



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών  
Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

#### ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ 2 & 3 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ



Αργυροπούλου Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Κεραπτσόγλου Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017



## *Ευχαριστίες*

Ολοκληρώνοντας τη Διπλωματική μου Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κ. Κεπαπτσόγλου, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την υποστήριξή του, καθώς και για την εκπληκτική συνεργασία που είχαμε σε όλα τα στάδιά της. Επιπλέον, οφείλω να τον ευχαριστήσω για τη σωστή καθοδήγηση αλλά και για τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για τις παρατηρήσεις της, την πολύτιμη συμβολή της και το χρόνο που μου αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ, ακόμα, τον κ. Νικόλαο Κωνσταντόπουλο, τομεάρχη του τμήματος συντήρησης επιδομής και έργων στη ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε. αλλά και τον εργοδηγό συντήρησης επιδομής κ. Παύλο Παππά για την αρωγή τους στην παροχή των στοιχείων που ήταν απαραίτητα για τη διπλωματική μου και στην κατανόηση της συντήρησης σιδηροδρομικών υποδομών σε βαθύτερο και πιο πρακτικό επίπεδο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο το βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης του μετρό της Αθήνας. Η διαμόρφωση του μοντέλου στηρίχθηκε στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης των επιβατών, η οποία προκαλείται, αφενός από τη καθυστέρηση της μετακίνησής τους εξαιτίας περιορισμών ταχύτητας λόγω προβλημάτων συντήρησης, αφετέρου από τα φορτία διέλευσης συρμών που συσσωρεύονται οδηγώντας σε προβλήματα φθοράς που τους προκαλούν όχληση. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται ο βέλτιστος προγραμματισμός των ενεργειών συντήρησης που είναι απαραίτητες μία δεδομένη χρονική στιγμή στο δίκτυο (γραμμές μετρό 2 & 3). Για τον λόγο αυτό αναπτύσσεται μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που βασίζεται στο πρόβλημα του ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0-1» με εφαρμογή στον επιστημονικό κλάδο της επιχειρησιακής έρευνας και βελτιστοποίησης για μηχανικούς. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται και έγιναν οι κατάλληλες επιλογές και παραδοχές, έτσι ώστε να προγραμματιστούν μια σειρά από εργασίες για να υλοποιηθούν στη διάρκεια ενός μηνός στα τμήματα των γραμμών 2 & 3 του μετρό, δοσμένων περιορισμών, όπως τον διαθέσιμο προϋπολογισμό, τις εργατοώρες και τη συμπληρωματικότητα ορισμένων εργασιών. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζοντας διαφορετικά σενάρια και καταγράφοντας τα αποτελέσματά τους κατά τον τελικό προγραμματισμό. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά έδειξαν ότι το μοντέλο προγραμματίζει τις εργασίες συντήρησης δίνοντας χρονική προτεραιότητα στην επέμβαση σε τμήματα μεγάλης επιβατικής κίνησης που είναι περισσότερο καταπονημένα από τα φορτία ή/και με χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης.

**Λέξεις-κλειδιά:** γραμμές μετρό, προγραμματισμός συντήρησης, γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός, βελτιστοποίηση, δυαδικό πρόβλημα

## ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the optimal scheduling of the Athens metro maintenance activities. The formulation of the model was based on minimizing the discomfort on passengers, caused by the delay of their time travel due to speed limitations because of maintenance problems, and by the accumulated train passage loads leading to problems of wear and tear that cause passengers' discomfort. More specifically, it is attempted to optimally program the actions needed at a given time in the network (Metro lines 2 & 3). For this reason, a mathematical optimization model based on the "0-1" integral programming problem is being developed with application to the field of operations research and optimization for engineers. For the optimization needs, the necessary data were collected and the appropriate choices and assumptions were made to schedule a series of activities to be carried out over a month on the sections of the Metro lines 2 & 3, given limitations such as the available budget, working hours and the complementarity of certain tasks. Finally, a sensitivity analysis was carried out by applying different scenarios and their results in the final programming were recorded. The conclusions drawn from these showed that the model plans maintenance work by giving scheduling priority to parts with high passenger volumes that are more stressed by loads or/and with lower travel speed.

**Keywords:** metro lines, maintenance scheduling, integer linear programming, optimization, binary problem

## ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διατυπώνεται για πρώτη φορά μοντέλο γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0,1» με σκοπό τον προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης των γραμμών 2 & 3 του μετρό της Αθήνας με στοχαστικό τρόπο, ελαχιστοποιώντας την όχληση των επιβατών, η οποία θεωρήθηκε ότι προκαλείται από την καθυστέρηση λόγω προβλημάτων συντήρησης και την αυξημένη φθορά των γραμμών από τις διελεύσεις φορτίων. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από δύο όρους που κανονικοποιούνται και σταθμίζονται με την επιβατική κίνηση του κάθε τμήματος γραμμής. Κατά τη διατύπωση του μοντέλου λήφθηκαν υπόψη περιορισμοί, οι οποίοι αφορούσαν τα κόστη των εργασιών συγκριτικά με το διαθέσιμο προϋπολογισμό, τον αριθμό των εργασιών που επιτρέπεται να πραγματοποιηθούν σε κάθε τμήμα μία μέρα, καθώς και τις εργατοώρες για την υλοποίησή τους. Επιλέχθηκαν συγκεκριμένα 8 είδη εργασιών συντήρησης για την επισκευή των προβλημάτων σε 35 τμήματα μετρό στις 30 μέρες του μήνα. Εξασφαλίστηκε ότι όλες οι εργασίες, που απαιτούνται, θα πραγματοποιούνται όλες, ακριβώς μέσα στο μήνα που ήταν ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού, αλλά και ότι ορισμένες συμπληρωματικές εργασίες πρέπει υποχρεωτικά να υλοποιούνται σε ζεύγη. Μετά τη διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου δόθηκαν οι αναγκαίες εργασίες προς υλοποίηση, σε μορφή πίνακα, οι οποίες αφορούν τα είδη των εργασιών και τα τμήματα των γραμμών. Με τη βοήθεια του OpenSolver σε περιβάλλον Excel επιλύθηκε το μοντέλο και προγραμματίστηκε η υλοποίηση των εργασιών στα τμήματα συγκεκριμένες μέρες του μήνα επιτυγχάνοντας την ελάχιστη τιμή συνολικής επιβάρυνσης των επιβατών και λαμβάνοντας υπόψη όλους τους επιβαλλόμενους περιορισμούς. Για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, καθώς και για την επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου που διαμορφώθηκε, επιλύθηκαν σενάρια αλλαγής ζήτησης, συντελεστών αντικειμενικής συνάρτησης, ταχύτητας διάνυσης τμημάτων και διέλευσης συνολικού ημερήσιου φορτίου και καταγράφηκαν τα αποτελέσματά τους. Δείχθηκε ότι όσο περισσότερη βαρύτητα δίνεται στον όρο των φορτίων διέλευσης με την ταυτόχρονη μείωση αυτής στον όρο της καθυστέρησης, τόσο πιο άμεσα επισκευάζονται οι αστοχίες των τμημάτων με αυξημένη καταπόνηση των γραμμών. Αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής του όρου της καθυστέρησης τόσο πιο επείγουσα είναι η ανάγκη για επιδιόρθωση των βλαβών τμημάτων με πολύ χαμηλή ταχύτητα διάνυσης. Στην περίπτωση ίσης βαρύτητας στους δύο όρους, διαπιστώθηκε ότι πιο γρήγορα επισκευάστηκαν τα τμήματα με τη μεγάλη καθυστέρηση ή/και φθορά. Η αύξηση της καθυστέρησης και της φθοράς εφαρμόστηκαν, αντιστοίχως, για τη γραμμή 2 & 3 για εποπτικότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.1.1. Ιστορία Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στην Αθήνα.....	1
1.1.2. Συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου.....	6
1.1.3. Αρχές Συντήρησης στο μετρό.....	7
1.2. Στόχος της παρούσας εργασίας.....	13
1.3. Μεθοδολογία.....	13
1.4. Δομή.....	15
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	16
2.1. Γενικά.....	16
2.2. Εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	16
2.2.1. Προγραμματισμός έργου και εργασιών ανανέωσης.....	17
2.2.2. Προγραμματισμός των πόρων και του χρονοδιαγράμματος των εργασιών.....	19
2.2.3. Προγραμματισμός με βάση μοντέλα φθοράς.....	24
2.3. Σύνοψη βιβλιογραφίας.....	34
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	35
3.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	35
3.1.1. Θεωρία γραμμικών μοντέλων προγραμματισμού.....	35
3.1.2. Ακέραιος Προγραμματισμός.....	37
3.1.3. Δυϊκό Πρόβλημα.....	38
3.2. Ανάπτυξη Προτύπου.....	39
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ.....	42
4.1. Στόχος.....	42
4.2. Δεδομένα.....	42
4.3. Διαμόρφωση μοντέλου.....	45
4.3.1. Αντικειμενική συνάρτηση.....	47
4.3.2. Περιορισμοί.....	48
4.4. Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης.....	50
4.5. Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel....	54
4.6. Επίλυση σεναρίων και αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης.....	55
4.6.1. Μεταβολή συντελεστών βαρύτητας των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης.....	56
4.6.2. Αύξηση της ζήτησης.....	67
4.6.3. Αύξηση της καθυστέρησης της γραμμής 2.....	69
4.6.4. Αύξηση των ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3.....	73
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	79
5.1. Ανασκόπηση του προβλήματος.....	79
5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	84

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.1.:</b> Κατασκευή πρώτης γραμμής μετρό, Αθήνα.....	2
<b>Εικόνα 1.2.:</b> Γενικές αρχές συντήρησης σιδηροδρομικής.....	8
<b>Εικόνα 1.3.:</b> Διάκριση ίδιας εργασίας σε δύο διαφορετικούς τύπους συντήρησης ανάλογα με το ερέθισμα.....	9
<b>Εικόνα 1.4.:</b> Διάκριση ίδιας εργασίας σε τρεις διαφορετικούς τύπους συντήρησης ανάλογα με το ερέθισμα.....	9
<b>Εικόνα 1.5.:</b> Ενδεικτικός πίνακας ροής εργασιών συντήρησης σε παράδειγμα σιδηροδρομικού δικτύου τραμ.....	12
<b>Εικόνα 2.1.:</b> Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης των Nader Azad, Elkafi Hassini και Manish Verma (2016).....	23
<b>Εικόνα 2.2.:</b> Μοντέλα τροχιάς σύμφωνα με τους Ferreira και Murray (1997).....	24
<b>Εικόνα 2.3.:</b> Απαραίτητες παράμετροι δημιουργίας βέλτιστων στρατηγικών συντήρησης (L. Ferreira and M. H. Murray-1997).....	25
<b>Εικόνα 4.1.:</b> Προσθήκη Open Solver στο Microsoft Excel.....	54
<b>Εικόνα 4.2.:</b> Μοντέλο Βελτιστοποίησης στο Open Solver.....	55
<b>Εικόνα Π1.:</b> Χάρτης εγκαταστάσεων τμήματος Ανθούπολη-Συγγρού/Φιξ.....	90
<b>Εικόνα Π2.:</b> Χάρτης εγκαταστάσεων τμήματος Συγγρού/Φιξ-Ελληνικό.....	91
<b>Εικόνα Π3.:</b> Χάρτης εγκαταστάσεων τμήματος Αγ. Μαρίνα-Μέγαρο Μουσικής.....	92
<b>Εικόνα Π4.:</b> Χάρτης εγκαταστάσεων τμήματος Μ. Μουσικής-Δ. Πλακεντίας.....	93
<b>Εικόνα Π5:</b> Συνάρτηση ταχύτητας-χρόνου μεταξύ διαδοχικών σταθμών μετρό.....	96
<b>Εικόνα Π6.:</b> Ισχύοντες περιορισμοί λειτουργίας την 31/3/2017.....	100



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1.:</b> Ιστορική αναδρομή για τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς της Αθήνας.....	3
<b>Πίνακας 2.1.:</b> Κατηγορίες προβλημάτων συντήρησης κατά Lidén (2015).....	16
<b>Πίνακας 2.2.:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των βιβλιογραφικών αναφορών κατά αύξουσα χρονολογική σειρά.....	31
<b>Πίνακας 4.1.:</b> Τμήματα γραμμών μετρό 2 & 3.....	46
<b>Πίνακας 4.2.:</b> Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς και όρου καθυστέρησης συναρτήσει των συντελεστών του όρου φθοράς.....	56
<b>Πίνακας 4.3.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.1/0.9).....	58
<b>Πίνακας 4.4.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.2/0.8).....	59
<b>Πίνακας 4.5.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.3/0.7).....	60
<b>Πίνακας 4.6.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.4/0.6).....	61
<b>Πίνακας 4.7.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.5/0.5).....	62
<b>Πίνακας 4.8.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.6/0.4).....	63
<b>Πίνακας 4.9.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.7/0.3).....	64
<b>Πίνακας 4.10.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.8/0.2).....	65
<b>Πίνακας 4.11.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα... (συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.9/0.1).....	66
<b>Πίνακας 4.12.:</b> Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει της ζήτησης.....	67
<b>Πίνακας 4.13.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 68 διπλασιασμός ζήτησης του βασικού σεναρίου.....	68
<b>Πίνακας 4.14.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 70 υποδιπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2.....	70
<b>Πίνακας 4.15.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 71 υποτριπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2.....	71
<b>Πίνακας 4.16.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 72 υποτετραπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2.....	72
<b>Πίνακας 4.17.:</b> Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει της..... καθυστέρησης στα τμήματα της γραμμής 2.....	73
<b>Πίνακας 4.18.:</b> Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει του συνολικού ημερήσιου φορτίου για τη γραμμή 3.....	74
<b>Πίνακας 4.19.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 75 διπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3.....	75
<b>Πίνακας 4.20.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 76 τριπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3.....	76
<b>Πίνακας 4.21.:</b> Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα: 77 τετραπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3.....	77
<b>Πίνακας Π1:</b> Εργασίες συντήρησης στο μετρό της Αθήνας (πηγή:ΣΤΑ.ΣΥ.).....	84

<b>Πίνακας Π2.:</b> Τμήμα πίνακα υπαρχόντων αστοχιών και προτεινόμενες εργασίες επισκευής τους.....	88
<b>Πίνακας Π3.:</b> Κωδικοί και τοποθεσία εγκαταστάσεων.....	89
<b>Πίνακας Π4.:</b> Χρεώσεις προσωπικού και εξοπλισμού συντήρησης .....	94
<b>Πίνακας Π5.:</b> Φορτία επιβάρυνσης των τμημάτων γραμμής έως την ημέρα γενικής επιθεώρησης .....	95
<b>Πίνακας Π6.:</b> Μετρό γραμμή 2: Χρόνοι διέλευσης-ταχύτητες-χρόνοι αναμονής .....	97
<b>Πίνακας Π7.:</b> Μετρό γραμμή 3: Χρόνοι διέλευσης-ταχύτητες-χρόνοι αναμονής.....	97
<b>Πίνακας Π8.:</b> Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό .....	98
<b>Πίνακας Π9:</b> Χρόνος και μέση ωριαία ταχύτητα διάλυσης των τμημάτων μετά την επιβολή των περιορισμών για τη γραμμή 2 (πάνω) και για τη γραμμή 3 (κάτω) στο βασικό σενάριο.....	99

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<b>Διάγραμμα 1.1:</b> Στάδια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.....	14
<b>Διάγραμμα 4.1.:</b> Χρόνοι διάνυσης τμημάτων γραμμής 2.....	42
<b>Διάγραμμα 4.2.:</b> Χρόνοι διάνυσης τμημάτων γραμμής 3.....	43
<b>Διάγραμμα 4.3.:</b> Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό της γραμμής 2.....	43
<b>Διάγραμμα 4.4.:</b> Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό της γραμμής 3.....	44
<b>Διάγραμμα 4.5.:</b> Φορτία διέλευσης (σε τόνους) τμημάτων γραμμής από την αρχή λειτουργίας έως 07/04/2017.....	44
<b>Διάγραμμα 4.6.:</b> Διάγραμμα ροής αναπτυσσόμενου μοντέλου.....	53
<b>Διάγραμμα 4.7.:</b> Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει των συντελεστών του όρου φθοράς.....	57
<b>Διάγραμμα 4.8.:</b> Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει της ζήτησης.....	67
<b>Διάγραμμα 4.9.:</b> Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει της καθυστέρησης για τα τμήματα της γραμμής 2.....	73
<b>Διάγραμμα 4.10.:</b> Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει των φορτίων/ημέρα για τη γραμμή 3.....	74

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενική Ανασκόπηση

#### 1.1.1. Ιστορία Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στην Αθήνα

Στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου το δίκτυο συγκοινωνιών της Αθήνας, όπως και αυτό των περισσότερων Ευρωπαϊκών πόλεων, ήταν ολοκληρωτικά κατεστραμμένο. Στο κέντρο της Αθήνας υπήρχαν τα υπολείμματα ενός απαρχαιωμένου συστήματος τραμ, το οποίο χρειαζόταν επιδιόρθωση ή αντικατάσταση. Η μοναδική γραμμή Μετρό ξεκινούσε από το λιμάνι του Πειραιά και συνέχιζε βόρεια, μέσω της Πλατείας Ομονοίας, – την καρδιά του εμπορικού κέντρου της Αθήνας – μέχρι την πλατεία Αττικής. Πριν τον πόλεμο, το Μετρό συνδεόταν στην πλατεία Αττικής με έναν ατμοκίνητο σιδηρόδρομο και έφθανε μέχρι τα βόρεια προάστια, την Κηφισιά. Αυτό που απέμεινε από τη γραμμή ήταν ένα εγκαταλελειμμένο μονοπάτι. Τα λεωφορεία και τα ταξί που κυκλοφορούσαν την περίοδο πριν τον πόλεμο ήταν σχεδόν ανύπαρκτα, καθώς τα περισσότερα οχήματα ή είχαν επιταχθεί από τις δυνάμεις κατοχής ή είχαν καταστραφεί. Έτσι το περπάτημα ήταν ο πιο διαδεδομένος τρόπος μετακίνησης.

Άρχισαν σταδιακά να λειτουργούν ιδιωτικά λεωφορεία, όμως καθώς άρχισε ο κόσμος να συρρέει προς την Αθήνα, αναζητώντας περισσότερες ευκαιρίες εργασίας από αυτές που παρουσιάζονταν στην επαρχία, η ζήτηση για συγκοινωνίες αυξήθηκε κατακόρυφα. Έτσι άρχισαν και οι τριβές μεταξύ των ιδιοκτητών λεωφορείων, γιατί κάθε ιδιοκτήτης ήθελε να κυκλοφορεί το λεωφορείο του στις πιο επικερδείς διαδρομές με τη μεγαλύτερη ζήτηση και ειδικότερα σ' αυτές που η τοπολογία εξασφάλιζε τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση καυσίμων και τη μικρότερη φθορά του οχήματος, ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτό τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης.

Προβλήματα που συνδέονταν με την ανεξέλεγκτη ιδιωτική πρωτοβουλία οδήγησαν στην ίδρυση των «ΚΤΕΛ», του φορέα ο οποίος ήταν υπεύθυνος για τη διαχείριση και το συντονισμό των λεωφορείων. Ο φορέας των ΚΤΕΛ, αν και κάπως δυσκίνητος, λειτούργησε καλά και οι υπηρεσίες που προσέφερε στο θέμα των συγκοινωνιών στις δεκαετίες του 1950 και 1960 ήταν αρκετά ικανοποιητικές. Το 1965 κορυφώθηκε η χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών στην Αθήνα, ενώ σημειώθηκε ρεκόρ επιβατικής κίνησης (973 εκατομμύρια επιβάτες χρησιμοποιήσαν όλα τα μέσα συγκοινωνίας).

Κατά την περίοδο αυτή σημειώθηκαν και άλλες σημαντικές αλλαγές στο δίκτυο των αστικών συγκοινωνιών. Τα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία πρωτοεμφανίστηκαν στον Πειραιά το 1949 και στην Αθήνα το 1953. Μέχρι το 1961 όλες οι τοπικές γραμμές τραμ στην Αθήνα και τον Πειραιά αντικαταστάθηκαν από ηλεκτροκίνητα ή πετρελαιοκίνητα λεωφορεία.

Τα τραμ των προαστίων, και ειδικότερα αυτά που συνέδεαν τον Πειραιά με το Πέραμα εξακολούθησαν τη λειτουργία τους μέχρι το 1977, οπότε αντικαταστάθηκαν και αυτά από πετρελαιοκίνητα λεωφορεία.

Στο μεταξύ έγινε ένα ξεκίνημα για την ανάπτυξη ενός συστήματος Μετρό στην ευρύτερη Περιφέρεια Αθηνών. Η υφιστάμενη γραμμή που συνέδεε τον Πειραιά με την Αθήνα είχε τις ρίζες της στον πρώτο ατμοκίνητο σιδηρόδρομο της Ελλάδος, ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία το 1869. Η γραμμή αυτή επεκτάθηκε το 1894 από το Θησείο μέσα από το Μοναστηράκι προς την Ομόνοια, ηλεκτροδοτήθηκε και το 1904 μετατράπηκε σε έναν από τους πρώτους σιδηρόδρομους Μετρό της Ευρώπης. Το 1926 η γραμμή επεκτάθηκε από την Ομόνοια μέσω Βικτώριας προς την Πλατεία Αττικής. Τρεις δεκαετίες αργότερα το Μετρό επεκτάθηκε, μέσω μιας εγκαταλελειμμένης γραμμής ατμοκίνητου σιδηρόδρομου πλάτους ενός μέτρου, φθάνοντας το 1956 στη Νέα Ιωνία και το 1957 στη μέχρι σήμερα βορειότερη αφετηρία του, στο Σταθμό της Κηφισιάς. Αν και εξαγγέλθηκαν μεγαλεπήβολα σχέδια για την προσθήκη και άλλων γραμμών Μετρό, δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα απαραίτητα κεφάλαια για την κατασκευή τους.



*Εικόνα 1.1.: Κατασκευή πρώτης γραμμής μετρό, Αθήνα (Πηγή: [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))*

Παρόλο που ο πληθυσμός της ευρύτερης Περιφέρειας Αθηνών αυξανόταν με γοργό ρυθμό (3,5% ετησίως την περίοδο 1961-1971 και 1,75% την περίοδο 1971-1981), ο σημαντικά υψηλότερος ρυθμός αύξησης των αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης αποτέλεσε το βασικότερο ανασταλτικό παράγοντα στη χρήση των δημοσίων συγκοινωνιών: η ετήσια επιβατική κίνηση έπεσε από την τιμή ρεκόρ των 973 εκατομμυρίων επιβατών το 1965 σε 510 εκατομμύρια το 1983. Η συνεπακόλουθη απώλεια εσόδων καθώς και οι καλπάζουσες λειτουργικές δαπάνες κατέστησαν τις αστικές συγκοινωνίες οικονομικά ασύμφορες.

Το κράτος αναγνωρίζοντας τη σημασία των δημοσίων μέσων μεταφοράς στην ευημερία του κοινωνικού συνόλου άρχισε να συνδράμει στα έσοδα των λεωφορειούχων με επιδοτήσεις, αντισταθμίζοντας έτσι τις ζημιές που υφίσταντο. Η κυβέρνηση, διαπιστώνοντας με ανησυχία την υποβάθμιση του επιπέδου και της ποιότητας των παρεχόμενων από τις αστικές συγκοινωνίες υπηρεσιών κατέβαλε προσπάθειες για την αναδιοργάνωσή τους. Έτσι, στη δεκαετία του 1970, μετά από συστηματικές μελέτες και διεξοδικές συζητήσεις, συντελέστηκαν οι εξής βασικές αλλαγές στην αναδιοργάνωση της δομής των συγκοινωνιών:

- Η ιδιωτική εταιρεία Ηλεκτροκίνητων Μεταφορών, η οποία ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία και εκμετάλλευση των τρόλλεϋ στην Αθήνα και τον Πειραιά, διαλύθηκε το 1971 και αντικαταστάθηκε από την κρατική εταιρεία ΗΛΠΑΠ (Ηλεκτροκίνητα Λεωφορεία Πειραιώς-Αθηνών και Προαστίων).
- Η ιδιωτική εταιρεία των Ελληνικών Ηλεκτροκίνητων Σιδηροδρόμων, η οποία ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία και εκμετάλλευση του Μετρό και της γραμμής τραμ Πειραιάς – Πέραμα, διαλύθηκε το 1976 και αντικαταστάθηκε από την κρατική εταιρεία ΗΣΑΠ (Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι Αθηνών-Πειραιώς).
- Τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία που λειτουργούσαν κάτω από τον έλεγχο των ΚΤΕΛ, περιήλθαν το 1978 στην κατοχή της κρατικής εταιρείας ΕΑΣ (Εταιρεία Αστικών Συγκοινωνιών).
- Αναγνωρίζοντας την ανάγκη συστηματικού σχεδιασμού, προγραμματισμού και χάραξης οικονομικής πολιτικής στις αστικές συγκοινωνίες, το κράτος ίδρυσε το 1978 τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών, ο οποίος απετέλεσε ένα ανεξάρτητο κρατικό φορέα που είχε σαν σκοπό το συντονισμό και την υποστήριξη των τριών παραπάνω εταιρειών συγκοινωνιών.

Το καλοκαίρι του 1991 ιδρύεται με το νόμο 1955 η Ανώνυμη Εταιρεία «ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ» με σκοπό τη μελέτη, κατασκευή, οργάνωση, διοίκηση, λειτουργία, εκμετάλλευση και ανάπτυξη του δικτύου του Μετρό στην περιοχή του Νομού Αττικής. Σε αυτό το πλαίσιο, δυο νέες Γραμμές Μετρό ξεκίνησαν να κατασκευάζονται στα τέλη του 1992.

*Πίνακας 1.1.: Ιστορική αναδρομή για τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς της Αθήνας*

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΓΕΓΟΝΟΣ
1869	Λειτουργία πρώτου ατμοκίνητου σιδηροδρόμου Ελλάδος (Πειραιάς-Θησείο)
1894	Επέκταση σιδηροδρόμου (Θησείο-Ομόνοια)
1904	Ηλεκτροδότηση σιδηροδρόμου
1949	Πρώτα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία στον Πειραιά
1953	Εμφάνιση ηλεκτροκίνητων λεωφορείων στην Αθήνα
1957	Επέκταση σιδηροδρόμου μέχρι την Κηφισιά (Σταθμός Κηφισιάς)
1971	Αντικατάσταση ιδιωτικής εταιρείας Ηλεκτροκίνητων Μεταφορών από την κρατική ΗΛΠΑΠ
1976	Αντικατάσταση ιδιωτικής εταιρείας ΕΗΣ από την κρατική εταιρεία ΗΣΑΠ
1978	Ίδρυση Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών
1991	Ίδρυση ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

Στα τέλη του 1993, ιδρύεται η Ανώνυμη Εταιρεία Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (Ο.Α.Σ.Α. Α.Ε.) ως Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου και καθολικός διάδοχος του Ο.Α.Σ. και των αρμοδιοτήτων του. Το 1996, το καταστατικό του Ο.Α.Σ.Α. τροποποιείται και προσαρμόζεται στις διατάξεις του Ν.2414 περί εκσυγχρονισμού των Αστικών Συγκοινωνιών.

Από το Δεκέμβριο του 1998 με τη δημοσίευση του Νόμου 2669 οι Αστικές Συγκοινωνίες της περιοχής Αθηνών-Πειραιώς και Περιχώρων μπαίνουν σε νέα φάση. Ο σχεδιασμός, ο προγραμματισμός, η οργάνωση, ο συντονισμός, ο έλεγχος, και η παροχή του Συγκοινωνιακού Έργου όλων των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς ανήκουν στον Ο.Α.Σ.Α., ενώ η εκτέλεση του Συγκοινωνιακού Έργου με λεωφορεία, τρόλλεϋ, ηλεκτρικό σιδηρόδρομο στην περιοχή αρμοδιότητας του Ο.Α.Σ.Α. διενεργείται από τους συμβαλλόμενους με αυτόν (ΕΦΣΕ) Εκτελεστικούς Φορείς Συγκοινωνιακού Έργου (Ε.ΘΕ.Λ. Α.Ε., Η.Λ.Π.Α.Π. Α.Ε., Η.Σ.Α.Π. Α.Ε.), οι οποίοι αποτελούν και τις θυγατρικές του εταιρείες.

Στο μεταξύ η κατασκευή των Γραμμών 2 και 3 του Μετρό Αθήνας εξελίσσεται κανονικά όλα αυτά τα χρόνια και τον Ιανουάριο του 2000 τίθεται σε λειτουργία το πρώτο τμήμα του έργου: η Γραμμή 2 «ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΣΕΠΟΛΙΑ» και η Γραμμή 3, «ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ-ΣΥΝΤΑΓΜΑ», συνολικού μήκους 13 χλμ. με 14 Σταθμούς.

Το Νοέμβριο του 2000 προστίθεται στο δίκτυο το τμήμα της Γραμμής 2 ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΔΑΦΝΗ, μήκους 5 χλμ. με 5 νέους Σταθμούς, ενώ την ίδια χρονιά ιδρύεται η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Α.Ε. (θυγατρική εταιρεία της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.) με σκοπό να διαχειριστεί τη λειτουργία του συστήματος.

Τον Απρίλιο του 2003 προστίθεται στο δίκτυο του Μετρό το τμήμα της Γραμμής 3 ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ (1,5 χλμ. και ένας νέος Σταθμός) και το καλοκαίρι του 2004 παραδίδονται οι πρώτες επεκτάσεις του δικτύου:

- Η Γραμμή 3 (ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ-ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ) επεκτείνεται υπογείως προς τα βόρεια (κατά 5,9 χλμ.) έως τον Σταθμό ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ και από εκεί οι νέοι συρμοί του Μετρό αναδύονται στην επιφάνεια και μέσω των Γραμμών του Προαστιακού Σιδηροδρόμου φθάνουν στον Σταθμό του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών “Ελευθέριος Βενιζέλος”.
- Η Γραμμή 2 (ΣΕΠΟΛΙΑ-ΔΑΦΝΗ) επεκτείνεται στα δυο της άκρα και το Μετρό πλέον φθάνει δυτικότερα στο σταθμό ΑΓΙΟ ΑΝΤΩΝΙΟ (Περιστέρι) και νοτιότερα στο σταθμό ΑΓΙΟ ΔΗΜΗΤΡΙΟ/ΑΛΕΚΟ ΠΑΝΑΓΟΥΛΗ.

Το Μάιο του 2007 εντάσσεται στο δίκτυο του Μετρό η επέκταση της Γραμμής 3 από το Μοναστηράκι έως το Αιγάλεω, μήκους 4,2 χλμ. με 3 νέους σύγχρονους σταθμούς, βελτιώνοντας σημαντικά τη συγκοινωνιακή εξυπηρέτηση των κατοίκων των Δυτικών Προαστίων. Το Δεκέμβριο του 2013 παραδόθηκε επίσης μια νέα επέκταση της Γραμμής 3, από το σταθμό Αιγάλεω μέχρι το σταθμό Αγ. Μαρίνα (Δήμος Αγ. Βαρβάρας) συνολικού μήκους 1,4 χλμ. που εξυπηρετεί καθημερινά περισσότερους από 30.000 επιβάτες. Με την παράδοση του σταθμού Αγ. Μαρίνα ολοκληρώθηκε εντός του 2013, η παράδοση 7 συνολικά σταθμών προς το επιβατικό κοινό και

συγκεκριμένα των σταθμών Περιστερί και Ανθούπολη στις 5 Απριλίου 2013 και των σταθμών Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό στις 25 Ιουλίου 2013.

Σήμερα, οι δύο Γραμμές του Μετρό Αθήνας έχουν συνολικό μήκος 59,7 χλμ. (συμπεριλαμβανομένων των 20,7 χλμ. γραμμής του προαστιακού από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας προς το Αεροδρόμιο) και διαθέτουν 40 σύγχρονους σταθμούς (περιλαμβάνοντας 4 σταθμούς σε κοινή χρήση με τον Προαστιακό). Καθημερινά περίπου 938.000 επιβάτες εξυπηρετούνται από τις Γραμμές 2 και 3 του Μετρό, ενώ η Γραμμή 1 των ΗΣΑΠ (μήκους 25,6 χλμ. με 24 Σταθμούς) εξυπηρετεί αντίστοιχα 460.000 επιβάτες. Οι Αθηναίοι έχουν πλέον τη δυνατότητα να πραγματοποιούν “συνδυασμένες διαδρομές” εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο στις καθημερινές τους μετακινήσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με το Μετρό χρειάζονται μόλις 14 λεπτά για να καλυφθεί η απόσταση Σύνταγμα-Χαλάνδρι, ενώ με το αυτοκίνητο η ίδια απόσταση καλύπτεται σε 45 λεπτά σε ώρες αιχμής.

Επισημαίνεται ακόμη ότι από το καλοκαίρι του 2004, προστέθηκαν στο σύστημα συγκοινωνιών δύο νέα “μέλη”, το TRAM και ο Προαστιακός Σιδηρόδρομος. Το TRAM διαθέτει δύο Γραμμές συνολικού μήκους 26,1 χλμ. που συγκλίνουν στη λεωφόρο Ποσειδώνος στο ύψος του Παλαιού Φαλήρου. Με τη λειτουργία του TRAM επιτυγχάνεται η σύνδεση του κέντρου της Αθήνας με την παραλιακή ζώνη έως το Ελληνικό (Γραμμή 1) και του Νέο Φαλήρου με τη Γλυφάδα (Γραμμή 2). Το δίκτυο του Προαστιακού Σιδηροδρόμου εξασφαλίζει πρόσβαση στο Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών “Ελευθέριος Βενιζέλος” σε 40 περίπου λεπτά από το κέντρο της πόλης.

Το Μετρό της Αθήνας αποτελώντας ένα από τα σημαντικότερα συγκοινωνιακά έργα και το πλέον προσφιλές δημόσιο μέσο μεταφοράς στο Λεκανοπέδιο συνεχίζει να επεκτείνεται με γοργούς ρυθμούς.

Η Αττικό Μετρό Α.Ε. επαναδημοπράτησε στις 21 Νοεμβρίου 2008 το διαγωνισμό για την κατασκευή της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό στα Δυτικά Προάστια με κατάληξη στον Πειραιά και την 1η Μαρτίου 2012 υπογράφηκε η σχετική σύμβαση με την ανάδοχο κοινοπραξία J&P – ΑΒΑΞ Α.Ε., GHELLA SPA, ALSTOM TRANSPORT S.A. Η επέκταση αυτή θα έχει συνολικό μήκος 7,6 χλμ. και θα προσθέσει στο δίκτυο του Μετρό 6 νέους σταθμούς εξυπηρετώντας τόσο τα δυτικά προάστια του Λεκανοπεδίου όσο και τον Πειραιά, ο οποίος θα διαθέτει 3 σύγχρονους σταθμούς Μετρό.

Παράλληλα, βρίσκεται σε λειτουργία για τις ανάγκες των δημόσιων μεταφορών ένας μεγάλος αριθμός νέων λεωφορείων κινούμενων με φυσικό αέριο ή και πετρέλαιο, ενώ προγραμματίζεται η σταδιακή αντικατάσταση ολόκληρου του υφιστάμενου στόλου.

Το σύστημα συγκοινωνιών της Αθήνας μεταμορφώνεται χρόνο με το χρόνο εξυπηρετώντας ολοένα και περισσότερες περιοχές του Λεκανοπεδίου. Τα οφέλη από την συστηματική χρήση των δημοσίων μέσων μεταφοράς είναι πολλαπλά για τους κατοίκους της πρωτεύουσας, τόσο για τους χρήστες των δημοσίων μέσων (ταχύτητα, άνεση, ασφάλεια, αξιοπιστία), όσο και γενικότερα (μείωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καταπολέμηση του θορύβου, κλπ.) για την πόλη.



Για τον σκοπό αυτό, το 2011 ιδρύθηκε η ανώνυμη εταιρεία με την επωνυμία ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ και το διακριτικό τίτλο ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε. κατόπιν της απορρόφησης των εταιρειών ΗΣΑΠ Α.Ε. και ΤΡΑΜ Α.Ε. από την ΑΜΕΛ Α.Ε. Η ΣΤΑΣΥ Α.Ε. αποτελεί εταιρεία του ομίλου ΟΑΣΑ, και έχει ως κύρια αρμοδιότητα την εκτέλεση του συγκοινωνιακού έργου μέσα στα όρια της Περιφέρειας Αττικής για την εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού, με τα (επίγεια και υπόγεια) μέσα σταθερής τροχιάς (αστικοί σιδηρόδρομοι, τροχιόδρομοι-τραμ και λοιπά μέσα σταθερής τροχιάς).

