγάλος φόρτος ή ταχύτητες στο σιδηροδρομικό δίκτυο, το μοντέλο για R=75% είναι επαρκές και οικονομικά βιώσιμο. Σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, ωστόσο, το επίπεδο R=85% κρίνεται απαραίτητο και ο εκάστοτε διαχειριστής πρέπει να συμπεριλάβει στην στρατηγική του ότι η συντήρηση για χαμηλά όρια υποβάθμισης θα οδηγήσει σε εξάντληση των πόρων. Αντίθετα, η σχετικά στενή σύγκλιση των δύο επιπέδων αξιοπιστίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1, υποδηλώνει ότι τα οφέλη για την ασφάλεια του επιπέδου αξιοπιστίας 85% μπορεί να αντισταθμίζουν το συγκριτικά μικρότερο συμβιβασμό του χαμηλότερου οικονομικού κόστους του χαμηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας.

Για τον εντοπισμό των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων του μοντέλου MRPO αυτής της μελέτης, τα παραπάνω αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του MINLP των Bressi et al. (2021). Για το σύνολο λύσεων Pareto για R = 75%, η μέση VA τους κυμαινόταν μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής 7,13 mm - 11,48 mm αντίστοιχα,

που αντιστοιχεί άμεσα σε μέγιστη και ελάχιστη τιμή κόστους συντήρησης και επισκευής 56.769 €/km - 19.196 €/km. Απεικονίζοντας γραφικά αυτό το εύρος λύσεων, οι Bressi et al. (2021) έλαβαν μια εκθετική αντίστροφη αύξηση των λύσεων Pareto, που ταιριάζει με τη γραφική σχέση του Σχήματος 4-1 που προέκυψε από τη μελέτη αυτής της διπλωματικής. Αυτό υποστηρίζει ότι οι τεχνικοί και οικονομικοί στόχοι του MRPO είναι πράγματι αντικρουόμενοι. Η ίδια γραφική σχέση παρατηρήθηκε για το σύνολο λύσεων Pareto του MINLP για επίπεδο αξιοπιστίας  $R=85\%$ , κυμαινόμενη από μια ελάχιστη μέση τιμή VA 7,87 mm - 10,96 mm αντίστοιχα, καταλήγει σε μέγιστο και ελάχιστο κόστος συντήρησης και επισκευής 63.484 €/km - 23.032 €/km.

Εντός επιπέδου αξιοπιστίας  $R=75\%$ , οι Bressi et al. (2021) ανέλυσαν το σχέδιο συντήρησης για 8,53 mm, με αποτέλεσμα κόστος 26.191 €/km, όπου για να διατηρηθεί αυτή η μέση VA με πιθανότητα 75%, απαιτήθηκαν 5 εργασίες συμπίεσης παράλληλα με 35 επιθεωρήσεις, καθ' όλη τη διάρκεια της 20ετούς περιόδου ανάλυσης. Για να διατηρηθεί μια μέση VA ίση με 8,97 mm για 31.731 €/km με επίπεδο αξιοπιστίας 85%, απαιτήθηκαν ομοίως 5 εργασίες συμπίεσης επιπλέον των 42 ελέγχων.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, εντός των 80 χρονικών κύκλων  $t \in T$  της 20ετούς περιόδου, δεν εφαρμόζεται ενέργεια συντήρησης και επισκευής για κάθε κύκλο στο μοντέλο τους. Αυτό συμβαίνει επειδή το MINLP περιλαμβάνει την ενέργεια «καμία παρέμβαση» στη μεταβλητή απόφασής τους σχετικά με την παρέμβαση συντήρησης που εφαρμόζεται σε κάθε χρονικό διάστημα. Παρά το σχετικό κόστος 0€/km για αυτό το πρόσθετο μέτρο παρέμβασης, το συνολικό κόστος του MINLP είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό του MRPO. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον μεγαλύτερο αριθμό δράσεων συμπίεσης που χρησιμοποιεί το MINLP, σύμφωνα με τις στοχαστικές εκτιμήσεις του.

Αντίθετα, το συγκριτικά πολύ χαμηλότερο κόστος του MRPO παρουσιάζει μια πολύ πιο αποτελεσματική κατανομή πόρων και αυξημένη οικονομική βιωσιμότητα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη ολική βελτιστοποίηση των ακριβών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος MRPO, σε αντίθεση με τη χρήση μεταερευτικών μεθόδων της μελέτης Bressi et al (2021), οι οποίες δεν εγγυώνται την ολική βελτιστοποίηση. Ωστόσο, το χαμηλότερο κόστος ήταν απροσδόκητο λόγω του περιορισμού των παρεμβάσεων του MRPO ώστε να περιλαμβάνει μόνο τις επί πληρωμή ενέργειες «επιθεώρησης» και «συμπίεσης» για 111€/km και 7200€/km αντίστοιχα, σε αντίθεση με το MINLP που περιλαμβάνει την ενέργεια «καμία παρέμβαση» μηδενικού κόστους για

0€/km, μαζί με την «επιθεώρηση» και την «συμπίεσης» για πάλι 111€/km και 7200€/km αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει ότι ο περιορισμός έκπτωσης του περιορισμού (7) και του OF<sub>2</sub> του μοντέλου MRPO λειτουργεί προς όφελος μιας στρατηγικής που βασίζεται στη συνεχή χρήση ενεργητικών μέτρων συντήρησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές για το πρόβλημα MRPO, καθώς το μοντέλο προορίζεται για γενικευμένη χρήση πέρα από το δίκτυο που εξετάζεται σε αυτήν τη μελέτη, ειδικά υπό το πρίσμα της έλλειψης γενικά διαθέσιμων μακροπρόθεσμων ιστορικών δεδομένων σχετικά με τη συντήρηση της επιδομής. Ενθαρρύνοντας ένα συνεπές πλαίσιο λήψης αποφάσεων που βασίζεται στην επιθεώρηση και τη συντήρηση, μπορεί να υποστηριχθεί η μελλοντική συλλογή δεδομένων συντήρησης και επισκευής και να παρακολουθείται στενότερα ο ρυθμός φθοράς, παρέχοντας καλύτερη χρήση των πόρων για την άμεση παρακολούθηση και διατήρηση της κατάστασης της σιδηροδρομικής επιδομής.

Ενώ το μοντέλο MINLP διαθέτει μια πιο αυστηρή στοχαστική προσέγγιση κατάλληλη για την ολοκληρωμένη διαχείριση της αβεβαιότητας σε θεωρητικό επίπεδο, με αποτέλεσμα την υψηλότερη εμφάνιση συμπιέσεων λόγω της πιθανοτικά ακριβέστερης προσέγγισής της, αυτή η μεθοδολογία βασίζεται στη διαθεσιμότητα των απαραίτητων ιστορικών δεδομένων για την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων. Αυτό περιορίζει τη γενικευσιμότητά της σε άλλες περιπτώσεις δοκιμών. Ενώ είναι λιγότερο στοχαστικά στιβαρή, το υπολογιστικά πιο αποτελεσματικό MILP του MRPO παρουσιάζει παρόμοιο μέση VA του προτύπου συντήρησης με το MINLP για χαμηλότερο κόστος και επικυρωμένη ολική βελτιστοποίηση. Το πρόβλημα MRPO δεν περιορίζεται από την εξειδίκευση του πεδίου δοκιμών που είναι φυσικά αποτέλεσμα της εφαρμογής στοχαστικών μεθόδων, καθώς πρέπει να μετρηθεί ειδικά γύρω από αυτό και να κατασκευαστεί γύρω από ένα μεγάλο ιστορικό σύνολο δεδομένων. Έτσι, το μοντέλο του προβλήματος MRPO αναδεικνύεται ως ένα πρακτικά εφαρμόσιμο εργαλείο οικονομικής βελτιστοποίησης με σαφή επιχειρησιακή κατεύθυνση. Αυτό παρέχει στη διαχείριση συντήρησης σιδηροδρόμων ένα διαφανές και υπολογιστικά αποτελεσματικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων που είναι ευκολότερο να ενσωματωθεί σε συστήματα διαχείρισης υποδομών.

Η αξιολόγηση λοιπόν μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου με αυτού των Bressi et al. (2021) ανέδειξε διαφοροποιήσεις που εγείρουν ερωτήματα σχετικά με την σταθερότητα και την ανθεκτικότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, λόγω της πολυδιάστατης φύσης του μοντέλου MRPO της παρούσας μελέτης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποικιλομορφία

των περιπτώσιολογικών μελετών συντήρησης και επισκευής σιδηροδρόμων. Υπό το πρίσμα της παγκόσμιας αστάθειας που προκαλείται από την κλιματική αλλαγή και τις πολιτικοοικονομικές αβεβαιότητες, η διαθεσιμότητα τόσο των οικονομικών και υλικών πόρων μπορεί να ποικίλει, όπως και ο ρυθμός φθοράς των σιδηροδρομικών γραμμών (Chinowsky et al. 2019). Συνεπώς για να εξετασθούν περαιτέρω το μοντέλο MRPO οι συμβιβασμοί μεταξύ των τεχνικών και οικονομικών στόχων του Διαγράμματος 4-1 και του Πίνακα 4-2, καθώς και για την απαίτηση περαιτέρω καθοδήγησης από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων με βάση τις ιδιαιτερότητες των αντίστοιχων συνθηκών συντήρησης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Η ανάλυση θα επιτρέψει την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του μοντέλου απέναντι στις διάφορες μεταβολές παραμέτρων.

#### **4.4 Ανάλυση Ευαισθησίας και Αξιολόγηση Σεναρίων**

Για την περαιτέρω διερεύνηση των βελτιστοποιημένων λύσεων των στρατηγικών συντήρησης όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό να προσδιορισθεί ο βαθμός στον οποίο οι βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων εισόδου. Αυτό επιτρέπει την περαιτέρω αξιολόγηση του μοντέλου υπό διαφορετικά επίπεδα ασφαλείας, αναδεικνύοντας ότι η αυστηρότητα των προδιαγραφών επηρεάζει τις απαιτήσεις σε πόρους και την ευαισθησία του συστήματος σε εξωτερικούς παράγοντες.

Η βέλτιστη στρατηγική αναμένεται να μεταβληθεί όταν οι συνθήκες αποκλίνουν από τις αρχικές παραδοχές. Μέσω λοιπόν της ανάλυσης ευαισθησίας του προβλήματος MRPO, θα εξετασθεί ο τρόπος με τον οποίο οι αλλαγές στις παραμέτρους του προβλήματος επηρεάζουν το σύνολο των βέλτιστων λύσεων του μετώπου Pareto. Στόχος είναι η απόκτηση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τις βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης και να εντοπίσουμε παράγοντες που μπορούν τόσο να ενισχύσουν όσο και να αποδυναμώσουν την εφαρμογή του μοντέλου.

Για τη διαφοροποίηση των σεναρίων βελτιστοποίησης για την ανάλυση, ακολουθήθηκε η κάτωθι διαδικασία. Το πρώτο βήμα ήταν η αξιολόγηση σεναρίων ενός παράγοντα (Single factor Scenarios), μεταβάλλοντας μεμονωμένα μία από τις παραμέτρους  $B_{max}$ ,  $d$ ,

$Y_{r \max}$  και  $DF_r$  από τον Πίνακα 4-1 κατά διαστήματα  $\pm 10\%$ , ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Πολλαπλά σενάρια αυτής της μεταβολής δημιουργήθηκαν πολλαπλασιάζοντας την αναλύσιμη παράμετρο με δείγματα ενός συνόλου τιμών του συντελεστή  $\lambda \in \{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4\}$ , έτσι ώστε πολλαπλασιάζοντας την παράμετρο επί 0.9 ή 1.3, το 90% ή το 130% της αρχικής τιμής αντίστοιχα να χρησιμοποιείται ως είσοδος για το μοντέλο MRPO. Με  $\lambda=1$  να αντιπροσωπεύεται το βασικό μοντέλο, καθώς χρησιμοποιείται το 100% της αρχικής παραμέτρου. Τα σενάρια που δημιουργούνται με το μεταβαλλόμενο  $\lambda$  συγκρίνονται με αυτήν τη βασική γραμμή, καθώς και μεταξύ τους ανάλογα με τις σχετικές διαφορές τους.

Αυτή η συγκριτική ανάλυση της παραμετρικής μεταβολής του  $\lambda$  διευκολύνθηκε βελτιστοποιώντας το MRPO με κάθε αλλαγή της εισόδου του, δημιουργώντας μια νέα καμπύλη Pareto χρησιμοποιώντας τη μέθοδο περιορισμού έψιλον έτσι ώστε  $\varepsilon \in [1, 19]$  για κάθε αξιολογημένο σενάριο. Σχεδιάζοντας καθεμία από τις προκύπτουσες βελτιστοποιημένες καμπύλες Pareto, καθώς και αυτήν της γραμμής βάσης (δηλαδή, Διάγραμμα 4-1), η συστηματική μετατόπιση μετρά την ελαστικότητα του μοντέλου, καθώς και την ειδική επιρροή της απομονωμένης παραμέτρου, προσφέροντας πληροφορίες για το τι πρέπει να ληφθεί περαιτέρω υπόψη τόσο όσον αφορά την ευαισθησία του MRPO ως μοντέλου, όσο και μεταξύ των επιπέδων αξιοπιστίας του.

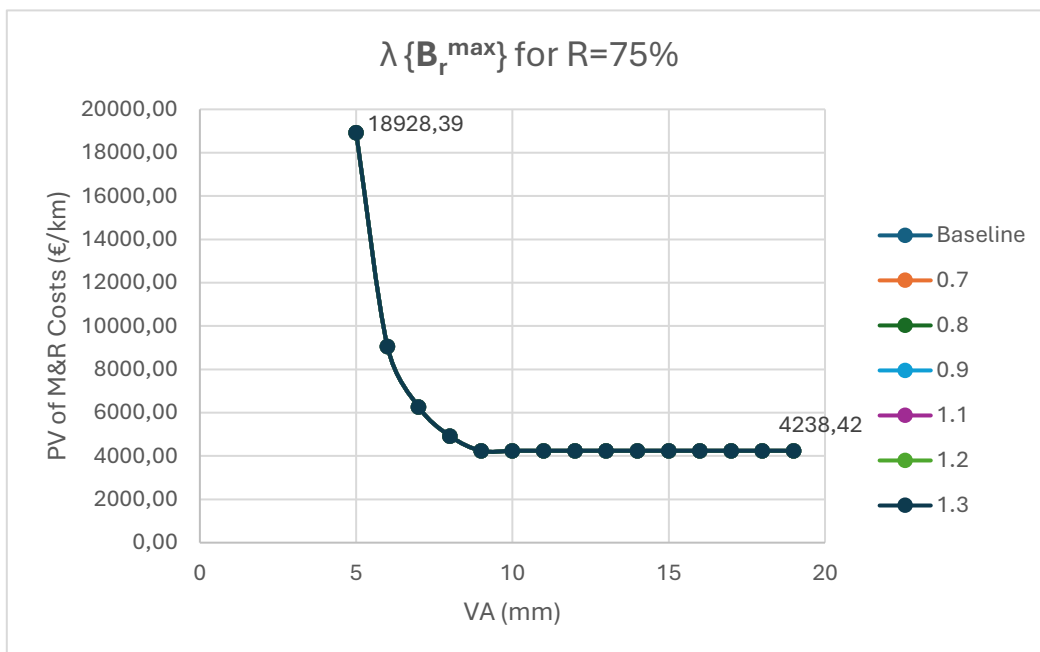
Συνολικά, κατά την ποσοτικοποίηση και ανάλυση του αντίκτυπου των εξωτερικών αλλαγών στο μέτωπο Pareto του MRPO, η αντιστάθμιση μεταξύ οικονομικού κόστους και τεχνικής υποβάθμισης της γραμμής (εκφρασμένη σε όρους της μέσης κατακόρυφης ευθυγράμμισής της) μπορεί να αξιολογηθεί περαιτέρω υπό συνθήκες όπου οι τεχνικές και οικονομικές πιέσεις μπορεί να είναι σημαντικές. Δομημένο γύρω από 9 διακριτά σενάρια  $\lambda$ , από τα οποία περιλαμβάνονται μόνο τα εφικτά σενάρια για κάθε ανάλυση και επίπεδο αξιοπιστίας, η συμπεριφορά του μοντέλου μπορεί να χαρτογραφηθεί υπό μεταβολές των πραγματικών συνθηκών. Αυτή η ανάλυση συμπληρώνει το πλαίσιο λήψης αποφάσεων προσφέροντας περαιτέρω πληροφορίες, σκέψεις και συστάσεις για την καθοδήγηση της ανάπτυξης στρατηγικών συντήρησης χρησιμοποιώντας το MRPO ακόμη και σε ακανόνιστα περιβάλλοντα.

### Ευαισθησία ως προς τον Μέγιστο διαθέσιμο Προϋπολογισμό

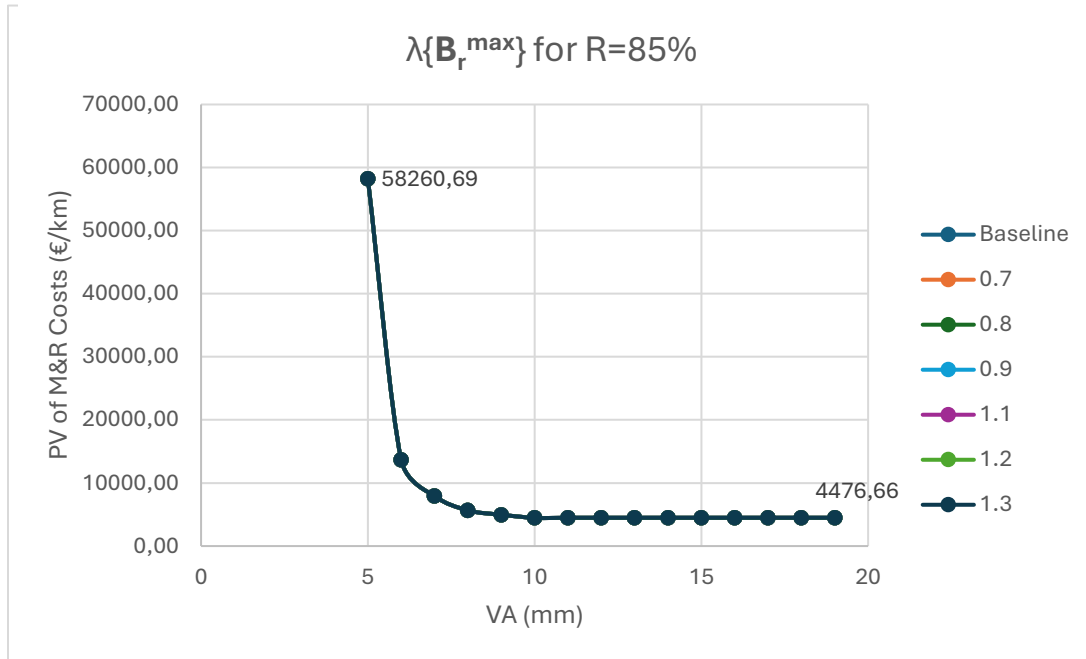
Στο σενάριο 1, για να εκτιμηθεί η ευαισθησία του μοντέλου MRPO στον μέγιστο διαθέσιμο προϋπολογισμό, η παράμετρος  $B_r^{\max}$  μεταβλήθηκε σε συνδυασμό με τον συντελεστή  $\lambda = \{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ . Η παραμετρική μεταβολή του  $\lambda \{B_r^{\max}\}$  δημιούργησε 7 διακριτά σενάρια για κάθε επίπεδο αξιοπιστίας, τα οποία απεικονίζονται στα Διαγράμματα 4-2 και 4-3 παρακάτω.

Και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας, οι καμπύλες που προέκυψαν για όλες τις αλλαγές του  $\lambda \{B_r^{\max}\}$  είναι πανομοιότυπες με το μέτωπο Pareto του βασικού μοντέλου ( $\lambda=1$ ). Η μεταβολή στις λύσεις Pareto για όλες τις παραμέτρους του  $\lambda$  ακολουθεί την ίδια καμπύλη του Μετώπου Pareto, κυμαινόμενη μεταξύ τιμών  $\varepsilon \in [5,9]$ mm και  $\varepsilon \in [5,10]$ mm για επίπεδα αξιοπιστίας 75% και 85% αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ίδιο εύρος Pareto κόστους συντήρησης για τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις τους των  $[18.928,39, 4.238,42]$  €/km και  $[58.260,69, 4.476,66]$  €/km για  $\varepsilon \in [5,9]$ mm και  $\varepsilon \in [5,10]$ mm αντίστοιχα, που ταιριάζουν με τις βασικές τιμές του Διαγράμματος 4-1 και του Πίνακα 4-2.