### **1.1.2. Συντήρηση του σιδηροδρομικού δικτύου**

Η σιδηροδρομική υποδομή είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που περιλαμβάνει διάφορα υποσυστήματα. Η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι μια από τις σημαντικότερες πτυχές αυτού του πρωταρχικού τρόπου μεταφοράς. Ωστόσο, η ωφέλιμη ζωή των επιμέρους στοιχείων της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στρατηγική συντήρησης και ανανέωσης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Οι σημερινές απαιτήσεις απαιτούν από τη σιδηροδρομική βιομηχανία αυξημένη χωρητικότητα, ύπαρξη περισσότερων αμαξοστοιχιών που ταξιδεύουν σε υψηλότερες ταχύτητες και με μεγαλύτερα φορτία άξονα. Αυτή η αυξημένη χρήση οδηγεί σε μεγαλύτερη υποβάθμιση των σιδηροδρομικών μερών και υψηλότερο κόστος συντήρησης. Παλαιότερα, οι διαδικασίες συντήρησης των σιδηροδρόμων προγραμματίζονταν συνήθως βάσει της εμπειρογνωμοσύνης του ιδιοκτήτη της υποδομής και ο κύριος στόχος ήταν να παρέχεται υψηλό επίπεδο ασφάλειας, με πολύ μικρή όμως ανησυχία για οικονομικά ζητήματα. Σήμερα, ωστόσο, το απελευθερωμένο ανταγωνιστικό περιβάλλον και οι περιορισμοί του προϋπολογισμού αναγκάζουν τις σιδηροδρομικές υποδομές να στραφούν από τα όρια ασφαλείας στα οικονομικά αποδοτικότερα όρια συντήρησης ώστε να βελτιστοποιηθούν η λειτουργία και οι διαδικασίες συντήρησής του. Ο στόχος είναι να καταστούν η λειτουργία και η συντήρηση οικονομικά αποδοτικές, διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλά πρότυπα ασφαλείας. Μία από τις κύριες παραμέτρους για τη διασφάλιση της ασφαλείας των σιδηροδρόμων και της άνετης σιδηροδρομικής μεταφοράς είναι η διατήρηση υψηλής ποιότητας γεωμετρίας γραμμής. Κακή ποιότητα γεωμετρίας γραμμής, συνεπάγεται άμεσα ή έμμεσα, προβλήματα ασφαλείας, μείωση της ταχύτητας, διακοπή της κυκλοφορίας, μεγαλύτερο κόστος συντήρησης και υψηλότερο ρυθμό φθοράς των λοιπών σιδηροδρομικών συνιστωσών (π.χ. σιδηροτροχιές, τροχούς κ.λπ.). Γίνεται, επομένως, κατανοητό ότι η αξιόπιστη και βέλτιστη συντήρηση των σιδηροδρομικών υποδομών συνδράμει στην αναβάθμισή τους και τη διαχείρισή τους με τον αποτελεσματικότερο δυνατό τρόπο.

### 1.1.3. Αρχές Συντήρησης στο μετρό

#### *Πεδίο παρέμβασης*

Η μονάδα που είναι υπεύθυνη για την συντήρηση, πρέπει στην ουσία να εξασφαλίζει ότι τα διάφορα εξαρτήματα της γραμμής διατηρούνται σε καλή κατάσταση λειτουργίας:

- Η βάση της γραμμής, είτε πρόκειται για έρμα είτε για σκυρόδεμα,
- Οι στρωτήρες και οι προσηλώσεις των σιδηροτροχιών κυκλοφορίας,
- Οι σιδηροτροχιές κυκλοφορίας,
- Οι αλλαγές με εξαίρεση τις μηχανές αλλαγής τροχιάς.

#### *Στρατηγική συντήρησης*

Η γραμμή υπόκειται σε σημαντικά δυναμικά φορτία. Διαταράσσεται έντονα και σε κάποιες περιπτώσεις εξαρτήματά της μπορεί να φθείρονται γρήγορα.

Η συντήρηση ουσιαστικά, πάντα κατευθύνεται από κανόνες που σχετίζονται με την ιδέα της εξυπηρέτησης του κοινού. Είναι σχεδιασμένη να κρατά αυτά τα ελαττώματα σε αποδεκτά όρια, ούτως ώστε :

- Πάντα να εγγυάται την ασφάλεια των συρμών και του επιβατικού κοινού,
- Διασφαλίζει την διαθεσιμότητα των γραμμών σε συμφωνία με τους καθολικούς στόχους,
- Όσο γίνεται περισσότερο, να περιορίζει τις ενοχλήσεις που δημιουργούνται από τα διάφορα ελαττώματα.

#### *Εργασία συντήρησης (κατηγοριοποίηση)*

Οι εργασίες συντήρησης είναι κυρίως πρακτικές. Μια εργασία αντιστοιχεί στην πρακτική έκφραση μιας οδηγίας, αναφοράς ή προγράμματος.

Κάθε εργασία αποτελεί ένα διακριτό σύνολο ενεργειών, που διεκπεραιώνεται από μια δεδομένη ομάδα, πάνω σε ένα εξάρτημα ή τμήμα των κυρίων γραμμών κίνησης και πάντα μέσα σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (γενικά όχι πάνω από μια ημέρα ή μια νύκτα).

Δεδομένων των ειδικών χαρακτηριστικών του Μετρό της Αθήνας (περιβάλλον, πολύ μικρά διαστήματα μεταξύ των δρομολογίων των τραιίνων, σημεία κλειδιά), οι δυνατότητες παρέμβασης σε εργάσιμες ώρες θα είναι πολύ περιορισμένες.

Οι παρεμβάσεις καθορίζονται από τοπικούς κανονισμούς ασφάλειας (για παράδειγμα απαγόρευση εργασιών όταν υπάρχει ρεύμα στις γραμμές), αλλά στην πλειοψηφία τους, οι παρεμβάσεις θα αποτελούνται από:

- Επιδιορθώσεις μετά από κάποια αναφορά ή από ένα γεγονός,

- Συγκεκριμένες περιηγήσεις επιθεώρησης (με το βαγονέτο επιθεώρησης),
- Συντήρηση δευτερευουσών ή παρακαμπτηρίων γραμμών.

Όλες οι άλλες επιθεωρήσεις πρέπει να υλοποιούνται όταν η διέλευση επιβατών έχει διακοπή, δηλαδή, τις νύκτες, με την επιβεβλημένη υποχρέωση την επαναλειτουργία στον προγραμματισμένο χρόνο.

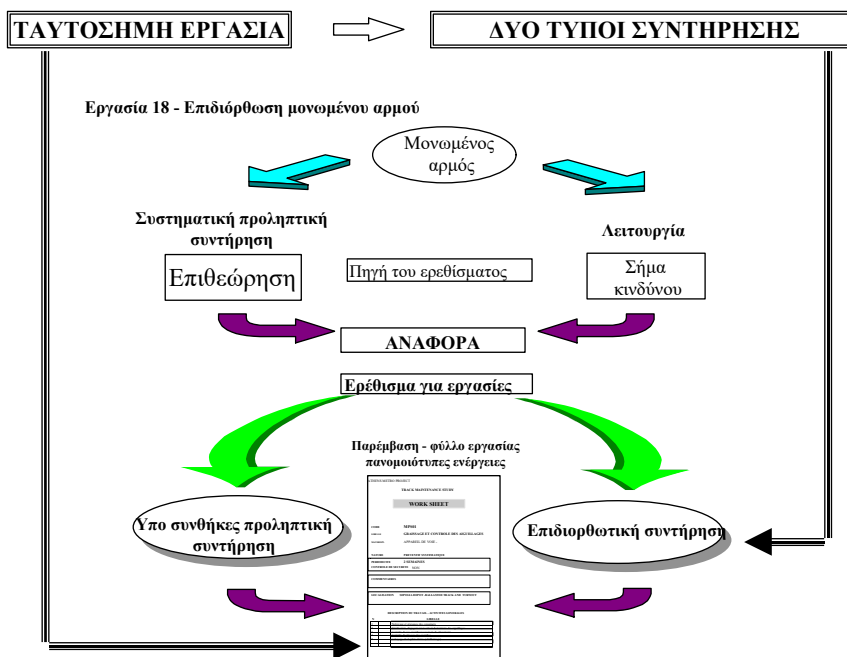
Οι εργασίες στην γραμμή εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες, αναλόγως της φύσης τους και της έκτασης:

- Προγραμματισμένη συντήρηση:
  - \* Συστηματική Προληπτική Συντήρηση (ΣΠΣ),
  - \* Υπό Συνθήκες Προληπτική Συντήρηση (ΥΣΠΣ),
  - \* Ανανεώσεις.
- Μη προγραμματισμένη συντήρηση:
  - \* Επιδιορθωτική Συντήρηση (επιδιορθώσεις) (ΕΣ).

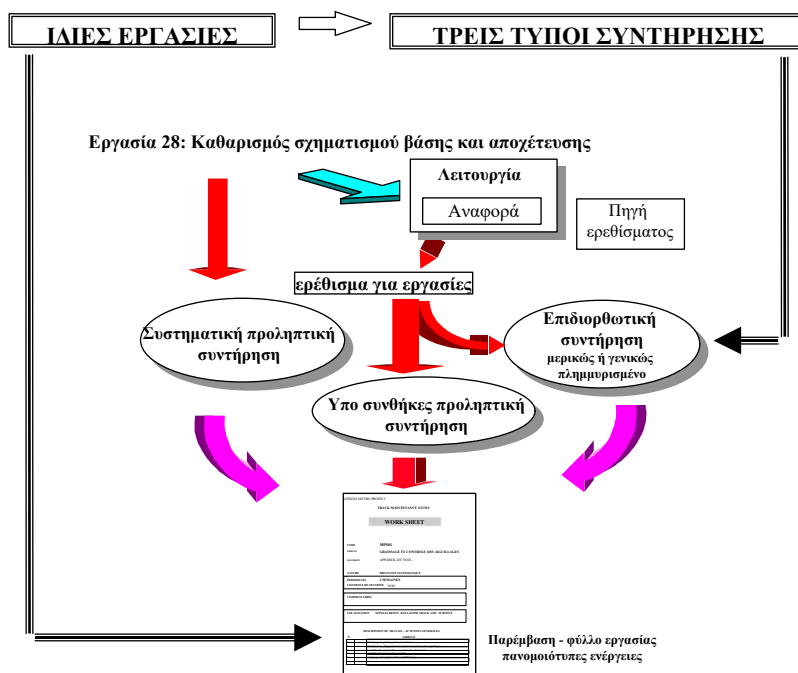


**Εικόνα 1.2.:** Γενικές αρχές συντήρησης σιδηροδρομικής

Όταν δηλώνεται ο τύπος συντήρησης (συστηματική προληπτική, υπό συνθήκες ή επιδιορθωτική), ορισμένες εργασίες μπορεί να κατατάσσονται σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Οι εργασίες και οι συσχετιζόμενες κύριες ενέργειες είναι ταυτόσημες, αλλά το ερέθισμα μπορεί να έχει διαφορετικές πηγές.



Εικόνα 1.3.: Διάκριση ίδιας εργασίας σε δύο διαφορετικούς τύπους συντήρησης ανάλογα με το ερέθισμα



Εικόνα 1.4.: Διάκριση ίδιας εργασίας σε τρεις διαφορετικούς τύπους συντήρησης ανάλογα με το ερέθισμα

## Προγραμματισμένη συντήρηση

### *Παρεμβάσεις συστηματικής προληπτικής συντήρησης*

Αυτές οι προγραμματισμένες παρεμβάσεις πρέπει να εντάσσονται σε πλήρως καθορισμένους κύκλους. Αυτός ο συστηματικός έλεγχος με τις σχετικές έγγραφες αναφορές επιτρέπει την παρακολούθηση της κατάστασης των συντηρούμενων μερών.

Αποτελούνται από επιθεωρήσεις(ελέγχους απαραίτητους για την εξασφάλιση της ασφάλειας των δρομολογίων, παρακολούθηση της κατάστασης των γραμμών) και σε μικρότερες παρεμβάσεις σε εξαρτήματα (λάδωμα μοχλού αλλαγής, ρύθμιση των προστατευτικών σιδηροτροχιών, σφίξιμο κοχλιώσεων).

Με εξαίρεση κάποιων ειδικών περιπτώσεων (περιηγήσεις επιθεώρησης με το βαγονέτο επιθεώρησης, επιθεώρηση και πιθανών μικρές επιδιορθώσεις σε προσβάσιμες υπερκείμενες κατασκευές, καταγραφή των χαρακτηριστικών της γραμμής με την χρήση κατάλληλων καταγραφικών οχημάτων, ικανών να τρέχουν ανάμεσα στα τραίνα, για παράδειγμα), αυτές οι παρεμβάσεις γίνονται συνήθως κατά την διάρκεια της νύκτας, εκτός των ωρών λειτουργίας.

### *Παρεμβάσεις συστηματικής προληπτικής συντήρησης για ασφάλεια*

Μερικές φορές οι παρεμβάσεις συστηματικής προληπτικής συντήρησης αφορούν στον έλεγχο παραμέτρων καθοριστικών για την ασφάλεια των τραίνων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εφαρμόζεται μια μέγιστη περίοδος επαναπρογραμματισμού (επιτρεπτό μέσα σε έναν κύκλο. Τέτοιες μετρήσεις μπορεί να εφαρμόζονται σε άλλες επαναλαμβανόμενες παρεμβάσεις, ειδικά όταν και όπου εκτελούνται εργασίες με υπεργολάβους.

### *Παρεμβάσεις υπό συνθήκη προληπτικής συντήρησης*

Αυτές οι παρεμβάσεις είναι προγραμματισμένες στην βάση των πραγματικών συνθηκών της γραμμής, όπως αυτές αντικατοπτρίζονται στα αποτελέσματα των περιοδικών ελέγχων.

Συνήθως, εμπεριέχουν γεωμετρικές διορθώσεις σε γραμμές διαστρωμένες σε έρματος (συμπύκνωση, χωροστάθμιση, ευθυγράμμιση), επιδιορθώσεις στην χρησιμοποιούμενη σιδηροδρομική γραμμή (τοπικές ανανεώσεις, τρόχισμα, επιπεδοποίηση, κτλ.) ή των αρμών, καθώς επίσης και της αντιράβδου αλλαγής ή συντήρηση της μηχανής αλλαγής.

Αυτές οι εργασίες γίνονται κατά την διάρκεια της νύκτας, ενώ κατά την διάρκεια της μέρας γίνονται εργασίες σε δευτερεύουσες γραμμές, όταν δεν υπάρχει καθόλου κίνηση. Πράγματι, συνήθως απαιτείται :

- Κατοχή για αρκετά μεγάλο διάστημα,
- Βαρέα εργαλεία ή χειρισμούς της αντιράβδου αλλαγής,
- Αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων της σιδηροδρομικής γραμμής.

Πραγματοποιούνται με αποσυναρμολόγηση, συναρμολόγηση ή ρύθμιση, και πιθανώς αντικατάσταση εξαρτημάτων από άλλα νέα. Αυτή η συντήρηση αποτελείται από όλο το φάσμα των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης, είτε πρόκειται για εποχιακές προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης, είτε για εργασίες συντήρησης εξαιτίας κάποιας οριακής κατάστασης (λόγω υπέρβασης κριτηρίου που διαπιστώθηκε από πρώτου επιπέδου εργασίες συντήρησης/επιθεώρηση).

#### *Ανανεώσεις*

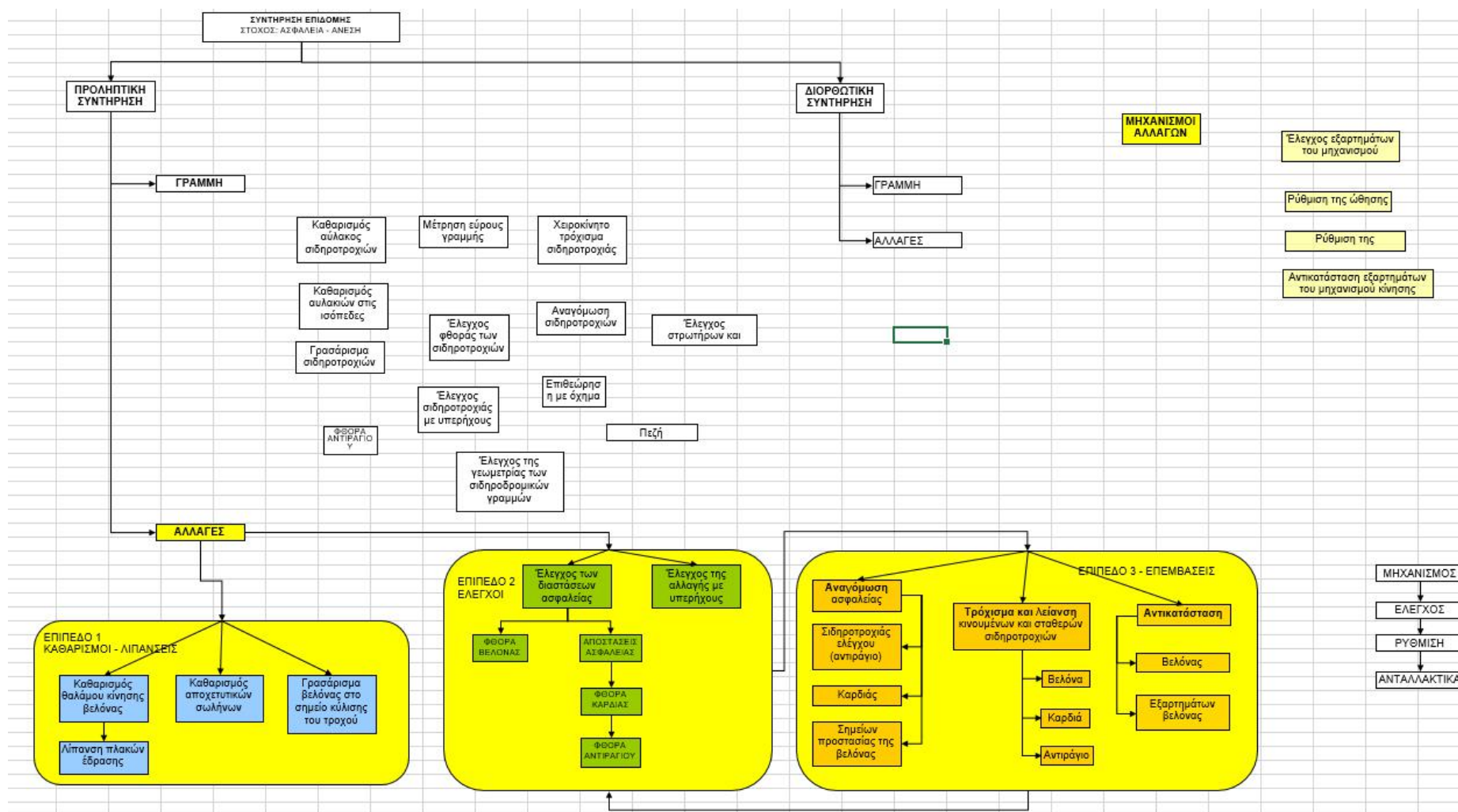
Οι ανανεώσεις είναι προγραμματισμένες αρκετά νωρίς. Περιλαμβάνουν την αλλαγή ολόκληρου ή μέρους της σιδηροδρομικής γραμμής. Αντικαθιστούν τις συνηθισμένες επεμβάσεις συντήρησης όταν αυτές αποδεικνύονται αναποτελεσματικές ή υπερβολικά δαπανηρές. Απαιτούν αρκετά μεγάλες ομάδες και συνήθως εκτελούνται από ειδικευμένους υπεργολάβους.

#### Μη προγραμματισμένη συντήρηση

##### *Επιδιορθωτική συντήρηση*

Η επιδιορθωτική συντήρηση αποτελείται από επείγουσες παρεμβάσεις σε συνέχεια περιστατικών που συμβαίνουν κατά την διάρκεια λειτουργίας του μετρό (σπασμένες σιδηροτροχιές, ρύθμιση του ανοίγματος της αντιράβδου αλλαγής, κτλ.). Γενικότερα σαν αρχή, δεν είναι προγραμματισμένες στο μεσοδιάστημα. Γίνεται, όμως, – εκτός των επισκευών – δεόντως προγραμματισμένη εκ των προτέρων. Επίσης συμπεριλαμβάνει όλες τις επισκευαστικές εργασίες μετά από ατυχήματα ή βλάβη λειτουργίας υλικών.

Μπορεί να είναι είτε μόνιμες είτε προσωρινές (καταπραϋντικές), στην οποία, δεύτερη περίπτωση, συνοδεύονται από μία μόνιμη παρέμβαση που υλοποιείται την νύκτα εκτός ωραρίου λειτουργίας του Μετρό, ή κατά την διάρκεια της ημέρας σε δευτερεύουσες σιδηροδρομικές γραμμές και στις αποθηκευτικές παρακαμπτήριες σιδηροδρομικές γραμμές του αμαξοστασίου, όταν δεν υπάρχουν σταθμευμένα τρέινα σε αυτές. Οι ομάδες εργασίας αποτελούνται από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό με βαθιά γνώση για τις σιδηροδρομικές γραμμές και των διάφορων εξαρτημάτων της χωρίς να καθυστερεί την επιστροφή στην λειτουργία του τμήματος των γραμμών στο οποίο ανήκει.



Εικόνα 1.5.: Ενδεικτικός πίνακας ροής εργασιών συντήρησης σε παράδειγμα σιδηροδρομικού δικτύου τραμ. (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ.. Α.Ε.)

## 1.2. Στόχος της παρούσας εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των εργασιών επιδιορθωτικής και υπό συνθήκες προληπτικής συντήρησης του μετρό της Αθήνας, με εφαρμογή στις γραμμές 2 & 3, μία δεδομένη χρονική στιγμή αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης των επιβατών που οφείλεται στην καθυστέρηση της μετακίνησής τους λόγω περιορισμών στην ταχύτητα και στη φθορά της γραμμής από τις διελεύσεις φορτίων συρμών. Για τον λόγο αυτό αναπτύσσεται μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης με εφαρμογή στον επιστημονικό κλάδο της επιχειρησιακής έρευνας και βελτιστοποίησης για μηχανικούς. Πιο συγκεκριμένα βασίζεται στο πρόβλημα του ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0,1». Για την επίτευξη του τελικού στόχου χρησιμοποιήθηκαν με ορθολογικό τρόπο μια σειρά από απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για την ανάπτυξη και εφαρμογή του μοντέλου.

Το έναυσμα για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος δόθηκε από το γεγονός ότι στο μετρό της Αθήνας εφαρμόζουν μεν πρόγραμμα συντήρησης το οποίο όμως έχει αφενός προκύψει με ντετερμινιστικό τρόπο και αφετέρου αφορά περισσότερο τη συστηματική προληπτική παρά την υπό συνθήκες και την επιδιορθωτική συντήρηση. Η προτεραιότητα μάλιστα για την απόφαση της πραγματοποίησης μιας επισκευής προκύπτει αποκλειστικά από την κοινή λογική και τη γνώση των ειδικών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανάγκη για μείωση των καθυστερήσεων που έχουν προκληθεί από τρέχουσες αστοχίες και για αμεσότερη παρέμβαση στα τμήματα που έχουν φθαρεί περισσότερο με απώτερο στόχο την ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης των επιβατών.

## 1.3. Μεθοδολογία

Αρχικά καθορίστηκε το αντικείμενο εξέτασης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και ο επιδιωκόμενος σκοπός. Για την υλοποίησή του πραγματοποιήθηκε ευρεία βιβλιογραφική ανασκόπηση, δηλαδή αναζήτηση ερευνών με θέμα συναφές με αυτό της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς επίσης και γενικών πληροφοριών σχετικά με αυτό που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες για την απόκτηση σχετικής εμπειρίας στην επεξεργασία τέτοιων θεμάτων, αλλά και στην απόφαση της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος.

Μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης βιβλιογραφικών αναφορών, σειρά είχε η εύρεση του τρόπου συλλογής των στοιχείων. Πηγή της προέλευσης των στοιχείων αποτέλεσε κατά κύριο λόγο η εταιρία Σταθερών Συγκοινωνιών (ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.). Στη συνέχεια, τα στοιχεία μελετήθηκαν και καταχωρήθηκαν σε αρχείο Excel για τη χρησιμοποίησή τους κατά τη διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου.

Εφόσον επιδίωξη είναι η διαμόρφωση ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, εφελτήριο της επίτευξης του στόχου ήταν η επιχειρησιακή έρευνα. Η επιχειρησιακή



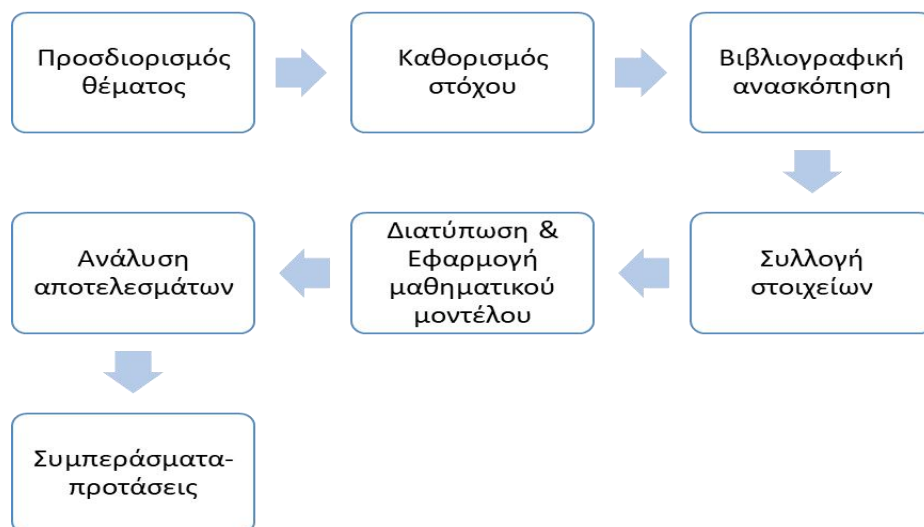
έρευνα είναι ένα κύριο εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την άσκηση της διοίκησης και ειδικότερα για τη λήψη αποφάσεων με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο εύστοχος ορισμός της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι «η επιστημονική προετοιμασία των αποφάσεων της Διοικήσεως με την επιστημονική ανάλυση των δεδομένων και τη δημιουργία μαθηματικών προτύπων» είναι ικανός να βοηθήσει στην κατανόηση του όρου. Η επιχειρησιακή έρευνα ασχολείται με την άριστη λήψη αποφάσεων σε προσδιοριστικά και πιθανολογικά συστήματα που προκύπτουν μέσα από πραγματικά προβλήματα.

Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε ένα σύνολο ποσοτικών σχέσεων που εκφράζουν τους στόχους του προβλήματος και τους περιορισμούς του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα στον ακεραίο προγραμματισμό της μορφής «0,1». Η συγκεκριμένη μορφή μπορεί να συσχετισθεί με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων όπου οι εναλλακτικές επιλογές είναι της μορφής «ΝΑΙ-ΟΧΙ», δηλαδή αν θα πραγματοποιηθεί ή όχι μια ενέργεια με σκοπό το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος περιλαμβάνει, αρχικά, τον προσδιορισμό των μεταβλητών του, όπου σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ποσοτικοποιούν τις αποφάσεις που πρόκειται να ληφθούν, γι' αυτό ονομάζονται μεταβλητές απόφασης. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών χρειάζονται να προσδιοριστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε η αντικειμενική συνάρτηση, στην περίπτωση του παρόντος προβλήματος, να ελαχιστοποιηθεί, δεδομένων κάποιων γνωστών περιορισμών.

Μετά την ανάπτυξη και εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματά του. Τέλος, προέκυψαν τα συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζονται, υπό μορφή διαγράμματος ροής, τα διαδοχικά στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.



**Διάγραμμα 1.1:** Στάδια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας

## 1.4. Δομή

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται η προσπάθεια προσδιορισμού του θέματος της διπλωματικής εργασίας και ο καθορισμός του στόχου της σε συνδυασμό με μία ιστορική αναδρομή για τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς της Αθήνας και την πορεία τους μέχρι το σύγχρονο μετρό. Γίνεται αναφορά στη συντήρηση ως μία από τις βασικότερες ανάγκες για την ομαλή λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου και αναλύονται οι κύριες αρχές που διέπουν το σύστημα συντήρησης του μετρό της Αθήνας, καθώς και οι εργασίες συντήρησης που υλοποιούνται σε αυτό. Μέσα από την περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και της δομής της διπλωματικής εργασίας, επιδιώκεται η πλήρης κατανόηση του αντικειμένου της, καθώς και ο τρόπος που αυτό θα προσεγγιστεί.

Το κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει την παρουσίαση και την ανασκόπηση των αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και των μεθοδολογιών που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την αντιμετώπιση παρόμοιων προβλημάτων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μια προσπάθεια συγκριτικής αξιολόγησης, ώστε να διαπιστωθεί αν και ποιες από αυτές μπορούν να συνδράμουν στην επίλυση του προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 3 προσδιορίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασιστήκαμε και αναλύεται εις βάθος για την πλήρη αποσαφήνιση η επιλεγείσα μεθοδολογία καθώς και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της. Γίνεται ακόμα η διατύπωση του μοντέλου της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή του μοντέλου που διαμορφώθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα απαραίτητα δεδομένα που συλλέχθηκαν για την μαθηματική του διατύπωση κι έπειτα παρουσιάζεται η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου και των βημάτων που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας στο κατάλληλο λογισμικό έως ότου επέλθει η λύση και το τελικό αποτέλεσμα για την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διάφορα σενάρια του μοντέλου παρατίθενται στο εν λόγω κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 5 περιέχονται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας και καταγράφονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα ή επιπλέον διερεύνηση, προσθήκη ή αλλαγή μεταβλητών και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, παρατίθεται κατάλογος βιβλιογραφικών αναφορών, οι οποίες σχετίζονται με παρεμφερείς έρευνες που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρατίθεται η σύνοψη της κάθε εξεταζόμενης σχετικής έρευνας που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα, οι οποίες περιλαμβάνουν το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα κυριότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα, ώστε έπειτα από τη σύνθεση των παραπάνω στοιχείων να προκύπτει η αναγκαιότητα εξέτασης του αντικειμένου και η επιλογή της υιοθετηθείσας μεθοδολογίας για το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο καταδεικνύεται ότι από συναφείς έρευνες δεν έχει καλυφθεί πλήρως το αντικείμενο που εξετάζεται, αλλά και με ποιόν τρόπο μέσω των χρησιμοποιούμενων μεθοδολογιών επιλέγεται η καταλληλότερη για την αντιμετώπιση του ζητουμένου. Προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των ενεργειών συντήρησης των γραμμών 2 & 3 του μετρό της Αθήνας πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία και ακολουθεί.

### 2.2. Εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση

Με αφορμή την εργασία του Lidén το 2015, ο οποίος επιχείρησε να πραγματοποιήσει μία συνολική ανασκόπηση των μελετών που είχαν πραγματοποιηθεί μέχρι τότε στο πεδίο συντήρησης των σιδηροδρομικών υποδομών, καθώς και να παραθέσει τα προβλήματα σχεδιασμού και την σχετική έρευνα, διαπιστώθηκε ότι τα κυριότερα προβλήματα διακρίνονται σε τρία είδη: στρατηγικά, τακτικά και λειτουργικά, κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται στις εξής επιμέρους κατηγορίες.

*Πίνακας 2.1.: Κατηγορίες προβλημάτων συντήρησης σύμφωνα με τον Lidén (2015)*

Στρατηγικά προβλήματα	Εκτίμηση των αναγκών συντήρησης	Διάρκεια ζωής και καθορισμός συχνότητας συντήρησης
		Σχεδιασμός του δικτύου με βάση τη συντήρηση
		<b>Προγραμματισμός έργου και εργασιών ανανέωσης</b>
	Σχεδιασμός συμβάσεων	
	Εκτίμηση των πόρων για τη συντήρηση και καταμερισμός τους	
Τακτικά προβλήματα	Προγραμματισμός των ελεύθερων τμημάτων για συντήρηση με σκοπό το συντονισμό της με την κυκλοφορία	

	Δρομολόγηση των συνεργείων και των οχημάτων συντήρησης	<b>Προγραμματισμός με βάση μοντέλα φθοράς</b>
	Αναπρογραμματισμός	Δρομολόγηση οχημάτων συντήρησης και προγραμματισμός συνεργείων συντήρησης
Λειτουργικά προβλήματα	Σχεδιασμός του έργου συντήρησης	
	<b>Προγραμματισμός πόρων και χρονοδιαγράμματος εργασιών</b>	
	Σχεδιασμός χρήσης τροχιάς	

Η ακόλουθη βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει βασιστεί σε αυτήν την κατηγοριοποίηση, εφόσον το πρόβλημά μας φάνηκε ότι εντάσσεται περισσότερο στις κατηγορίες «**Προγραμματισμός έργου και εργασιών ανανέωσης**», «**Προγραμματισμός πόρων και χρονοδιαγράμματος εργασιών**» και «**Προγραμματισμός με βάση μοντέλα φθοράς**», όπου απαντώνται και πληθώρα σχετικών ερευνών.

### 2.2.1. Προγραμματισμός έργου και εργασιών ανανέωσης

Το πρώτο και θεμελιώδες πρόβλημα που προκύπτει είναι να καθιερωθούν κάποια επίπεδα ποιότητας των υποδομών μαζί με πολιτικές συντήρησης και ανανέωσης, δηλαδή να αποφασισθεί πόσο καλή πρέπει να είναι η υποδομή καθώς και μέθοδοι για την επίτευξη αυτού του στόχου. Πρόκειται για την εκτίμηση, δηλαδή, των αναγκών συντήρησης και τον εντοπισμό τους στο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο της κυκλοφορίας, την ασφάλεια, την αξιοπιστία, την οικονομία κλπ. Πρέπει να θεωρηθεί, ακόμα, η συνολική χωρητικότητα και τα επίπεδα εξυπηρέτησης του συστήματος, καθώς και προβλέψεις σχετικά με την υποβάθμιση-φθορά. Στην κατηγορία αυτή βρίσκουμε πολλές μελέτες οι οποίες με χρονολογική σειρά παρατίθενται στο εξής:

Το 2009 στην έρευνα των Zhao κ.α. (2009) περιγράφεται μια προσέγγιση με γενετικό αλγόριθμο για τον προγραμματισμό της ανανέωσης των κυριότερων συστατικών του σιδηρόδρομου: τροχιά, έρμα και στρωτήρες. Το άρθρο τους περιγράφει τη διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το συγχρονισμό της ανανέωσής τους ώστε να ελαχιστοποιούνται οι δαπάνες που απαιτούνται για το σκοπό αυτό. Καθώς το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων μικτού αέριου προγραμματισμού με περιορισμούς, επιστράτευσαν έναν γενετικό αλγόριθμο για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Η τροχιά, οι στρωτήρες και το έρμα ακολουθούν διαφορετικές καμπύλες φθοράς και για αυτό συνήθως οι εργασίες ανανέωσής τους προγραμματίζονται ξεχωριστά. Ωστόσο, έχει επιχειρηθεί κατά καιρούς η ταυτόχρονη μεταχείρισή τους, όπως με το σύστημα ECOTRACK που ενώ μεν παρέχει μία συνάρτηση που επιτρέπει τον προγραμματισμό συνδυασμένων εργασιών ανανέωσης (για τα διαφορετικά συστατικά μέρη του σιδηρόδρομου), η διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται μόνο σε απλοϊκούς και εμπειρικά διατυπωμένους κανόνες.

Το εν λόγω άρθρο περιγράφει μια μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση των εργασιών ανανέωσης των στρωτήρων, τροχιάς και έρματος μέσα σε έναν ορισμένο σχεδιαστικό ορίζοντα. Το όφελος από το συνδυασμό των εργασιών τους εκτιμήθηκε από μία ανάλυση αποταμιεύσεων και δαπανών από βασικούς συνδυασμούς τους. Για να αποδειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής της προσέγγισης επίλυσης που ακολουθήθηκε και για μικρά τμήματα, παρουσιάστηκε ένα αριθμητικό παράδειγμα με τη λύση του και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν από την εφαρμογή της ακριβούς λύσης από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Για μεγαλύτερα τμήματα μπορεί αποτελεσματικότερα να εφαρμοστούν μέθοδοι με διχοτόμηση και ολοκλήρωση (πχ. GAPI) ενώ επιτυχώς εφαρμόζονται και ευρετικές και μεταευρετικές μέθοδοι (πχ. Tabu).

Μεταευρετική ήταν η τεχνική (simulated-annealing technique) που εφάρμοσαν οι Andrade και Teixeira (2011) για να βρουν το βέλτιστο μέτωπο Pareto σε ένα μικρό παράδειγμα απλού δικτύου, όπου χρησιμοποιήθηκε μοντέλο βελτιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις ως πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού για το σχεδιασμό των ενεργειών ανανέωσης και συντήρησης που σχετίζονται με τη γεωμετρία της τροχιάς σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο. Ελαχιστοποιήθηκαν α) τα συνολικά κόστη των σχεδιασμένων ενεργειών ανανέωσης και συντήρησης και β) ο συνολικός αριθμός καθυστερήσεων τρένων που προκαλούνται από περιορισμό της ταχύτητας.

Λίγο αργότερα (2013) οι Caetano και Teixeira, πρότειναν μία προσέγγιση βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για το σχεδιασμό της ανανέωσης του έρματος, των στρωτήρων και της τροχιάς. Ο σκοπός του αναπτυσσόμενου μοντέλου είναι να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη συντήρηση, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το κόστος κύκλου ζωής της σιδηροδρομικής τροχιάς, αλλά και το χρόνο κατάληψής της για να πραγματοποιηθεί η κάθε παρέμβαση. Ελαχιστοποιούνται, λοιπόν πάλι, δύο αντικειμενικές συναρτήσεις: α) η μη-διαθεσιμότητα της τροχιάς λόγω ενεργειών ανανέωσης και συντήρησης που πραγματοποιούνται σε αυτήν και β) το κόστος κύκλου ζωής των συστατικών μερών του σιδηρόδρομου. Το μοντέλο, εφαρμοζόμενο στη σιδηροδρομική γραμμή Πόρτο-Λισσαβόνα λαμβάνει υπόψη του μια πολυσύνθετη διατύπωση που αξιολογεί σε χρόνο και χώρο τον ευκαιριακό συνδυασμό των ενεργειών συντήρησης του σιδηρόδρομου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι περισσότερη επένδυση για τις εργασίες ανανέωσης και συντήρησης έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διαθεσιμότητα των τμημάτων της γραμμής.

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η συνεχής λειτουργία του συστήματος σιδηροδρομικού δικτύου, πολλές δραστηριότητες συντήρησης και ανανέωσης εκτελούνται απευθείας στην τροχιά κάθε μήνα. Οι μη προγραμματισμένες δραστηριότητες συντήρησης είναι δαπανηρές και προκαλούν χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών. Επομένως, η κατάσταση της τροχιάς πρέπει να παρακολουθείται και όταν έχει υποβαθμιστεί πέρα από κάποιο αποδεκτό όριο, πρέπει να υφίσταται κάποια προγραμματισμένη παρέμβαση για τη συντήρησή της ώστε να προληφθεί η βλάβη.

Πρέπει, δηλαδή, να προγραμματιστεί ένα βέλτιστο χρονοδιάγραμμα των δραστηριοτήτων συντήρησης, ένας προγραμματισμός του μηνιαίου φόρτου εργασίας, η μείωση των επιπτώσεων που θα έχουν στο επίπεδο εξυπηρέτησης των μεταφορών και η μείωση του δυνητικού κόστους. Λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα της διαδικασίας υποβάθμισης, την ασφάλεια της υπηρεσίας μεταφοράς, την απώλεια διάρκειας ζωής των αντικατασταθέντων τμημάτων τροχιάς, το κόστος συντήρησης και το κόστος ταξιδιού, οι Zhang κ.α. το 2013 παρουσίασαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό συντήρησης ενός περιφερειακού σιδηροδρομικού δικτύου. Προτείνεται μια ενισχυμένη προσέγγιση γενετικού αλγορίθμου για την αναζήτηση μιας λύσης, έτσι ώστε το συνολικό κόστος να ελαχιστοποιείται σε ένα πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα.

Όπως το 2009 οι Zhao κ.α. ασχολήθηκαν με τον συγχρονισμένο προγραμματισμό της ανανέωσης των κυριότερων μερών του σιδηρόδρομου, έτσι και οι Caetano και Teixeira το 2014 παρουσίασαν μοντέλο βελτιστοποίησης, επίσης, μεικτού ακέραιου προγραμματισμού που ενοποιεί τα μοντέλα βελτιστοποίησης του έρματος, της τροχιάς και του στρωτήρα για να μειώσει το κόστος του κύκλου ζωής της σιδηροτροχιάς. Τα αποτελέσματα δείχνουν μείωση του κόστους ανανέωσης της τροχιάς εάν τα συστατικά μέρη του σιδηρόδρομου (έρμα, τροχιά, στρωτήρας), τα τμήματα διαδρομής και το χρονικό διάστημα για τις εργασίες ανανέωσης βελτιστοποιούνται, καθώς και ότι πιθανοί περιορισμοί στον ετήσιο προϋπολογισμό της συντήρησης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το κόστος του κύκλου ζωής του σιδηρόδρομου. Το αναπτυσσόμενο γραμμικό μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού χρησιμοποιεί προβλεπτικές πληροφορίες για τις λειτουργίες συντήρησης, ενώ επίσης αξιολογεί και κάποιες ευκαιριακές αντικαταστάσεις που είχαν γίνει στην τροχιά. Η απόφαση βασίστηκε στο ισοζύγιο μεταξύ του χαμένου χρόνου ενός συστατικού που δεν χρησιμοποιήθηκε στο έπακρο και του οικονομικού οφέλους της από κοινού ανανέωσής τους.

### **2.2.2. Προγραμματισμός των πόρων και του χρονοδιαγράμματος των εργασιών**

Μία εξίσου σημαντική κατηγορία ερευνών είναι αυτή που αφορά τον προγραμματισμό των πόρων και του χρονοδιαγράμματος εργασιών. Οι επιθεωρήσεις ασφάλειας και συντήρησης είναι καλό να επαναλαμβάνονται σε όλα τα τμήματα της υποδομής - με διαφορετικές συχνότητες. Σε κάποιο βαθμό αυτές οι επιθεωρήσεις πρέπει να συντονίζονται με άλλες δραστηριότητες συντήρησης. Κατά συνέπεια, πρέπει να κατασκευαστούν αποτελεσματικά προγράμματα επιθεωρήσεων, τα οποία να πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι επιθεωρήσεις και οι διαγνωστικές μετρήσεις παράγουν επίσης μεγάλο αριθμό ενεργειών επισκευής και διορθωτικής συντήρησης, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικό φορτίο εργασίας και χρονικά όρια για την αποκατάσταση. Οι εργολάβοι αντιμετωπίζουν τότε το πρόβλημα της αποτελεσματικής επιλογής του ακριβούς χρονοδιαγράμματος κάθε ενέργειας, τη συγκέντρωση των εργασιών σε ομάδες εργασίας, την ανάθεση τους σε πληρώματα

επισκευής και της εύρεσης κατάλληλων τμημάτων αποκλεισμού, ελεύθερων για την εφαρμογή εργασιών συντήρησης.

Μία από τις πρώτες μελέτες (1999) που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία είναι εκείνη των Higgins κ.α., οι οποίοι επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου σχεδιασμένου για να βοηθήσει στην επίλυση της σύγκρουσης μεταξύ της λειτουργίας των τρένων και του προγραμματισμού των δραστηριοτήτων συντήρησης. Το μοντέλο τους περιλαμβάνει τον προγραμματισμό των δραστηριοτήτων συντήρησης για την ελαχιστοποίηση των διαταραχών στις υπηρεσίες του τρένου και τη μείωση του κόστους συντήρησης. Η κύρια δυνατότητα εφαρμογής ενός τέτοιου μοντέλου είναι ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τους υπεύθυνους σχεδιασμού συντήρησης γραμμής και τους σχεδιαστές των σιδηροδρομικών υποδομών.

Το πρόβλημα προγραμματισμού συντήρησης γραμμής, το οποίο περιλαμβάνει την ανάθεση δραστηριοτήτων συντήρησης στα χρονικά παράθυρα και τα πλήρώματα σε δραστηριότητες, διατυπώνεται ως ένα μοντέλο ακέραίου προγραμματισμού. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ένας σταθμισμένος συνδυασμός των αναμενόμενων καθυστερήσεων από τις παρεμβάσεις και του χρόνου προτεραιότητας των δραστηριοτήτων. Η ελαχιστοποίηση του πρώτου στοιχείου θα εξασφαλίσει μια ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ των δραστηριοτήτων συντήρησης γραμμής και των προγραμματισμένων συρμών όταν και τα δύο καθυστερούν. Η ευρετική λύση επιτυγχάνεται σε δύο στάδια. Πρώτον, δημιουργείται μια αρχική λύση, προγραμματίζοντας κάθε δραστηριότητα με τη σειρά της, οι οποίες διατάσσονται ανάλογα με τη σημαντικότητα της στιγμής ολοκλήρωσής τους. Κάθε δραστηριότητα επιλέγεται και κατανέμεται σε ένα διαθέσιμο κατάλληλο πλήρωμα. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα κατάλληλα πλήρώματα εργασίας κατά την επιλογή της δραστηριότητας, επιλέγεται αυτό το οποίο γίνεται συντομότερα διαθέσιμο πλήρωμα. Το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιεί την ευρετική αναζήτηση tabu. Το παραπάνω μοντέλο εφαρμόστηκε σε διάδρομο τροχιάς 89 χιλιομέτρων στην ανατολική ακτή της Αυστραλίας. Το χρονοδιάγραμμα που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας την αναζήτηση tabu έχει 7% μείωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σύγκριση με το χρονοδιάγραμμα που κατασκευάστηκε χειροκίνητα. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για να αποδείξει τις επιπτώσεις του χρονοδιαγράμματος δραστηριότητας και των αλλαγών των πόρων συντήρησης. Χρησιμοποιήθηκε ένας ορίζοντας τεσσάρων ημερών στον οποίο εφαρμόστηκε το μοντέλο για να δοκιμαστούν οι προτεινόμενες αλλαγές. Η αύξηση του χρονικού παραθύρου για τη μετακίνηση λιγότερο σημαντικών αμαξοστοιχιών αποδείχθηκε ότι μειώνει σημαντικά τις πιθανές καθυστερήσεις.

Την ίδια χρονολογία οι Cheung κ.α. ήταν από εκείνους που πρωτοασχολήθηκαν με την βέλτιστη κατανομή των πόρων για την πραγματοποίηση κάποιων εργασιών. Μελέτησε την περίπτωση εφαρμογής τεχνικών ικανοποίησης περιορισμών για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων κατανομής πόρων χρησιμοποιώντας τη γλώσσα περιορισμών CHIP. Το πρόβλημα έγκειται στην ανάθεση σιδηροδρομικών τμημάτων σε ένα σύνολο από προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης με βάση κάποιους

δοσμένους περιορισμούς. Για την πραγματοποίηση αυτής της ανάθεσης αναπτύχθηκε το σύστημα τεχνητής νοημοσύνης EWTPAS: μια νέα στρατηγική κατανομής των πόρων δύο φάσεων βασισμένη στη χαλάρωση των περιορισμών το οποίο αντικατέστησε την παλιά χειροκίνητη διαδικασία ανάθεσης, η οποία ήταν φύσει ευρετική και στη διαδικασία της συμμετείχε έμπειρο προσωπικό. Το νέο σύστημα, που περιγράφεται, καταγράφει τη διαθεσιμότητα των πόρων (πχ. τροχίες, βαγόνια κλπ.) σε ημέρες της εβδομάδος, καθώς και τις απαιτήσεις σε πόρους και μέρες, ενώ για κάθε απαίτηση υπάρχει και μια συγκεκριμένη τιμή προτεραιότητας. Είναι ανεξάρτητο από ανθρώπινα λάθη απροσεξίας και από την ύπαρξη έμπειρου προσωπικού και μάλιστα βρέθηκε 10 φορές πιο αποδοτικό από τη χειροκίνητη μέθοδο (1997).

Για την αποφυγή όσο το δυνατόν περισσότερων απρόσμενων διακοπών, απαιτείται προληπτική συντήρηση. Στην εργασία των G. Budai κ.α. (2006) συζητείται το πρόβλημα προγραμματισμού προληπτικής συντήρησης (PMSP), όπου πρέπει να προγραμματιστούν σε μια συγκεκριμένη περίοδο τόσο σύντομες δραστηριότητες ρουτίνας όσο και μεγάλα έργα. Οι εργασίες συντήρησης, συνήθως, ανατίθενται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (μήνες / εβδομάδες), ελαχιστοποιώντας το κόστος των τμημάτων που είναι διαθέσιμα για αυτές και το κόστος συντήρησης. Για να μειωθεί το κόστος και η ταλαιπωρία για τους ταξιδιώτες και τους φορείς εκμετάλλευσης, οι δραστηριότητες αυτές πρέπει να προγραμματιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο μαζί. Παρουσιάζονται δύο εκδόσεις του PMSP, μία με σταθερά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών εκτελέσεων της ίδιας εργασίας ρουτίνας, και μία με ένα μόνο μέγιστο διάστημα. Εκτός της διατύπωσης μαθηματικού προγραμματισμού των δύο εκδόσεων του PMSP, παρουσιάζονται και κάποιες ευρετικές λύσεις, καθώς το πρόβλημα προγραμματισμού της συντήρησης είναι ιδιαίτερα σύνθετο και κρίνεται σκόπιμο να δοθούν και ορισμένες προσεγγιστικές λύσεις. Επιπλέον, συγκρίνεται η απόδοση αυτών των ευρετικών λύσεων με τη βέλτιστη χρησιμοποιώντας μερικές τυχαία παραγόμενες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έχοντας περισσότερη ελευθερία στην επιλογή του χρόνου εκτέλεσης και στην αύξηση των δυνατοτήτων για συνδυασμό των δραστηριοτήτων σε μια περίοδο το κόστος συντήρησης είναι σημαντικά χαμηλότερο.

Τρία χρόνια αργότερα, οι ίδιοι επιχείρησαν να λύσουν το πρόβλημα προγραμματισμού της προληπτικής συντήρησης χρησιμοποιώντας γενετικό, μιμητικό και ευρετικό αλγόριθμο δύο φάσεων και να συγκρίνουν τα αποτελέσματα αυτού του αλγόριθμου με αυτά που προέκυψαν από την προηγούμενή τους δουλειά.

Η κατανομή των εργασιών σε μηχανήματα και συνεργεία, καθώς και η απόφαση μιας σειράς εκτέλεσής τους επιχειρήθηκε και από τους Heinicke κ.α. (2014). Από τη μία πλευρά οι διαχειριστές συντήρησης επιδιώκουν την ελαχιστοποίηση των άμεσων δαπανών συντήρησης και από την άλλη πρέπει να ληφθούν υπόψη προτεραιότητες αναφορικά με τον προγραμματισμό. Αυτό γίνεται συχνά, με βάση μία μη ευέλικτη μέθοδο, στηριζόμενη σε κανόνες επείγουσας ανάγκης που σημαίνει ότι εκτελούνται πρώτες, αυτές που έχουν προτεραιότητα. Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι κάνουν λόγο για



μία άλλη προσέγγιση με βάση την οποία αντί για κανόνες επείγουσας ανάγκης, οι εργασίες συντήρησης βαρύνονται με κόστη-ποινές που πρέπει να πληρωθούν για κάθε μέρα μέχρι να ολοκληρωθεί η εργασία. Το αργότερο εκτελείται η εργασία, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος-ποινή. Μειώνοντας το κόστος ποινής και το κόστος ταξιδιού σε μία αντικειμενική συνάρτηση, μπορεί να βρεθεί μία λύση με πολύ μικρά κόστη-ποινές και κόστη ταξιδιού. Για το πρόβλημα προγραμματισμού που προκύπτει, αναπτύσσονται και συγκρίνονται προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων με διαφορετικά γραμμικά μοντέλα μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MILP) και κόστη πελατών αναφορικά με το χρόνο εκτέλεσής τους.

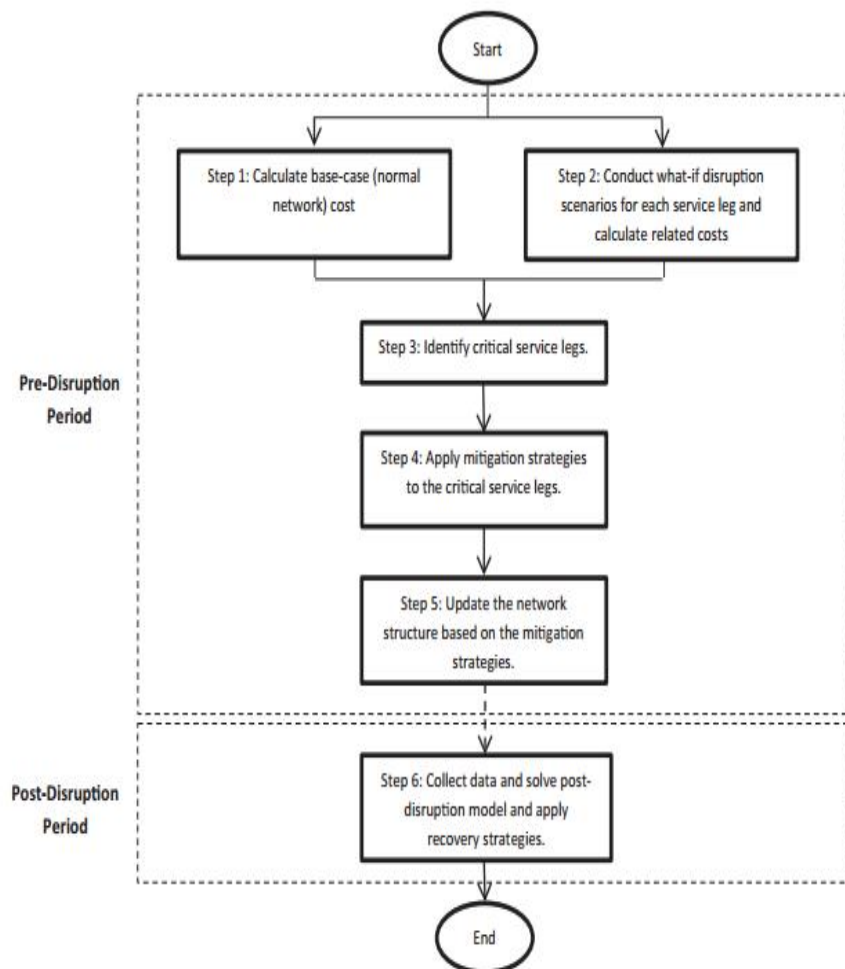
Η ανάλυση των ελαττωμάτων γεωμετρίας τροχιάς είναι κρίσιμη για την ασφαλή και αποτελεσματική σιδηροδρομική μεταφορά. Η διόρθωση του κατάλληλου αριθμού, τύπων και συνδυασμών ελαττωμάτων μπορεί αποτελεσματικά να μειώσει την πιθανότητα εκτροχιασμών. Στη μελέτη των He κ.α. (2014) προτείνεται ένα αναλυτικό πλαίσιο για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων για τη διόρθωση των ελαττωμάτων της γεωμετρίας της γραμμής. Οι συγγραφείς διαμορφώνουν και ενοποιούν τα ακόλουθα τρία μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα:

- (1) Μοντέλο επιδείνωσης της τροχιάς για την καταγραφή της διαδικασίας υποβάθμισης διαφόρων τύπων ελαττωμάτων.
- (2) Μοντέλο επιβίωσης για την αξιολόγηση του δυναμικού κινδύνου εκτροχιασμού ως συνάρτηση των ελαττωμάτων της τροχιάς και των συνθηκών κυκλοφορίας.
- (3) Μοντέλο βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό εργασιών επιδιόρθωσης της τροχιάς με δύο διαφορετικούς στόχους: μια διατύπωση βασισμένη στο κόστος (CF) και μια σύνθεση βασισμένη στον κίνδυνο (RF).

Οι προσεγγίσεις αυτές εφαρμόζονται για την επίλυση του βέλτιστου προβλήματος προγραμματισμού επιδιόρθωσης σε μια πραγματική σιδηροδρομική εφαρμογή, αποδεικνύοντας ταυτόχρονα ότι είναι αποτελεσματικότερα σε σύγκριση με υφιστάμενες στρατηγικές που ισχύουν σήμερα.

Στον προγραμματισμό για την επιδιορθωτική συντήρηση εντάσσεται και η έρευνα των Azad κ.α. (2016) οι οποίοι παρουσίασαν μεθοδολογία βελτιστοποίησης για την επισκευή των αστοχιών στα τμήματα εξυπηρέτησης και στις υπηρεσίες του τρένου. Έλυσαν ένα μοντέλο δικτύου βελτιστοποίησης για κάθε τμήμα για να αξιολογηθούν πιθανά σενάρια, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν σε προγνωστικό μοντέλο αναγνώρισης των κρίσιμων παραγόντων ζημιάς και των σχετικών στρατηγικών επιδιόρθωσης. Η τεχνική της προσθήκης ευέλικτης ή πλεονάζουσας χωρητικότητας στο δίκτυο λήφθηκε σκόπιμα υπόψη ώστε να είναι καλυμμένοι έναντι του κόστους και των επιπτώσεων αν εμφανιστεί κάποια αστοχία ενώ τονίζεται ότι πρέπει να δοθεί προσοχή στο «ισοζύγιο» του κόστους επιδιόρθωσης και βλάβης. Έπειτα από την ανάλυση, έγινε κατανοητή η σημασία της αποδοχής μιας μικρής αύξησης στο κόστος προληπτικής συντήρησης, η οποία με τη σειρά της θα αυξήσει την ανθεκτικότητα του δικτύου καθιερώνοντας διαφορετικές σιδηροδρομικές

διαδρομές και εναλλακτικές συνδέσεις γύρω από τα κρίσιμα τμήματα. Για την εκτίμηση του κόστους μετά τη ζημιά πραγματοποιήθηκε παλινδρόμηση μεταξύ βέλτιστου φόρτου και συχνότητας δρομολογίων που χρησιμοποιούν τμήματα πριν τη ζημιά. Διακρίνουν δύο περιόδους: πριν την εμφάνιση αστοχίας/pre-disruption (όπου εφαρμόζει βελτιστοποίηση με πιθανά σενάρια και κόστος για κάθε τμήμα με βέλτιστους φόρτους και αριθμούς τρένων βρίσκοντας τα κρίσιμα και εφαρμόζοντας στρατηγικές βελτίωσης) και μετά την εμφάνισή της/post-disruption period (όπου λύνει και εφαρμόζει μεθόδους επιδιόρθωσης των βλαβών). Δημιουργεί καινούργια δρομολόγια αφού πρώτα έχουν προσδιοριστεί τα κρίσιμα σκέλη-τμήματα με βάση το προγνωστικό μοντέλο και αυτό που αναφέρεται στο κόστος μετά τη ζημιά. Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνοψίζεται στο εξής σχεδιάγραμμα:



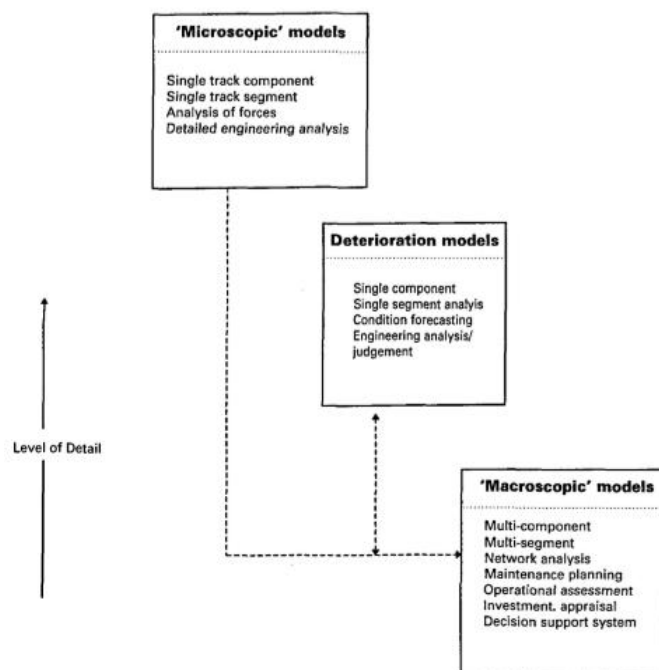
*Εικόνα 2.1.: Προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης των Nader Azad, Elkafi Hassini και Manish Verma (2016)*

### 2.2.3. Προγραμματισμός με βάση μοντέλα φθοράς

Στο μεταξύ η διενέργεια διαγνωστικών μετρήσεων για τον υπολογισμό του μοντέλου φθοράς της σιδηροδρομικής γραμμής συγκροτεί από μόνη της μία κατηγορία ερευνών επάνω στην οποία βασίζονται οι κυριότερες τακτικές συντήρησης.

Η αναφορά μας στην κατηγορία των προβλημάτων προγραμματισμού που βασίζονται σε μοντέλα φθοράς αρχίζει από την έρευνα των Ferreira και Murray (1997) οι οποίοι παρέθεσαν μία ανασκόπηση των μοντέλων φθοράς της γραμμής που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη, καθώς και τα συστήματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τη συντήρηση. Οι συγγραφείς επισημαίνουν, ακόμα, τα απαραίτητα στοιχεία ενός μοντέλου βελτιστοποίησης της συντήρησης καταλήγοντας στο ότι τρεις σημαντικές πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάπτυξη ενός τέτοιου υποστηρικτικού εργαλείου για τον προγραμματισμό της συντήρησης:

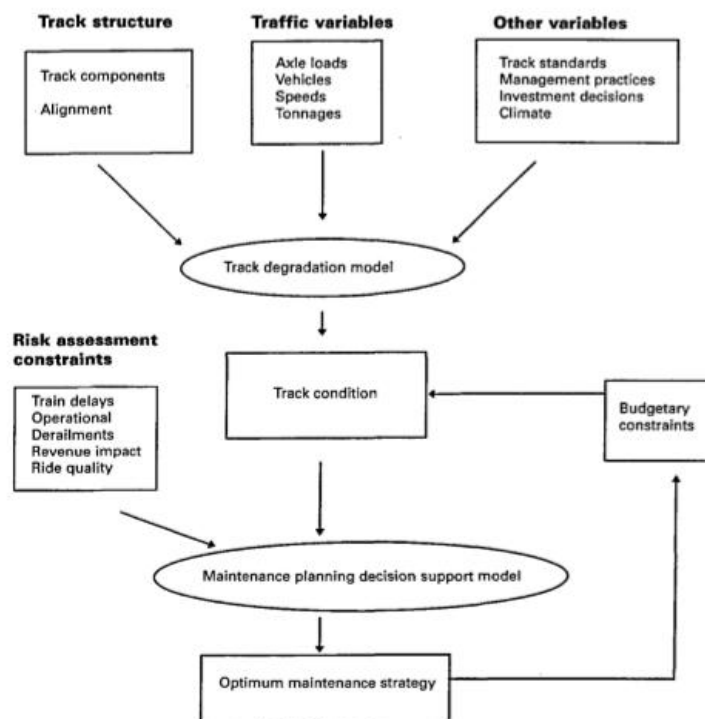
- A) Οι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υποβάθμιση της τροχιάς και συνεπώς το κόστος διόρθωσης ή ανανέωσης.
- B) Το πεδίο και οι δυνατότητες των υφιστάμενων μοντέλων υποβάθμισης και συντήρησης τροχιάς.
- Γ) Οι παράμετροι που πρέπει να συμπεριληφθούν στις διαδικασίες βελτιστοποίησης που να λαμβάνουν υπόψη τόσο μηχανικούς όσο και επιχειρηματικούς παράγοντες. Ιεραρχικά, κατηγοριοποιεί τα μοντέλα τροχιάς ως εξής:



*Εικόνα 2.2.: Μοντέλα τροχιάς σύμφωνα με τους Ferreira και Murray (1997)*

Αναφέρονται οι φυσικοί παράγοντες υποβάθμισης: δυναμικές επιδράσεις, ταχύτητες τρένων, φορτία αξόνων, καθώς και άλλοι παράγοντες. Καταγράφονται τα κυριότερα

μοντέλα υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τη συντήρηση της σιδηροδρομικής γραμμής μέχρι το 1997 (MARPAS, TMAS, TRACS, ECOTRACK) επάνω στα οποία βασίστηκε και η ανάπτυξη πολλών μεταγενέστερων αντίστοιχων εργαλείων. Οι δυναμικότητες μάλιστα του ECOTRACK να διευκολύνει το σύνθετο πρόβλημα της απόφασης του αν, που, πότε, που και πως θα παρέμβουμε, αποφασίζοντας τη βέλτιστη κατανομή των πόρων μειώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό κόστος παρουσιάστηκαν ολοκληρωμένες αργότερα (2001) από τον Stanislav Ivanovic και Coenraad Esveld. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα και τα συστήματα πρόβλεψης βασίζονται στα ιστορικά δεδομένα που προκύπτουν από τοπικές μετρήσεις της κατάστασης της γραμμής και της συντήρησης και του κόστους, των αναμενόμενων χρόνων ζωής των στοιχείων γραμμής και των τοπικά αναπτυσσομένων αλγορίθμων που προεκτείνουν την ημερομηνία μελλοντικού προγραμματισμού συντήρησης. Άλλα μοντέλα επικεντρώνονται κυρίως στις καταπονήσεις στις σιδηροτροχιές και στους στρωτήρες. Στα μοντέλα αυτά παράγονται δυναμικές καταπονήσεις για τον υπολογισμό των τάσεων σε ορισμένα από τα στοιχεία της γραμμής για παράγοντες όπως το φορτίο άξονα, η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας και η ολική χωρητικότητα της κυκλοφορίας. Οι καταπονήσεις στη συνέχεια σχετίζονται με την αναμενόμενη επιδείνωση της συνιστώσας της τροχιάς που απορρέει εν μέρει από τις ιστορικές τάσεις. Οι κυριότερες παράμετροι, σύμφωνα με τους L. Ferreira and M. H. Murray, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη βελτιστοποίηση της συντήρησης της τροχιάς συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα.



*Εικόνα 2.3.: Απαραίτητες παράμετροι δημιουργίας βέλτιστων στρατηγικών συντήρησης (L. Ferreira and M. H. Murray-1997)*

Το 2000 οι ίδιοι μαζί με τον Simson S. περιγράφουν ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για το σχεδιασμό συντήρησης γραμμής σε μεσοπρόθεσμο έως μακροπρόθεσμο επίπεδο, το οποίο προσομοιώνει τις επιπτώσεις των υποβαθμισμένων συνθηκών σιδηροδρομικής γραμμής και των συναφών εργασιών συντήρησης, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα που χρησιμοποιούν κυρίως συστήματα εμπειρογνομόνων. Το μοντέλο προσομοιώνει την υποβαθμισμένη κατάσταση τροχιάς χρησιμοποιώντας ένα υπάρχον μοντέλο υποβάθμισής της. Τέσσερα διακριτά υπομοντέλα αποτελούν την προσομοίωση:

- Το μοντέλο υποβάθμισης (ITDM), το οποίο υπολογίζει τις νέες συνθήκες τροχιάς για κάθε διαδοχικό διάστημα κυκλοφορίας.
- Το υπο-μοντέλο του λειτουργικών δαπανών του τρένου, το οποίο υπολογίζει τις καθυστερήσεις των αμαξοστοιχιών και το κόστος καθυστέρησης
- Το υπο-μοντέλο μη προγραμματισμένης συντήρησης που υπολογίζει τους ελαττωματικούς στρωτήρες που χρειάζονται αντικατάσταση
- Το υπο-μοντέλο προγραμματισμένης συντήρησης, το οποίο αποφασίζει για τις απαιτούμενες εργασίες συντήρησης και ενημερώνει τις συνθήκες διαδρομής μετά τη συντήρηση.

Τα δεδομένα συνθηκών της τροχιάς από αυτό το μοντέλο χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί εάν χρειάζονται περιορισμοί ταχύτητας σχετιζόμενοι με την ασφάλεια και ποιες είναι οι άμεσες εργασίες συντήρησης που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία των αμαξοστοιχιών. Το μοντέλο αποδίδει την καθαρή παρούσα αξία των οφελών της εφαρμογής μιας δεδομένης στρατηγικής συντήρησης, σε σύγκριση με ένα σενάριο βάσης. Η προσέγγιση του μοντέλου έχει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα τρέχοντα μοντέλα στη διερεύνηση των πιθανών σεναρίων. Ο μηχανικός της γραμμής μπορεί να αξιολογήσει τα πιθανά οφέλη από τη μείωση του λειτουργικού κόστους από την αναβάθμιση της υποδομής τροχιάς ή από τη χρήση βελτιωμένου εξοπλισμού συντήρησης. Μετά την περιγραφή των εισροών μοντέλων και των υποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν, η μελέτη ασχολείται με την προσομοίωση της συντήρησης της γραμμής και του κόστους λειτουργίας του τρένου με την πάροδο του χρόνου. Αναφέρονται επίσης τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου σε ένα τμήμα δοκιμαστικής διαδρομής με χρήση διαφόρων στρατηγικών συντήρησης.

Για το βραχυπρόθεσμο πάλι προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης της γραμμής οι Lake κ.α. ανέπτυξαν την ίδια χρονιά μοντέλο, με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνολικών δαπανών συντήρησης, που προβλέπει το διορισμό των συνεργείων συντήρησης σε κάθε εργασία που έχει προαποφασισθεί, επιτρέποντας διαφορετικά συνεργεία να ασχοληθούν με την ίδια ενέργεια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το μοντέλο προγραμματισμού συντήρησής τους, συμπεριλαμβάνοντας μια σειρά από περιορισμούς, λύθηκε με τη χρήση μιας ευρετικής τεχνικής σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, παρήχθη μια εφικτή λύση και στο δεύτερο αναπτύχθηκε μια επαναληπτική τεχνική που εξερευνά ένα σύνολο από λύσεις του προβλήματος, κινούμενη από τη μία λύση στην άλλη γειτονική λύση, για

να ληφθεί τελικώς μια βέλτιστη ή κοντά στη βέλτιστη λύση. Οι συγκεκριμένοι παρουσίασαν τα αποτελέσματα του μοντέλου τους για ένα πρόβλημα με είκοσι τμήματα γραμμής και μια περίοδο επταήμερου προγραμματισμού. Το μοντέλο τους προορίζεται εκτός από τη χρήση του για τον εκ των προτέρων σχεδιασμό και για την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο του προγράμματος που έχει ήδη βγει, σε περίπτωση απρόβλεπτης αλλαγής στη λειτουργία ή ακύρωσης τρένου

Οι Oyama και Miwa το 2006 ασχολήθηκαν όχι μόνο με το μοντέλο φθοράς αλλά και με της αποκατάστασης, διερευνώντας συγκεκριμένα τη διαδικασία μετάβασης από τη μία φάση στην άλλη. Πραγματοποίησαν αναλύσεις μαθηματικών μοντέλων για την απόκτηση ενός βέλτιστου προγράμματος σιδηροδρομικής συντήρησης επικεντρώνοντας την ανάλυσή τους στη διαδικασία συμπίεσης του έρματος. Αρχικά, επιχείρησαν να προβλέψουν τις αλλαγές στις επιφανειακές ανωμαλίες και να προβλέψουν τις επιδράσεις της λειτουργίας συντήρησης της τροχιάς. Έπειτα ανέπτυξαν ένα γραμμικό μοντέλο ολικού ακέραιου προγραμματισμού για να δώσει ένα βέλτιστο πρόγραμμα συμπίεσης του έρματος. Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει τόσο τα κόστη συντήρησης όσο και τις επιφανειακές ανωμαλίες που αντανακλούν την ποιότητα άνεσης και την ασφάλεια, δίνοντας τελικά ένα βέλτιστο πρόγραμμα συμπίεσης για όλο το χρόνο. Τέλος, εφάρμοσαν τα αποτελέσματα του μοντέλου για να λύσουν το βέλτιστο πρόβλημα προγραμματισμού της εν λόγω εργασίας συντήρησης και το συγκρίνουν με πραγματικά υπάρχοντα δεδομένα. Προκειμένου να επιλυθεί το μοντέλο προγραμματισμού σε έναν υπολογιστή ευρείας χρήσης, πρότειναν μια απλή διαδικασία για την απόκτηση ενός εφικτού χρονοδιαγράμματος συμπίεσης για προβλήματα οποιασδήποτε κλίμακας σε εύλογο χρονικό διάστημα. Επιβεβαίωσαν ακόμα ότι η διαδικασία είναι αποτελεσματική, όσον αφορά τον χρόνο υπολογισμού και την ακρίβεια της βέλτιστης λύσης, καθώς και ότι η λύση του μοντέλου τους έδωσε τυπική απόκλιση των επιφανειακών ανωμαλιών καλύτερη από εκείνες που είχαν καταγραφεί στο παρελθόν. Η απόκτηση ενός πρακτικά εφικτού χρονοδιαγράμματος συμπίεσης του έρματος με την επίλυση των μαθηματικών τους μοντέλων, τους οδήγησε στη διαπίστωση ότι τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν αποτελεσματικά και αρκετά χρήσιμα για τη βελτίωση των δραστηριοτήτων συντήρησης.