Διάγραμμα 4-2 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου διαθέσιμου προϋπολογισμού  $\lambda \{B_r^{\max}\}$  for  $\lambda = \{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%.



Διάγραμμα 4-3 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου διαθέσιμου προϋπολογισμού  $\lambda\{B_r^{\max}\}$  for  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%.

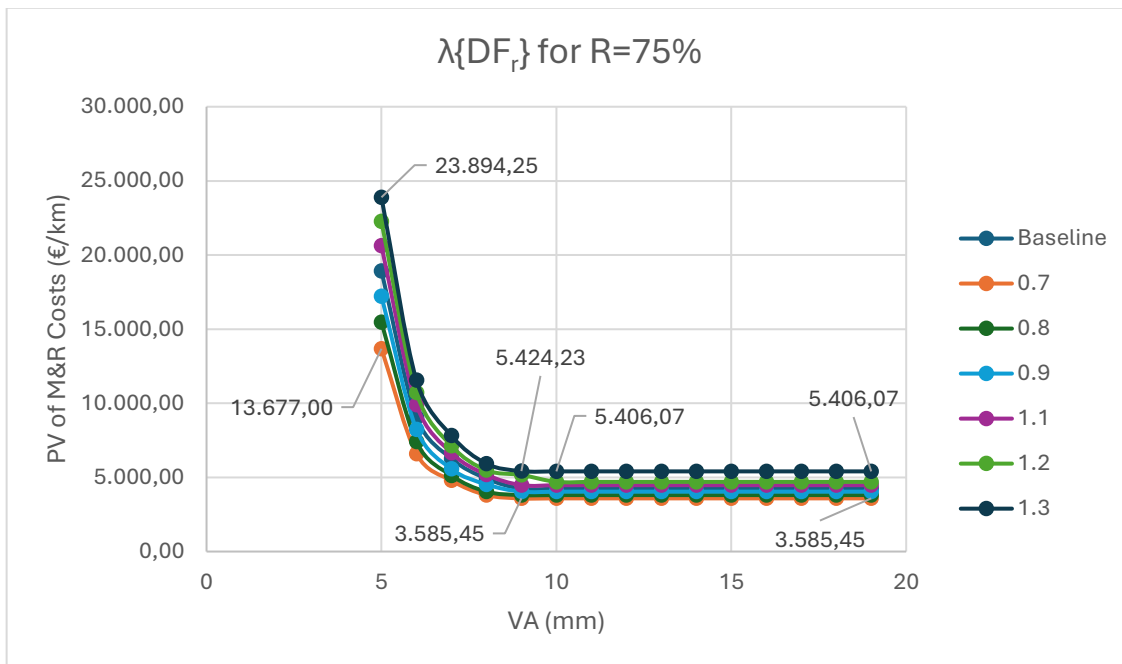


Το παρόν σενάριο έχει οικονομικό χαρακτήρα και συνυπολογίζει έντονες οικονομικές διακυμάνσεις στο διαθέσιμο προϋπολογισμό συντήρησης. Η πλήρης επικάλυψη των καμπυλών υποδεικνύει ότι και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας, οι αλλαγές που εφαρμόστηκαν δεν επηρέασαν το βέλτιστο αποτέλεσμα του μοντέλου και, ως εκ τούτου, το μέτωπο Pareto παραμένει αμετάβλητο. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο δεν παρουσιάζει ευαισθησία στις αλλαγές του μέγιστου διαθέσιμου προϋπολογισμού ( $B_r^{\max} = 120.000\text{€}$ ), είτε λόγω της επίδρασης της παραμέτρου έκπτωσης  $d$  προς τους περιορισμούς και τον στόχο, είτε λόγω της πιθανής ιεράρχησης των τεχνικών αναγκών του δικτύου έναντι των οικονομικών. Το μοντέλο είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε αυτή τη συγκεκριμένη παράμετρο, ενώ καλύπτει άνετα τις τεχνικές ανάγκες του δικτύου.

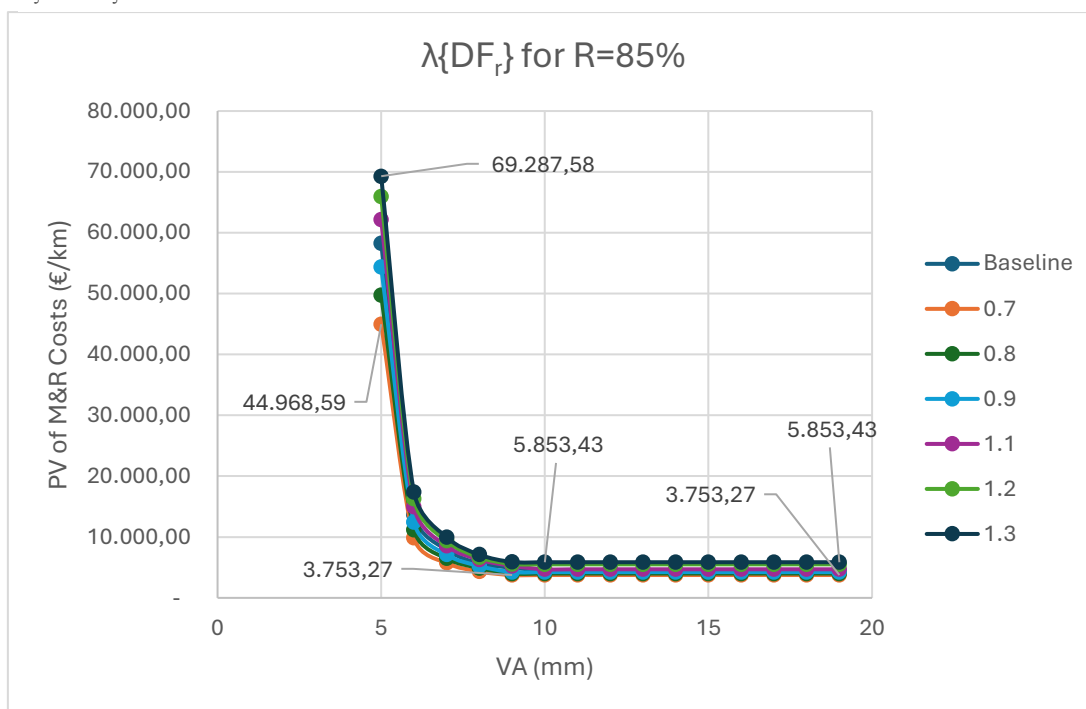
#### *Ευαισθησία ως προς τη Παράμετρο λειτουργίας Φθοράς*

Η παράμετρος  $DF_r$  περιγράφει τη δυναμική υποβάθμιση της επιδομής στο χρόνο. Τα επτά σενάρια της  $DF_r$  αξιολογούνται ορίζοντας τον συντελεστή  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  για τα δύο διαφορετικά  $R$ . Η μεταβολή της παραμέτρου λειτουργίας φθοράς  $\lambda\{DF_r\}$  προσομοιώνει αλλαγές στις συνθήκες της γραμμής όπως αύξηση του φορτίου κυκλοφορίας, παλαιότητα υλικών και περιβαλλοντικές συνθήκες, παράγοντες δηλαδή που επιταχύνουν την υποβάθμιση του γεωμετρικού επιπέδου. Η αλλαγή αυτή λοιπόν αποτελεί μια τεχνική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας της γραμμής υπό διάφορες συνθήκες καταπόνησης.

Διάγραμμα 4-4 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου παραμέτρου λειτουργίας φθοράς  $\lambda\{DF_r\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%.



Διάγραμμα 4-5 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου παραμέτρου λειτουργίας φθοράς  $\lambda\{DF_r\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%.



Η παραμετρική μεταβολή που απεικονίζεται στα Διαγράμματα 4-4 και 4-5, απεικονίζει μία σχετική γραμμική μετατόπιση των καμπύλων για κάθε αύξηση της παραμέτρου  $DF_r$ .

Αναλύοντας το προκύπτον εύρος των μετώπων Pareto, σε σύγκριση με το βασικό κόστος συντήρησης 75%: [18.928,39, 4.238,42] €/km για  $\varepsilon \in [5,9\text{mm}]$  και 85%: [58.260,69, 4.476,66] €/km  $\varepsilon \in [5,10\text{mm}]$ , το  $\lambda = 0,7$  διατηρεί το ίδιο τεχνικό όριο  $\varepsilon \in [5,9\text{mm}]$  ([13.677, 3.585,45] €/km) και  $\varepsilon \in [5,10\text{mm}]$  ([44.968,59, 3.753,27] €/km) για επίπεδα αξιοπιστίας 75% και 85% αντίστοιχα, ενώ το οικονομικό κόστος μετατοπίζεται γραμμικά αναλογικά. Το ίδιο συμβαίνει και για  $\lambda = 1,3$  διατηρώντας τη μέση τιμή VA για επίπεδο αξιοπιστίας 85% έτσι ώστε  $\varepsilon \in [5,10\text{mm}]$ , για μια άμεσα ανάλογη αύξηση του κόστους συντήρησης κατά ([69, 287,58, 8853,43] €/km). Επιπλέον, ενώ το οικονομικό κόστος αυξάνεται για επίπεδο αξιοπιστίας 75% σε ([23.894,25, 5.406,07] €/km), το σύνολο Pareto του τεχνικού στόχου αυξάνεται σε  $\varepsilon \in [5,10\text{mm}]$  σε σύγκριση με την τιμή βάσης  $\lambda = 1, \varepsilon \in [5,9\text{mm}]$ . Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την ευρωστία του μοντέλου 85%.

Αυτό υποδηλώνει ότι ο ρυθμός φθοράς επηρεάζει το κόστος αναλογικά, δηλαδή για ταχύτερη φθορά απαιτούνται σταθερά περισσότεροι πόροι. Επίσης στη περιοχή υψηλής λειτουργικής ευαισθησίας για  $\varepsilon < 6 \text{ mm}$  παρατηρείται εκθετική αύξηση τιμών κόστους συντήρησης στα αυστηρότερα όρια φθοράς, δηλαδή το μοντέλο καλείται να διατηρήσει χαμηλά επίπεδα φθοράς και το κόστος συντήρησης αντιδρά πολύ πιο έντονα στις μεταβολές του  $DF_r$  όταν οι απαιτήσεις ποιότητας είναι αυστηρές με αποτέλεσμα αν απαιτούνται περισσότερες επεμβάσεις, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος σε ένα εύρος τιμών 13.677,00~23.894,25 €/km για R=75% και 44.968,59~69.287,58 €/km για R=85%.

Η εκθετική αύξηση μετατοπίζεται γραμμικά προς αυξημένες τιμές  $\varepsilon$  καθώς αυξάνεται η παράμετρος  $DF_r$ . Αυτό υποδηλώνει ότι η ανοχή υποβάθμισης θα πρέπει να αυξηθεί για το χαμηλότερο διάστημα των δαπανών συντήρησης για υποδομές με υψηλότερους ρυθμούς υποβάθμισης. Ακόμη και στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης, δηλαδή για  $\varepsilon > 10 \text{ mm}$ , οι σειρές δεν ταυτίζονται. Το ελάχιστο κόστος που απαιτείται για διασφάλιση της αξιοπιστίας μεταβάλλεται ανάλογα την μεταβολή του  $DF_r$ . Αυτό αποδεικνύει ότι η τεχνική κατάσταση της γραμμής επιβάλλει ένα οικονομικό όριο που δε μπορεί να ξεπεραστεί όσο κι αν χαλαρώσουν τα τεχνικά κριτήρια.

Οι αλλαγές ως προς το οικονομικό κόστος του MRPO υποδηλώνουν ότι ο ρυθμός φθοράς επηρεάζει αναλογικά το οικονομικό κόστος, δηλαδή η ταχύτερη (υψηλότερη) φθορά απαιτεί σταθερά περισσότερους πόρους. Αντίθετα, ενώ το επίπεδο αξιοπιστίας 85% παραμένει αμετάβλητο, και επομένως ισχυρό, στην αύξηση του  $\lambda\{DF_r\}$  όσον αφορά το τεχνικό κόστος, οι λύσεις Pareto φαίνεται να επεκτείνονται προς λιγότερο αυστηρές τιμές

για 75%. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις πιο χαλαρές συνθήκες του επιπέδου αξιοπιστίας 75%. Συνολικά, αυτό υπογραμμίζει τη σημασία των επιπέδων ασφάλειας έναντι εξωτερικών ανωμαλιών φθοράς που μπορεί να επηρεάσουν το τεχνικό κόστος. Η αυξανόμενη ταχύτητα υποβάθμισης της γραμμής οδηγεί το μοντέλο στην δραματική αύξηση των δαπανών για τις εργασίες συντήρησης που απαιτούνται.

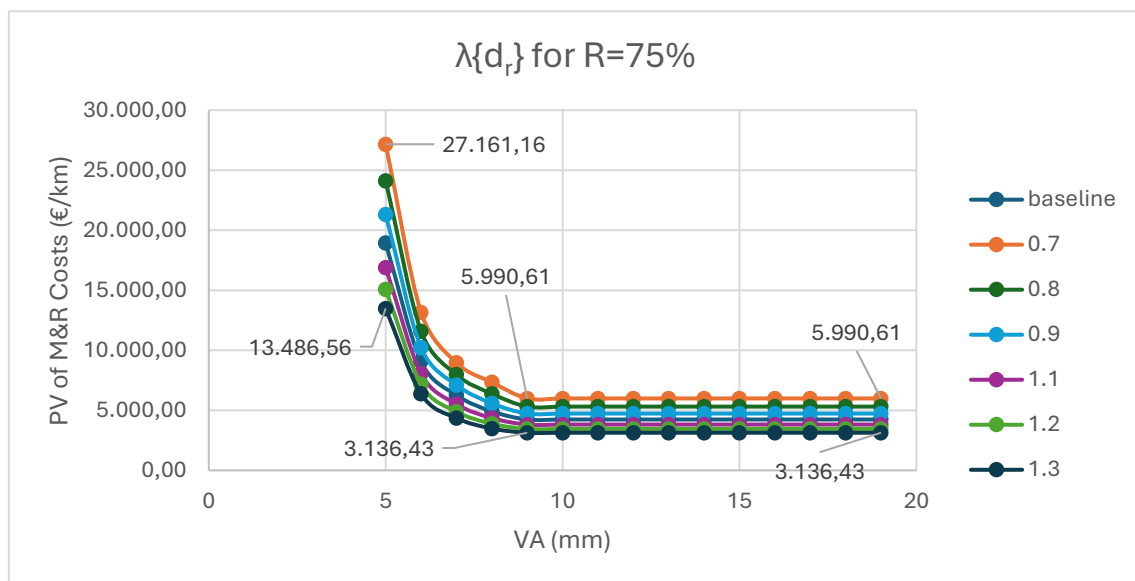
*Εναισθησία ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο*

Στην ανάλυση αυτή εισάγεται η σημασία του επιτοκίου. Το προεξοφλητικό επιτόκιο  $d$  μεταφράζει τις μελλοντικές δαπάνες συντήρησης σε σημερινές αξίες. Στην εικοσαετή περίοδο εξέτασης του μοντέλου, η τιμή  $d$  καθορίζει τη βαρύτητα του αλγορίθμου στις μελλοντικές παρεμβάσεις.

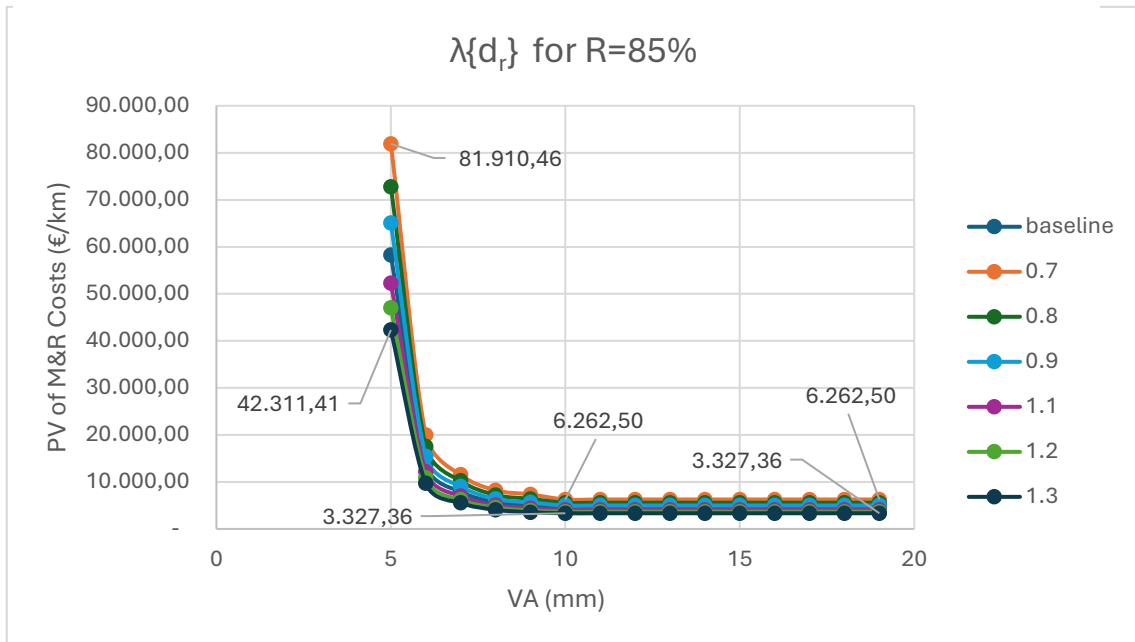
Υψηλό επιτόκιο υποδηλώνει τη μείωση της παρούσας αξίας των μελλοντικών δαπανών και το μοντέλο τείνει να ευνοεί παρεμβάσεις στο μέλλον. Εν αντιθέσει με το χαμηλό επιτόκιο όπου οι μελλοντικές δαπάνες κοστίζουν σχεδόν όσο και οι σημερινές. Η τιμή αναφοράς του  $d$  (Πίνακας 4-1) μεταβάλλεται μέσω πολλαπλασιασμού με τον συντελεστή  $\lambda \in \{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$ .

Ως αποτέλεσμα, οι σχετικές καμπύλες του μετώπου Pareto δημιουργούνται και παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4-6 και 4-7 για τα αντίστοιχα επίπεδα αξιοπιστίας.

Διάγραμμα 4-6 : Ανάλυση εναισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου προεξοφλητικού επιτοκίου  $\lambda\{d_r\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%.



Διάγραμμα 4- 7 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου προεξοφλητικού επιτοκίου  $\lambda\{d_r\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%.



Και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας των Διαγραμμάτων 4-6 και 4-7, το σύνολο Pareto παραμένει το ίδιο όσον αφορά τον τεχνικό στόχο της VA, δηλαδή: για όλα τα  $\lambda \in \{0,7, 0,8, 0,9, 1, 1,1, 1,2, 1,3\}$ , το  $\varepsilon$  παραμένει στο ίδιο εύρος με τις αντίστοιχες τιμές βάσης (75%:  $\varepsilon \in [5,9]$  mm και 85%:  $\varepsilon \in [5,10]$  mm). Για τα δύο αντίθετα άκρα των παραμέτρων  $\lambda$ , εντός του επιπέδου αξιοπιστίας 75%, το  $\varepsilon \in [5,9]$  mm έχει ως αποτέλεσμα ένα εύρος κόστους συντήρησης και επισκευών [27.161,16 - 5990,61] €/km για  $\lambda = 0,7$  και [13.486,56 - 3.136,43] €/km για  $\lambda = 1,3$ . Η ίδια τάση ακολουθείται για επίπεδο αξιοπιστίας 85%, για  $\varepsilon \in [5,10]$ mm, όπου το κόστος συντήρησης και επισκευής για  $\lambda = 0,7$  είναι [81.910,46 - 6262,50] €/km, και [42.311,41 - 3327,36] €/km για  $\lambda = 1,3$ .