Με μέθοδο βελτιστοποίησης του προγραμματισμού της συμπίεσης του έρματος στα τρένα υψηλών ταχυτήτων ασχολήθηκαν και οι Quiroga & Schnieder το 2010, βασιζόμενοι σε ευρετικό αλγόριθμο ο οποίος βρίσκει ένα πολύ αναλυτικό πρόγραμμα, όπου κάθε παρέμβαση είναι εντελώς καθορισμένη. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να μεγιστοποιήσει μια αντικειμενική συνάρτηση που είναι η ποσοτική έκφραση των στόχων της διαδικασίας συντήρησης όπως έχουν προσδιοριστεί από την εταιρεία σιδηροδρόμων. Αρχικά βρίσκει ένα ανώτερο όριο για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και στη συνέχεια επιστρέφει την βέλτιστη εφικτή λύση που βρέθηκε. Η μέθοδος επικυρώνεται μέσω της εφαρμογής της στη γαλλική γραμμή υψηλής ταχύτητας TGV μήκους 240 km. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται δείχνουν ότι η τιμή της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε είναι πολύ κοντά στο ανώτερο όριο (η

διαφορά είναι μικρότερη από 1%), με χρόνο υπολογισμού μικρότερο από 1 δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας έναν συμβατικό υπολογιστή. Έτσι, οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι ο ευρετικός αλγόριθμος έχει ένα μεγάλο δυναμικό απόδοσης.

Στη διδακτορική εργασία του Iman Arasteh Khouy (2013) το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα πραγματικά ποσοστά της διαμήκου υποβάθμισης των διαφορετικών τμημάτων τροχιάς σαν συνάρτηση των τονοχιλιομέτρων/χρόνο και της παρατηρούμενης απόδοσης συντήρησης. Η μελέτη επανεξετάζει τα μοντέλα βελτιστοποίησης της υποβάθμισης και συντήρησης της γεωμετρίας της τροχιάς στη γραμμή σιδηρομεταλλεύματος στη βόρεια Σουηδία και συζητά πιθανούς λόγους της κατανομής των αστοχιών της τροχιάς σε περίοδο ενός έτους και τη στρατηγική συντήρησης των Σουηδικών μεταφορών σχετικά με τις μετρήσεις και αναφορές για τη βελτίωση της ποιότητας της σιδηροτροχιάς. Εισάγονται δύο προσεγγίσεις για την ανάλυση της γεωμετρικής υποβάθμισης στις αλλαγές λόγω δυνάμεων από την κίνηση του τρένου:

A) Οι καταγεγραμμένες μετρήσεις προσαρμόζονται στο σημείο διέλευσης και μετά η γεωμετρική σχετική υποβάθμιση των αλλαγών αξιολογείται χρησιμοποιώντας δύο προσδιοριστικές παραμέτρους: Ara και Smax

B) Προσδιορίζονται διάφορες γεωμετρικές παράμετροι για την εκτίμηση της υποβάθμισης σε κάθε μέτρηση ξεχωριστά.

Παρουσιάζεται μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της συντήρησης της γεωμετρίας της τροχιάς, καθορίζοντας τα όρια της οικονομικά αποδοτικής συντήρησης μέσα από τη δημιουργία μοντέλου κόστους. Το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη το χρόνο επιθεώρησης, το χρονικό ορίζοντα του σχεδιασμού συντήρησης μετά την επιθεώρηση, καθώς και τα κόστη σχετικά με την επιθεώρηση, συμπίεση και κίνδυνο ατυχημάτων λόγω κακής ποιότητας τροχιάς.

Οι Jonavonici κ.α. ανέλυσαν τη φθορά της τροχιάς στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου Σιδηροδρομικού Συστήματος Διαχείρισης της Συντήρησης. Η χρήση γενικών μοντέλων φθοράς επιτρέπει στους σιδηροδρόμους να εκτελούν μακροχρόνιες προσομοιώσεις της συμπεριφοράς των τροχιών, εξισορροπώντας αποτελεσματικά τη συντήρηση με την ανανέωση και την επιτευχθείσα ποιότητα με τα έξοδα των εργασιών τους, αποτρέποντας συνέπειες όπως διαταραχές της κυκλοφορίας, μη διαθεσιμότητα, κλπ. Μια πραγματικά βέλτιστη μακροπρόθεσμη ισορροπία, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση κόστους για τους σιδηροδρομικούς οργανισμούς, μπορεί να επιτευχθεί με την ενδυνάμωση αυτού του μοντέλου με την κοστολόγηση κύκλου ζωής και τις τεχνικές αριθμητικής βελτιστοποίησης μέσα σε ένα καλά δομημένο Σιδηροδρομικό Σύστημα Διαχείρισης της Συντήρησης. Η δομή τέτοιων συστημάτων και οι λειτουργίες που περιγράφηκαν το 2015 σε αυτή την έρευνα ενίσχυσαν τον ισχυρισμό ότι είναι απαραίτητα για τη σιδηροδρομική βιομηχανία. Η ανάπτυξη και χρήση τέτοιων συστημάτων υποστηρίζει πλήρως την υπό συνθήκες προσέγγιση της συντήρησης και ανανέωσης συνδέοντας όλα τα απαραίτητα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί για τα στοιχεία του σιδηροδρόμου από

την παρακολούθηση της κατάστασής τους, με το ιστορικό των εργασιών ανανέωσης και συντήρησης και την κατανομή των πόρων, μέσω μιας μοναδικής και εξελιγμένης αυτόματης διαδικασίας μοντελοποίησης της υποβάθμισης και του μηχανισμού σχεδιασμού των εργασιών που βασίζεται σε κανόνες. Έτσι, επιτρέπονται οι στοχευμένες εργασίες συντήρησης και ανανέωσης, διασφαλίζοντας ότι τα σωστά έργα θα διεξάγονται πάντα στις σωστές θέσεις, την κατάλληλη στιγμή και για τους σωστούς λόγους. Αυτό με τη σειρά του επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους, διατηρώντας παράλληλα πλήρη και συνεχή έλεγχο της ασφάλειας της κυκλοφορίας και της ποιότητας των στοιχείων της υποδομής. Τέλος, το Σιδηροδρομικό Σύστημα Διαχείρισης Συντήρησης επιτρέπει την προσομοίωση, δοκιμή και διερεύνηση των διαφόρων πολιτικών συντήρησης και ανανέωσης και τις συνέπειές τους.

Σε απλές υποθέσεις νόμων φθοράς βασίζεται από την άλλη, η έρευνα των Gaudry κ.α. (2016) οι οποίοι χρησιμοποιώντας στοιχεία από τους γαλλικούς σιδηροδρόμους (κόστος συντήρησης, αντικατάστασης, φόρτος κυκλοφορίας συρμών) αναπτύσσουν μοντέλο για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του κόστους συντήρησης και του κόστους αντικατάστασης των συστατικών μερών της σιδηροδρομικής επιδομής και το συσχετίζουν με το παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης. Σε αντίθεση με τις πολλές μελέτες συντήρησης που έχουν υλοποιηθεί και ασχολούνται με χωρικά συνεχείς εργασίες συντήρησης, ο βασικός οικονομικός στόχος των συγγραφέων εντοπίζεται στην βέλτιστη κατανομή των τρεχουσών και περιοδικών δαπανών συντήρησης και ανανέωσης στην ετήσιά τους κατανομή σε μεγάλα χωρισμένα τμήματα του δικτύου, καθώς και στην κοστολόγηση της υποδομής. Το άρθρο τους δείχνει ότι μπορούν ταυτόχρονα να βελτιστοποιηθούν η τρέχουσα συντήρηση και η συντήρηση ανανέωσης λαμβάνοντας υπόψη την εξυπηρέτηση που σχετίζεται με τη ποιότητα της τροχιάς και τη σχέση της με την κυκλοφορία και τα έξοδα συντήρησης. Στα συμπεράσματα προκύπτει πως η τροχιά της βέλτιστης πολιτικής συντήρησης αποτελείται από τρεις φάσεις. Στην πρώτη, αμέσως μετά την ανανέωση, η ανάγκη για τρέχουσα συντήρηση είναι μηδενική και το επίπεδο εξυπηρέτησης μειώνεται με την ταχύτητα που εξαρτάται από την κυκλοφορία. Στη δεύτερη φάση, η τρέχουσα συντήρηση είναι θετική και αυξάνεται ενόσω το επίπεδο εξυπηρέτησης παραμένει σταθερό ή ελαφρά μειώνεται. Στην τρίτη φάση, δηλαδή λίγο πριν την επόμενη ανανέωση, η τρέχουσα συντήρηση πάλι φτάνει στο μηδέν ενώ το επίπεδο εξυπηρέτησης μειώνεται ραγδαία. Η ύπαρξη αβεβαιότητας έχει πολύ μικρές συνέπειες.

Η εισαγωγή της αβεβαιότητας, ωστόσο, για τις μελλοντικές συνθήκες της τροχιάς εισάγεται καινοφανώς από τους Baldi κ.α. (2016) με το Στοχαστικό Πρόβλημα Τακτικής Σιδηροδρομικής Συντήρησης (STRMP). Οι μέχρι τότε μέθοδοι θεωρούν τις εργασίες συντήρησης ως ντετερμινιστικές και γνωστές εκ των προτέρων, γεγονός που δε συμβαίνει με το STRMP. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι μόνο πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών των τροχιών μπορεί να γίνει, οι εργασίες συντήρησης γίνονται στοχαστικές. Το STRMP βασίζεται σε έναν κυλιόμενο ορίζοντα, για κάθε μήνα του οποίου ένα προσαρμοζόμενο σχέδιο πρέπει να επιστρατευτεί. Κάθε τέτοιο



πρόγραμμα γίνεται ντετερμινιστικό, δεδομένου ότι αποτελείται από ένα συγκεκριμένο υποπρόβλημα του συνόλου STRMP. Ωστόσο, μια ακριβής ανάλυση του κάθε σχεδίου στη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα θα ήταν πάρα πολύ χρονοβόρα. Ως εκ τούτου μια ευρετική προσέγγιση μπορεί να παρέχει αποτελεσματικές λύσεις μέσα σε έναν λογικό υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται. Οι κύριες συνεισφορές της εργασίας των Baldi κ.α. περιλαμβάνουν νέες εξελίξεις στη μεθοδολογία λύσης, ένα γραμμικό μοντέλο για το ντετερμινιστικό υποπρόβλημα, τρεις αποτελεσματικές ευρετικές μεθόδους για την γρήγορη και αποτελεσματική επίλυση του κάθε ντετερμινιστικού υποπροβλήματος, εκτεταμένα υπολογιστικά αποτελέσματα ενώ ακόμα έδωσε τη δυνατότητα δημιουργίας και διαχείρισης ενός προσαρμοζόμενου πλάνου συντήρησης αντί ενός πάγια καθορισμένου. Χρησιμοποιήθηκαν: Java 8, CPLEX 12.5 solver, AFFD heuristic κλπ., γενετικός αλγόριθμος, καθώς και μοντέλο για το ντετερμινιστικό πρόβλημα DTRMP.

Στηριζόμενος σε προηγούμενη μελέτη του (2015), ο Guler περιγράφει μια νέα προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης και ανανέωσης της σιδηροδρομικής γραμμής μέσω γενετικών αλγορίθμων, παρέχοντας μια λύση στο δύσκολο πρόβλημα της διατήρησης της γραμμής στο απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας και του κόστους στο ελάχιστο δυνατό. Το σύστημα που αναπτύσσει υποστηρίζει τη διαχείριση των υπό συνθήκες εργασιών ανανέωσης και συντήρησης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς αντί της επιδιορθωτικής συντήρησης. Το σύστημα που αναπτύχθηκε πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα που εφαρμόζει τη συντήρηση όταν εμφανίζεται αυτή η ανάγκη η οποία υποδεικνύεται από έναν ή περισσότερους δείκτες (Condition-Based Maintenance). Χρησιμοποιεί δεδομένα μετρήσεων που συγκεντρώθηκαν από τη γραμμή και το σύστημα αναλύει τη γραμμή χρησιμοποιώντας μια περιεκτική βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει κανόνες λήψης αποφάσεων διαμορφωμένους από τους κατάλληλους ειδικούς της γραμμής. Η γεωμετρία, τα συστατικά της γραμμής (πχ. σιδηροτροχιές, έρμα), καθώς και οι οριακές τιμές για τη συντήρηση και ανανέωσή τους, αλλά και το κόστος για κάθε εργασία πχ. κόστος καθαρισμού έρματος (life-cycle-cost) καθορίζουν τους κανόνες απόφασης. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν δείχνουν ότι, με τη βέλτιστη επιλογή του πλήθους των εργασιών και του χρόνου διεξαγωγής τους, μπορεί να επιτευχθεί η καλύτερη λύση για τη συντήρηση και ανανέωση, δοθέντων κάποιων περιορισμών. Περισσότερες ακριβείς λύσεις μπορούν, μάλιστα, να ληφθούν με την αύξηση της ευαισθησίας των δεδομένων αναφοράς. Το σύστημα βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται έχει την ικανότητα να ανανεώνεται από μόνο του με την πάροδο του χρόνου ενώ οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν ορισμένους κανόνες ή να συμπεριλάβουν νέους ώστε να προσαρμόσουν το σύστημα στις ανάγκες της πραγματικής ζωής. Το εν λόγω σύστημα αφορά συμβατικές σιδηροδρομικές γραμμές με έρμα, όμως μια καλή εναλλακτική λόγω των χαμηλών απαιτήσεων που έχουν στην ανανέωση και τη συντήρηση, αποτελούν οι γραμμές με πλάκες σκυροδέματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην Τουρκία για τραμ, μετρό κλπ. με συνέπεια την ανάγκη για μελλοντική αναμόρφωσή του, ώστε να παρέχει ένα

συνδυαστικό πρόγραμμα εργασιών συντήρησης και ανανέωσης για διαφορετικούς τύπους κυκλοφορίας και υλικά κατασκευής.

Ακολουθεί πίνακας όπου συνοψίζονται οι ανωτέρω πηγές βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

**Πίνακας 2.2.:** Συγκεντρωτικός πίνακας των βιβλιογραφικών αναφορών κατά αύξουσα χρονολογική σειρά

Έτος	Συγγραφείς	Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Μεθοδολογία	Δεδομένα
1999	Cheung et al.	ανάθεση απαιτούμενων εργασιών	εργασίες συντήρησης	τεχνητή νοημοσύνη, τεχνική χαλάρωσης περιορισμών	αληθινά δεδομένα μετρό του Χονγκ-Κονγκ
1999	Higgins et al.	χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών, παρεμβολές στα προγραμματισμένα τρένα	συνεργεία συντήρησης, εργασίες συντήρησης	μοντέλο αέριου προγραμματισμού ευρετική μέθοδος αναζήτησης Tabu	αληθινά δεδομένα γραμμής στην Αυστραλία
2000	Lake et al.	κόστος εργασίας	ανάθεση, χρόνοι έναρξης, πιθανή διάσπαση εργασιών	μεταερευνητική (SA), αναζήτηση Tabu, τοπική αναζήτηση	θεωρητικά δεδομένα γραμμής
2000	Ferreira & Murray	Δαπάνες συναφείς με τη διέλευση της κυκλοφορίας	4 υπομοντέλα: νέες συνθήκες τροχιάς, καθυστερήσεις και χρόνοι καθυστερήσεων, ελαττωματικά συσσωματώματα στρωτήρων, εργασίες συντήρησης	προσομοίωση	αληθινά δεδομένα γραμμής (Κουίνσλαντ, Αυστραλία)
2006	Oyama & Miwa	βελτίωση της ποιότητας της τροχιάς	ομαδοποίηση τμημάτων & αμαξοστάσιο/τμήματα ↔ χρόνος	αέριος προγραμματισμός μικτός αέριος προγραμματισμός	αληθινά δεδομένα δικτύου
2006	Budai et al.	συνολικό κόστος (κόστος τμημάτων κατοχής, έξοδα συντήρησης, ποινές εκτέλεσης πρόωρων εργασιών)	μοναδικά έργα και εργασίες συντήρησης ρουτίνας, χρήση τροχιάς	μικτός αέριος προγραμματισμός δύο ευρετικές μέθοδοι	θεωρητικά δεδομένα δικτύου

Έτος	Συγγραφείς	Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Μεθοδολογία	Δεδομένα
2009	Budai et al.	συνολικό κόστος (κόστος τμημάτων κατοχής, έξοδα συντήρησης, ποινές εκτέλεσης πρόωρων εργασιών)	μοναδικά έργα και εργασίες συντήρησης ρουτίνας, χρήση τροχιάς	γενετικός αλγόριθμος, μιμητικός αλγόριθμος (SHC, SA, Tabu search), ευρετικός δύο φάσεων	θεωρητικά δεδομένα δικτύου
2009	Zhao et al.	όφελος συγχρονισμού εργασιών ανανέωσης σε ένα τμήμα	ανανέωση έρματος, στρωτήρων και σιδ/χιάς	γενετικός αλγόριθμος	θεωρητικά δεδομένα για γραμμή
2011	Andrade & Texeira	πολλαπλών στόχων: κόστος συντήρησης, κόστος καθυστέρησης	συμπίεση και ανανεώσεις	μεταευρετική (SA)	θεωρητικά δεδομένα δικτύου
2011	Quiroga et al.	ποιότητα τροχιάς	αμαξοστάσιο/τμήμα αρχής και τέλους	δομική ευρετική	αληθινά δεδομένα γραμμής
2013	Caetano & Texeira	πολλαπλών στόχων: μη-διαθεσιμότητα, κόστος κύκλου ζωής	συμπίεση, στρωτήρες και επιδιόρθωση και ανανεώσεις σιδ/χιάς	γενετικός αλγόριθμος	αληθινά δεδομένα γραμμής
2013a	Zhang et al.	συνολικό κόστος: ασφάλεια μεταφοράς, κόστος ωφέλιμης ζωής, κόστος συντήρησης, κόστος ταξιδιού	πρόγραμμα εργασιών συντήρησης, ομάδες εργασίας	γενετικός αλγόριθμος, PT δίκτυο	θεωρητικά δεδομένα δικτύου
2014	He et al.	συνολικό κόστος ή κίνδυνος εκτροχιασμού	επιλογή εργασίας και χρόνου	μικτό πρόγραμμα ακέрайου προγραμματισμού	αληθινά δεδομένα δικτύου
2014	Heinicke et al.	κόστος ταξιδιού και ποινή ορίου εξυπηρέτησης	ταξίδι/ανάθεση εργασίας	μικτό πρόγραμμα ακέрайου προγραμματισμού, χαλάρωση, περιορισμός των υπο-περιοδειών	θεωρητικά δεδομένα δικτύου
2014	Caetano & Texeira	κόστος κύκλου ζωής	εργασία, συνδυασμός τμημάτων	μικτό μοντέλο γραμμικού ακέрайου προγραμματισμού	αληθινά δεδομένα σιδ/κής γραμμής Πόρτο-Λισαβόνα

Έτος	Συγγραφείς	Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Μεθοδολογία	Δεδομένα
2016	Baldi et al.	συνολικό κόστος από τις προειδοποιήσεις και από τις ποινές λόγω αυτών που αναβλήθηκαν	προειδοποίηση	ευρετική	αληθινά δεδομένα δικτύου (σιδ/κό δίκτυο Gargano, Ιταλία)
2016	Gaudry et al.	κέρδη	βέλτιστη στρατηγική συντήρησης, χρονικός ορίζοντας	δυναμικός προγραμματισμός	αληθινά δεδομένα γαλλικών σιδηροδρόμων
2016	Azad et al.	κόστος λειτουργίας (πριν την αστοχία), κόστος (μετά την αστοχία)	δρομολόγια, βαγόνια, τρένα, σκέλη εξυπηρέτησης	παλινδρόμηση	αληθινά δεδομένα δικτύου (ΗΠΑ)
2016	Guler	κόστος κύκλου ζωής	εργασίες συντήρησης και επισκευής	(GA) γενετικός αλγόριθμος	αληθινά δεδομένα γραμμής τουρκικού σιδηρόδρομου

### 2.3. Σύνοψη βιβλιογραφίας

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ξεκινάει μέσα από μία καταγραφή των κυριότερων κατηγοριών προβλημάτων που σχετίζονται με τον προγραμματισμό της συντήρησης στο σιδηρόδρομο και συνεχίζει με την χρονολογική περιληπτική παράθεση των ερευνών που ανήκουν στις εξής κατηγορίες: «Προγραμματισμός έργου και εργασιών ανανέωσης», «Προγραμματισμός πόρων και χρονοδιαγράμματος εργασιών» και «Προγραμματισμός με βάση μοντέλα φθοράς», οι οποίες και προσομοιάζουν περισσότερο στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συνάγεται, λοιπόν, ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το ζήτημα προγραμματισμού των εργασιών συντήρησης και ανανέωσης στο σιδηρόδρομο με σκοπό τον αποτελεσματικότερο καταμερισμό των πόρων, των μηχανημάτων και του ανθρώπινου δυναμικού ανάγεται σε πρόβλημα μεικτού αέριου προγραμματισμού το οποίο συνήθως επιλύεται με γενετικές, ευρετικές ή μεταευρετικές μεθόδους. Συχνότερα επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση κάποιας οικονομικής παραμέτρου (πχ. κόστος κύκλου ζωής των σιδηροδρομικών στοιχείων ή κόστος συνόλου εργασιών) αλλά και κάποιας παραμέτρου χρονικής υπόστασης, όπως οι καθυστερήσεις, υπό τον όρο της ικανοποίησης ορισμένων περιορισμών. Κρίνοντας πως μακροπρόθεσμα επιφέρει σημαντικά χαμηλότερες δαπάνες, παρατηρείται η προτίμηση στον προγραμματισμό της συστηματικής προληπτικής συντήρησης και έγκαιρης ανανέωσης αντί της υπό συνθήκες προληπτικής και επιδιορθωτικής συντήρησης. Με το πέρασμα των χρόνων έχει δοθεί έμφαση στον αυτοματισμό για τον βέλτιστο προγραμματισμό, εφόσον αποτελεί μια πιο σίγουρη, πιο συμφέρουσα και λιγότερο χρονοβόρα διαδικασία από τη συμβατική χειροκίνητη που βασίζεται μόνο στην εμπειρογνομosύνη των ειδικών. Πολύ σοβαρά, επίσης, λαμβάνεται υπόψη η σταδιακή φθορά που υφίσταται η τροχιά και τα συστατικά της μέρη και γίνεται προσπάθεια πρόγνωσης της υποβάθμισής της για τον καθορισμό των κανόνων απόφασης κατά τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού της συντήρησης και ανανέωσης της. Παρόλο μεν που οι στρωτήρες, το έρμα και η τροχιά ακολουθούν διαφορετικές καμπύλες φθοράς, έχει επιχειρηθεί η ταυτόχρονη μεταχείριση του προγραμματισμού τους. Έπειτα από την εκτενή ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας προέκυψε ότι τα σημεία στα οποία συναντάμε κενό στη βιβλιογραφία έχουν να κάνουν κυρίως με το γεγονός ότι δεν έχουν υλοποιηθεί έρευνες αυστηρά εστιασμένες στον μητροπολιτικό σιδηρόδρομο (Μετρό), στον οποίο μάλιστα απουσιάζει το έρμα, και με το ότι οι περισσότεροι συγγραφείς έχουν βασικώς επικεντρωθεί στον προγραμματισμό της τακτικής προληπτικής συντήρησης (επιθεωρήσεις κλπ.) όχι τόσο στο βέλτιστο προγραμματισμό της επιδιόρθωσης των αστοχιών που βασίζεται σε κανόνες προτεραιότητας και του προγραμματισμού των εργασιών ΥΣΠΣ (Υπό Συνθήκες Προληπτική Συντήρηση).

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλων προγραμματισμού, μέσω των οποίων επιλύονται προβλήματα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση σε προβλήματα γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού, στα οποία στηρίχθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία με στόχο τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των ενεργειών συντήρησης στο μετρό.

##### 3.1.1. Θεωρία γραμμικών μοντέλων προγραμματισμού

Στο θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας συμπεριλαμβάνεται κομμάτι της θεωρίας από το βιβλίο με τίτλο “Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς” με συγγραφείς τους Μ.Γ Καρλαύτη και Ν.Δ. Λαγαρό που εκδόθηκε το 2010. Στο βιβλίο αυτό αναπτύσσονται μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης στηριζόμενες στις αρχές του γραμμικού προγραμματισμού.

Το μαθηματικό πρότυπο του Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming L.P.) επιλύει το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού κάτω από περιορισμούς που είναι γραμμικοί όροι, επιδιώκοντας να βελτιστοποιήσουν (μεγιστοποιήσουν ή ελαχιστοποιήσουν) μία αντικειμενική συνάρτηση. Κατά το μαθηματικό πρότυπο γραμμικού προγραμματισμού πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της αναλογικότητας, της προσθετικότητας, της διαιρετότητας και της βεβαιότητας.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος περιλαμβάνει αρχικά τον καθορισμό των μεταβλητών του, όπου σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ποσοτικοποιούν τις αποφάσεις που πρόκειται να ληφθούν, γι’ αυτό και ονομάζονται μεταβλητές απόφασης. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών χρειάζεται να προσδιοριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδοθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, το οποίο αποτελεί και το κριτήριο ή μέτρο απόδοσης του συστήματος που έχει ορισθεί. Η συνάρτηση της οποίας αναζητείται το μέγιστο ή το ελάχιστο αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Η ανάλυση Γραμμικού Προγραμματισμού έχει στόχο τον προσδιορισμό των τιμών των μεταβλητών απόφασης ή άγνωστων μεταβλητών  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

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

Ταυτόχρονα οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς

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

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

.....

$$a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n [\leq, =, \geq] b_n$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες μεταβλητές  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

#### Είδη λύσεων προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού

Ως λύση θεωρείται κάθε διάνυσμα  $\chi$  που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος εκτός ίσως από τους περιορισμούς μη αρνητικότητας. Τα διάφορα είδη λύσεων σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Εφικτή λύση (feasible solution): Ως εφικτή λύση θεωρείται κάθε διάνυσμα  $\chi$  που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, καθώς και τους περιορισμούς μη αρνητικότητας
- ✓ Βέλτιστη εφικτή λύση (optimal feasible solution): η εφικτή λύση η οποία βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος
- ✓ Εφικτή λύση ακραίου σημείου (corner point feasible solution): η εφικτή λύση που κείται σε κάποιο γειτονικό σημείο
- ✓ Γειτονικές ακραίες εφικτές λύσεις (adjacent corner point feasible solution): Δύο οποιοσδήποτε ακραίες εφικτές λύσεις, αρκεί η ευθεία που τις ενώνει να αποτελεί εξίσωση ορίου για το χώρο εφικτότητας του προβλήματος
- ✓ Επαυξημένη λύση (augmented solution): Δεδομένου ενός προβλήματος με περιορισμούς ανισότητες, η λύση εκείνου του ισοδύναμου προβλήματος το οποίο έχει επαυξηθεί με μεταβλητές απόφασης, ώστε να μετατραπεί σε πρόβλημα με περιορισμούς ισότητας
- ✓ Βασική λύση (basic solution): κάθε ακραία επαυξημένη λύση, η συγκεκριμένη μπορεί να είναι εφικτή ή μη
- ✓ Βασική εφικτή λύση (basic feasible solution): Η βασική εκείνη λύση του προβλήματος της οποίας οι  $m$  βασικές μεταβλητές είναι μη αρνητικές και οι  $n-m$  μη βασικές μεταβλητές είναι όλες ίσες με το μηδέν. Μία βασική εφικτή λύση καλείται εκφυλισμένη (degenerated) εάν κάποιες από τις  $m$  βασικές μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή
- ✓ Εξισώσεις ορίων (boundary equations): Οι εξισώσεις ορίων ορίζουν ένα υπερεπίπεδο ή ένα  $n$ -διάστατο γεωμετρικό σχήμα που είναι το ανάλογο μιας ευθείας των δύο διαστάσεων ή ενός επιπέδου των τριών διαστάσεων και κατασκευάζονται από τις ανισώσεις των περιορισμών, αν αντικατασταθούν τα  $\leq, \geq$  με ισότητες. Προφανώς το όριο της εφικτής περιοχής ενός προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελείται από τις εφικτές λύσεις που ικανοποιούν μία ή περισσότερες εξισώσεις ορίων.

Ο αλγόριθμος SIMPLEX είναι η αλγεβρική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση μίας κατηγορίας προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού. Για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμός SIMPLEX πρέπει όλοι οι περιορισμοί να είναι ισότητες. Η

αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται σε ισότητα, θεωρώντας την ίση με το 0. Γενικά, ακολουθείται επαναληπτική μέθοδος προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού μέχρις ότου επιτευχθεί βέλτιστη λύση.

### 3.1.2. Ακέραιος Προγραμματισμός

Μία κατηγορία προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι ο ακέραιος προγραμματισμός ο οποίος βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού όπου οι τιμές των μεταβλητών που συμμετέχουν επιβάλλεται να είναι ακέραιες.

Κυριότερες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού:

#### 1) Μέθοδοι διακλάδωσης και ορίου (branch and bound)

Η λύση εδώ έρχεται ύστερα από τη λύση μιας σειράς υποπροβλημάτων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κλαδιά

#### 2) Τεχνικές περιορισμού του εφικτού χώρου (cutting planes)

Δημιουργία συμπληρωματικών ανισοτήτων για περιορισμό του χώρου των λύσεων ώστε το πρόβλημα να έχει ακέραιες μεταβλητές

#### 3) Μέθοδοι απαρίθμησης

Σε αυτές τις μεθόδους εντοπίζονται σύμφωνα με κάποια κριτήρια όλες οι εφικτές λύσεις και επιλέγεται αυτή που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση

#### 4) Διαμεριστικοί αλγόριθμοι

Επίλυση ενός μεικτού προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού μέσω της επίλυσης μιας σειράς προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού και προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού

#### 5) Αλγόριθμοι βασισμένοι στη θεωρία ομάδων (Gomory)

Ένα παράδειγμα προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού είναι εκείνο επιχειρήσεων που παράγουν προϊόντα σε ακέραιες ποσότητες όπως για παράδειγμα ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Με στόχο την μεγιστοποίηση των κερδών για τις επιχειρήσεις αυτές πρέπει να βρεθεί η ποσότητα παραγόμενων προϊόντων που θα επιφέρει αυτό το βέλτιστο αποτέλεσμα. Όπως είναι λογικό η παραγωγή μη ακέραιου αριθμού αυτών των ειδών δεν έχει καμία φυσική σημασία. Η στρογγυλοποίηση του αποτελέσματος επίσης είναι πολύ πιθανό να μην συμβαδίζει με τυχόν περιορισμούς που έχουν τεθεί όπως για παράδειγμα η διαθεσιμότητα ενός από τα δύο είδη υπολογιστών που η επιχείρηση θέλει να παράγει. Το ωράριο του ανθρώπινου δυναμικού μπορεί να είναι επίσης άλλος ένας περιοριστικός παράγοντας που θα πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο.

Στα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0-1» εισάγεται



αντικειμενική συνάρτηση η οποία είναι και η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, η οποία είναι ζητούμενο είτε να μεγιστοποιηθεί είτε να ελαχιστοποιηθεί.

Παρακάτω αναφέρονται δύο παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0-1», όπου στο ένα στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μαθηματικής συνάρτησης και στο άλλο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της μαθηματικής συνάρτησης.

Το πρώτο παράδειγμα αφορά στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα σε δύο δεδομένα κομβικά σημεία ενός δικτύου, για παράδειγμα ανάμεσα σε δύο πόλεις. Όλες οι πιθανές διαδρομές ανάμεσα σε αυτές τις δύο πόλεις απαιτούν την κατασκευή οδικών τμημάτων για τα οποία υπάρχει το αντίστοιχο κόστος κατασκευής.

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του ακέραιου προγραμματισμού και να βρεθεί η βέλτιστη διαδρομή η οποία θα είναι και η συντομότερη. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνει χρήση αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία θα εισαχθούν ως μεταβλητές τα δεδομένα κόστη της κατασκευής των οδικών τμημάτων αλλά και ο συντελεστής  $X_{ij}$  ο οποίος παίρνει τιμές 0 ή 1, 0 σε περίπτωση που δεν θα κατασκευαστεί το οδικό τμήμα και 1 σε περίπτωση που θα κατασκευαστεί το οδικό τμήμα. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το σύνολο όλων των αθροισμάτων των γινομένων των δύο παραπάνω μεταβλητών, κόστους και  $X_{ij}$ . Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης δεδομένου ότι η μία μεταβλητή αντιπροσωπεύει κόστη τα οποία πάντα ζητούμενο είναι να ελαχιστοποιηθούν.

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στην επένδυση αρχικού ποσού  $A$  σε  $n$  διαθέσιμες επενδύσεις. Εδώ ζητούμενο είναι να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης του αρχικού κεφαλαίου στις διάφορες επενδύσεις έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το κέρδος.

Πάλι το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια του ακέραιου προγραμματισμού εισάγοντας και πάλι αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζεται ως το σύνολο των αθροισμάτων των γινομένων δύο μεταβλητών. Η πρώτη μεταβλητή είναι όπως και στο πρώτο πρόβλημα η μεταβλητή  $X_{ij}$  η οποία παίρνει τιμές 0 ή 1 ανάλογα με το αν πραγματοποιείται η όχι η επένδυση και η δεύτερη μεταβλητή είναι η μεταβλητή που εκφράζει την απόδοση της επένδυσης. Στόχος στο δεύτερο πρόβλημα σε αντίθεση με το πρώτο είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς επιζητείται η μέγιστη δυνατή απόδοση των λιμένων.

### 3.1.3. Δυϊκό Πρόβλημα

Η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού βασίζεται στις εφήμερες συνθήκες που κυριαρχούν τη στιγμή κατά την οποία το μοντέλο του προβλήματος κατασκευάζεται και επιλύεται. Σε προβλήματα πραγματικών συνθηκών, τα διάφορα περιβάλλοντα αποφάσεων παραμένουν στατικά μόνο σε εξαιρετικά

σπάνιες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει η βέλτιστη λύση όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι του μοντέλου. Με το παραπάνω πρόβλημα ασχολείται η ανάλυση της ευαισθησίας η οποία παρέχει ικανές υπολογιστικές τεχνικές που βοηθούν στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης, η οποία προκύπτει από διάφορες αλλαγές που προκύπτουν στις παραμέτρους του μοντέλου. Η θεωρία της δυϊκότητας παρέχει έναν αλγεβρικό τρόπο αντιμετώπισης αυτού του σημαντικού πρακτικού προβλήματος. Το δυϊκό πρόβλημα (dual problem) είναι ένα πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού το οποίο καθορίζεται ντετερμινιστικά από το αρχικό ή πρωτεύον μοντέλο (primal or original problem) προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Η συσχέτιση των δύο προβλημάτων είναι τόσο απόλυτη ώστε αν προκύψει με κάποια τρόπο η βέλτιστη λύση του πρωτεύοντος, να επέρχεται με φυσιολογικό τρόπο και η λύση του δυϊκού προβλήματος και αντίστροφα. Το είδος της βελτιστοποίησης (max ή min), οι μορφές των ανισοτήτων των περιορισμών ( $\geq$ ,  $=$ ,  $\leq$ ), καθώς και το είδος των μεταβλητών προσδιορίζουν πλήρως το δυϊκό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί του πρωτεύοντος καθορίζουν τις μεταβλητές του δυϊκού, οι μεταβλητές του πρωτεύοντος καθορίζουν τους περιορισμούς του δυϊκού, η ίδια αντίθεση ισχύει και με τους συντελεστές μεταξύ των μεταβλητών του ενός και συντελεστών του άλλου. Τέλος, το είδος της βελτιστοποίησης που επιζητείται είναι επίσης αντίθετη στα δύο προβλήματα. Δηλαδή ένα πρωτεύον πρόβλημα μεγιστοποίησης μετατρέπεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης στο δυϊκό και αντίστροφα.