Αυτά τα αποτελέσματα αντιπαραβάλλουν την άμεσα γραμμική σχέση της προηγούμενης ανάλυσης ευαισθησίας έναντι της παραμέτρου λειτουργίας φθοράς, έτσι ώστε η γραμμική σχέση μεταξύ της αύξησης της παραμέτρου έκπτωσης  $\lambda\{d\}$  να φαίνεται ανεστραμμένη. Δηλαδή, για αλλαγές που αντιστοιχούν σε μείωση του επιτοκίου (για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9\}$ ) η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα πάνω και αντίθετα η αύξηση του επιτοκίου (για  $\lambda=\{1.1, 1.2, 1.3\}$ ) μετατοπίζει την καμπύλη προς τα κάτω και αυτό επιβεβαιώνει την σχέση του προεξοφλητικού επιτοκίου με την παρούσα αξία, δηλαδή όσο μικρότερο το επιτόκιο τόσο μεγαλύτερη η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης.

Η σημαντική αύξηση του εύρους του κόστους συντήρησης και επισκευής σε όλα τα σύνολα Pareto για  $\lambda < 1$ , οφείλεται στη διατήρηση της χαμηλής φθοράς που απαιτεί

συνεχείς παρεμβάσεις σε όλο το βάθος των είκοσι ετών. Αυτό αυξάνει το σχετικό κόστος συντήρησης για χαμηλότερες και αυστηρότερες μέσες τιμές  $VA$  του  $\varepsilon$ , και ενισχύεται σημαντικά από τη διαφορά στην ασφάλεια που λαμβάνεται υπόψη από τα επίπεδα αξιοπιστίας, όπου η επίδραση του επιτοκίου στις διάφορες μελλοντικές δαπάνες αυξάνεται δραστικά τα οικονομικά κόστη των δύο συνόλων Pareto, όπως φαίνεται για παράδειγμα για  $\lambda 0.7$  και  $\varepsilon \in [5,10]$  for  $[81,910.46 - 6262.50]$  €/km.

Συνολικά, η μεταβολή στο οικονομικό κόστος και η διατήρηση των τιμών  $\varepsilon$  δείχνει ότι το επιτόκιο επηρεάζει το επιτόκιο επηρεάζει το ύψος της δαπάνης για συντήρηση αλλά δεν διαφοροποιεί την τεχνική απόφαση για το ποιο είναι το βέλτιστο επίπεδο φθοράς για τη γραμμή.

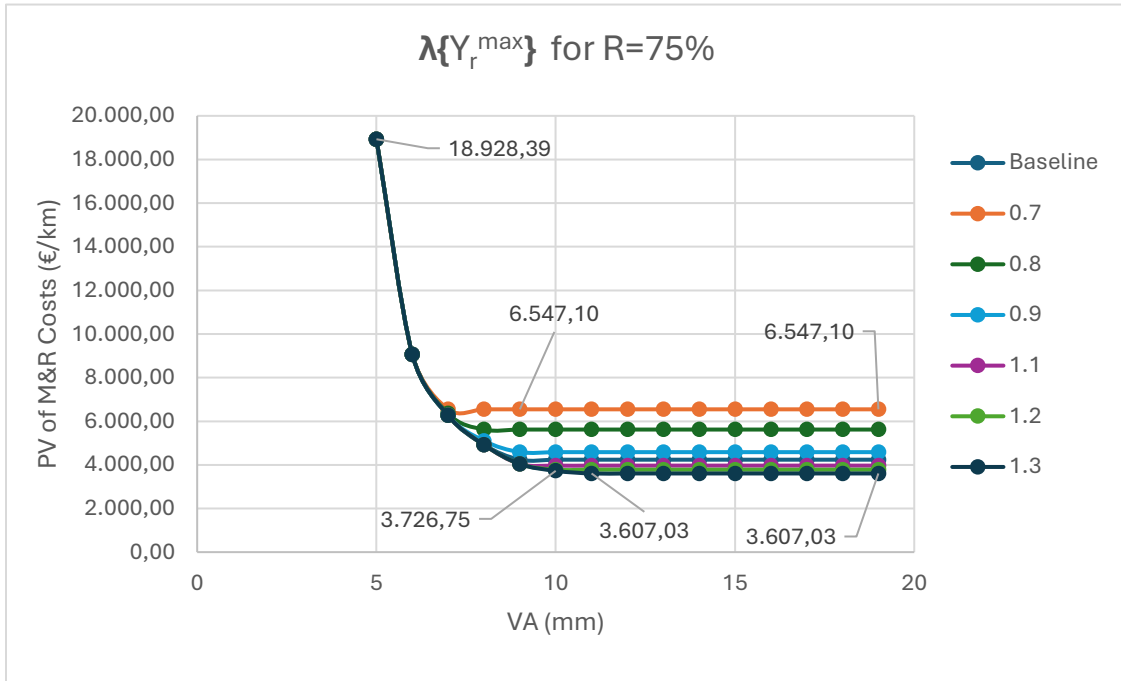
Άρα οι διακυμάνσεις του προεξοφλητικού επιτοκίου δείχνουν ότι οι μακροχρόνιες στρατηγικές συντήρησης ενέχουν οικονομικό ρίσκο και δημιουργούν μεγάλη χρηματοοικονομική ευαισθησία στο μοντέλο. Η επίδραση του ανατοκισμού λειτουργεί αντιστρόφως ανάλογα για το κόστος συντήρησης. Ενώ η τεχνική λύση παραμένει σταθερή, η λογιστική της αξία είναι ευμετάβλητη καθιστώντας την ακρίβεια του επιτοκίου κρίσιμη για τον σωστό προγραμματισμό των κεφαλαίων.

#### *Ευαισθησία ως προς το Μέγιστο όριο Φθοράς*

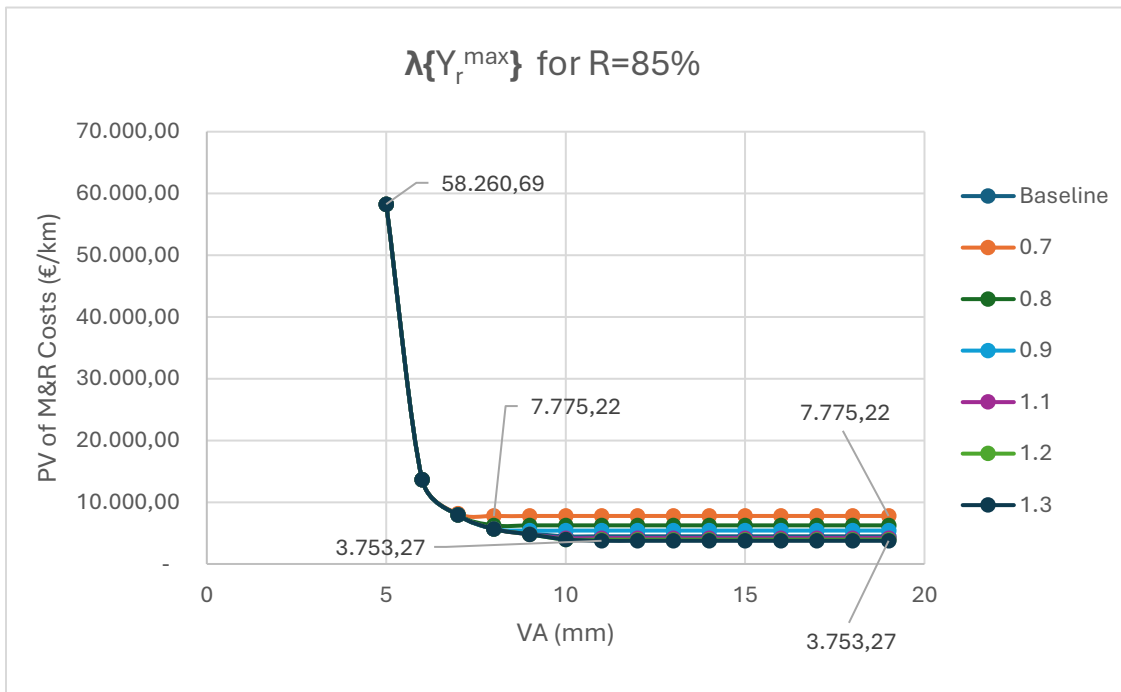
Η ευαισθησία του μοντέλου MRPO στην μεμονωμένη μεταβολή του  $Y_r^{\max}$  του δικτύου εξετάζεται με την αξιολόγηση της προδιαγραφής ασφαλείας ενός μέγιστου ορίου υποβάθμισης που απαγορεύεται να ξεπεράσει η σιδηροδρομική επιδομή, δηλαδή τη περαιτέρω επιδείνωσή της. Για να γίνει αυτό, το  $\lambda \{ Y_r^{\max} \}$  μεταβάλλεται παραμετρικά για  $\lambda \in \{0,7, 0,8, 0,9,1, 1,1, 1,2, 1,3\}$ , όπως απεικονίζεται στα Διαγράμματα 4-8 και 4-9 παρακάτω.

Η ανάλυση ευαισθησίας αυτής της ενότητας παρουσιάζει την πιο ποικίλη μετατόπιση προς τον τεχνικό στόχο του προβλήματος MRPO και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας. Για  $R=75\%$ , η μεγαλύτερη μείωση της παραμέτρου  $Y_r^{\max}$  για  $\lambda = 0,7$  είχε ως αποτέλεσμα ένα μέτωπο Pareto με  $\varepsilon \in [5,9\text{mm}]$  για ένα εύρος κόστους συντήρησης και επισκευής παρούσας αξίας  $[18.928,39 - 6547,1]$  €/km, ενώ για τη μεγαλύτερη αύξηση του  $\lambda \{ Y_r^{\max} \}$  κατά  $\lambda = 1,3$ , ελήφθη ένα μέτωπο Pareto με  $\varepsilon \in [5,11\text{mm}]$  για  $[18.928,39 - 3.607,03]$  €/km.

Διάγραμμα 4-9 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου ορίου φοθράς  $\lambda\{Y_r^{\max}\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 75%.



Διάγραμμα 4-8 : Ανάλυση ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά επίπεδα παραμετροποιημένου μέγιστου ορίου φοθράς  $\lambda\{Y_r^{\max}\}$  για  $\lambda=\{0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$  προς το σύνολο λύσεων Pareto του MRPO για επίπεδο αξιοπιστίας 85%.



Το επίπεδο αξιοπιστίας 85% έδειξε μια παρόμοια αλλαγή στα αντίστοιχα σύνολα λύσεων Pareto, όπου για  $\lambda=0.7$  η μέση τιμή φθοράς για  $\varepsilon \in [5,8\text{mm}]$  βρέθηκε για  $[58.260,69 - 7774,22]$  €/km και για  $\lambda=1.3$  οδήγησε σε ένα εύρος  $\varepsilon \in [5,11\text{mm}]$  για  $[58.260,69 - 3.753,27]$ €/km.

Μειώνοντας την τιμή του  $Y_r^{\max}$  για  $\lambda < 1$ , τα πρότυπα συντήρησης γίνονται αυστηρότερα λόγω της μείωσης της μέγιστης κατάστασης υποβάθμισης που επιτρέπεται να φτάσει η σιδηροδρομική επιδομή. Ως υποπροϊόν, η μέση κατάσταση κατακόρυφης ευθυγράμμισης μπορεί να μειωθεί, όπως παρατηρήθηκε για  $\lambda = 0,7$  επιπέδου αξιοπιστίας 85%, όπου το τεχνικό εύρος του μετώπου Pareto μειώθηκε αισθητά. Αντίθετα, το πιο χαλαρό επίπεδο ασφάλειας του 75% διατήρησε τις ίδιες  $\varepsilon$ -τιμές με την αντίστοιχη καμπύλη βάσης. Σε αντίθεση με τους αυστηρότερους περιορισμούς  $\lambda < 1$ , για  $\lambda > 1$  εισάγεται στο MRPO ένα μεγαλύτερο μέγιστο όριο υποβάθμισης, όπου και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας το σύνολο Pareto για τη μέση κατακόρυφη χάραξη εκτείνεται σε  $\varepsilon \in [5,11\text{mm}]$ .

Εμφανώς, για  $\varepsilon = 5 \text{ mm}$  όλων των επιπέδων  $\lambda$  και αξιοπιστίας, τα κόστη συντήρησης και επισκευής είναι πανομοιότυπα με εκείνα του ισοδύναμου συνόλου λύσεων βάσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυστηρότητα της διατήρησης ενός μέσου όρου 5 mm για την VA του έρματος, παραμένοντας σχετικά αμετάβλητη σε τυχόν αλλαγές στη μέγιστη τιμή της κατάστασης υποβάθμισης. Ωστόσο, καθώς η μέση VA αυξάνει το  $\varepsilon$  της καμπύλης Pareto προς τη σύγκλιση και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας, το κόστος συντήρησης και επισκευής φαίνεται να είναι συνολικά υψηλότερο από την τιμή βάσης για  $\lambda < 1$ . Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς ο περιορισμός της μειωμένης  $Y_r^{\max}$  έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για συχνή συντήρηση καθώς το περιθώριο υποβάθμισης στενεύει. Η αύξηση του ορίου για  $\lambda < 1$  υποδηλώνει χαλάρωση των κανόνων και επιτρέπει στη γραμμή να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα υποβάθμισης πριν από την παρέμβαση, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στο μειωμένο κόστος σε σχέση με την τιμή βάσης καθώς η καμπύλη συγκλίνει σε όλα τα επίπεδα αξιοπιστίας, εκμεταλλευόμενο την ελευθερία να επιτραπεί στη γραμμή να υποβαθμιστεί περισσότερο.

Η ανάλυση δείχνει λοιπόν ότι το μέγιστο όριο φθοράς είναι ο παράγοντας που καθορίζει το ελάχιστο κόστος συντήρησης, ενώ για αυστηρότερους ποιοτικούς στόχους ( $\varepsilon \in [5,7]\text{mm}$ ) η παράμετρος δεν επηρεάζει το μοντέλο.

## 4.5 Συμπεράσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

Η εκτέλεση ανάλυσης ευαισθησίας στο μοντέλο MRPO δίνει έμφαση στην πολυπλοκότητα του προβλήματος σχεδιασμού συντήρησης και επισκευής προσδιορίζοντας τις κρισιμότερες παραμέτρους που καθορίζουν την βιωσιμότητα του σιδηροδρομικού δικτύου. Η ανάλυση αξιολογεί τον τρόπο με τον οποίο οι αλλαγές στις βασικές τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους επηρεάζουν τις βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης που παράγονται από το μοντέλο MRPO υπό δύο επίπεδα αξιοπιστίας (75% και 85%). Στόχος ήταν ο έλεγχος της ανθεκτικότητας και η ελαστικότητα του μοντέλου, ο προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν σημαντικά τις βέλτιστες λύσεις και η κατανόηση της μεταβολής της αντιστάθμισης μεταξύ κόστους συντήρησης και υποβάθμισης υποδομών υπό διαφορετικές συνθήκες. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο επηρεάζεται κυρίως από τις τεχνικές παραμέτρους που βασίζονται στην υποβάθμιση, ενώ οι οικονομικές παράμετροι επηρεάζουν κυρίως το μέγεθος του κόστους παρά την τεχνική πτυχή της βέλτιστης λύσης.

Οι αλλαγές στο μέγιστο διαθέσιμο προϋπολογισμό  $B^{\max}$  δεν είχαν καμία επίδραση στα μέτωπα Pareto για κανένα από τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας, υποδηλώνοντας ότι ο περιορισμός προϋπολογισμού δεν είναι δεσμευτικός και οι απαιτήσεις συντήρησης εξαρτώνται πρωτίστως από τεχνικές ανάγκες της επιδομής. Οι ανάγκες συντήρησης του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ότι καλύπτονται εύλογα από τον διαθέσιμο προϋπολογισμό, πιθανώς εν μέρει λόγω της σημαντικής επιρροής της παραμέτρου έκπτωσης όπως συζητείται στο Κεφάλαιο 4.2 και παρακάτω.

Σε αντίθεση, η παράμετρος λειτουργίας φθοράς ( $DF_T$ ) επηρεάζει σημαντικά τα κόστη συντήρησης, με υψηλότερους ρυθμούς φθοράς να οδηγούν σε αναλογικές αυξήσεις στις απαιτούμενες δαπάνες. Το προεξοφλητικό επιτόκιο ( $d$ ) μεταβάλλει την παρούσα αξία του κόστους συντήρησης αλλά δεν αλλάζει τις τεχνικά βέλτιστες λύσεις, υποδεικνύοντας οικονομική ευαισθησία χωρίς να μεταβάλλει τις αποφάσεις πολιτικής συντήρησης.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο υποβάθμισης ( $Y_T^{\max}$ ) προσδιορίστηκε ως η παράμετρος με τον ισχυρότερο αντίκτυπο στον χώρο των τεχνικών λύσεων. Τα αυστηρότερα όρια αυξάνουν τη συχνότητα και το κόστος συντήρησης, ενώ τα χαλαρότερα όρια επιτρέπουν μεγαλύτερη υποβάθμιση και μειώνουν τις δαπάνες. Τέλος, οι υψηλότερες απαιτήσεις αξιοπιστίας αυξάνουν σημαντικά το κόστος συντήρησης, καταδεικνύοντας την ισχυρή αντιστάθμιση μεταξύ της ποιότητας της επιδομής και των οικονομικών πόρων. Το

μέγιστο όριο υποβάθμισης μπορεί να θεωρηθεί ως η κύρια παράμετρος που ελέγχει τόσο το ελάχιστο κόστος συντήρησης όσο και την τεχνική σκοπιμότητα.

Παράλληλα με τα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 4.2, συνολικά τα επίπεδα αξιοπιστίας είχαν σημαντική επιρροή στην ευελιξία του μοντέλου, όπου τα υψηλότερα πρότυπα ασφαλείας απαιτούν σημαντικά περισσότερους πόρους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι πιο κρίσιμοι παράγοντες της στρατηγικής συντήρησης είναι οι τεχνικές παράμετροι που σχετίζονται με την κατάσταση της επιδομής, ιδιαίτερα ο ρυθμός υποβάθμισης και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο φθοράς. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν άμεσα τόσο τις εφικτές τεχνικές λύσεις όσο και το απαιτούμενο επίπεδο δαπανών συντήρησης. Αντίθετα, οι οικονομικές παράμετροι, όπως ο διαθέσιμος προϋπολογισμός και το προεξοφλητικό επιτόκιο, επηρεάζουν κυρίως την οικονομική αποτίμηση των στρατηγικών συντήρησης χωρίς να αλλοιώνουν ουσιαστικά τις βέλτιστες τεχνικές αποφάσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η σύγκριση μεταξύ των επιπέδων αξιοπιστίας υπογραμμίζει τη σημαντική αύξηση απαιτήσεων πόρων που σχετίζονται με τα αυστηρότερα πρότυπα ασφαλείας. Τα υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερες επενδύσεις συντήρησης, προκειμένου να διατηρηθούν χαμηλότερα επίπεδα υποβάθμισης στο δίκτυο.

Συνολικά, η ανάλυση υποδεικνύει ότι το μοντέλο MRPO παραμένει εύρωστο υπό ένα ευρύ φάσμα μεταβολών παραμέτρων, παρέχοντας παράλληλα πολύτιμες πληροφορίες για τους οικονομικούς και τεχνικούς συμβιβασμούς που διαμορφώνουν τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό συντήρησης των σιδηροδρόμων. Αυτά τα ευρήματα υποστηρίζουν την πρακτική εφαρμογή του μοντέλου ως πλαισίου υποστήριξης αποφάσεων που είναι ικανό να καθοδηγεί στρατηγικές συντήρησης ακόμη και υπό αβέβαιες ή μεταβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες. Γενικά, η επιλογή του επιπέδου αξιοπιστίας R δεν πρέπει να είναι ενιαία σε όλες τις χρήσεις αλλά να διαφοροποιείται βάσει της κρισιμότητας και της ταχύτητας της γραμμής ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη σπατάλη πόρων σε τμήματα χαμηλής κυκλοφορίας.

Τα συμπεράσματα ενισχύουν την υπεροχή της προληπτικής συντήρησης. Ο διαχειριστής πρέπει να εστιάσει στην παρακολούθηση του ρυθμού λειτουργίας φθοράς, καθώς μικρές μεταβολές στην ποιότητα της γραμμής μπορούν να προκαλέσουν απότομη απαίτηση για συντήρηση αν ξεπεραστούν τα όρια ασφαλείας που έχουν τεθεί στο σύστημα.