### 3.2. Ανάπτυξη Προτύπου

Για τη μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος είναι αναγκαίο να ορίσουμε το σύνολο των μεταβλητών, καθώς και την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του αναπτυσσόμενου προτύπου. Ορίζοντας:

- $C_i$ : κόστος κάθε ενέργειας που πραγματοποιείται
- $B$ : διαθέσιμος προϋπολογισμός
- $Z_{ij}$ : η εργασία  $i$  που πρέπει από τα δεδομένα να υλοποιηθεί στο τμήμα  $j$
- $I$ : το σύνολο των εργασιών συντήρησης  $i$
- $R \subseteq I$ : σύνολο ζευγών εργασιών  $i, p$  που είναι συμπληρωματικές
- $J$ : το σύνολο των τμημάτων της γραμμής  $j$
- $K$ : το σύνολο των ημερών του μήνα  $k$
- $H$ : το σύνολο των διαθέσιμων εργατοωρών σε μία ημέρα
- $h_i$ : απαιτούμενες εργατοώρες για την ολοκλήρωση μιας εργασίας  $i$
- $X_{ijk}$ : παίρνει την τιμή 1 αν η εργασία  $i$  πραγματοποιείται στο τμήμα  $j$  τη χρονική στιγμή  $k$  και 0 αν δεν πραγματοποιείται

- $E_j$ : η επιβατική κίνηση του τμήματος  $j$
- $G_{jk}$ : τόνοι που έχουν διέλθει από κάθε τμήμα γραμμής από την αρχή της λειτουργίας του μέχρι την ημέρα όπου έγινε η επισκευή.
- $M_j$ : η μέρα όπου πραγματοποιήθηκε η τελευταία επισκευή κάθε τμήματος
- $\Delta T_j$  η καθυστέρηση στον χρόνο διάνυσης κάθε τμήματος που οφείλεται σε εντολές για μείωση της ταχύτητας σε τμήματα της γραμμής

Προκύπτουν τα κάτωθι:

#### Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\min Z = \sum_{j \in J} \Delta T_j * E_j * M_j \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{ijk} + \sum_{j \in J} E_j \sum_{k \in K} G_{jk} * \sum_{i \in I} X_{ijk} \quad (3.1)$$

#### Περιορισμοί

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} * h_i \leq H, \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$Z_{ij} = \sum_{k=1}^K X_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} C_i * \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq B \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$X_{ijk} \geq X_{pjk}, \quad \forall k \in K, \forall i, p \in R, \forall j \in J \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} \leq 2 \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{αν η ενέργεια } i \text{ πραγματοποιηθεί στο τμήμα } j \text{ τη χρονική στιγμή } k \\ 0 & \text{αν η ενέργεια } i \text{ δεν πραγματοποιηθεί στο τμήμα } j \text{ τη χρονική στιγμή } k \end{cases} \quad (3.7)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν η ενέργεια } i \text{ πραγματοποιηθεί στο τμήμα } j \text{ τη χρονική στιγμή } k \\ 0 & \text{αν η ενέργεια } i \text{ δεν πραγματοποιηθεί στο τμήμα } j \text{ τη χρονική στιγμή } k \end{cases} \quad (3.8)$$

Η συνάρτηση (3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, στόχος της οποίας είναι ο βέλτιστος προγραμματισμός των εργασιών συντήρησης με την ελαχιστοποίηση της όχλησης των επιβατών, η οποία οφείλεται στις καθυστερήσεις των μετακινήσεών τους και έμμεσα στη φθορά της γραμμής που προκαλείται από τα φορτία διέλευσης των συρμών. Έτσι, ο ένας όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται στη χρονοκαθυστέρηση των επιβατών που οφείλεται σε εντολή για μείωση της ταχύτητας από τους υπεύθυνους συντήρησης της επιδομής σε ορισμένα

τμήματα και ο δεύτερος όρος στους τόνους που έχουν επιβαρύνει τα τμήματα μέχρι τη μέρα όπου πραγματοποιείται η εργασία συντήρησης. Επιδιώκεται έτσι η αμεσότερη διεξαγωγή των εργασιών ώστε να αρθούν οι προσωρινοί περιορισμοί ταχύτητας που προκαλούν την καθυστέρηση στους επιβάτες αλλά και να επιβαρυνθούν όσο το δυνατόν λιγότερο τα προβληματικά σημεία της γραμμής που παρουσιάζουν αστοχία, καθώς η υποβάθμιση σε αυτά με την επιπλέον καταπόνηση από τα φορτία θα ήταν πολύ ταχύτερη. Η φθορά της γραμμής από τις διελεύσεις των φορτίων επηρεάζει έμμεσα την όχληση των επιβατών, εφόσον πολύ χρησιμοποιημένη ράγα επιφέρει διαφόρων ειδών φθορές στα συστατικά μέρη του σιδηρόδρομου, όπως για παράδειγμα όταν δεν υπάρχει η κατάλληλη επαφή του συρμού με την τροχιά, γεγονός που συνεπάγεται μη ομαλή κίνηση του οχήματος, άρα και όχληση του επιβάτη.

Η εξίσωση (3.2) αναφέρεται στο σύνολο των ωρών εργασίας που καταλαμβάνουν οι επισκευές που πραγματοποιούνται μέσα σε μία ημέρα και οι οποίες δεν πρέπει να ξεπερνούν το σύνολο των διαθέσιμων σε αυτήν εργατοωρών.

Η εξίσωση (3.3) εξασφαλίζει πως οι εργασίες που απαιτείται να πραγματοποιηθούν, όπως δίνονται στα δεδομένα, θα προγραμματιστούν ακριβώς μία φορά μέσα στον χρονικό μας ορίζοντα.

Η εξίσωση (3.4) υποδεικνύει πως το συνολικό κόστος των εργασιών που προγραμματίζονται για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο δεν πρέπει να ξεπερνάει τον προϋπολογισμό που αντιστοιχεί σε αυτήν.

Ο περιορισμός (3.5) αναφέρεται στις συμπληρωματικές εργασίες και ορίζει πως μία εργασία (p) είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί αν δεν έχει γίνει κάποια άλλη (i). Η εργασία (i) μπορεί να πραγματοποιηθεί και μόνη της.

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.6) δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν περισσότερες από δύο εργασίες συντήρησης στο ίδιο τμήμα (j) την ίδια χρονική στιγμή (k).

Τέλος, οι εξισώσεις (3.7) και (3.8) καθορίζουν ότι οι μεταβλητές τόσο στα ζητούμενα όσο και στα δεδομένα αντίστοιχα θα είναι δυαδικές (binary).

## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

### 4.1. Στόχος

Σκοπός του δημιουργούμενου μοντέλου είναι ο βέλτιστος προγραμματισμός των εργασιών της συντήρησης στο μετρό της Αθήνας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης των επιβατών. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης συλλέγονται τα απαραίτητα στοιχεία και γίνονται οι κατάλληλες επιλογές και παραδοχές έτσι ώστε να προγραμματιστούν μια σειρά από επισκευές για να υλοποιηθούν στη διάρκεια ενός μηνός στα τμήματα των γραμμών 2 & 3 του μετρό.

### 4.2. Δεδομένα

Η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων έγινε από την εταιρία λειτουργίας μέσω της σταθερής τροχιάς ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε. η οποία προμήθευσε τεχνικά χαρακτηριστικά όπως το μήκος του δικτύου, το διαχωρισμό του σε τμήματα, το σιδηροδρομικό εξοπλισμό κλπ., καθώς και λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως επιβατική κίνηση, διάρκεια ταξιδιού μεταξύ διαδοχικών σταθμών, αναμονή στο σταθμό και διάρκεια διαδρομής και μέση ωριαία ταχύτητα ανά τμήμα, τα οποία παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα. Για μια πρώτη εικόνα των δεδομένων δημιουργήθηκαν διαγράμματα για τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο παρόν κεφάλαιο, παρατίθενται τα διαγράμματα για τα δεδομένα που αφορούν το χρόνο διάνυσης των τμημάτων, την ημερήσια επιβατική κίνηση και τα φορτία καταπόνησης από τις διελεύσεις συρμών σε κάθε τμήμα.



Διάγραμμα 4.1.: Χρόνοι διάνυσης τμημάτων γραμμής 2



Διάγραμμα 4.2.: Χρόνοι διάνυσης τμημάτων γραμμής 3

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι στο τμήμα «Χαλάνδρι-Δουκ. Πλακεντίας» απαντάται ο μεγαλύτερος χρόνος διάνυσης, γεγονός το οποίο οφείλεται στη συγκριτικά χαμηλή μέση ωριαία ταχύτητα διέλευσης του συρμού από αυτό. Η ανάλυση έπειτα έγινε με βάση τη διαφορά χρόνων διάνυσης υπό κανονικές συνθήκες (απεικονίζονται στα διαγράμματα 4.1. και 4.2.) και αυτών που επιβλήθηκαν από το αρμόδιο τμήμα λόγω προβλημάτων συντήρησης στην επιδομή.



Διάγραμμα 4.3.: Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό της γραμμής 2



**Διάγραμμα 4.4.:** Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό της γραμμής 3

Από τα παραπάνω διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για την εποπτικότερη παρουσίαση των δεδομένων της επιβατικής κίνησης, φαίνεται ότι ο σταθμός «Σύνταγμα» έχει την υψηλότερη ημερήσια επιβατική κίνηση. Ακολουθούν οι σταθμοί «Αμπελόκηποι», «Μοναστηράκι» και «Ευαγγελισμός», ενώ η χαμηλότερη ημερήσια επιβατική κίνηση απαντάται στους σταθμούς «Ελαιώνας», «Αργυρούπολη» και «Περιστέρη».

Ακόμα, δόθηκαν στοιχεία που υποδεικνύουν την κυκλοφορία των συρμών (φορτία σε τόνους) σε κάθε τμήμα που έχει καταγραφεί από την ημέρα έναρξης λειτουργίας έκαστου σταθμού, γεγονός που σχετίζεται άμεσα με τη φθορά που έχει υποστεί. Από τα στοιχεία αυτά μπορεί κανείς να εντοπίσει τα παλαιότερα τμήματα και άρα τα πλέον φθαρμένα και τα νεότερα τμήματα που είναι λιγότερο καταπονημένα από τα διερχόμενα φορτία.











**Διάγραμμα 4.5.:** Φορτία διέλευσης (σε τόνους) τμημάτων γραμμής από την αρχή λειτουργίας έως 07/04/2017

Διαπιστώνεται ότι τα τμήματα που βρίσκονται στην περιοχή γραμμής «Σύνταγμα-Εθν. Άμυνα» και «Σεπόλια-Σύνταγμα» είναι τα πιο επιβαρυνόμενα από τις διελεύσεις φορτίων συρμών. Το γεγονός αυτό εξηγείται εύλογα από την παλαιότητα των εν λόγω τμημάτων. Το νεότερο τμήμα γραμμής «Αιγάλεω-Αγ. Μαρίνα» είναι και το λιγότερο επιβαρυνόμενο από τις διελεύσεις συρμών.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένοι περιορισμοί λειτουργίας, που αναφέρονταν, κυρίως, σε εντολές μείωσης της ταχύτητας που υπαγορεύονται από κακή ή ελλιπή συντήρηση του συγκεκριμένου τμήματος της γραμμής (τροχιά ή αλλαγή). Εμπειρογνώμονες και ειδικοί του τμήματος συντήρησης της επιδομής υπογράμμισαν εργασίες που πρέπει απαραίτητως να υλοποιούνται μαζί ή διαδοχικά, ενώ παρείχαν και στοιχεία για τις απαιτούμενες ώρες εργασίες, το προσωπικό και κόστος για τις επιλεχθείσες ενέργειες συντήρησης, αλλά και τον ετήσιο/μηνιαίο προϋπολογισμό του τμήματος. Τέλος, παρέδωσαν λίστα με τις αστοχίες που βρίσκονται σε εκκρεμότητα μία δεδομένη χρονική στιγμή (συγκεκριμένα την 7/4/2017), καθώς και τα σημεία του δικτύου όπου εντοπίζονται, αλλά και τις ενέργειες που πρέπει να υλοποιηθούν για την επισκευή τους. Στο παράρτημα παρατίθενται ενδεικτικά επιβαλλόμενοι περιορισμοί λειτουργίας από το τμήμα συντήρησης, εκκρεμείς βλάβες στα τμήματα, οι συνολικές εργασίες συντήρησης που πραγματοποιούνται στο μετρό της Αθήνας, πίνακες χρεώσεων για τον υπολογισμό των ετήσιων εξόδων λειτουργίας του τμήματος συντήρησης κ.α.

### 4.3. Διαμόρφωση μοντέλου

Σε πρώτη φάση, από την υπάρχουσα βάση δεδομένων που διατηρούν ειδικοί επόπτες της συντήρησης των γραμμών 2 & 3 του μετρό, βρέθηκαν ποιες βλάβες-αστοχίες εκκρεμούν να επιδιορθωθούν και σε ποια σημεία του δικτύου. Από αυτές επιλέχθηκαν εκείνες που επιδέχονταν τα παρακάτω είδη εργασιών συντήρησης, οι οποίες σύμφωνα με τους υπεύθυνους συντήρησης είναι οι σημαντικότερες.

-  Κολλήσεις σιδηροτροχιών
-  Αντικατάσταση σιδηροτροχιάς
-  Λείανση σιδηροτροχιάς
-  Αναγόμευση καρδιάς
-  Λείανση αλλαγής
-  Αντικατάσταση καρδιάς
-  Αντικατάσταση βελόνας-αντιβελόνας
-  Αντικατάσταση στρωτήρων

Η ανάλυση επιλέχθηκε να γίνει για τα ξεχωριστά τμήματα μεταξύ σταθμών των γραμμών 2 & 3, εφόσον για αυτά υπολογίζονται οι επιβατικές κινήσεις και αυτός είναι ο συνηθέστερος τρόπος αντιμετώπισης ανάλογων προβλημάτων στη βιβλιογραφία. Έτσι, προέκυψαν τα εξής τμήματα μελέτης:



**Πίνακας 4.1.: Τμήματα γραμμών μετρό 2 & 3**

<b>Γραμμή 3</b>	<b>Γραμμή 2</b>
Αγ. Μαρίνα-Αιγάλεω	Ανθούπολη-Περιστέρι
Αιγάλεω-Ελαιώνας	Περιστέρι-Αγ. Αντώνιος
Ελαιώνας-Κεραμεικός	Αγ. Αντώνιος-Σεπόλια
Κεραμεικός-Μοναστηράκι	Σεπόλια-Αττική
Μοναστηράκι-Σύνταγμα	Αττική-Σταθμός Λαρίσης
Σύνταγμα-Ευαγγελισμός	Σταθμός Λαρίσης- Μεταξουργείο
Ευαγγελισμός-Μέγαρο Μουσικής	Μεταξουργείο-Ομόνοια
Μέγαρο Μουσικής- Αμπελόκηποι	Ομόνοια-Πανεπιστήμιο
Αμπελόκηποι-Πανόρμου	Πανεπιστήμιο-Σύνταγμα
Πανόρμου-Κατεχάκη	Σύνταγμα-Ακρόπολη
Κατεχάκη-Εθνική Άμυνα	Ακρόπολη-Συγγρού/Φιξ
Εθνική Άμυνα-Χολαργός	Συγγρού/Φιξ-Ν. Κόσμος
Χολαργός-Νομισματοκοπείο	Νέος Κόσμος-Αγ. Ιωάννης
Νομισματοκοπείο-Αγ. Παρασκευή	Αγ. Ιωάννης-Δάφνη
Αγ. Παρασκευή-Χαλάνδρι	Δάφνη-Αγ. Δημήτριος
Χαλάνδρι-Δουκίσσης Πλακεντίας	Αγ. Δημήτριος-Ηλιούπολη
	Ηλιούπολη-Άλιμος
	Άλιμος-Αργυρούπολη
	Αργυρούπολη-Ελληνικό

Ο προγραμματισμός των εργασιών επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μηνιαία σε ημερήσιο επίπεδο, δηλαδή για καθεμιά από τις τριάντα (30) μέρες του μήνα. Για κάθε τμήμα που χρειάζεται επιδιόρθωση έγινε και η αντίστοιχη αλλαγή της ταχύτητας του συγκεκριμένου τμήματος ως εντολή περιορισμού λειτουργίας. Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι παρόλο που για λόγους απλοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες ταχύτητες για τα τμήματα, η ταχύτητα διάνυσης στο κάθε ένα αυξομειώνεται από σταθμό σε σταθμό, με μέγιστη ταχύτητα υπό κανονικές συνθήκες 80χλμ./ώρα, διαμορφώνοντας ένα συγκεκριμένο προφίλ, η καμπύλη του οποίου παρατίθεται στο παράρτημα.

### 4.3.1. Αντικειμενική συνάρτηση

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκαν οι εξής αποφάσεις στην αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς.

Δημιουργήθηκαν δύο κατηγορίες πινάκων για κάθε έναν από τους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην κατηγορία πινάκων που αναφέρονται στην φθορά της γραμμής από τις διελεύσεις για κάθε κελί που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τμήμα και ημέρα του μήνα υπολογίστηκε για κάθε διαφορετικό είδος εργασίας το γινόμενο της μεταβλητής απόφασης επί τα φορτία που έχουν επιβαρύνει το τμήμα μέχρι την ημέρα του πίνακα που αντιστοιχεί σε αυτό με την επιβατική κίνησή του. Όμοια για τον δεύτερο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης στους πίνακες που αναφέρονται στα διάφορα είδη εργασιών υπολογίστηκαν τα γινόμενα των μεταβλητών απόφασης με την καθυστέρηση του τμήματος και την ημέρα στην οποία αντιστοιχεί το κάθε κελί. Η αντικειμενική συνάρτηση προέκυψε από το άθροισμα του περιεχομένου αυτών των κελιών και στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης της τιμής της, δοθέντων ορισμένων περιορισμών, προγραμματίστηκαν οι εργασίες στις διάφορες μέρες του μήνα ανάλογα με τις ανάγκες.

- Ο κάθε όρος της αντικειμενικής συνάρτησης σταθμίστηκε με την επιβατική κίνηση του κάθε σταθμού.
- Ο όρος των φορτίων στο βασικό σενάριο διαιρέθηκε με 10 ώστε να βρίσκεται σε παρόμοια τάξη μεγέθους με το δεύτερο όρο.
- Τα κελιά που αφορούν τον όρο της καθυστέρησης πολλαπλασιάστηκαν με την αντίστοιχη ημέρα πραγματοποίησης της εργασίας του τμήματος, καθώς θεωρήθηκε πως μετά την ημέρα ολοκλήρωσής της παύουν να λαμβάνονται υπόψη οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί της ταχύτητας.
- Οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης κανονικοποιήθηκαν, ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να έχει φυσικό νόημα και να εκφράζει επί της ουσίας την επιβάρυνση των επιβατών, η οποία οφείλεται στη φθορά της γραμμής λόγω διελεύσεων συρμών από τμήματα που εμφανίζουν αστοχία και στην καθυστέρηση του χρόνου διάνυσης ορισμένων τμημάτων που οφείλεται σε εντολές μείωσης της ταχύτητας του συρμού σε αυτά. Ο όρος λοιπόν της καθυστέρησης των επιβατών κάθε τμήματος διαιρέθηκε με τον μέγιστο (δυσμενέστερο) χρόνο διάνυσης που απαντάται από όλα τα τμήματα της γραμμής 2 & 3 καθώς και με τον αριθμό ημέρας 30 που είναι η αργότερη δυνατή χρονική στιγμή διεξαγωγής των εργασιών, ενώ ο όρος των φορτίων διαιρέθηκε με τη μέγιστη δυνατή τιμή επιβάρυνσης, η οποία προκύπτει αν η επισκευή γίνει όσο το δυνατόν αργότερα, δηλαδή την 30<sup>η</sup> μέρα, και για τα παλαιότερα τμήματα του δικτύου, τα οποία μπορούν να εντοπιστούν από το αντίστοιχο διάγραμμα διελεύσεων φορτίων από αυτά. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση έχει φυσικό νόημα, εκφράζοντας την επιβάρυνση των επιβατών που οφείλεται στην καθυστέρηση λόγω προβλημάτων συντήρησης και στη φθορά των γραμμών από τις διελεύσεις φορτίων.

- Όσον αφορά στην επιβατική κίνηση κάθε τμήματος, αυτή θεωρήθηκε απλουστευτικά ίση με το ημίθροισμα των ακραίων σταθμών του εκάστοτε τμήματος.
- Στη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. κεφ. 2.2.3.) ο προγραμματισμός των εργασιών συντήρησης βασίζεται σε μοντέλα φθοράς, τα οποία έχουν προκύψει κατά κύριο λόγο ύστερα από την εφαρμογή κάποιας μαθηματικής κατανομής στα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί έπειτα από τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της κατάστασης της τροχιάς. Ωστόσο, λόγω έλλειψης ανάλογων στοιχείων, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αξιοποιήθηκε η γνώση από σχετικές έρευνες ότι οι καμπύλες υποβάθμισης είναι κατά κανόνα γραμμικές, έτσι ώστε να μπορεί η φθορά να θεωρηθεί ότι αυξάνεται γραμμικά με τις διελεύσεις των συρμών ανά ημέρα.
- Οι μεταβλητές απόφασης είναι ακέραιες ψευδομεταβλητές της μορφής  $X_{ijk}$  που λαμβάνουν την τιμή 1 ή 0 ανάλογα με το αν μια συγκεκριμένη ενέργεια επισκευής πραγματοποιείται -ή όχι- αντίστοιχα σε δεδομένη χρονική στιγμή και καθορισμένο τμήμα. Ο δείκτης  $i$  αφορά το είδος της εργασίας, ο  $j$  το τμήμα της γραμμής και ο  $k$  τη χρονική στιγμή (στην περίπτωση μας την ημέρα του μήνα). Εφόσον πρόκειται για τρισδιάστατο πρόβλημα, οι μεταβλητές απόφασης αναπαριστώνται σε ένα δυσδιάστατο πίνακα ο κάθε ένας εκ των οποίων αντιπροσωπεύει και μία εργασία επισκευής  $i$ . Στον οριζόντιο άξονα του κάθε πίνακα απεικονίζεται η χρονική στιγμή  $k$  (ημέρες του μήνα), ενώ στον κατακόρυφο τα επιμέρους τμήματα γραμμής  $j$ .

#### 4.3.2. Περιορισμοί

Για τη διαμόρφωση των περιορισμών λήφθηκαν υπόψη κυρίως πληροφορίες που δόθηκαν από τους αρμόδιους της συντήρησης της επιδομής και σχετίζονται με τις δυνατότητες του δικτύου και της εταιρείας.

- ❖ Το κόστος όλων των εργασιών που προέρχεται από τις πληρωμές των συνεργείων, τον εξοπλισμό και τα υλικά που απαιτούνται για την επισκευή των αστοχιών σε ένα μήνα δεν πρέπει να υπερβαίνει τον προϋπολογισμό που προορίζεται γι' αυτά εντός του συγκεκριμένου χρονικού ορίζοντα (περιορισμός 3.4).
- ❖ Ο μηνιαίος προϋπολογισμός της εταιρείας που προορίζεται για τις συγκεκριμένες εργασίες συντήρησης προκύπτει αθροιστικά από τον αντίστοιχο πίνακα που παρείχε το τμήμα συντήρησης της επιδομής από τη ΣΤΑ.ΣΥ, ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα, συμπεριλαμβανομένου και των μισθών των 18 υπαλλήλων που συγκροτούν τα συνεργεία που δουλεύουν για τις επιλεγθείσες εργασίες, οι οποίοι πληρώνονται ωριαία ανάλογα με το επίπεδο της ιεραρχίας που κατέχουν για τις «καθαρές» 5 ώρες της νυχτερινής εργασίας τους, τις 22 από τις 30 μέρες του μήνα, οι οποίες μπορεί να είναι και Κυριακές (συγκαταλέγονται στις αργίες) και για τους 12 μήνες του χρόνου (παρόλο τον ένα μήνα αδειών που

δικαιούνται ανά χρόνο). Έτσι, για παράδειγμα, η πληρωμή ενός επιβλέποντα για ένα μήνα προκύπτει ως εξής:  $[17,97*(6/7)+29,95*(1/7)]*5*22*(12/11)=2361,77$  €. Όσον αφορά το αριστερό μέρος του περιορισμού, αυτό προκύπτει από το γινόμενο του συνολικού κόστους της κάθε εργασίας (εξοπλισμός, υλικά και κόστος εργασίας) επί το σύνολο των εργασιών που πραγματοποιούνται από κάθε κατηγορία.

- ❖ Μέσα σε μία μέρα σε κάθε τμήμα δεν επιτρέπεται να γίνουν πάνω από δύο εργασίες συνολικά (περιορισμός 3.6) καθώς πρακτικοί λόγοι δεν διευκολύνουν την δραστηριοποίηση παραπάνω από δύο συνεργείων στην ίδια περιοχή στο χρονικό διάστημα που διατίθεται για τις εργασίες (νύχτα-κατά τη διάρκεια μη λειτουργίας του δικτύου).
- ❖ Λαμβάνοντας υπόψη τις ώρες που απαιτεί η ολοκλήρωση της κάθε εργασίας, καθώς και τις εργασίες που πραγματοποιούνται συνολικά σε μία μέρα, θέτουμε τον περιορισμό οι συνολικές ώρες εργασίας σε μία μέρα να μην υπερβαίνει το συνολικό αριθμό διαθέσιμων εργατοωρών ο οποίος προκύπτει από το σύνολο των εργατών που είναι διαθέσιμοι και τις ώρες «καθαρής» εργασίας που διαθέτει ο καθένας για την υλοποίηση μιας εργασίας (περιορισμός 3.2). Στο σημείο αυτό γίνεται η παραδοχή ότι οι διαθέσιμες εργατοώρες προκύπτουν από τον ακόλουθο συλλογισμό: Από το σύνολο των εργαζομένων του τμήματος συντήρησης της επιδομής, οι υπάλληλοι που απασχολούνται για τις συγκεκριμένες εργασίες είναι 18 (από τους 32 που συνολικά είναι επιφορτισμένοι με εργασίες συντήρησης συνολικά). Οι εν λόγω εργαζόμενοι απασχολούνται με τις συγκεκριμένες εργασίες για μέρος του 8-ώρου της εργασίας τους και συγκεκριμένα για τις 5 ώρες που το δίκτυο βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Κάθε υπάλληλος εργάζεται σε πενήνθημερη βάση, δικαιούμενος ετήσια άδεια διάρκειας ενός μηνός το χρόνο. Δεδομένου ότι οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνται κάθε ημερολογιακή μέρα, ο διαθέσιμος αριθμός ωρών «καθαρής» απασχόλησης την ημέρα είναι  $18*5*(5/7)*11/12=58,9$  ώρες.
- ❖ Η αντικατάσταση της σιδηροτροχιάς είναι μια εργασία που χρειάζεται απαραίτητα μετά την κόλληση, η οποία όμως κόλληση μπορεί να υλοποιηθεί και μόνη της. Αντιστοίχως, η αναγόμωση της καρδιάς συνεπάγεται ότι έχει προηγηθεί η αντικατάσταση της βελόνας-αντιβελόνας, η οποία όμως με τη σειρά της γίνεται να πραγματοποιηθεί και εντελώς ανεξάρτητα. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον περιορισμό (3.5).
- ❖ Οι μεταβλητές απόφασης  $X_{ijk}$  στα δεδομένα, αλλά και στα ζητούμενα πρέπει να είναι δυαδικές (binary) «0, 1» ή αλλιώς ακέραιες (integer) και  $\geq 0$  ,  $\leq 1$  (περιορισμοί 3.7 και 3.8).
- ❖ Δίνεται επίσης προσοχή (περιορισμός 3.3) ώστε τα ζητούμενα, δηλαδή οι ανάγκες για επιδιόρθωση να είναι ίσα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά τη βελτιστοποίηση και μάλιστα ο περιορισμός αυτός να αφορά κάθε εργασία, ημέρα του μήνα και τμήμα της γραμμής ξεχωριστά, ώστε να μοιράζονται οι εργασίες ομοιόμορφα κατά τον προγραμματισμό.

#### 4.4. Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης

Αρχικά, από τον πίνακα των τρεχουσών αστοχιών που δίνεται από τους υπεύθυνους της ΣΤΑ.ΣΥ. συμπληρώνεται πίνακας των εργασιών που απαιτείται να πραγματοποιηθούν και στα τμήματα των γραμμών. Στον οριζόντιο άξονα του πίνακα βρίσκονται οι οκτώ κατηγορίες των εργασιών ενώ στον κατακόρυφο τα τριανταπέντε τμήματα γραμμής. Κάθε κελί συμπληρώνεται με 0 αν δεν απαιτείται στο συγκεκριμένο τμήμα να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη εργασία και με 1 αν χρειάζεται. Στη συμπλήρωση αυτού του πίνακα δίνεται προσοχή ώστε να τοποθετηθούν μονάδες σε όλες τις συμπληρωματικές εργασίες κάθε τμήματος. Αν, για παράδειγμα, στο τμήμα 2 χρειάζεται αντικατάσταση τότε “1” θα τοποθετηθεί στο κελί της αντικατάστασης για το εν λόγω τμήμα, καθώς και σε αυτό της κόλλησης.

Έπειτα δημιουργούνται οι πίνακες των μεταβλητών απόφασης και συγκεκριμένα οκτώ πίνακες, όπου έκαστος αντιπροσωπεύει και μία συγκεκριμένη εργασία. Οι διαστάσεις κάθε πίνακα είναι 30x35, εφόσον ενδιαφέρει ο μηνιαίος προγραμματισμός των ενεργειών συντήρησης σε καθημερινή βάση (γίνεται η παραδοχή ότι όλοι οι μήνες έχουν 30 μέρες) για τα 35 τμήματα της γραμμής.

Ακολουθεί η δημιουργία των εγγραφών στο υπολογιστικό φύλλο που είναι απαραίτητες για την έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Για τη διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης δημιουργούνται ξεχωριστά οι δύο όροι της. Υπολογίζεται πρώτα η επιβατική κίνηση των τμημάτων και δημιουργούνται 8 πίνακες για τον όρο των φορτίων και άλλοι 8 πίνακες για τους όρους της καθυστέρησης, κάθε ένας από τους οποίους είναι επίσης διαστάσεων 30x35.

Για τη δημιουργία του όρου της φθοράς υπολογίζονται γραμμικά με το χρόνο οι τόνοι που θα έχουν συνολικά επιβαρύνει το συγκεκριμένο τμήμα γραμμής μέχρι την κάθε ημέρα που αντιπροσωπεύεται από κάθε κελί. Έχοντας ως δεδομένα τον αριθμό διελεύσεων ανά ημέρα και γραμμή, καθώς και το φορτίο επιβάρυνσης της γραμμής από μία απλή διέλευση βρίσκονται για κάθε τμήμα οι συνολικοί τόνοι που έχουν επιβαρύνει τη γραμμή την κάθε μέρα του μήνα.

Για τη δημιουργία του όρου της καθυστέρησης απαιτείται ο υπολογισμός της διαφοράς του χρόνου διάνυσης του τμήματος μετά την επιβολή του περιορισμού μείον εκείνον που θα χρειαζόταν υπό κανονικές συνθήκες. Οι χρόνοι διάνυσης προκύπτουν από τις ταχύτητες και την απόσταση του αντίστοιχου τμήματος στο οποίο αυτή εφαρμόζεται. Είναι προφανές ότι σε κάθε τμήμα όπου υπάρχει εντολή για προσωρινό περιορισμό της ταχύτητας από το τμήμα συντήρησης, ο χρόνος διάνυσης θα είναι αυξημένος μέχρις ότου γίνει άρση της εντολής αυτής με την επισκευή της αντίστοιχης αστοχίας. Στα τμήματα για τα οποία υπάρχει τέτοια εντολή, είναι αναγκαίο να υλοποιηθούν εργασίες συντήρησης ανάλογα με το εμφανιζόμενο πρόβλημα. Οι περιορισμοί λειτουργίας αφορούν την προσωρινή μέγιστη ταχύτητα, η οποία από 80 χλμ./ώρα μειώνεται για παράδειγμα στα 50 χλμ./ώρα ανάλογα με τις

τοπικές ανάγκες. Ανάλογα βρίσκεται και η νέα μέση ωριαία ταχύτητα κάθε τμήματος κι έτσι προκύπτει ο χρόνος διάνυσης των τμημάτων με βάση αυτήν.

Έπειτα διαμορφώνονται οι περιορισμοί. Για τη διαμόρφωση του αριστερού μέλους του περιορισμού (3.4) χρησιμοποιείται το κόστος κάθε ενέργειας συντήρησης που είναι απόρροια του κόστους εργασίας, του εξοπλισμού και των υλικών για το σύνολο των οκτώ εργασιών που πραγματοποιούνται σε ένα μήνα. Για το δεξί του μέλος χρειάζεται ο υπολογισμός του μηνιαίου προϋπολογισμού της εταιρείας, με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.2.

Για τον περιορισμό (3.6) δημιουργείται πίνακας 30x35 σε κάθε κελί του οποίου περιέχεται το άθροισμα του πλήθους των εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί τη συγκεκριμένη μέρα στο κάθε τμήμα.

Για τον περιορισμό (3.2) των εργατοωρών χρειάζεται ο υπολογισμός για καθεμία από τις 30 ημέρες του μήνα του συνόλου των γινομένων των ωρών απασχόλησης της κάθε εργασίας με τον αριθμό όσων από την κάθε κατηγορία πραγματοποιήθηκαν σε μία μέρα καθώς και των εργατών που δούλεψαν για αυτές. Οι συνολικές διαθέσιμες εργατοώρες υπολογίστηκαν σε ξεχωριστό κελί ως εξής:  $5*18*(5/7)*(11/12)=58,9$  ώρες, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, εφόσον 18 είναι οι εργάτες οι οποίοι προορίζονται για τις εργασίες που έχουν επιλεγεί για τις ανάγκες της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας, καθένας από τους οποίους εργάζεται στο πεδίο πέντε ώρες τις μέρες της εβδομάδος εκτός σαββατοκύριακου και δικαιούται συνολικά ένα μήνα άδεια το χρόνο.

Για τον περιορισμό (3.5) χρειάζεται να δοθούν στο μοντέλο οι εντολές για τους πίνακες των εργασιών που πραγματοποιούνται συνδυαστικά, ώστε με τη δημιουργία των κατάλληλων ανισοτήτων να ληφθεί υπόψη ότι ορισμένες εργασίες προϋποθέτουν απαραίτητως και την υλοποίηση κάποιων άλλων. Για την αντικατάσταση και την κόλληση σιδ/χιών δίνεται ο περιορισμός κάθε κελί της κόλλησης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο ( $\geq$ ) από το αντίστοιχο κελί της αντικατάστασης, γεγονός που σημαίνει ότι αν πραγματοποιηθεί αντικατάσταση σιδηροτροχιών θα πρέπει υποχρεωτικά να γίνει την ίδια μέρα και η κόλλησή τους. Ομοίως, το περιεχόμενο κάθε κελιού του πίνακα της αντικατάστασης της βελόνας-αντιβελόνας ορίστηκε να είναι μεγαλύτερο ή ίσο ( $\geq$ ) με το αντίστοιχο κελί του πίνακα της αναγόμενης καρδιάς και επομένως αν υπάρχει η ανάγκη για αναγόμενη και συνεπώς αντικατάσταση καρδιάς, αυτές να προγραμματίζονται την ίδια μέρα εφόσον εξάλλου το OpenSolver δουλεύει κελί προς κελί. Η αντικατάσταση βελόνας-αντιβελόνας όπως και η κόλληση δύναται να πραγματοποιηθούν και μόνες τους αν έτσι δίνονται από τα δεδομένα, εν αντιθέσει με την αντικατάσταση σιδηροτροχιάς και την αναγόμενη καρδιάς που αν υπάρχουν στα δεδομένα μόνες τους, το πρόβλημα εύλογα δεν βρίσκει εφικτή λύση.

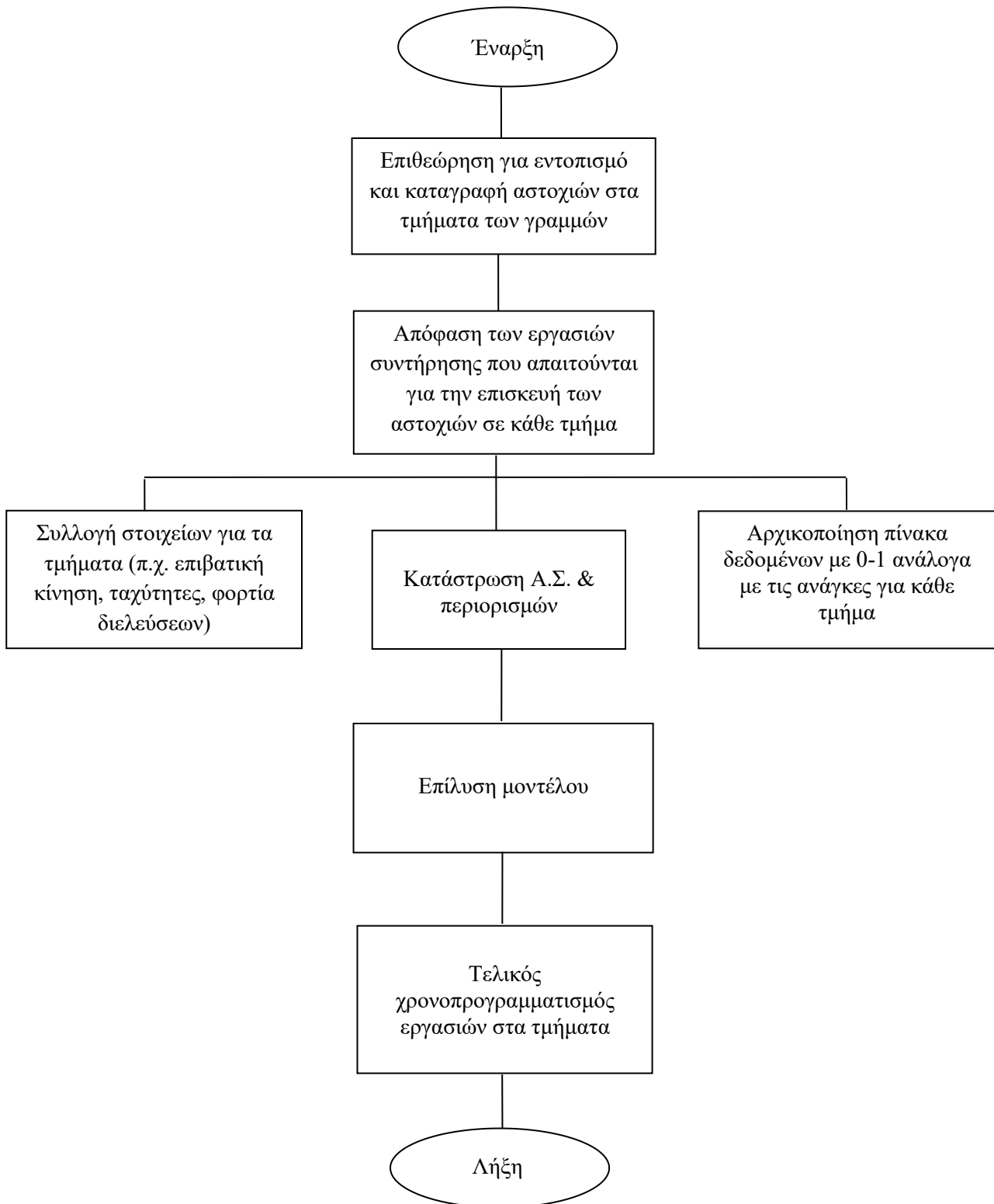
Κατά τον ορισμό των μεταβλητών απόφασης στη δημιουργία του μοντέλου ως δυαδικές, η μηχανή επίλυσης εμφανίζει σφάλμα μη γραμμικότητας. Το πρόβλημα αυτό διορθώνεται με τον ορισμό των μεταβλητών ως ακέραιων και  $\leq 1, \geq 0$ .

Είναι μάλιστα εμφανές ότι δεν είναι δυνατόν να προγραμματιστούν παραπάνω εργασίες από όσες είναι αναγκαίες να πραγματοποιηθούν. Επομένως, οι συνολικές

εργασίες που προγραμματίζονται μετά τη βελτιστοποίηση πρέπει να είναι το πολύ ίσες με αυτές που φαίνεται από τα δεδομένα ότι χρειάζονται. Ωστόσο, επειδή έχουμε αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης στην περίπτωση που στους περιορισμούς χρησιμοποιηθεί η ανισότητα:

$$Z_{ij} \geq \sum_{k=1}^K X_{ijk} \quad \forall i, j$$

το πρόγραμμα μηδενίζει όλες τις μεταβλητές απόφασης στην προσπάθεια απόδοσης του ελάχιστου δυνατού αποτελέσματος με αποτέλεσμα να μην προγραμματίζεται καμία εργασία. Επομένως, περιορίσαμε το πρόγραμμα ώστε οι εργασίες που απαιτούνται στα ζητούμενα να είναι ακριβώς ίσες με αυτές που προγραμματίζονται, να προγραμματίζονται, δηλαδή, ακριβώς μία φορά μέσα στο μήνα.



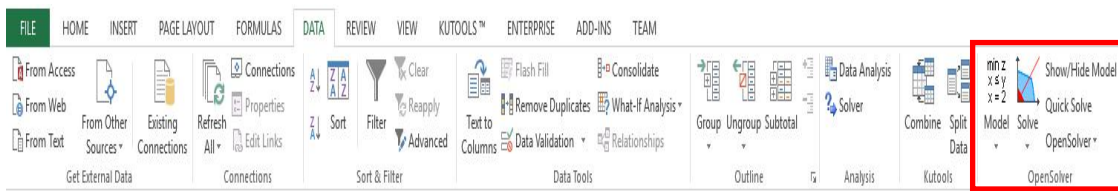
*Διάγραμμα 4.6.: Διάγραμμα ροής αναπτυσσόμενου μοντέλου*



#### 4.5. Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel

Το μοντέλο βελτιστοποίησης και η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκουν εφαρμογή μέσω εργαλείου προγραμματισμού σχεδιασμένο για το Microsoft Excel. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται Open Solver και είναι βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και είναι σχεδιασμένο για την επίλυση μεγάλων γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Δεν υπάρχουν τεχνητοί περιορισμοί στην εφαρμογή του συγκεκριμένου εργαλείου και συνεπώς ο αριθμός των δεδομένων που εισάγονται στο πρόβλημα μπορεί να είναι πολύ μεγάλος.

Το εργαλείο Open Solver εισάγεται στο Microsoft Excel ως προσθήκη κάτω από το Data Section. Η προσθήκη του εργαλείου φαίνεται στο παρακάτω εικονίδιο:



*Εικόνα 4.1.: Προσθήκη Open Solver στο Microsoft Excel*

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το μοντέλο βελτιστοποίησης έτσι όπως εμφανίζεται στο Open Solver. Το Open Solver επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, μεγιστοποιώντας, ελαχιστοποιώντας ή ορίζοντας μια συγκεκριμένη τιμή την οποία είναι επιθυμητό να πάρει η αντικειμενική συνάρτηση. Οπότε, το objective cell αντιστοιχεί στο κελί εκείνο που περιέχει τον τύπο της αντικειμενικής συνάρτησης. Δίπλα από το objective cell εμφανίζονται τρεις επιλογές μεγιστοποίησης, ελαχιστοποίησης και ορισμού συγκεκριμένης τιμής.

Κάτω από το objective cell υπάρχουν τα variable cells. Τα variable cells σε αντίθεση με το objective cell που αντιστοιχεί σε ένα κελί και μπορεί να πάρει μόνο μία τιμή (μέγιστη, ελάχιστη ή καθορισμένη) αντιστοιχούν σε όλα εκείνα τα κελιά στο excel τα οποία περιέχουν τις μεταβλητές του προβλήματος των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται ανάλογα με την επίλυση του μοντέλου, δηλαδή τα  $X_{ijk}$ . Στο πρόβλημά μας έχουμε 8400 μεταβλητές απόφασης (8 είδη εργασιών\*35 τμήματα γραμμής\*30 μέρες του μήνα). Στα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού μετά την επίλυση του μοντέλου οι μεταβλητές αυτές παίρνουν τιμές 0 ή 1.

Τέλος στο μοντέλο εισάγονται οι περιορισμοί κάτω από την υπόδειξη constraints. Οι περιορισμοί αντιστοιχούν στα κελιά των μεταβλητών  $X_{ijk}$  για τα οποία είναι επιθυμητός ο ορισμός μίας διαφορετικής συνθήκης από εκείνη αυτή που ισχύει για όλα τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα είναι επιθυμητό μία συγκεκριμένη ενέργεια συντήρησης να προηγείται μίας άλλης. Παρακάτω φαίνεται πώς στήνεται πρακτικά το μοντέλο στο Open Solver για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί επιδιώκεται ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης

καθώς σε αυτή εισάγονται οι χρόνοι διάνυσης των τμημάτων και η φθορά της γραμμής συναρτήσε των φορτίων που την έχουν καταπονήσει από την αρχή της λειτουργίας κάθε τμήματός της. Έτσι το objective cell πρέπει να λάβει μετά την επίλυση του excel solver την ελάχιστη δυνατή τιμή.

*Εικόνα 4.2.: Μοντέλο Βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου προβλήματος στο Open Solver*

Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών και πατώντας αρχικά την επιλογή Save Model, ώστε να αποθηκευτεί το δημιουργηθέν μοντέλο κι έπειτα την επιλογή Solve, με τη βοήθεια του OpenSolver επιλύθηκε το πρόβλημα εφαρμόζοντας μία επαναληπτική μαθηματική διαδικασία ώστε τα κελιά που αντιστοιχούν στα  $X_{ijk}$  να παίρνουν τις βέλτιστες τιμές. Μετά την ενεργοποίηση της εντολής Solve οι πίνακες με τις μεταβλητές απόφασης συμπληρώνονται με 0 ή 1 και το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνει τη βέλτιστη τιμή ελαχιστοποίησης.

#### 4.6. Επίλυση σεναρίων και αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης

Προκειμένου να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, το μοντέλο βελτιστοποίησης στο OpenSolver επιλύεται για διάφορα σενάρια με σκοπό αφενός να δειχθεί ότι το μοντέλο που κατασκευάστηκε

δουλεύει αποτελεσματικά και αφετέρου η επίδραση που έχουν στον τελικό βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης αλλά και στην επιβάρυνση των επιβατών επιμέρους αλλαγές στους παράγοντές του.

Εφαρμόστηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια που το πρώτο αφορά τους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, το δεύτερο τη ζήτηση, δηλαδή τις αναγκαίες εργασίες προς επισκευή, το τρίτο τον όρο της καθυστέρησης και το τέταρτο τον όρο της φόρτισης των γραμμών από τη διέλευση των συρμών. Για κάθε ένα από αυτά τα τέσσερα σενάρια, το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του OpenSolver για βαθμιαία αύξηση των προσδιοριστικών παραγόντων που αφορούν. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε έχοντας ως βάση μοντέλο με ίση βαρύτητα 0,5/0,5 στους δύο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, μία απαιτούμενη εργασία συντήρησης σε κάθε τμήμα των γραμμών (2 υπήρξαν μόνο στην περίπτωση συμπληρωματικών εργασιών που η μία δε δύναται να υλοποιηθεί ποτέ μόνη της), ευλόγως μειωμένη ταχύτητα σε κάθε τμήμα γνωστού μήκους κατά το δοκούν, ημερήσιες διελεύσεις συρμών, άρα και συνολικά φορτία ανά ημέρα, και επιβατική κίνηση που δόθηκε από τη ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε..

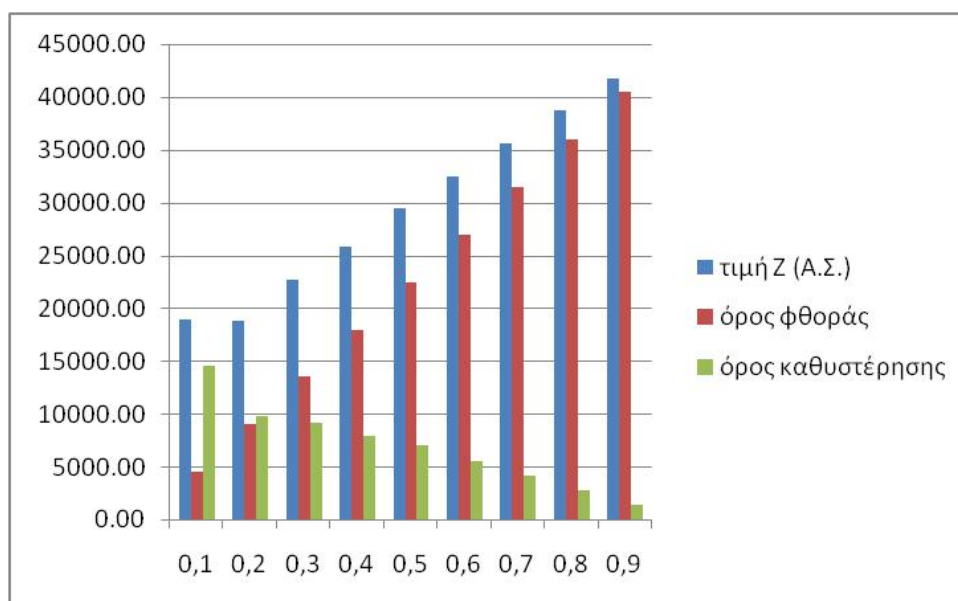
Αυτές οι επιλύσεις καθιστούν εφικτή τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών σεναρίων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, όπως για παράδειγμα ποιο σενάριο είναι πιο αποδοτικό. Λογικό είναι να επιδιώκεται όσο το δυνατόν η ελαχιστοποίηση της όχλησης των επιβατών η οποία οφείλεται, τόσο στην καθυστέρηση, όσο και στη φθορά των γραμμών και στα συνακόλουθα προβλήματά τους που προκαλείται εξαιτίας της, γεγονός το οποίο υπαγορεύει και τον βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών επισκευής.

#### 4.6.1. Μεταβολή συντελεστών βαρύτητας των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης

Στο πρώτο σενάριο επιχειρήθηκε η επίλυση του μοντέλου για ύπαρξη ανάγκης επισκευής σε κάθε τμήμα των γραμμών (συνολικά 39 εργασίες) με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς συντελεστών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης (Α.Σ.), οι οποίοι εναλλάσσονταν παίρνοντας έκαστος τις διακριτές τιμές 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, έχοντας συνολικό άθροισμα τη μονάδα. Για κάθε ένα συνδυασμό συντελεστών, ακολουθούν οι τιμές της Α.Σ. και των δύο όρων της.

**Πίνακας 4.2.:** Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς και όρου καθυστέρησης συναρτήσει των συντελεστών του όρου φθοράς

συντελεστής όρου φθοράς	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
συντελεστής όρου καθυστέρησης	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
τιμή Z (Α.Σ.)	18985,83	18788,02	22656,28	25824,76	29491,43	32510,50	35619,03	38736,44	41756,47
όρος φθοράς	4492,89	8985,14	13478,51	17971,29	22464,78	26957,87	31452,60	35947,07	40434,71
όρος καθυστέρησης	14492,94	9802,88	9177,76	7853,47	7026,65	5552,63	4166,43	2789,37	1321,76



*Διάγραμμα 4.7.: Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή A.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει των συντελεστών του όρου φθοράς<sup>1</sup>*

Κατά την καταγραφή των αποτελεσμάτων των αλλαγών των συντελεστών των δύο όρων στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, παρατηρήθηκε ότι αυτή γενικώς φθίνει, καθώς μικραίνει ο συντελεστής που δίνεται στον όρο της φθοράς και αυξάνει αυτός της καθυστέρησης. Για τις τιμές των συντελεστών φθοράς- καθυστέρησης 0.1/0.9 και 0.2/0.8 ο όρος της καθυστέρησης είναι μεγαλύτερος αριθμητικά από αυτόν της φθοράς ενώ για τους υπόλοιπους συνδυασμούς συντελεστών, συμβαίνει το αντίστροφο.

Για κάθε διαφορετικό συνδυασμό συντελεστών πραγματοποιήθηκε ο προγραμματισμός των εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα. Διαπιστώθηκε ότι όσο περισσότερη βαρύτητα δίνεται στον όρο των φορτίων, τόσο πιο άμεσα προγραμματίζεται η επισκευή των τμημάτων της γραμμής που είναι πολύ επιβαρυνμένα από αυτά. Αντιθέτως, όσο περισσότερη βαρύτητα δίνεται στον όρο της καθυστέρησης, τόσο πιο εμφανές είναι ότι επισκευάζονται νωρίτερα τα τμήματα με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση. Στην περίπτωση ίσων συντελεστών στους δυο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης εάν υπάρχουν τμήματα με πολύ παρόμοια επιβάρυνση από συνολικά φορτία και καθυστέρηση, τότε πρώτα επισκευάζονται τα τμήματα εκείνα με τη μεγαλύτερη επιβατική κίνηση. Το είδος των εργασιών, καθώς και το κόστος της καθεμιάς δεν επηρεάζουν την προτεραιότητα που θα δοθεί στον προγραμματισμό των εργασιών. Το συνολικό κόστος των εργασιών είναι το ίδιο σε κάθε περίπτωση, εφόσον η ζήτηση στο συγκεκριμένο σενάριο δεν έχει μεταβληθεί. Ακολουθούν οι πίνακες προγραμματισμού των διαφόρων ειδών αναγκαίων εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα.

<sup>1</sup> Είναι προφανές ότι όταν ο όρος της φθοράς είναι 0.1, τότε ο όρος της καθυστέρησης θα είναι 0.9 κ.ο.κ.

**Πίνακας 4.3.: Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα**  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.1/0.9)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Η αντικειμενική συνάρτηση συμπεριλαμβάνει τη φθορά της γραμμής οφειλόμενη στις διελεύσεις φορτίων, την επιβατική κίνηση των τμημάτων και την ταχύτητα διάνυσής τους. Γνωρίζοντας τα στοιχεία αυτά για τα τμήματα, διαπιστώνουμε και από τον παραπάνω πίνακα ότι αυτά με την υψηλότερη επιβάρυνση από διελεύσεις φορτίων, τη χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης ή/και την υψηλότερη επιβατική κίνηση προγραμματίζεται να επισκευαστούν συντομότερα.

**Πίνακας 4.4.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.2/0.8)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Όπως συνέβη και με την περίπτωση των συντελεστών 0.1, 0.9, έτσι και στην περίπτωση των συντελεστών 0.2 (όρος φθοράς), 0.8 (όρος καθυστέρησης) προκύπτει ότι τα τμήματα με την υψηλότερη επιβάρυνση από διελεύσεις φορτίων, τη χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης ή/και την υψηλότερη επιβατική κίνηση προγραμματίζεται να επισκευαστούν συντομότερα. Συγκεκριμένα, δίνεται περισσότερη προτεραιότητα σε αυτά που έχουν μεγαλύτερη καθυστέρηση εφόσον στο συγκεκριμένο σενάριο έχει δοθεί περισσότερη βαρύτητα στον όρο που αφορά τη διαφορά του χρόνου διάνυσής τους.

*Πίνακας 4.5.: Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.3/0.7)*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Όμοια, προκύπτει ότι τα τμήματα με την υψηλότερη επιβάρυνση από διελεύσεις φορτίων, τη χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης ή/και την υψηλότερη επιβατική κίνηση προγραμματίζεται να επισκευαστούν συντομότερα. Η διαφορά στην προτεραιότητα που δίνεται στα τμήματα με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση μικραίνει εφόσον μειώνεται και η διαφορά στη βαρύτητα που δίνεται στους δύο όρους.

**Πίνακας 4.6.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.4/0.6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Γνωρίζοντας τις επιβατικές κινήσεις, τις διελεύσεις φορτίων και τους χρόνους διάλυσης των τμημάτων είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι τα τμήματα που συνδυάζουν τα πιο επιβαρυμένα από άποψη διελεύσεων, καθυστέρησης και επιβατών επισκευάζονται πιο άμεσα από εκείνα που είναι λιγότερο επιβαρυμένα. Η διαφορά στην προτεραιότητα που δίνεται στα τμήματα με μεγάλη καθυστέρηση σε σχέση με εκείνα που είναι περισσότερο επιβαρυμένα από τα φορτία διέλευσης είναι λιγότερο εμφανής παρόλο που η σύγκριση δυσχεραίνεται λόγω διαφορετικών επιβατικών κινήσεων στα τμήματα.



**Πίνακας 4.7.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.5/0.5)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
33	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Στην περίπτωση του βασικού σεναρίου, οι τιμές των καθυστερημένων χρόνων διάλυσης, των διελεύσεων φορτίων και των επιβατικών κινήσεων των τμημάτων δίνονται στο παράρτημα. Είναι, λοιπόν, πρόδηλος είναι ο αμεσότερος προγραμματισμός των απαιτούμενων εργασιών συντήρησης στα τμήματα που συνολικά έχουν τον πιο επιβαρυσμένο συνδυασμό χαμηλού χρόνου διάλυσης-αυξημένων διερχόμενων φορτίων-επιβατών. Στο παρόν σενάριο, η καθυστέρηση και η φθορά της γραμμής από τα διερχόμενα φορτία συνεισφέρουν εξίσου στον τελικό προγραμματισμό των εργασιών.

**Πίνακας 4.8.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.6/0.4)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-

Τα τμήματα με τη μεγαλύτερη φθορά προγραμματίζεται να επισκευαστούν πρώτα από τα τμήματα με τη μεγαλύτερη καθυστέρηση εφόσον από τους συντελεστές βαρύτητας που τέθηκαν, εκεί δίνεται προτεραιότητα. Ακόμα πιο άμεσα προγραμματίζονται οι εργασίες συντήρησης στα τμήματα που συνδυάζουν υψηλή επιβατική κίνηση, υψηλή καθυστέρηση και έντονη επιβάρυνση από τις διελεύσεις φορτίων.

**Πίνακας 4.9.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.7/0.3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
33	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Όλο και πιο έντονη γίνεται η διαφορά στον αμεσότερο προγραμματισμό των τμημάτων με τη μεγαλύτερη φθορά συγκριτικά με εκείνα με τη χαμηλότερη ταχύτητα διάλυσης, άρα και τη μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση. Σαφώς, τα τμήματα που έχουν τον πιο επιβαρυσμένο συνδυασμό φόρτου επιβατών-φθοράς γραμμής-καθυστέρησης επισκευάζονται αμεσότερα.

**Πίνακας 4.10.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.8/0.2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Παρατηρείται ότι οι εργασίες συντήρησης πρώτα προγραμματίζονται στα τμήματα με τους περισσότερους επιβάτες, τις περισσότερες διελεύσεις φορτίων μέχρι την ημέρα της επισκευής και τη μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση που οφείλεται στους επιβαλλόμενους χρονικούς περιορισμούς. Μεγαλύτερη προτεραιότητα δίνεται στην επισκευή των τμημάτων που έχουν περισσότερο φθαρμένη γραμμή, παρά μεγαλύτερη καθυστέρηση.

**Πίνακας 4.11.: Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα**  
(συντελεστής φορτίων/ $\Delta t$ : 0.9/0.1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Στην περίπτωση αυτή είναι πιο πολύ εμφανής η αμεσότερη επισκευή των τμημάτων που έχουν φθαρεί πολύ από τις διελεύσεις φορτίων συγκριτικά με εκείνα που έχουν υψηλή χρονική καθυστέρηση. Συνολικά, συντομότερα επισκευάζονται τα τμήματα που έχουν συνδυαστικά περισσότερους επιβάτες, είναι περισσότερο φθαρμένα και έχουν τον περιορισμό για τη χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης.

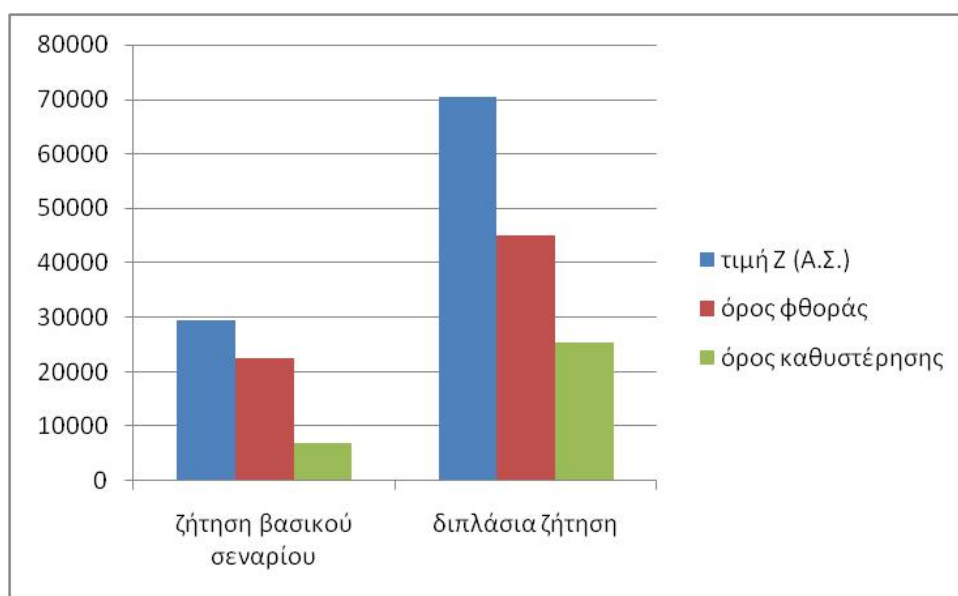
#### 4.6.2. Αύξηση της ζήτησης

##### Διπλασιασμός της ζήτησης

Στο σενάριο αυτό, οι απαιτούμενες εργασίες διπλασιάστηκαν με τυχαίο τρόπο, δηλαδή οι εργασίες που προστέθηκαν ώστε να διπλασιαστεί η ζήτηση του βασικού σεναρίου ήταν ανόμοιες και επιλέχθηκαν με τυχαίο τρόπο. Όπως είναι αναμενόμενο, υπήρξε σχεδόν διπλασιασμός του συνολικού κόστους των εργασιών εντός του μήνα, ενώ η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σχεδόν τριπλασιάστηκε καθώς η ζήτηση και η τιμή της δεν είναι ποσά ανάλογα.

**Πίνακας 4.12.:** Τιμές *A.Σ.*, όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει της ζήτησης

	βασική ζήτηση	διπλάσια ζήτηση
τιμή <i>Z</i> ( <i>A.Σ.</i> )	29491,43	70313,62
όρος φθοράς	22464,78	44975,22
όρος καθυστέρησης	7026,65	25338,41



**Διάγραμμα 4.8.:** Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή *A.Σ.*, όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει της ζήτησης

Οι εργασίες κατανεμήθηκαν σχεδόν στις διπλάσιες μέρες του μήνα και ενώ στο βασικό σενάριο προγραμματίζονταν περίπου για το μισό πρώτο δεκαπενθήμερο του μήνα, στην προκειμένη περίπτωση καταλαμβάνουν το σύνολο των τριάντα ημερών του.

*Πίνακας 4.13.: Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
διπλασιασμός ζήτησης του βασικού σεναρίου*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	1,2	-	-	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	3	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	5	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	1	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	5	-	-
12	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,8	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,7	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	5	-
23	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	1,2	-	8	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	8	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-
32	8	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	8
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Διαφαίνεται ότι ο προγραμματισμός των εργασιών κατέλαβε τις διπλάσιες μέρες του μήνα σε σχέση με το βασικό σενάριο, τα αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται στον πίνακα 4.7. Αμεσότερα επισκευάζονται τα τμήματα που έχουν συνδυαστικά υψηλότερο επιβατικό φορτίο, είναι περισσότερο φθαρμένα και έχουν τη χαμηλότερη ταχύτητα διάλυσης.

*Τριπλασιασμός της ζήτησης*

Επιχειρήθηκε, ακόμα, ο τριπλασιασμός της ζήτησης. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατή η εύρεση βέλτιστης λύσης εφόσον οι 117 εργασίες ήταν πολλές για να μπορέσουν να κατανεμηθούν στις 30 μέρες του μήνα τηρουμένων των περιορισμών.

**4.6.3. Αύξηση της καθυστέρησης της γραμμής 2**

Στο σενάριο αυτό, διατηρήθηκαν οι συντελεστές της Α.Σ., η ζήτηση, η επιβατική κίνηση και η καθυστέρηση στη γραμμή 3 του βασικού σεναρίου, ενώ η ταχύτητα των τμημάτων της γραμμής 2 υποδιπλασιάστηκε σε σχέση με αυτό. Έτσι, τα τμήματα της γραμμής 2 προγραμματίστηκε να επισκευαστούν πρώτα στις μέρες του μήνα συγκριτικά με εκείνα της γραμμής 3.

Το ίδιο σενάριο επιλύθηκε και για υποτριπλασιασμό και υποτετραπλασιασμό της ταχύτητας των τμημάτων της γραμμής 2, όπου και η προτεραιότητα στην επισκευή των αστοχιών αυτής της γραμμής είναι σαφώς πιο εμφανής όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση των τμημάτων.

Συγκριτικά με το βασικό σενάριο διαπιστώνεται από τον πίνακα 4.14 ότι τα τμήματα της γραμμής 2 που πλέον εμφανίζουν την υψηλότερη καθυστέρηση στο χρόνο διάνυσης, επισκευάζονται πρώτα συγκριτικά με εκείνα της γραμμής 3, καθώς επιδιώκεται η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.



**Πίνακας 4.14.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
υποδιπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Πίνακας 4.15.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
υποτριπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Στην προκειμένη περίπτωση η χρονική προτεραιότητα στην επισκευή των τμημάτων της γραμμής 2, των οποίων η ταχύτητα τώρα υποτριπλασιάστηκε σε σχέση με αυτή του βασικού σεναρίου, γίνεται ακόμα πιο εμφανής. Ακόμα πιο φανερό είναι η διαφορά στην αμεσότητα υλοποίησης των εργασιών στα τμήματα με τη χαμηλότερη ταχύτητα διάνυσης στην περίπτωση του υποτετραπλασιασμού της.

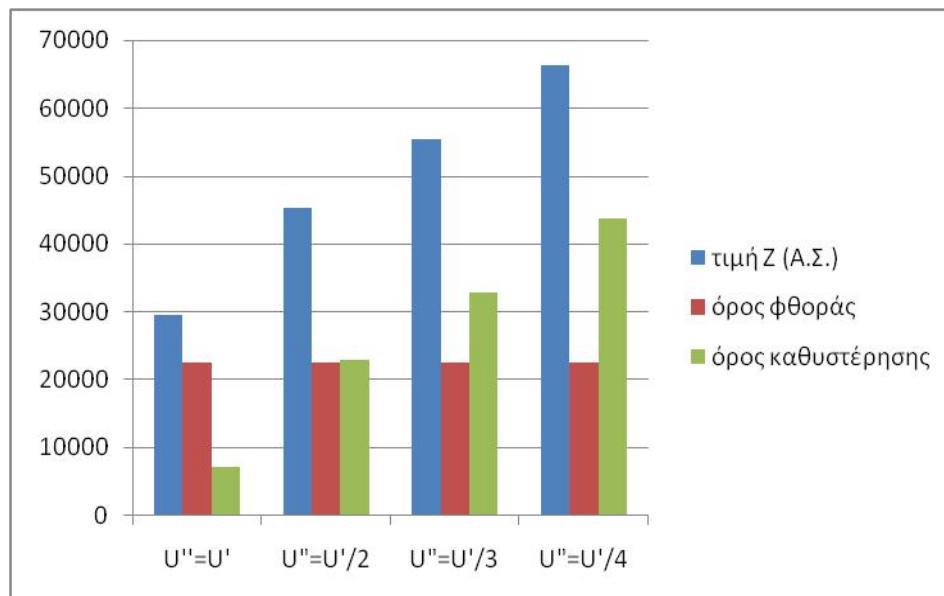
**Πίνακας 4.16.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
υποτετραπλασιασμός της ταχύτητας διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αυξήθηκε δυσανάλογα με τις μεταβολές που προκλήθηκαν, αντανακλώντας την επιβάρυνση των επιβατών. Ο όρος της φθοράς παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητος εφόσον η μειωμένη ταχύτητα δεν υπεισέρχεται σε αυτόν και η μόνη αμελητέα διαφορά οφείλεται στην διαφορετική μέρα επιδιόρθωσης των αστοχιών. Ο όρος της καθυστέρησης αυξανόταν δυσανάλογα αλλά συνεχώς όσο περισσότερο μειωνόταν η ταχύτητα διάνυσης των τμημάτων της γραμμής 2.

**Πίνακας 4.17.:** Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει της καθυστέρησης στα τμήματα της γραμμής 2

	$U''=U'$	$U''=U'/2$	$U''=U'/3$	$U''=U'/4$
τιμή Z (Α.Σ.)	29491,43	45202,38	55321,21	66210,33
όρος φθοράς	22464,78	22468,65	22467,27	22467,24
όρος καθυστέρησης	7026,65	22733,73	32853,93	43743,11



**Διάγραμμα 4.9.:** Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει της καθυστέρησης για τα τμήματα της γραμμής 2<sup>2</sup>

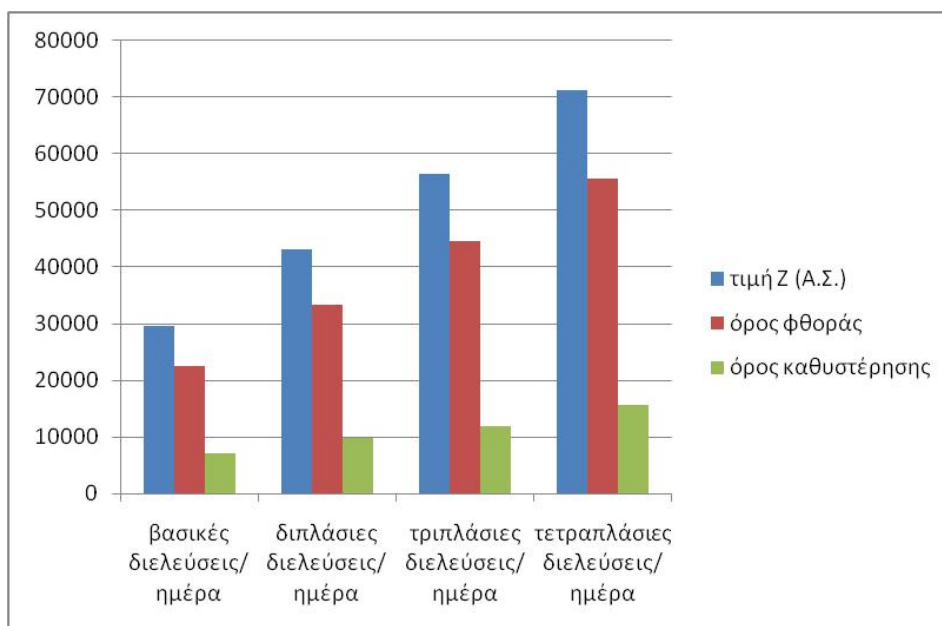
#### 4.6.4. Αύξηση των ημερήσιων διελεύσεων από την 7/4/2017 έως την ημέρα επισκευής στη γραμμή 3

Στο σενάριο αυτό αυξήθηκε ο αριθμός των ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3 και όπως είναι λογικό και των επιβατικών κινήσεων των τμημάτων. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε για διπλασιασμό, τριπλασιασμό και τετραπλασιασμό του συνολικού ημερήσιου φορτίου διελεύσεων της γραμμής σε σχέση με τα πραγματικά που την επιβαρύνουν στο βασικό σενάριο (και των επιβατικών τους κινήσεων) και παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνονται τα φορτία που καταπονούν τη γραμμή για κάθε μέρα που περνάει, τόσο αυξάνεται η επιβάρυνση των επιβατών. Αυτή, στην προκειμένη περίπτωση, αντικατοπτρίζεται και στους δύο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, εφόσον και οι δύο επηρεάζονται από την επιβατική κίνηση και την ημέρα προγραμματισμού των εργασιών, αλλά και στην τελική της τιμή. Ο όρος της φθοράς αυξήθηκε κατά πολύ περισσότερο εφόσον αυτός περιλαμβάνει τα αυξημένα φορτία/ημέρα.