## 5. Επίλογος

### 5.1 Βασικά Συμπεράσματα

Η συντήρηση της σιδηροδρομικής επιδομής αναγνωρίζεται πλέον ως μια στρατηγική επένδυση για τη διασφάλιση λειτουργικότητας και μεγίστης ασφαλείας των σιδηροδρομικών δικτύων. Το πρόβλημα της συντήρησης μετασχηματίζεται από μία καθαρά τεχνική διαδικασία σε μοντέλο ολιστικής διαχείρισης, το οποίο ενσωματώνει τεχνικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Η παρούσα έρευνα αναδεικνύει την ανάγκη για μετάβαση από την εμπειρική στην αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων, με κύριο στόχο τη βελτιστοποίηση του κόστους και τη διαθεσιμότητα της γραμμής.

Το προτεινόμενο μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) αποτελεί ντετερμινιστικό ισοδύναμο ενός προγενέστερου στοχαστικού μοντέλου των Bressi et al. (2021). Σχεδιάστηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση κόστους και την ίδια στιγμή να αποτελεί ένα φιλικότερο εργαλείο για τον διαχειριστή/λήπτη αποφάσεων, διευκολύνοντας την ευρύτερη δυνατότητα υιοθέτησης και ενσωμάτωσης του σε πραγματικά συστήματα στρατηγικής διαχείρισης σιδηροδρομικών υποδομών, ειδικά σε συστήματα που δεν διαθέτουν ιστορικά σύνολα δεδομένων συντήρησης και επισκευής. Με χρήση της μεθόδου epsilon ( $\epsilon$ -constrained), το μοντέλο παράγει ένα σύνολο λύσεων Pareto επιτρέποντας στους διαχειριστές να αξιολογήσουν τους συμβιβασμούς μεταξύ οικονομικής δαπάνης για τις διάφορες παρεμβάσεις που απαιτούνται και της τεχνικής ποιότητας της γραμμής.

Τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου MRPO έδειξαν μια σαφή αντιστάθμιση (trade-off) μεταξύ κόστους συντήρησης και της κατάστασης της επιδομής, η οποία εκφράζεται μέσω της κάθετης ευθυγράμμισης (VA) του έρματος. Και για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας που εξετάστηκαν ( $R = 75\%$  και  $R = 85\%$ ), το μοντέλο ήταν ανέφικτο για πολύ αυστηρά όρια υποβάθμισης ( $\epsilon \in [0,4] \text{ mm}$ ), υποδεικνύοντας ότι η διατήρηση τόσο χαμηλών επιπέδων φθοράς είναι λειτουργικά μη ρεαλιστική εντός των δεδομένων περιορισμών του συστήματος. Εντός της εφικτής περιοχής, τα μέτωπα Pareto αποκαλύπτουν μια εκθετική μείωση του κόστους συντήρησης καθώς αυξάνεται το επιτρεπόμενο επίπεδο υποβάθμισης. Το υψηλότερο κόστος συντήρησης εμφανίζεται στα αυστηρά όρια φθοράς, όπου απαιτούνται συχνές παρεμβάσεις. Για παράδειγμα, η διατήρηση  $\epsilon = 5 \text{ mm}$  έχει ως αποτέλεσμα κόστος 18.928,39 €/km για  $R = 75\%$  και

58.260,69 €/km για  $R = 85\%$ , υπογραμμίζοντας το σημαντική προσαύξηση κόστους που σχετίζεται με υψηλότερες απαιτήσεις αξιοπιστίας.

Καθώς τα όρια υποβάθμισης χαλαρώνουν, το κόστος μειώνεται ραγδαία μέχρι να φτάσει σε σημείο σύγκλισης περίπου  $\varepsilon \geq 10$  mm. Πέρα από αυτό το σημείο, η περαιτέρω χαλάρωση των τεχνικών προτύπων δεν παράγει πρόσθετα οικονομικά οφέλη, καθώς ο οικονομικός στόχος κυριαρχεί στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Κατά συνέπεια, τα σύνολα βέλτιστων λύσεων Pareto εντοπίζονται εντός  $\varepsilon \in [5,9]$  για  $R = 75\%$  και  $\varepsilon \in [5,10]$  για  $R = 85\%$ . Μεταξύ αυτών των λύσεων, η τιμή  $\varepsilon = 9$  mm αναδεικνύεται ως ένας ισορροπημένος συμβιβασμός μεταξύ της κατάστασης της επιδομής και της οικονομικής αποδοτικότητας. Σε αυτό το επίπεδο, το μοντέλο MRPO απαιτεί μόνο μία παρέμβαση συμπίεσης για  $R = 75\%$  και δύο παρεμβάσεις συμπίεσης για  $R = 85\%$  σε ορίζοντα 20ετούς σχεδιασμού, καταδεικνύοντας την πρόσθετη προσπάθεια συντήρησης που απαιτείται για την επίτευξη υψηλότερης αξιοπιστίας.

Η σύγκριση με το στοχαστικό μοντέλο συντήρησης των Bressi et al. (2021) επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του MRPO, καθώς και οι δύο προσεγγίσεις παράγουν παρόμοιες εκθετικές σχέσεις Pareto μεταξύ κόστους και κατάστασης επιδομής. Ωστόσο, το μοντέλο MRPO επιτυγχάνει συγκρίσιμα πρότυπα συντήρησης με σημαντικά χαμηλότερα κόστη, κυρίως λόγω του ακριβούς πλαισίου βελτιστοποίησης. Η υπολογιστική αποδοτικότητα του MRPO και η αποτελεσματική κατανομή των διαθέσιμων πόρων, υπογραμμίζουν το πρακτικό πλεονέκτημα του MRPO ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων που μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε περιβάλλοντα με περιορισμένα ιστορικά δεδομένα.

Η ανάλυση ευαισθησίας ενισχύει περαιτέρω την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου, αποδεικνύοντας την ανθεκτικότητά του υπό μεταβαλλόμενες οικονομικές και τεχνικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καθορίζονται κυρίως από τεχνικές παραμέτρους, ιδιαίτερα τον ρυθμό υποβάθμισης της επιδομής και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο υποβάθμισης. Οι αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους επηρεάζουν σημαντικά το κόστος συντήρησης και το εύρος των εφικτών λύσεων. Αντίθετα, οι οικονομικές παράμετροι, όπως ο μέγιστος διαθέσιμος προϋπολογισμός και το προεξοφλητικό επιτόκιο, επηρεάζουν κυρίως την οικονομική αποτίμηση των στρατηγικών συντήρησης χωρίς να αλλοιώνουν τις βέλτιστες τεχνικές λύσεις. Η ανάλυση ενίσχυσε την εγκυρότητα της απλούστερης προσέγγισης του

προτεινόμενου μοντέλου, αποδεικνύοντας ότι παραμένει ανθεκτικό στις διακυμάνσεις των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων, παρέχοντας έτσι ένα σαφές πλαίσιο για μια στρατηγική προληπτικής συντήρησης.

Συνολικά, το μοντέλο MRPO παρέχει ένα διαφανές και υπολογιστικά αποδοτικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό συντήρησης των σιδηροδρόμων. Προσδιορίζοντας τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ποιότητας επιδομής και οικονομικών πόρων, το μοντέλο προσφέρει στους διαχειριστές υποδομών ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, ικανό να καθοδηγεί μακροπρόθεσμες στρατηγικές συντήρησης υπό μεταβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες και αβεβαιότητα.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Παρόλο που το μοντέλο MRPO που αναπτύχθηκε σε αυτήν τη μελέτη παρέχει ένα υπολογιστικά αποτελεσματικό και πρακτικό πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση της συντήρησης των σιδηροδρόμων, υπάρχουν αρκετοί τομείς που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση. Πρώτον, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ενσωματώσει αλγόριθμους πρόβλεψης για την καλύτερη καταγραφή της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την υποβάθμιση των υποδομών λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών, των φορτίων κυκλοφορίας και της μεταβλητότητας των υλικών. Ακολουθώντας τις τελευταίες εξελίξεις, μια προσέγγιση βαθιάς μάθησης (time-forecasting neural networks) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση της στοχαστικότητας, αντί των πιο παραδοσιακών μεθόδων των Bressi et al. (2021). Μια τέτοια επέκταση θα βελτιώνει τον ρεαλισμό του μοντέλου και θα επέτρεπε την αξιολόγηση των στρατηγικών συντήρησης υπό πιθανοτικές συνθήκες κινδύνου.

Δεύτερον, η τρέχουσα μελέτη λαμβάνει υπόψη μόνο τις παρεμβάσεις επιθεώρησης και συμπύκνωσης. Η επέκταση του συνόλου των παρεμβάσεων συντήρησης ώστε να περιλαμβάνει πρόσθετες δραστηριότητες όπως καθαρισμό έρματος, λείανση σιδηροτροχιών, ανανέωση έρματος ή αντικατάσταση των σιδηροτροχιών, θα επέτρεπε στο μοντέλο να αναπαριστά πιο ολοκληρωμένα σενάρια σχεδιασμού συντήρησης. Μια ακόμη σημαντική κατεύθυνση, αφορά την ενσωμάτωση των λειτουργικών περιορισμών. Ο σχεδιασμός συντήρησης συνδέεται στενά με τον προγραμματισμό των τρένων, τους χρόνους κατοχής των τροχιών και τις διακοπές λειτουργίας. Επομένως, η ενσωμάτωση

αυτών των λειτουργικών παραμέτρων στο μοντέλο θα μπορούσε να βελτιώσει την πρακτική εφαρμογή του. Παρόλο που το μοντέλο επιλύθηκε κυρίως με βάση οικονομικές και τεχνικές παραμέτρους, η διερεύνηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτελεί μια επιπλέον σημαντική προοπτική. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε επιπλέον να επικεντρωθεί στον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην υποβάθμιση των υποδομών.

Ένα άλλο ζήτημα προς διερεύνηση, είναι το γεγονός ότι παρόλο που το μοντέλο εστιάζει στη βελτιστοποίηση ενός τμήματος γραμμής, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν τη συντήρηση σε επίπεδο ολόκληρου του δικτύου και τον αντίκτυπο ενός μεγαλύτερου όγκου δεδομένων στο μοντέλο, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη διασυνδεσιμότητα των κόμβων και τις επιπτώσεις των καθυστερήσεων από το ένα τμήμα στο άλλο. Η μετάβαση προς μια προσέγγιση σχεδιασμού σε επίπεδο ενός ολόκληρου δικτύου θα επέτρεπε στους διαχειριστές υποδομών να κατανέμουν πόρους συντήρησης σε πολλαπλά τμήματα της σιδηροτροχιάς, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους περιορισμούς προϋπολογισμού και τις ποικίλες συνθήκες της επιδομής.