<sup>2</sup> Η  $U'$  αντιπροσωπεύει την καθυστερημένη ταχύτητα που έχει επιβληθεί στα τμήματα στο βασικό σενάριο ενώ η  $U''$  υποδηλώνει την αλλαγμένη ταχύτητα σε κάθε σενάριο που εφαρμόζεται

**Πίνακας 4.18.:** Τιμές Α.Σ., όρου φθοράς, όρου καθυστέρησης συναρτήσει του συνολικού ημερήσιου φορτίου για τη γραμμή 3

	βασικός αριθμός ημερήσιων διελεύσεων	διπλάσιες ημερήσιες διελεύσεις	τριπλάσιες ημερήσιες διελεύσεις	τετραπλάσιες ημερήσιες διελεύσεις
τιμή Z (Α.Σ.)	29491,43	42975,20	56349,03	71146,32
όρος φθοράς	22464,78	33253,02	44561,17	55495,96
όρος καθυστέρησης	7026,65	9722,18	11787,86	15650,36



**Διάγραμμα 4.10.:** Διαγραμματική απεικόνιση των: τιμή Α.Σ., όρος φθοράς, όρος καθυστέρησης συναρτήσει των φορτίων/ημέρα για τη γραμμή 3

Διαπιστώθηκε ότι πράγματι οι εργασίες που αφορούν τη γραμμή 3 υλοποιούνται σχεδόν όλες πρώτα από εκείνες που αφορούν τη γραμμή 2. Η διαφορά αυτή στη χρονική προτεραιότητα του προγραμματισμού είναι ακόμα πιο έντονη όσο αυξάνεται η αλλαγή που πραγματοποιείται. Κάποιες μικροαποκλίσεις από αυτόν τον κανόνα οφείλονται στο γεγονός ότι το κάθε τμήμα χαρακτηρίζεται από διαφορετικό ιστορικό φορτίων που το έχουν επιβαρύνει.

**Πίνακας 4.19.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
διπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Προκύπτει ότι τα τμήματα της γραμμής 3 των οποίων οι ημερήσιες διελεύσεις διπλασιάστηκαν, επισκευάζονται αμεσότερα σε σχέση με το βασικό σενάριο αλλά και συγκριτικά με τα τμήματα της γραμμής 2. Στον τελικό προγραμματισμό βέβαια των εργασιών στο μήνα και για τις δύο γραμμές λαμβάνονται υπόψη και η επιβατική κίνηση και ο βαθμός της καθυστέρησης λόγω μειωμένης ταχύτητας. Ακόμα πιο εμφανής είναι η αμεσότερη επισκευή των τμημάτων της γραμμής 3 στην περίπτωση τριπλασιασμού των ημερήσιων διελεύσεων από αυτά, όπως απεικονίζεται στον πίνακα 4.20.

**Πίνακας 4.20:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
τριπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

**Πίνακας 4.21.:** Προγραμματισμός εργασιών στα τμήματα και τις ημέρες του μήνα:  
τετραπλασιασμός ημερήσιων διελεύσεων της γραμμής 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	4, 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Στην περίπτωση που ο συνολικός ημερήσιος αριθμός διελεύσεων των τμημάτων της γραμμής 3 τετραπλασιαστεί είναι φανερό ότι η επισκευή των τμημάτων αυτών (τα οποία στον πίνακα βρίσκονται στις γραμμές 1-16) προγραμματίζεται αμεσότερα συγκριτικά με των τμημάτων της γραμμής 2, καθώς και σε σχέση με των ίδιων αλλά στην περίπτωση του βασικού σεναρίου.



#### 4.7. Ανάλυση αποτελεσμάτων επίλυσης

- Οι συντελεστές σχετικής βαρύτητας που δίνονται στους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, η ζήτηση ή αλλιώς οι ανάγκες επισκευής που δίνονται από τα δεδομένα, το συνολικό ημερήσιο φορτίο που επιβαρύνει τις γραμμές από τις διελεύσεις των συρμών, η επιβατική κίνηση των τμημάτων και η ταχύτητα διάνυσής τους, καθώς αυτή εμφανίζεται μειωμένη κατόπιν περιορισμών λειτουργίας που επιβάλλονται από το αρμόδιο τμήμα συντήρησης επιδομής, είναι παράγοντες που επηρεάζουν το βέλτιστο προγραμματισμό της συντήρησης σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο, όπως στο μετρό.
- Διαπιστώθηκε ότι αύξηση του συντελεστή του όρου της καθυστέρησης με ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή των φορτίων επιφέρει, γενικά, μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Αύξηση της ζήτησης είχε ως αποτέλεσμα αφενός αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και αφετέρου κατανομή των εργασιών συντήρησης που έχουν προγραμματιστεί σε περισσότερες μέρες του μήνα.
- Αύξηση των ημερήσιων διελεύσεων συρμών από τα τμήματα έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του συνολικού ημερήσιου φορτίου που επιβαρύνει τη γραμμή και συνεπώς προτεραιότητα στον χρονοπρογραμματισμό αυτών. Αντίστοιχα, μία μείωση στις ημερήσιες διελεύσεις που θα οδηγούσε σε μειωμένη επιβάρυνση των τμημάτων θα είχε ως αποτέλεσμα μείωση της τιμής της Α.Σ. και όχι τόση ανάγκη για αμεσότητα της διεξαγωγής των εργασιών συντήρησης σε αυτά όσο σε εκείνα που ο αριθμός των διελεύσεων παρέμενε κανονικός.
- Αυξημένη καθυστέρηση στα τμήματα έχει ως αποτέλεσμα να επιδιορθώνονται πολύ πιο άμεσα από τμήματα στα οποία η ταχύτητα είναι η κανονική ή έστω μειωμένη κατά πολύ λιγότερο, τα οποία επισκευάζονται πιο αργά.
- Τμήματα που χρησιμοποιούνται από πολλούς επιβάτες υπαγορεύουν την ανάγκη για συντομότερη επισκευή των αστοχιών τους απ' ό,τι συμβαίνει σε τμήματα χρησιμοποιούμενα από λιγότερους επιβάτες.
- Είναι λογικό ότι, με τον τρόπο κιόλας που είναι διατυπωμένο το πρόβλημα, στις περισσότερες περιπτώσεις συμβαίνει συνδυασμός αλλαγών στις παραμέτρους του μοντέλου, επιφέροντας κάθε φορά και τα ανάλογα αποτελέσματα.
- Συνολικά, επιδιώκεται ο γρηγορότερος προγραμματισμός των εργασιών με τρόπο που η συνολική επιβάρυνση των επιβατών να ελαχιστοποιείται.
- Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προγραμματισμού της συντήρησης του μετρό της Αθήνας, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην πράξη, αυτούσιο ή με αλλαγές, από την ίδια την εταιρία του, καθώς σε ελάχιστο χρόνο και με μεγάλη ευκολία, δίνοντας στον πίνακα των δεδομένων τις ανάγκες, προκύπτει βελτιστοποιημένο πρόγραμμα διεξαγωγής τους και μάλιστα προς όφελος του επιβάτη, εφόσον επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσής του.

## 5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

### 5.1. Ανασκόπηση του προβλήματος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ο βέλτιστος προγραμματισμός της συντήρησης του μετρό της Αθήνας. Αρχικά αναφέρθηκαν οι κυριότερες αρχές συντήρησης των σιδηροδρομικών δικτύων, ενώ ακολούθησε η αναφορά στο ιστορικό πλαίσιο των ερευνών που έχουν υλοποιηθεί σε συναφές αντικείμενο, γεγονός που οδήγησε στην διαμόρφωση του παρόντος μοντέλου με βάση τις ανάγκες που υπήρχαν. Η εκτενής ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με το βέλτιστο προγραμματισμό της συντήρησης κατέδειξε ότι για πρώτη φορά αναπτύσσεται μοντέλο βελτιστοποίησης του προγραμματισμού της επιδιορθωτικής και υπό συνθήκες προληπτικής συντήρησης, γεγονός που επιτρέπει μια πιο στοχαστική προσέγγισή της και μάλιστα κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση των επιβατών.

Έπειτα από παρουσίαση της μεθόδου βελτιστοποίησης (γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός) ακολούθησε η διατύπωση του προτύπου αλλά και η εφαρμογή του βασισμένη σε στοιχεία που συλλέχθηκαν από τη ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε. για τις γραμμές του μετρό της Αθήνας 2 & 3. Η βελτιστοποίηση επικεντρώθηκε στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης της επιβάρυνσης των επιβατών που οφείλεται σε φθαρμένη γραμμή και χρονοκαυστέρηση λόγω των αστοχιών που προορίζονται για επισκευή. Λαμβανομένων λειτουργικών περιορισμών που υπήρχαν από το ίδιο το τμήμα συντήρησης του μετρό προγραμματίστηκαν στις 30 μέρες ενός τυπικού μήνα, επιλεγμένες εργασίες συντήρησης που χρειάζεται να γίνουν στα 35 τμήματα γραμμών.

Το μοντέλο, που αναπτύχθηκε, επιλύθηκε για διαφορετικούς συντελεστές όρων αντικειμενικής συνάρτησης, ζήτηση, ημερήσιο φορτίο επιβάρυνσης των γραμμών, το οποίο προκαλεί τη φθορά τους, και ταχύτητα διάνυσης των τμημάτων εκφρασμένη με τη μορφή καθυστέρησης. Ακολούθησε η ανάλυση των αποτελεσμάτων των αναφερθέντων σεναρίων. Δείχθηκε η επιρροή που έχει στον προγραμματισμό της συντήρησης του μετρό η επιλογή της βαρύτητας που θα δοθεί στον κάθε όρο της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και πώς επιδρά σε αυτόν η αλλαγή της ζήτησης (αναγκαίων εργασιών), η μείωση των ταχυτήτων διάνυσης και η αύξηση του συνολικού ημερήσιου φορτίου διελεύσεων που καταπονεί τις γραμμές.

### 5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας επήλθε έπειτα από συγκεκριμένες λογικές θεωρήσεις και παραδοχές. Στο εξής, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα για να βελτιώσουν και να επεκτείνουν το πρόβλημα που θα παρουσίαζαν ενδιαφέρον.

- Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν ενδεικτικά οκτώ εργασίες συντήρησης ενώ στην πράξη είναι πολύ περισσότερες οι οποίες θα μπορούσαν να προγραμματιστούν με το βέλτιστο τρόπο.
- Η φθορά της γραμμής ως αναγκαία παράμετρος για τον ορθολογικό προγραμματισμό των εργασιών συντήρησής της λήφθηκε υπόψη απλουστευτικά ως γραμμική συνάρτηση των ημερών που περνούν και οι αστοχίες παραμένουν μη επισκευασμένες. Πιο δόκιμη θα ήταν η θεώρηση κάποιων δεικτών ποιότητας τροχιάς και η δημιουργία μιας καμπύλης φθοράς που θα απεικονίζει την εξέλιξη των ελαττωμάτων της γραμμής με το χρόνο βασισμένη σε στοιχεία που έχουν συλλεχθεί και τα οποία έχουν παρασταθεί με κάποια κατανομή, όπως Weibull. Η χειροτέρευση εξάλλου της κατάστασης έχει στοχαστικές ρίζες, γεγονός που καθιστά επίσης ενδιαφέρουσα τη μελλοντική εισαγωγή στο πρόβλημα της αλυσίδας Μαρκόφ.
- Η επιβατική κίνηση κάθε τμήματος θεωρήθηκε απλουστευτικά ίση με το ημιάθροισμα των επιβιβάσεων των δύο σταθμών εκατέρωθεν κάθε τμήματος. Θα μπορούσε, αν ήταν γνωστές και οι αποβιβάσεις σε κάθε σταθμό να υπολογίζεται ακριβώς το πλήθος των επιβατών που μετακινούνται σε κάθε τμήμα της γραμμής.
- Διερευνήθηκε η επίπτωση που έχουν οι περιορισμοί λειτουργίας συνολικά στη μέση ταχύτητα κάθε τμήματος, ενώ πιο ακριβής θα ήταν η προσέγγιση υπολογισμού της νέας ταχύτητας κάθε τμήματος σε κάθε σημείο του και η χρήση των συγκεκριμένων προφίλ ταχυτήτων τους για τον υπολογισμό της καθυστέρησης.
- Κατά τη διαμόρφωση του συγκεκριμένου μοντέλου λήφθηκαν υπόψη ως αιτίες επιβάρυνσης του επιβάτη μόνο η καθυστέρηση στο χρόνο διάνυσης των τμημάτων και η μετακίνηση πάνω σε παλαιές, φθαρμένες, γραμμές. Στην πραγματικότητα όμως οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την άνεση των επιβατών είναι πολλοί περισσότεροι, όπως, η οφιοειδής κίνηση, ο θόρυβος, η πλευρική ταχύτητα κλπ..
- Για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος συντήρησης θα ήταν δόκιμο να εξεταστεί το συνολικό σύστημα αστικών σιδηροδρομικών μεταφορών που διαχειρίζεται η ΣΤΑ.ΣΥ. το οποίο περιλαμβάνει πέραν των δύο γραμμών (2 & 3) που εξετάστηκαν, τη γραμμή 1 (πρώην Η.Σ.Α.Π.) και το τραμ. Η ενοποίηση των υποδομών έχει ήδη υλοποιηθεί σε διοικητικό επίπεδο και σε πληθώρα τεχνικών αντικειμένων, ωστόσο στον τομέα της συντήρησης της επιδομής θα ήταν σκόπιμη η διαμόρφωση κοινής βάσης δεδομένων που θα δώσει τη δυνατότητα εφαρμογής του προγράμματος στο σύνολο της υποδομής.
- Η διαδικασία του βέλτιστου προγραμματισμού της συντήρησης σιδηροδρομικών υποδομών θα μπορούσε να διατυπωθεί ως πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης και να εφαρμοστεί με την κατάλληλη τεχνική επίλυσης στην περίπτωση των γραμμών του μετρό της Αθήνας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrade, A., Teixeira, P., 2011. Biobjective optimization model for maintenance and renewal decisions related to rail track geometry. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2261, 163–170. doi:10.3141/2261-19.
- Azad, N., Hassini, E., Verma, M., 2016. Disruption risk management in railroad networks: An optimization-based methodology and a case study. *Transportation Research Part B* 85, 70-88. doi: 10.1016/j.trb.2016.01.001
- Baldi, M., Heinicke, F., Simroth, A., Tadei, R., 2016. New heuristics for the Stochastic Tactical Railway Maintenance Problem, *Omega*, vol. 63, issue C, 94-102. doi: 10.1016/j.omega.2015.10.005.
- Budai, G., Huisman, D., Dekker, R., 2006. Scheduling preventive railway maintenance activities. *Journal of the Operational Research Society* 57, 1035–1044. doi:10.1057/palgrave.jors.2602085.
- Budai, G., Dekker, R., Kaymak, U., 2009. Genetic and memetic algorithms for scheduling railway maintenance activities. *Econometric Institute Report EI 2009-30*, 1-23. Erasmus University Rotterdam. URL: <https://repub.eur.nl/pub/17513>
- Caetano, L., Teixeira, P., 2013. Availability approach to optimizing railway track renewal operations. *Journal of Transportation Engineering* 139, 941–948. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000575.
- Caetano, L., Teixeira, P., 2014. Optimisation model to schedule railway track renewal operations: a life-cycle cost approach. *Structure and Infrastructure Engineering* 0, 1–13. doi:10.1080/15732479.2014.982133.
- Couy, A., 1997, RATP, *Εγχειρίδιο συντήρησης σιδηροδρόμων-0G00TW700X000*
- Cheung, B.S.N., Chow, K.P., Hui, L.C.K., Yong, A.M.K., 1999. Railway track possession assignment using constraint satisfaction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 12, 599–611. doi:10.1016/S0952-1976(99)00025-1.
- Ferreira, L., Murray, M.H., 1997. Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs. *Transport Reviews* 17,207–221. doi:10.1080/01441649708716982.
- Gaudry, M, Lapeyre, B., Quinet É., 2016. Infrastructure maintenance, regeneration and service quality economics: A rail example. *Transportation Research Part B: Methodological* 86, 181-210. doi: 10.1016/j.trb.2016.01.015
- Hakan Guler, H., 2017. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. *Gradevinar, Vol. 68 No. 12*, 979-993. doi:10.14256/JCE.1458.2015
- He, Q., Li, H., Bhattacharjya, D., Parikh, D.P., Hampapur, A., 2014. Track geometry defect rectification based on track deterioration modelling and derailment risk

assessment. *Journal of the Operational Research Society* , 1–13. doi:10.1057/jors.2014.7.

Heinicke, F., Simroth, A., Scheithauer, G., Fischer, A., 2014. On a Railway Maintenance Scheduling Problem with Customer Costs and Multi-Depots. *Technical Report MATH-NM-01-2014*. TU-Dresden. Dresden, Germany. URL: <http://www.math.tu-dresden.de/~scheith/ABSTRACTS/PREPRINTS/14-Heinicke.pdf>.

Higgins, A., Ferreira, L., Lake, M. 1999. Scheduling rail track maintenance to minimise overall delays. *Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Jerusalem, Israel.

Jovanovic, S., Esveld, C., 2001. ECOTRACK: an objective condition-based decision support system for long-term track M&R planning directed towards reduction of Life Cycle Costs. *Proceedings of the 7th International Heavy Haul Conference*, Brisbane, Australia, 199–207.

Jovanovic, S., Guler, H., Čoko, B., 2015. Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems. *Gradevinar, Vol. 67 No. 3*, pp. 247-258. doi: 10.14256/JCE.1194.2014.

Καρλαύτης, Μ.Γ., Λαγαρός, Ν.Δ., 2010. *Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς*, Αθήνα: Συμμετρία.

Khouy, I. A., 2013. Doctoral Thesis: Cost effective maintenance of track geometry. A Shift from Safety Limits to Maintenance Limits. Luleå University of Technology, Sweden.

Lake, M., Ferreira, L., Murray, M., 2000. Minimising costs in scheduling railway track maintenance, *Seventh International Conference on Computers in Railways Vol. VII*, 895–902.

Liden, T., 2015. Railway infrastructure maintenance - a survey of planning problems and conducted research. *Transportation Research Procedia 10*, 574 – 583. doi: 10.1016/j.trpro.2015.09.011

Oyama T, Miwa M (2006) Mathematical modeling analyses for obtaining an optimal railway track maintenance schedule. *Japan Journal of industrial and applied mathematics 23(2)*, 207-224. doi:10.1007/BF03167551.

Quiroga L. M. , Schnieder E (2010) A heuristic approach to railway track maintenance scheduling. *Proceedings of the 12th International Conference on Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems*, 687-699, China.

Simson, S., Ferreira, L., Murray, M., 2000. Rail track maintenance planning: An assessment model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1713*, 29–35. doi:10.3141/1713-05.

Τσάντας, Ν. 2007. *Μια πρώτη προσέγγιση στην ανάλυση ευαισθησίας*. Διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο:

<http://www.math.upatras.gr/~tsantas/DownloadFiles/GraphicalSensAnal.pdf>  
(06/05/2007).

Υψηλάντης, Π., 2015. *Επιχειρησιακή Έρευνα. Μέθοδοι και τεχνικές λήψης αποφάσεων.*, Αθήνα: Προπομπός.

Zhao, J., Chan, A.H.C., Burrow, M.P.N., 2009. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 223, 533–541. doi:10.1243/09544097JRRT273.

Zhang, T., Andrews, J., Wang, R., 2013b. Optimal scheduling of track maintenance on a railway network. *Quality and Reliability Engineering International* 29, 285–297. doi:10.1002/qre.1381.

### **Ιστότοποι**

<http://www.ametro.gr/>. Αττικό Μετρό Α.Ε., Συλλογή στοιχείων για την ιστορία και το έργο του μετρό της Αθήνας.

<http://www.stasy.gr>. Εταιρεία Σταθερών Συγκοινωνιών ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε., Συλλογή οικονομικών στοιχείων της εταιρείας

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας III: Εργασίες συντήρησης στο μετρό της Αθήνας (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ.)

Περιγραφή Εργασίας	Είδος Συντήρησης	Τοποθεσία
Λείανση βελόνας, αντιβελόνας, καρδιάς και σιδ/χιών	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα Αλλαγής
Αντικατάσταση εξαρτημάτων βελόνας/αντιβελόνας	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση σετ βελόνας/αντιβελόνας	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Λίπανση αλλαγής	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντισκωρ.βαφή ανταλλακτικών	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Σήραγγα
Έλεγχος αλλαγής με υπέρηχους	ΣΠΣΑ	Σήραγγα
Γενική επισκευή αλλαγής	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθ. Διαστάσεων ασφαλείας	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Ρύθμιση ασφαλείας αντιράγιου	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση αντιράγιου αλλαγής	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αναγόμευση καρδιάς	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση καρδιάς	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Ακινητοποίηση εκτίναξης	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Ρύθμιση εκτίναξης	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση εξαρτημάτων εκτίναξης	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Λίπανση μηχανισμού εκτίναξης	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αναγόμευση αρμού	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επισκευή μονωτικού αρμού	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση συγκ. μονωτικού αρμού	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Κυκλική επισκευή μονωτικού αρμού	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθεώρηση διάκενου αρμών	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επισκευή μηχανικού αρμού	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Κυκλική επισκευή μηχανικού αρμού	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Εξίσωση διάκενων μηχανικών αρμών	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Καθαρισμός έρματος	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Προσθήκη έρματος	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αποψίλωση	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Καθαρισμός βάσης και	ΣΠΣ, ΥΣΠΣ,	Σήραγγα

Περιγραφή Εργασίας	Είδος Συντήρησης	Τοποθεσία
αποχέτευσης	ΕΣ	
Καθαρισμός με ηλ. Σκούπα	ΣΠΣ	Σήραγγα
Καθαρισμός αποχέτευσης	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Σήραγγα
Εργασίες σε διαβάσεις και πεζοδιαδρόμους	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Συγκόλληση συνδέσεων σιδηροτροχιών	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος σιδ/χιάς με υπέρηχους	ΣΠΣΑ	Σήραγγα
Έλεγχος φθοράς σιδηροτροχιάς	ΣΠΣ	Σήραγγα
Προσωρινή ενίσχυση σιδ/χιάς	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Καθαρισμός και υδροβολή σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Λείανση σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αναγόμωση σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Στρώση τμήματος σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Προσωρινή ενίσχυση συγκόλλησης	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Θερμική συγκόλληση μεγάλου διάκενου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Λείανση συγκόλλησης τοπικά	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αναγόμωση συγκόλλησης	ΥΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Γεν. Επισκευή προσήλωσης σιδ/χιάς	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Συμπύκνωση ή ευθυγράμμιση γραμμής	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών
Επιθ. Γεωμετρίας (καταγραφικό)	ΣΠΣΑ	Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών
Γεν. Επισκευή συγκρουστήρα	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Εργασίες σε συγκρουστήρα	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθεώρηση από καμπίνα οδηγού	ΣΠΣΑ	Σήραγγα
Πεζή επιθεώρηση	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση στρωτήρων	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Πλύσιμο σιδ. Γραμμής	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθεώρηση μετά από αναφορά	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος στρωτήρων και προσηλώσεων	ΣΠΣΑ	Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα



Περιγραφή Εργασίας	Είδος Συντήρησης	Τοποθεσία
Συρμός λειάνσεως	ΣΠΣ	Σήραγγα
Έλεγχος συγκολλήσεων με υπέρηχους	ΣΠΣΑ	Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθεώρηση & λίπανση αλλαγής	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Τοποθέτηση συγκρουστήρα	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Υποστήριξη εργασιών τρίτων	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Υποστήριξη εργασιών τμημάτων ΑΜ/ΑΜΕΛ	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Συνοδεία εργολάβου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Ειδικές τροχιές, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Συντήρηση εργαλειομηχανών	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Συντήρηση οχήματος	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Κατασκευή ειδικού εξοπλισμού	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Επισκευή εξοπλισμού	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Συντήρηση εξοπλισμού	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Διαχείριση αποθήκης	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Χρήση ανυψωτικών μηχανημάτων	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Προετοιμασία συρμών	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Προγραμματισμός εργασιών	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Εκπαίδευση	ΕΣ	Αμαξοστάσια
Γαιωδέτηση	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης
Κατασκευή αρμού	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος σιδ/χιάς με δινορρεύματα	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος Θερμικών κινητήρων	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια – Υπηρεσιακές γραμμές
Άσκηση εντροχιασμού	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια – Υπηρεσιακές γραμμές
Μετρήσεις δονήσεων και θορύβου	ΣΠΣ	Σήραγγα
Αντικατάσταση ελαστομερών εδράνων	ΥΣΠΣ	Σήραγγα
Επιθ. Κυμάτωσης (καταγραφικό)	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Υψομετρικός έλεγχος αιχμών διασταύρωσης	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος ηλεκτροφόρου	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Έλεγχος προστατευτικών ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Σύσφιξη ακροκιβωτίων ηλεκτροφόρου	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Σύσφιξη διαστολών και αγκυρίων ηλεκτροφόρου	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Σύσφιξη μονωτήρων	ΣΠΣΑ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα

<b>Περιγραφή Εργασίας</b>	<b>Είδος Συντήρησης</b>	<b>Τοποθεσία</b>
Αντικατάσταση ράμπας ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Συγκόλληση ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση προστατευτικών ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση ακροκιβωτίων ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση διαστολής ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση μονωτήρων ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση τμήματος ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Καθαρισμός συστήματος ηλεκτροφόρου	ΣΠΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση αμφιδετών ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Αντικατάσταση αγκυρίου ηλεκτροφόρου	ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα
Επιθεώρηση υπερύθρων (αλουμινένια)	ΥΣΠΣ, ΕΣ	Αμαξοστάσια, Τροχιές Πρόσβασης, Τροχιά Δοκιμών, Σήραγγα

**Πίνακας Π2.: Τμήμα πίνακα υπαρχόντων αστοχιών και προτεινόμενες εργασίες επισκευής τους (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)**

Ημ/νία	Εγκατάσταση	Αστοχία	Ενέργεια Επισκευής	Επισκευάστηκε	Χ.Θ.
3/4/2017	TW2TW1	Νερά στην κεφαλή	καθαρισμός	FALSE	0410W
3/4/2017	TW2TW3	RCF b		FALSE	1980W-2030W
3/4/2017	TW2TW3	RCF b		FALSE	1400W-1766W
3/4/2017	TW2TW1	Κυμάτωση	λείανση	FALSE	030W-0430W
4/4/2017	TW3TW4	Χτυπημένος στρωτήρας	αντικατάσταση	FALSE	01923
4/4/2017	TW3TN3	Κλειστός αρμός		FALSE	15400
4/4/2017	TW3TN3	Σπασμένα στηρίγματα		FALSE	14930
4/4/2017	TW3TN3	Κλειστός αρμός		FALSE	14892
4/4/2017	TW3TN3	Σπασμένα στηρίγματα	αντικατάσταση	FALSE	14880
4/4/2017	TW3TN3	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	14825
4/4/2017	TW3TN3	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	14790
4/4/2017	TW3TN2	Κλειστός αρμός		FALSE	13970
4/4/2017	TW3TN2	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	13378
4/4/2017	TW3TN1	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	12783
5/4/2017	TW2T04	Αποφλοίωση στην κεφαλή	κόλληση	FALSE	03607
5/4/2017	TW2T06	Κυμάτωση	λείανση	FALSE	03510-03620
5/4/2017	TW2T05	Νερά σε tie bar και κεφαλή		FALSE	03038
5/4/2017	TW2T05	RCF b και πλάγια φθορά	αντικατάσταση	FALSE	02580-02920
5/4/2017	TW2T03	Κυμάτωση	λείανση	FALSE	01620-01710
5/4/2017	TW2T03	Κυμάτωση		FALSE	01280-01470
5/4/2017	TW2T03	RCF b		FALSE	01030-01058
5/4/2017	TW2T03	RCF a και πλάγια φθορά		FALSE	01030-00450
5/4/2017	TW2T02	Λάσκα nabra		FALSE	00700
5/4/2017	TW2T12	Νερά στην ηλεκτροφόρο		FALSE	08468
5/4/2017	TW2TS1	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	09385
5/4/2017	TW2TS1	Φαγωμένος μονωτήρας		FALSE	09375
5/4/2017	TW2TS1	Φαγωμένος μονωτήρας	αντικατάσταση	FALSE	08928
5/4/2017	TW2TS2	Λασκαρισμένο στήριγμα		FALSE	09540
5/4/2017	TW2TS2	Νερά στην ηλεκτροφόρο		FALSE	10035

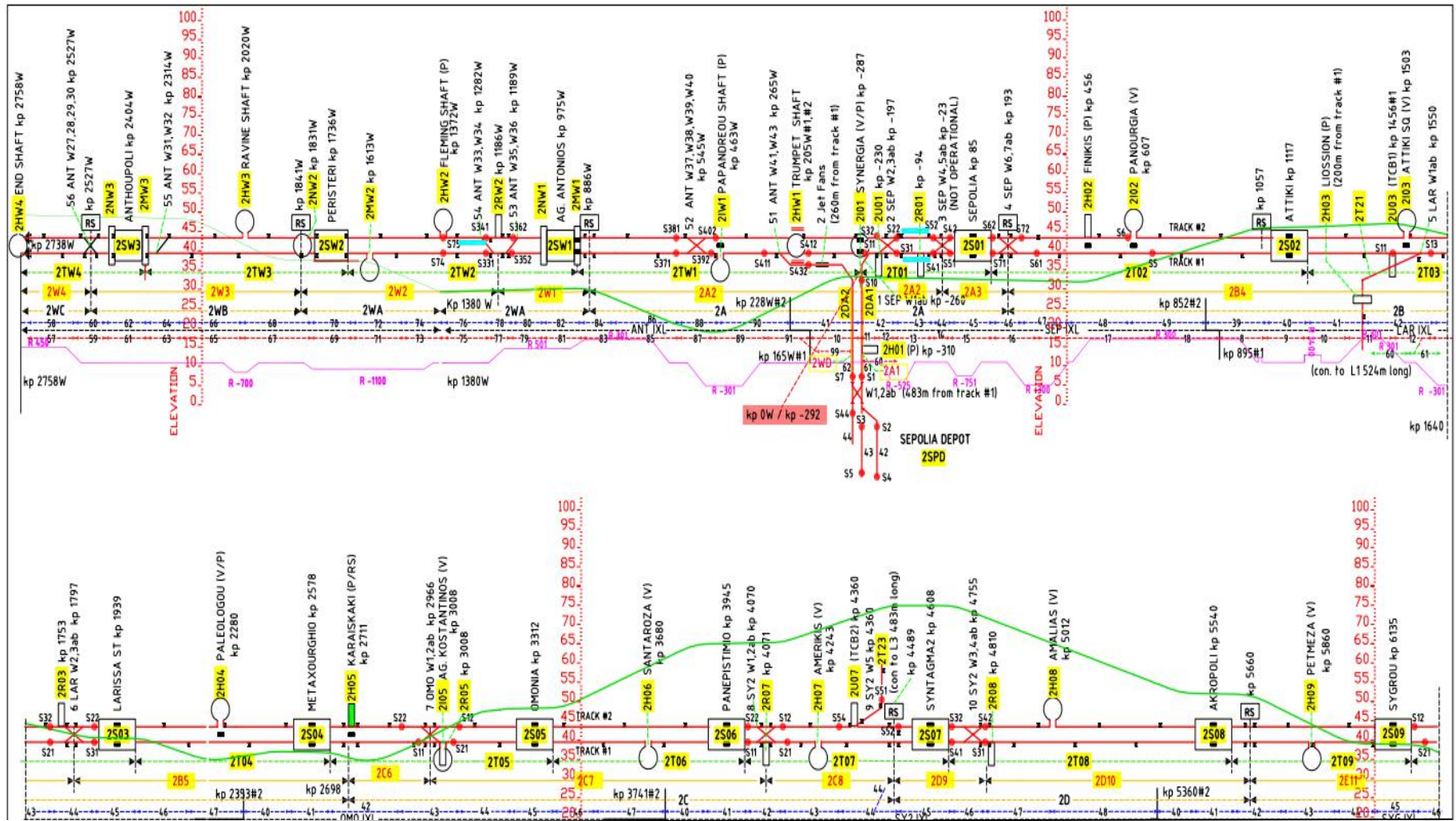
Το τμήμα συντήρησης του μετρώ ακολουθεί έναν κωδικοποιημένο τρόπο ονομασίας για να εντοπίζουν και να αναφέρονται στα διάφορα τμήματα και σημεία της γραμμής. Ενδεικτικά, ακολουθεί απόσπασμα με τους κωδικούς των εγκαταστάσεων και τις περιοχές όπου εντοπίζονται.