Συνδυαστικά όλες αυτές οι επεκτάσεις, θα μπορούσαν να ενισχύσουν περαιτέρω το μοντέλο MRPO ως ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση σιδηροδρομικών υποδομών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- 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., & Teixeira, P. F. (2011). Biobjective optimization model for maintenance and renewal decisions related to rail track geometry. *Transportation research record*, 2261(1), 163-170. <https://doi.org/10.3141/2261-19>
- Andrade, A. R., & Teixeira, P. F. (2013). Hierarchical Bayesian modelling of rail track geometry degradation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit*, 227(4), 364-375.
- Bressi, S., Santos, J., & Losa, M. (2021). Optimization of maintenance strategies for railway track-bed considering probabilistic degradation models and different reliability levels. *Reliability engineering & system safety*, 207, 107359. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107359>
- Budai, G., & Dekker, R. (2004). A dynamic approach for planning preventive railway maintenance activities. *WIT Transactions on The Built Environment*, 74.
- Budai, G., Huisman, D., & Dekker, R. (2006). Scheduling preventive railway maintenance activities. *Journal of the Operational Research Society*, 57(9), 1035-1044. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.11.009>
- CER & Rail freight forward (2020). How rail freight achieves its goals. [https://www.railfreightforward.eu/sites/default/files/downloadcenter/rff\\_cer\\_position\\_paper.pdf](https://www.railfreightforward.eu/sites/default/files/downloadcenter/rff_cer_position_paper.pdf)
- Cheung, B. S., Chow, K. P., Hui, L. C., & Yong, A. M. (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)
- Chinowsky, P., Helman, J., Gulati, S., Neumann, J., & Martinich, J. (2019). Impacts of climate change on operation of the US rail network. *Transport Policy*, 75, 183-191.

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#/](https://www.mckinsey.com/industries/public-sector/our_insights/using-analytics-to-get-european-rail-maintenance-on-track#/)

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>

Dantzig, G. B. (1965). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press.

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>

Eurostat 2020, Rail passenger transport for main undertakings, EU, 2015-2023 [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Rail\\_passenger\\_transport\\_for\\_main\\_undertakings\\_EU\\_2015-2023\\_\(billion\\_passenger-kilometres\).png#filelinks](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Rail_passenger_transport_for_main_undertakings_EU_2015-2023_(billion_passenger-kilometres).png#filelinks)

Eurostat. (2025). *Railway passenger transport statistics - 2024 annual data*. European Commission. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail\\_pa\\_typepas/](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_pa_typepas/)

Fokkert, J. V. Z. D., den Hertog, D., Berg, F. V. D., & 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>

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>

Giannakos, K. (2016). Deflection of a railway reinforced concrete slab track: Comparing the theoretical results with experimental measurements. *Engineering Structures*, 122, 296-309.

Gkiotsalitis, Konstantinos. 2022. *Public transport optimization*. Springer.

- Gkonou, N., Nisyrios, E., & Gkiotsalitis, K. (2023). Combined optimization of maintenance works and crews in railway networks. *Applied Sciences*, 13(18), 10503. <https://doi.org/10.3390/app131810503>
- 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.
- Higgins, A. (1998). Scheduling of railway track maintenance activities and crews. *Journal of the Operational Research Society*, 49(10), 1026-1033.
- Indraratna, B., & Salim, W. (2005). *Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective*. CRC Press.
- Kienzler C., Lotz, C., & Stern, S. (2020). Using analytics to get European rail maintenance on track. *McKinsey & Company: New York, NY, USA*.
- Lake, M., Ferreira, L., & Murray, M. (2000). Minimising costs in scheduling railway track maintenance. *WIT Transactions on The Built Environment*, 50.
- 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>
- Lidén, T., Kalinowski, T., & Waterer, H. (2018). Resource considerations for integrated planning of railway traffic and maintenance windows. *Journal of rail transport planning & management*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.02.001>
- Lundqvist, A., & Dahlberg, T. (2005). Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 219(2), 67-77.
- Mohammadzadeh, S., Heydari, H., Karimi, M., & Mosleh, A. (2024). Correlation analysis of railway track alignment and ballast stiffness: Comparing frequency-based and machine learning algorithms. *Algorithms*, 17(8), 372.
- 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.

Podofillini, L., Zio, E., & Vatn, J. (2006). Risk-informed optimisation of railway tracks inspection and maintenance procedures. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(1), 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.11.009>

ReportLinker 2023, Global Spending on Rail Infrastructure Maintenance by Country in 2023, <https://www.reportlinker.com/dataset/8048aea59320b1fcc8148a095a6945e051552f4d>

Sadeghi, J., Motieyan-Najar, M. E., Zakeri, J. A., Yousefi, B., & Mollazadeh, M. (2018). Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 151, 263-273.

Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford.

Sharma, S., Cui, Y., He, Q., Mohammadi, R., & Li, Z. (2018). Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 90, 34-58. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.019>

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>

Sun, J., Zhang, R., & Qin, S. (2017, July). Turnout maintenance scheduling problem considering reliabilities: Modeling and optimization. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 10143-10148). IEEE.

Καρλαύτης, Μ. Γ., & Λαγαρός, Ν. Δ. (2010). *Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Λυμπέρης, Κ. (2011). *Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

## Παράρτημα Α

Πίνακας Α-1: Μεταβλητές απόφασης  $Y_{t,75}$  and  $X_{mt}$  για  $t \in T$ ,  $m \in M$  και επίπεδο αξιοπιστίας  $r=75\%$ .

$t \in T$	$Y_{t,75}$	$X_{1t}$ : Inspection	$X_{2t}$ : Tamping
1	4.4	1	0
2	4.61	1	0
3	4.82	1	0
4	5.03	1	0
5	5.24	1	0
6	5.45	1	0
7	5.66	1	0
8	5.87	1	0
9	6.08	1	0
10	6.29	1	0
11	6.5	1	0
12	6.71	1	0
13	6.92	1	0
14	7.13	1	0
15	7.34	1	0
16	7.55	1	0
17	7.76	1	0
18	7.97	1	0
19	8.18	1	0
20	8.39	1	0
21	8.6	1	0
22	8.81	1	0
23	9.02	1	0
24	9.23	1	0
25	9.44	1	0
26	9.65	1	0

27	9.86	1	0
28	10.07	1	0
29	10.28	1	0
30	10.49	1	0
31	10.7	1	0
32	10.91	1	0
33	11.12	1	0
34	11.33	1	0
35	11.54	1	0
36	11.75	1	0
37	11.96	1	0
38	12.17	1	0
39	12.38	1	0
40	12.59	1	0
41	12.8	1	0
42	13.01	1	0
43	13.22	1	0
44	13.43	1	0
45	13.64	1	0
46	13.85	1	0
47	14.06	1	0
48	14.27	1	0
49	14.48	1	0
50	4.19	0	1
51	4.4	1	0
52	4.61	1	0
53	4.82	1	0
54	5.03	1	0
55	5.24	1	0
56	5.45	1	0
57	5.66	1	0
58	5.87	1	0
59	6.08	1	0

60	6.29	1	0
61	6.5	1	0
62	6.71	1	0
63	6.92	1	0
64	7.13	1	0
65	7.34	1	0
66	7.55	1	0
67	7.76	1	0
68	7.97	1	0
69	8.18	1	0
70	8.39	1	0
71	8.6	1	0
72	8.81	1	0
73	9.02	1	0
74	9.23	1	0
75	9.44	1	0
76	9.65	1	0
77	9.86	1	0
78	10.07	1	0
79	10.28	1	0
80	10.49	1	0

Πίνακας A-1: Μεταβλητές απόφασης  $Y_{t85}$  and  $X_{mt}$  για  $t \in T$ ,  $m \in M$  και επίπεδο αξιοπιστίας  $r=85\%$ .

<b>t</b>	<b><math>Y_{t,85}</math></b>	<b><math>X_{1t}</math>:</b> <b>Inspection</b>	<b><math>X_{2t}</math>:</b> <b>Tamping</b>
1	5.01	1	0

2	5.23	1	0
3	5.45	1	0
4	5.67	1	0
5	5.89	1	0
6	6.11	1	0
7	6.33	1	0
8	6.55	1	0
9	6.77	1	0
10	6.99	1	0
11	7.21	1	0
12	7.43	1	0
13	7.65	1	0
14	7.87	1	0
15	8.09	1	0
16	8.31	1	0
17	8.53	1	0
18	8.75	1	0
19	8.97	1	0
20	9.19	1	0
21	9.41	1	0
22	9.63	1	0
23	9.85	1	0
24	10.07	1	0
25	10.29	1	0
26	10.51	1	0
27	10.73	1	0
28	10.95	1	0
29	11.17	1	0
30	11.39	1	0
31	11.61	1	0
32	11.83	1	0
33	12.05	1	0
34	12.27	1	0

35	12.49	1	0
36	12.71	1	0
37	12.93	1	0
38	13.15	1	0
39	13.37	1	0
40	13.59	1	0
41	13.81	1	0
42	14.03	1	0
43	14.25	1	0
44	14.47	1	0
45	4.79	0	1
46	5.01	1	0
47	5.23	1	0
48	5.45	1	0
49	5.67	1	0
50	5.89	1	0
51	6.11	1	0
52	6.33	1	0
53	6.55	1	0
54	6.77	1	0
55	6.99	1	0
56	7.21	1	0
57	7.43	1	0
58	7.65	1	0
59	7.87	1	0
60	8.09	1	0
61	8.31	1	0
62	8.53	1	0
63	8.75	1	0
64	8.97	1	0
65	9.19	1	0
66	9.41	1	0
67	9.63	1	0

68	9.85	1	0
69	10.07	1	0
70	10.29	1	0
71	10.51	1	0
72	10.73	1	0
73	10.95	1	0
74	11.17	1	0
75	11.39	1	0
76	11.61	1	0
77	11.83	1	0
78	4.79	0	1
79	5.01	1	0
80	5.23	1	0