## Πίνακας Π3.: Κωδικοί και τοποθεσία εγκαταστάσεων

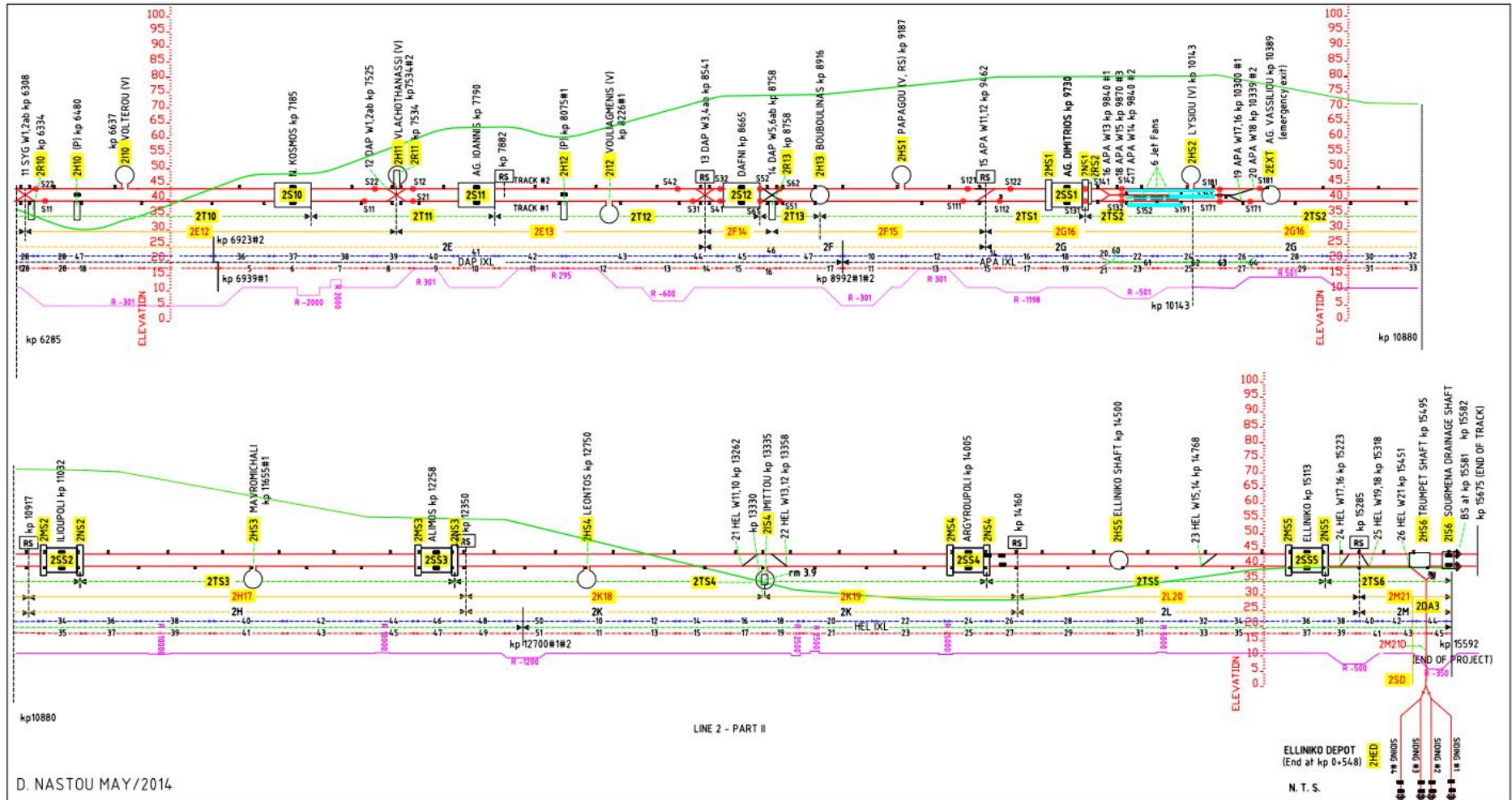
(πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)

Κωδικός BaaN	Νέος Κωδικός BaaN	Περιγραφή BaaN	Περιγραφή AccPlaning	Τύπος	Περιοχή	Τομέας	Start	End
TW2T01001	TW2T01	ΑΜΑΞ/ΣΙΟ - ΣΕΠΟΛΙΑ	TW2T01	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T01	-296	85
TW2T02001	TW2T02	ΣΕΠΟΛΙΑ - ΑΤΤΙΚΗ	TW2T02	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T02	85	1117
TW2T03001	TW2T03	ΑΤΤΙΚΗ - Σ. ΛΑΡΙΣΗΣ	TW2T03	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T03	1117	1939
TW2T04001	TW2T04	Σ. ΛΑΡΙΣΗΣ - ΜΕΤΑΞΟΥΡΓΕΙΟ	TW2T04	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T04	1939	2578
TW2T05001	TW2T05	ΜΕΤΑΞΟΥΡΓΕΙΟ - ΟΜΟΝΟΙΑ	TW2T05	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T05	2578	3312
TW2T06001	TW2T06	ΟΜΟΝΟΙΑ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	TW2T06	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T06	3312	4000
TW2T07001	TW2T07	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ - ΣΥΝΤΑΓΜΑ	TW2T07	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T07	4000	4608
TW2T08001	TW2T08	ΣΥΝΤΑΓΜΑ - ΑΚΡΟΠΟΛΗ	TW2T08	TW700	Πλωτή	TW2T08	4608	5540
TW2T09001	TW2T09	ΑΚΡΟΠΟΛΗ - ΣΥΓΓΡΟΥ - ΦΙΞ	TW2T09	TW700	Πλωτή	TW2T09	5540	6135
TW2T10001	TW2T10	ΣΥΓΓΡΟΥ - ΦΙΞ - Ν. ΚΟΣΜΟΣ	TW2T10	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T10	6135	7185
TW2T11001	TW2T11	Ν. ΚΟΣΜΟΣ - ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ	TW2T11	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T11	7185	7790
TW2T12001	TW2T12	ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ - ΔΑΦΝΗ	TW2T12	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T12	7790	8665
TW2T13001	TW2T13	ΔΑΦΝΗ - ΜΠΟΥΜΠΟΥΛΙΝΑΣ	TW2T13	TW700	ΧΣήραγγα	TW2T13	8665	8916
TW2TS1001	TW2TS1	ΜΠΟΥΜΠΟΥΛΙΝΑΣ - ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	TW2TS1	TW700	ΑΣήραγγα	TW2TS1	8916	9785
TW2TS2001	TW2TS2	ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ	TW2TS2	TW700	Επιστάθμιοι	TW2TS2	9785	10143
TW2TW1001	TW2TW1	ΣΕΠΟΛΙΑ - ΑΓ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ	TW2TW1	TW700	ΑΣήραγγα	TW2TW1	0W	920W
TW2TW2001	TW2TW2	ΑΓ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ - ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	TW2TW2	TW700	Επιστάθμιοι	TW2TW2	920W	1372W
TW3T02001	TW3T02	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ - ΘΗΣΕΙΟ	TW3T02	TW700	ΧΣήραγγα	TW3T02	4890	5470
TW3T03001	TW3T03	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ - ΣΥΝΤΑΓΜΑ	TW3T03	TW700	ΧΣήραγγα	TW3T03	5470	6393
TW3T04001	TW3T04	ΣΥΝΤΑΓΜΑ - ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟ	TW3T04	TW700	ΧΣήραγγα	TW3T04	6393	7365
TW3T05001	TW3T05	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ - ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ	TW3T05	TW700	ΧΣήραγγα	TW3T05	7365	8112
TW3T06001	TW3T06	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ - ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	TW3T06	TW700	ΧΣήραγγα	TW3T06	8112	9050

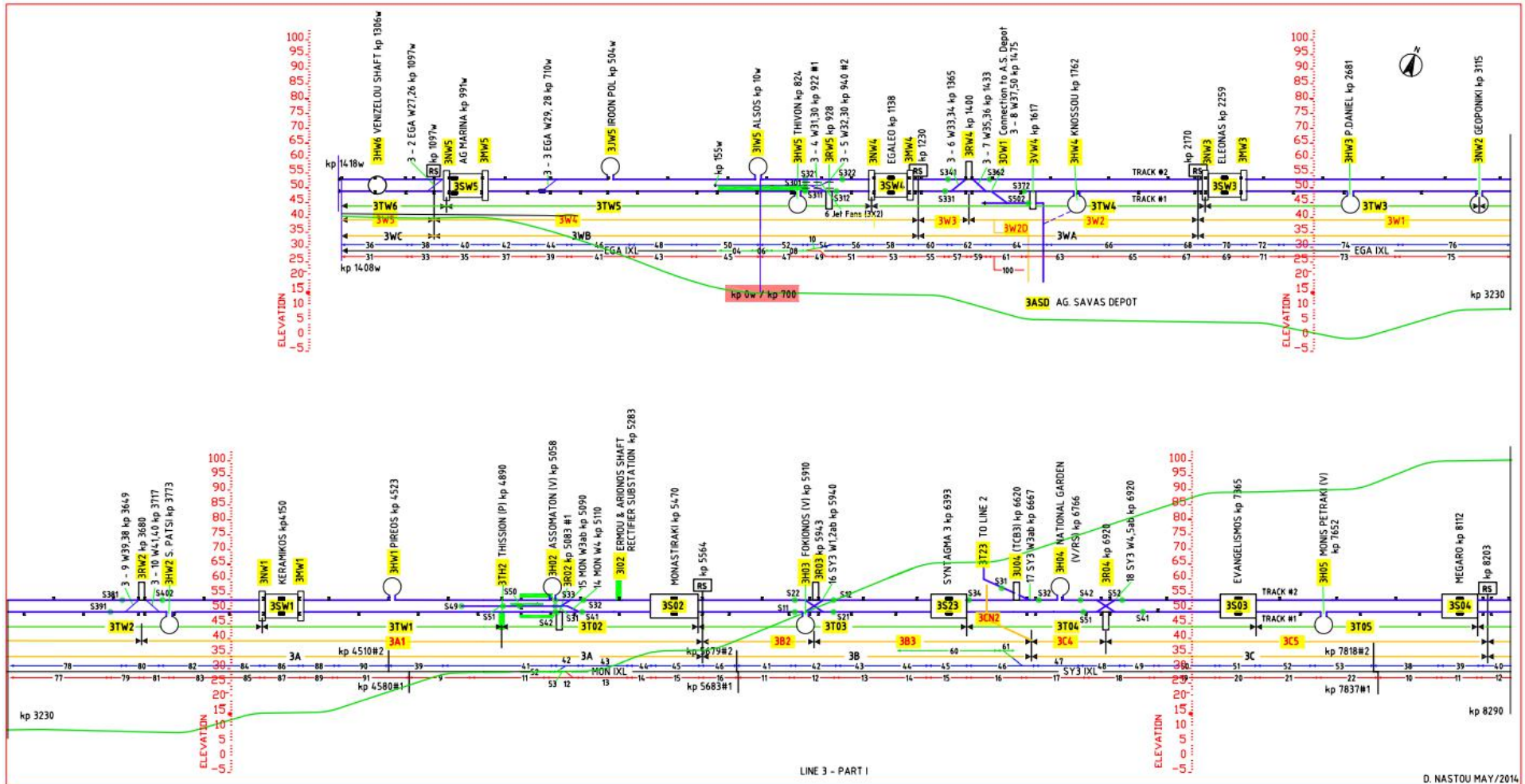
Οι εγκαταστάσεις φαίνονται και στα παρακάτω διαγράμματα πολύ λεπτομερώς για την κάθε μία από τις γραμμές 2 & 3:



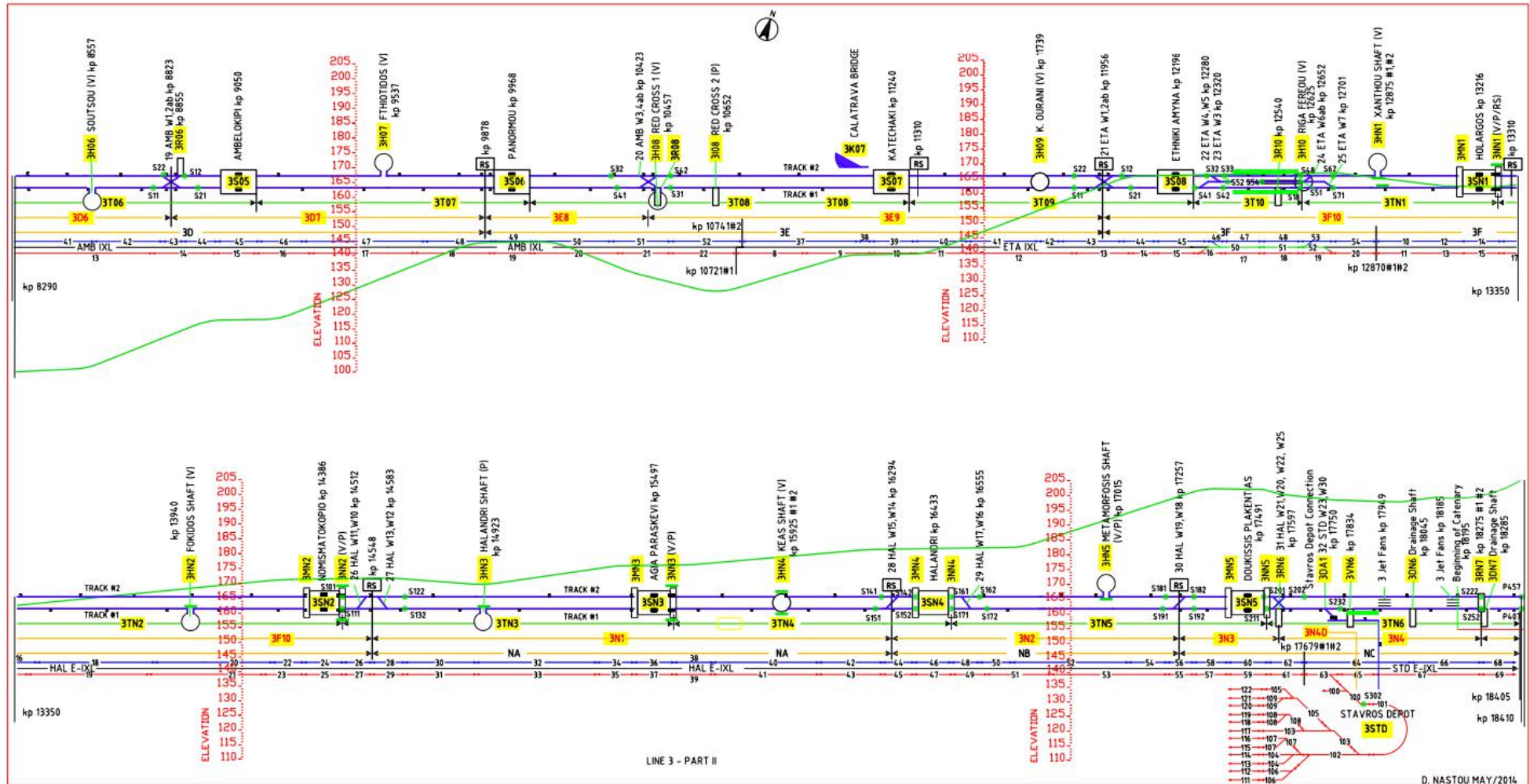
Εικόνα Π1.: Χάρτης εγκαταστάσεων γραμμής 2 τμήματος Ανθούπολη-Συγγρού/Φιζ (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)



Εικόνα Π2.: Χάρτης εγκαταστάσεων γραμμής 2 τμήματος Συγγρού/Φιξ-Ελληνικό (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)




Εικόνα Π3.: Χάρτης εγκαταστάσεων γραμμής 3 τμήματος Αγ. Μαρίνα-Μέγαρο Μουσικής (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)



Εικόνα Π4.: Χάρτης εγκαταστάσεων γραμμής 3 τμήματος Μέγαρο Μουσικής-Δουκίσσης Πλακεντίας (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)



Πίνακας Π4.: Χρεώσεις προσωπικού και εξοπλισμού συντήρησης (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)

 <b>Χρέωση προσωπικού Επιδομής για εργασίες τρίτων</b> Trackwork charges for 3rd parties works			
<b>Πίνακας Χρέωσης</b>			
<b>Charge Table</b>			
<b>Προσωπικό / Personel</b>	<b>Ημερήσια Βάρδια</b>	<b>Νυχτερινή βάρδια</b>	<b>Αργίες / Υπερωρίες</b>
Επιβλέπων / Supervisor	11.98 € / HR	17.97 € / HR	29.95 € / HR
Αρχιτεχνίτης / Senior Technician	10.51 € / HR	15.77 € / HR	26.28 € / HR
Τεχνίτης / Technician	9.61 € / HR	14.42 € / HR	24.03 € / HR
<b>Μηχανήματα / Machinery</b>	<b>Χρέωση Ανά Βάρδια / Charge Per Shift</b>		
Ο.Γ.Δ. / Unimog	500 € με τον Χειριστή / with Operator		
Μηχανές Έλξης / Locomotives	300 €		

ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ		
ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΤΟΜΕΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ		ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
Καρδιές	60,000.00	ΕΠΙΔΟΜΗ
Βελόνες - αντιβελόνες αροστερή και δεξιά Γραμμών & αναλώσιμα καρδιών 2/3	60,000.00	ΕΠΙΔΟΜΗ
Διάφορα	20,000.00	ΕΠΙΔΟΜΗ
<b>ΣΥΝΟΛΟ Γ</b>	<b>140,000.00</b>	<b>ΕΠΙΔΟΜΗ</b>
ΑΝΑΛΩΣΙΜΑ		ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
Αναλώσιμα Τομέα Επιδομή	60,000.00	ΕΠΙΔΟΜΗ
<b>ΣΥΝΟΛΟ Δ</b>	<b>60,000.00</b>	
Β. ΠΑΓΙΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ		ΣΥΝΟΛΟ
ΕΡΓΑΛΕΙΑ		ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΟΜΕΑ ΕΠΙΔΟΜΗΣ	15,000.00	ΕΠΙΔΟΜΗ
<b>ΣΥΝΟΛΟ Ε</b>	<b>15,000.00</b>	

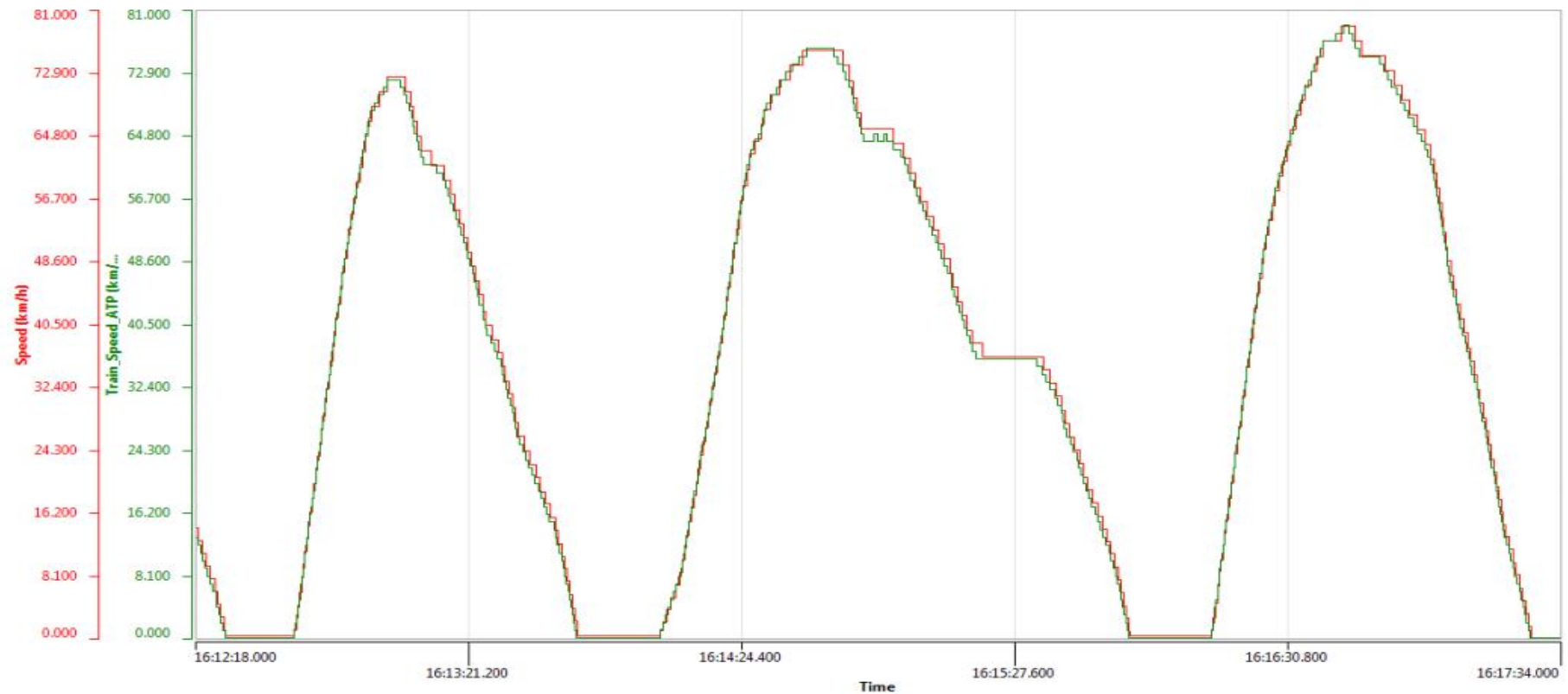
Πίνακας Π5.: Φορτία επιβάρυνσης των τμημάτων γραμμής έως την ημέρα γενικής επιθεώρησης (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)

Δευτέρα - Παρασκευή						Συνολικό φορτίο έως την 25/05/2007		Σύνολο την 07/04/2017		15/12/2013		07/04/2017		
Ωρα	Συχνότητα	Συρμοί	Συντελεστής	Σύνολο		Γραμμή 2		1,260,962 Trains		30,263,092 Axles		Αιγάλεω-Αγ. Μαρίνα		
Γραμμή 2						Σεπόλια - Σύνταγμα	189,300,614.40 T	423,683,294.40 T	1,185,598 Trains		28,454,363 Axles		Αγ. Αντώνιος-Ανθούπια	
05:30	06:00	00:10	3	0.8	806.4T	Αλλαγή SEP W 4b	280,588,745.60 T	514,971,425.60 T	931,602 Trains		22,358,457 Axles		Αγ. Δημήτριος-Ελληνικό	
06:00	07:00	00:05	12	0.9	3628.8T	Αλλαγή SEP W 7a&b	217,300,614.40 T	451,683,294.40 T	905,938 Trains		21,742,512 Axles			
07:00	07:30	00:04	8	0.9	2419.2T	Αλλαγή SY2 W 3b	214,622,822.40 T	449,005,502.40 T	1,355 Trains		70,434 Trains			
07:30	09:30	00:03	37	1	12432.T	Σύνταγμα - Δάφνη	163,978,406.40 T	398,361,086.40 T	1,274,610 Trains		30,590,632 Axles			
09:30	10:30	00:04	15	1	5040.T	Αλλαγή DAF W 3a&b	186,978,406.40 T	421,361,086.40 T	1,026,928 Trains		24,646,269 Axles			
10:30	12:00	00:05	18	1	6048.T	Αλλαγή DAF W 6b	226,321,091.20 T	460,703,771.20 T	932,825 Trains		22,387,801 Axles			
12:00	14:00	00:04	30	1	10080.T	Δάφνη - Αγ. Δημήτριος	78,635,721.60 T	313,018,401.60 T	711,215 Trains		17,069,160 Axles			
14:00	16:00	00:03	37	1	12432.T	Αλλαγή APA W15	157,271,443.20 T	626,036,803.20 T	1,381 Trains		71,812 Trains			
16:00	17:30	00:04	22	1	7392.T	Σεπόλια - Αγ. Αντώνιος	70,012,483.20 T	304,395,163.20 T	71,812 Trains					
17:30	22:00	00:06	45	0.9	13608.T	Αλλαγή ANT W35	140,024,966.40 T	608,790,326.40 T						
22:00	0:15	00:10	13	0.8	3494.4T	Φορτία σε απλή διέλευση	23665824.T	Εβδομαδιαίο 455112.T						
			240		73886.4T	Φορτία σε σημεία αναστροφή	47331648.T	Ετήσιο 23665824.T						
Γραμμή 3						Σύνταγμα - Εθ. Άμυνα		428,268,854.40 T		1,274,610 Trains		30,590,632 Axles		
05:30	06:00	00:10	3	0.8	806.4T	Αλλαγή SY3 W 5a	276,140,249.60 T	515,108,489.60 T						
06:00	07:00	00:05	12	0.9	3628.8T	Αλλαγή PEN W 5	217,300,614.40 T	456,268,854.40 T						
07:00	10:30	00:04	52	1	17472.T	Αλλαγή PEN W 1a&b	214,622,822.40 T	453,591,062.40 T						
10:30	12:00	00:05	18	1	6048.T	Σύνταγμα - Μοναστηράκι	106,079,520.00 T	345,047,760.00 T						
12:00	17:30	00:04	83	1	27888.T	Αλλαγή MON W3b	212,159,040.00 T	451,127,280.00 T						
17:30	22:00	00:05	54	0.9	16329.6T	Εθ. Άμυνα - Προαστιακός	74,460,979.20 T	313,429,219.20 T						
22:00	0:15	00:10	13	0.8	3494.4T	Αλλαγή HAL W21	148,921,958.40 T	626,858,438.40 T						
			235		75667.2T	Μοναστηράκι - Αιγάλεω	0.00 T	238,968,240.00 T						
Σάββατο - Κυριακή						Αλλαγή EGA W30 <th colspan="2">477,936,480.00 T <th colspan="2">711,215 Trains</th> <th colspan="2">17,069,160 Axles</th> </th>		477,936,480.00 T <th colspan="2">711,215 Trains</th> <th colspan="2">17,069,160 Axles</th>		711,215 Trains		17,069,160 Axles		
05:30	09:00	00:10	21	0.9	6350.4T	Φορτία σε απλή διέλευση	24128832.T	Εβδομαδιαίο 464016.T						
09:00	17:00	00:07	69	1	23184.T	Φορτία σε σημεία αναστροφή	48257664.T	Ετήσιο 24128832.T						
17:00	00:15	00:10	44	0.9	13305.6T									
			134		85680.T	Φορτία συρμού	336.T							

Db4o Provider (Embedded)\Default\5/5/17 17:09:34.000 - 5/9/17 11:56:56.561

Tuesday, May 9, 2017 10:34 AM

Configuration name : 069_01C01_I117	Customer Id : ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ SA	Vehicle Id : 322	Wheel diameter :	Time from : May 5, 2017 5:12:18 PM.000
Memory type : stm	Serial number : 11011963	Vehicle type : Metro	Distance counter : 221662.383miles	Time to : May 5, 2017 5:17:34 PM.000



Εικόνα Π5: Συνάρτηση ταχύτητας-χρόνου μεταξύ διαδοχικών σταθμών μετρό της Αθήνας (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)

**Πίνακας Π6.: Μετρό γραμμή 2: Χρόνοι διέλευσης-ταχύτητες-χρόνοι αναμονής (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)**

	ΑΠΟ	ΠΡΟΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΑΝΑΜΟΝΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Μ.Ωριαία
				ΤΑΞΙΔΙΟΥ	ΣΤΑΘΜΟΥ	(seconds)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ
ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ ΠΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟ				12:00:59	12:00:13		
	ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ	ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	667	πμ	πμ	72	33.35
	ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	ΑΓ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ	750	0:01:02	0:00:13	75	36.00
	ΑΓ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ	ΣΕΠΟΛΙΑ	1352	0:01:31	0:00:13	104	46.80
	ΣΕΠΟΛΙΑ	ΑΤΤΙΚΗ	1032	0:01:21	0:00:20	101	36.78
	ΑΤΤΙΚΗ	Σ.ΛΑΡΙΣΗΣ	829	0:01:10	0:00:15	85	35.11
	Σ.ΛΑΡΙΣΗΣ	ΜΕΤΑΞΟΥΡΓΕΙΟ	639	0:00:58	0:00:13	71	32.40
	ΜΕΤΑΞΟΥΡΓΕΙΟ	ΟΜΟΝΟΙΑ	736	0:01:07	0:00:30	97	27.32
	ΟΜΟΝΟΙΑ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	633	0:01:02	0:00:25	87	26.19
	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	ΣΥΝΤΑΓΜΑ 2	683	0:01:03	0:00:30	93	26.44
	ΣΥΝΤΑΓΜΑ	ΑΚΡΟΠΟΛΗ	932	0:01:21	0:00:13	94	35.69
	ΑΚΡΟΠΟΛΗ	ΣΥΓΓΡΟΥ-ΦΙΞ	595	0:01:06	0:00:20	86	24.91
	ΣΥΓΓΡΟΥ-ΦΙΞ	Ν.ΚΟΣΜΟΣ	1050	0:01:19	0:00:15	94	40.21
	Ν.ΚΟΣΜΟΣ	ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	605	0:01:00	0:00:15	75	29.04
	ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	ΔΑΦΝΗ	875	0:01:19	0:00:20	99	31.82
	ΔΑΦΝΗ	ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	1067	0:01:19	0:00:20	99	38.80
	ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ	1302	0:01:34	0:00:15	109	43.00
	ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ	ΑΛΙΜΟΣ	1226	0:01:36	0:00:15	111	39.76
	ΑΛΙΜΟΣ	ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ	1747	0:01:55	0:00:15	130	48.38
	ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	1108	0:01:24	0:00:20	104	38.35

**Πίνακας Π7.: Μετρό γραμμή 3: Χρόνοι διέλευσης-ταχύτητες-χρόνοι αναμονής (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)**

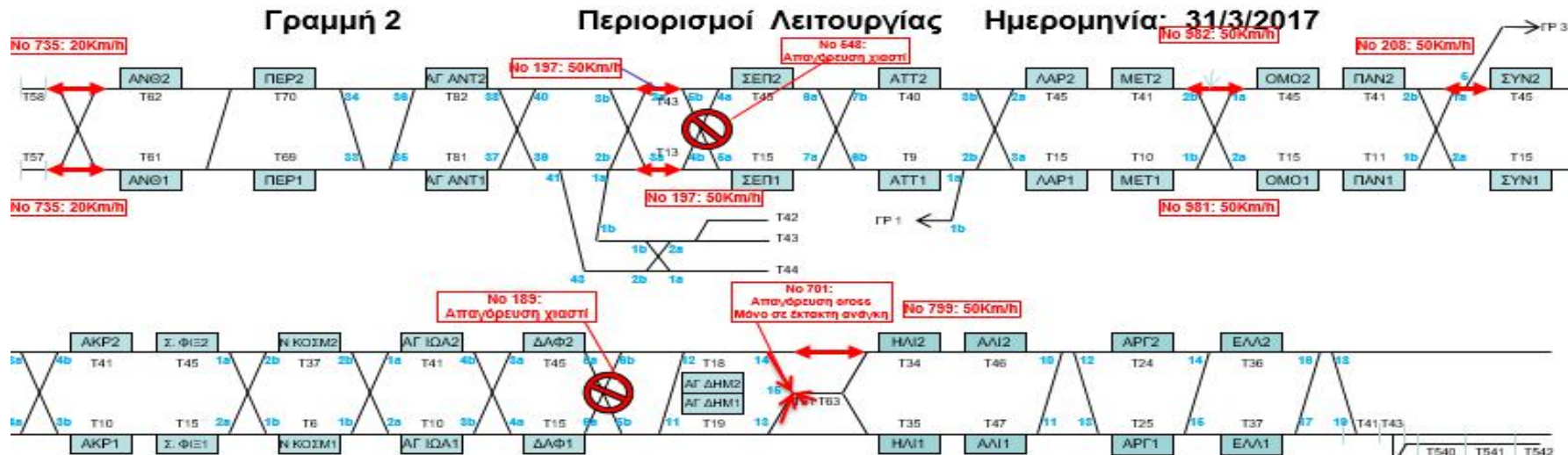
	ΑΠΟ	ΠΡΟΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΑΝΑΜΟΝΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Μ.Ωριαία
				ΤΑΞΙΔΙΟΥ	ΣΤΑΘΜΟΥ	(seconds)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ
ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ ΠΡΟΣ Δ. ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ	ΑΓ. ΜΑΡΙΝΑ	ΑΙΓΑΛΕΩ	1429	0:01:39	0:00:20	119	43.23
	ΑΙΓΑΛΕΩ	ΕΛΑΙΩΝΑΣ	1122	0:01:24	0:00:15	99	40.80
	ΕΛΑΙΩΝΑΣ	ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ	1890	0:02:01	0:00:15	136	50.03
	ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	1312	0:01:39	0:00:35	134	35.25
	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	ΣΥΝΤΑΓΜΑ 3	923	0:01:15	0:00:50	125	26.58
	ΣΥΝΤΑΓΜΑ	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ	970	0:01:16	0:00:20	96	36.38
	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ	750	0:01:04	0:00:15	79	34.18
	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ	ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	940	0:01:12	0:00:20	92	36.78
	ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	ΠΑΝΟΡΜΟΥ	920	0:01:13	0:00:15	88	37.64
	ΠΑΝΟΡΜΟΥ	ΚΑΤΕΧΑΚΗ	1270	0:01:30	0:00:15	105	43.54
	ΚΑΤΕΧΑΚΗ	ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ	1030	0:01:17	0:00:45	122	30.39
	ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ	ΧΟΛΑΡΓΟΣ	1026	0:01:23	0:00:15	98	37.69
	ΧΟΛΑΡΓΟΣ	ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ	1170	0:01:23	0:00:15	98	42.98
	ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ	ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	1110	0:01:22	0:00:15	97	41.20
	ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	ΧΑΛΑΝΔΡΙ	937	0:01:13	0:00:15	88	38.33
	ΧΑΛΑΝΔΡΙ	Δ. ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ	1057	0:01:19	0:02:20	219	17.38

Πίνακας Π8.: Ημερήσια επιβατική κίνηση ανά σταθμό (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)

ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΠΙΒΑΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ	ΕΠΙΒΙΒΑΣΕΙΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ
ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ	11,766	2.44%
ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	5,082	1.05%
ΑΓ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ	10,921	2.26%
ΣΕΠΟΛΙΑ	7,171	1.49%
ΑΤΤΙΚΗ	9,563	1.98%
ΣΤΑΘΜΟΣ ΛΑΡΙΣΗΣ	7,985	1.66%
ΜΕΤΑΞΟΥΡΓΕΙΟ	10,212	2.12%
ΟΜΟΝΟΙΑ	16,366	3.39%
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ	20,235	4.20%
ΣΥΝΤΑΓΜΑ	45,736	9.48%
ΑΚΡΟΠΟΛΗ	9,306	1.93%
ΣΥΓΓΡΟΥ-ΦΙΞ	15,021	3.11%
Ν. ΚΟΣΜΟΣ	11,240	2.33%
ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ	7,476	1.55%
ΔΑΦΝΗ	14,280	2.96%
ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	11,750	2.44%
ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ	8,333	1.73%
ΑΛΙΜΟΣ	7,298	1.51%
ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ	4,954	1.03%
ΕΛΛΗΝΙΚΟ	15,179	3.15%
ΑΓ. ΜΑΡΙΝΑ	16,763	3.48%
ΑΙΓΑΛΕΩ	17,234	3.57%
ΕΛΑΙΩΝΑΣ	3,289	0.68%
ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ	10,455	2.17%
ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	24,032	4.98%
ΣΥΝΤΑΓΜΑ	45,736	
ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ	23,227	4.82%
ΜΕΓ. ΜΟΥΣΙΚΗΣ	21,986	4.56%
ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	24,758	5.13%
ΠΑΝΟΡΜΟΥ	17,837	3.70%
ΚΑΤΕΧΑΚΗ	13,337	2.76%
ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ	10,328	2.14%
ΧΟΛΑΡΓΟΣ	8,871	1.84%
ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ	8,842	1.83%
ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	6,431	1.33%
ΧΑΛΑΝΔΡΙ	6,782	1.41%
ΔΟΥΚ. ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ	18,309	3.80%
<b>ΓΡΑΜΜΗ 2&amp;3</b>	<b>482,355</b>	<b>100.00%</b>

*Πίνακας Π9: Χρόνος και μέση ωριαία ταχύτητα διάνυσης των τμημάτων μετά την επιβολή των περιορισμών για τη γραμμή 2 (πάνω) και για τη γραμμή 3 (κάτω) στο βασικό σενάριο*

	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΑΝΑΜΟΝΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Μ.Ωριαία
	ΤΑΞΙΔΙΟΥ	ΣΤΑΘΜΟΥ	(seconds)	Ταχύτητα
<b>ΓΡΑΜΜΗ 2</b>	12:01:19 πμ	12:00:13 πμ	92	26.10
	0:01:22	0:00:13	95	28.42
	0:01:52	0:00:13	125	38.94
	0:01:34	0:00:20	114	32.59
	0:01:31	0:00:15	106	28.15
	0:01:06	0:00:13	79	29.12
	0:01:25	0:00:30	115	23.04
	0:01:19	0:00:25	104	21.91
	0:01:20	0:00:30	110	22.35
	0:01:53	0:00:13	126	26.63
	0:01:17	0:00:20	97	22.08
	0:01:32	0:00:15	107	35.33
	0:01:11	0:00:15	86	25.33
	0:01:25	0:00:20	105	30.00
	0:01:24	0:00:20	104	36.93
	0:02:59	0:00:15	194	24.16
	0:01:52	0:00:15	127	34.75
	0:02:03	0:00:15	138	45.57
	0:01:43	0:00:20	123	32.43
	<b>ΓΡΑΜΜΗ 3</b>	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΑΝΑΜΟΝΗ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ
ΤΑΞΙΔΙΟΥ		ΣΤΑΘΜΟΥ	(seconds)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ
0:02:00		0:00:20	140	36.75
0:01:55		0:00:15	130	31.07
0:02:25		0:00:15	160	42.53
0:01:53		0:00:35	148	31.91
0:01:35		0:00:50	145	22.92
0:01:39		0:00:20	119	29.34
0:01:27		0:00:15	102	26.47
0:01:21		0:00:20	101	33.50
0:01:29		0:00:15	104	31.85
0:02:00		0:00:15	135	33.87
0:01:25		0:00:45	130	28.52
0:01:49		0:00:15	124	29.79
0:01:35		0:00:15	110	38.29
0:01:37		0:00:15	112	35.68
0:01:24	0:00:15	99	34.07	
0:01:30	0:02:20	230	16.54	



Αριθμός	Εισαγωγή	Αρτη	Αιτιών	ΑΤΡ	Απαίτηση Απενεώσεως	Απενεώσ.	ΒΡ ΠΗ*	Αιτία - Περιορισμός
No 189	19/07/04		Τεραξέλης	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	Απαγόρευση διέλευσης χρεστί W3,6 ab DXL Δάρνης λόγω προσωρινής αφαίρεσης κεντρικών σιευρών. Τοποθέτηση βοηθού κεντρικών σιευρών.
No 197	02/08/04		Τεραξέλης	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 43 & 13 , 50 χλμ/ω DXL Σιπλίκων λόγω πηγίου προβλήματος γεωμετρίας
No 208	25/09/04		Τεραξέλης	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 44 50 χλμ/ω DXL Συνετήματος επαναφορά πηγίου περιορισμού
No 548	14/05/09		Μοροβασιούλης	---	ΝΑΙ	ΝΑΙ	---	Απαγόρευση διέλευσης χρεστί W4,5 ab DXL Σιπλίκων
No 701	15/10/12		Μάστορας	---	---	---	---	Απαγόρευση διέλευσης από την W14, ΑΔΗΓ προς middle Pit. (προβλήμα στην αριμή της W14) Η κίνηση μπορεί να γίνει σε περίπτωση μεγάλης ανάγκης
No 735	09/04/13		Αττικό Μέτρο	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 59-60, 20 χλμ/ω DXL Αγία Αναστασία
No 799	20/11/13		Καραγκούνης	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 22 & 24 , 30 χλμ/ω DXL ΑΡΑ λόγω υπερνόμενης μεταλλικής αποβάθρας
No 981	21/08/16		Κουζής	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 12 , 30 χλμ/ω DXL ΟΜΟ λόγω εφορίας στη σιδηρ.
No 982	21/08/16		Κουζής	ΝΑΙ	---	---	---	Περιορισμός ταχύτητας TC 42 , 30 χλμ/ω DXL ΟΜΟ λόγω εφορίας στη σιδηρ.

\* **BPTH** : Blocking Point against Throwing μόνο για SICAS

Εικόνα Π6.: Ισχύοντες περιορισμοί λειτουργίας την 31/3/2017 (πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ. Α.Ε.)