



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΡΟ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

**Δημήτριος Ρουμπέκας**

*Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου,  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π*

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ  
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ**



*Αθήνα, Μάρτιος 2021*



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**  
**SCHOOL OF RURAL & SURVEYING ENGINEERING**  
**DEP. OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT**

Diploma Thesis

**DEVELOPMENT OF A METRO LINE TIMETABLE  
OPTIMIZATION MODEL: APPLICATION TO ATHENS  
METRO**

**Dimitris Roumpekas**

*Supervisor: Konstantinos Kepaptsoglou,*

*Associate Professor NTUA*

**LABORATORY OF  
TRANSPORTATION ENGINEERING**



*Athens, March 2021*

*Στην οικογένειά μου και τους φίλους μου*

## ΔΗΛΩΣΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Δηλώνω ότι η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί στο σύνολό της δική μου εργασία, και κανένα τμήμα της δεν έχει χρησιμοποιηθεί για την κτήση άλλου τίτλου σπουδών. Όπου έχει χρησιμοποιηθεί υλικό από άλλες πηγές, αυτές έχουν αναφερθεί με ακρίβεια και πληρότητα.

Ρουμπέκας Δημήτρης

Υπογραφή Φοιτητή

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται και ο πενταετής κύκλος φοίτησης στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Έτσι, οι ευχαριστίες μου προς ορισμένα πρόσωπα κρίνονται απαραίτητες.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π, για τη πολύτιμη βοήθειά του και τις γνώσεις που μου προσέφερε στη διάρκεια της φοίτησής μου αλλά και στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου, υπό την επίβλεψή του.

Συνάμα, θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα Χριστίνα Ηλιοπούλου, για τις συμβουλές και την επίλυση αποριών που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ προς όλους τους καθηγητές της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π για όλα τα απαραίτητα εφόδια που παρείχαν απλόχερα, στην πενταετή φοίτησή μου.

Πρόσθετα, ευχαριστώ όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου, έναν προς έναν, για την συμπαράσταση και το συνεργατικό και όμορφο κλίμα που δημιουργήθηκε μεταξύ μας εντός της σχολής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το δίνω στην οικογένειά μου, που τόσο οικονομικά όσο και ψυχικά με βοήθησε για την επίτευξη των στόχων μου, καθώς και για την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της Σχολής.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η βελτιστοποίηση της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας (μπλε γραμμή). Η γραμμή αυτή εκτελεί το δρομολόγιο Νίκαια – Δουκίσσης Πλακεντίας – Αεροδρόμιο. Συγκεκριμένα μελετήθηκε το τμήμα Αγία Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας. Η κεντρική ιδέα είναι να μειωθεί όσο γίνεται περισσότερο η αναμονή των επιβατών στην αποβάθρα, με την ταυτόχρονη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για την κίνηση του συρμού. Παράλληλα, θα πρέπει και εντός του συρμού να επικρατεί μία σχετική άνεση των επιβατών στις επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του συρμού. Η αναμονή των επιβατών στην αποβάθρα μειώνεται με την ταχύτερη διέλευση των συρμών, η οποία αν όντως είναι ταχύτερη (μερικά δευτερόλεπτα σε κάθε σταθμό) από τα υπάρχοντα δρομολόγια, στο τέλος του δρομολογίου εξοικονομούνται μερικά λεπτά της ώρας, για το κάθε τρένο. Συμπερασματικά, αυτά τα λεπτά είναι πολύτιμα, καθώς στο τέλος της ημέρας τα δρομολόγια γίνονται ταχύτερα. Εκτός από το ενεργειακό πλεονέκτημα που θα έχει το νέο δρομολόγιο, αυξάνεται ταυτόχρονα και η συχνότητα των συρμών που θα περνούν, αποσυμφωνώντας έτσι τους κορεσμένους σταθμούς σε ώρες αιχμής. Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε., όπως το μήκος διαδρομής μεταξύ των σταθμών, οι χρόνοι διαδρομής με τα υπάρχοντα προφίλ ταχύτητας, καθώς και η Μέση Ωριαία Ταχύτητα. Η ανάλυση έγινε με βάση τον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> Νόμο του Νεύτωνα που αφορούν την κίνηση ενός σώματος σε διάφορες επιφάνειες. Έτσι, υπολογίστηκαν τρία Προφίλ Ταχύτητας, τα οποία εφαρμόστηκαν κατά το βέλτιστο τρόπο στη μηκοτομή της γραμμής, σύμφωνα με το χρόνο διαδρομής του κάθε «μπλοκ», την ενέργεια που καταναλώνεται σε αυτό το «μπλοκ» και την άνεση των επιβατών. Σημειώνεται πως η μηκοτομή της γραμμής είναι όσο γίνεται κοντά στα πραγματικά δεδομένα, λόγω αδυναμίας συλλογής στοιχείων για τις κλίσεις. Τέλος, από την ανάλυση προέκυψε πως όλα τα προφίλ ταχύτητας είναι γρηγορότερα από αυτό που εφαρμόζεται και συγκεκριμένα οι διαφορές που παρατηρούνται είναι οι μικρότεροι χρόνοι διαδρομής, η κατανάλωση ενέργειας και η άνεση των επιβατών.

## Λέξεις Κλειδιά

Γραμμή 3 μετρό, μπλε γραμμή, Αγία Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας, δρομολόγια μετρό, κατανάλωση ενέργειας, άνεση επιβατών, διέλευση συρμών, ώρες αιχμής, βελτιστοποίηση δρομολογίων.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is the optimization of the Athens metro line 3 (known as blue line). This line executes the route Nikaia - Doukissis Plakentias - Airport, but only the section Agia Marina - Doukissis Plakentias was studied. The basic idea is to reduce the waiting time of passengers at the platform as much as possible, with the simultaneous reduce of energy consumption. At the same time, there should be an adequate level of comfort for passengers inside the wagons, during the accelerations and decelerations of the train. The passengers' waiting time at the platform is reduced by the faster passage of the trains, which at the end of the day, if it is indeed faster (by few seconds at each station) than the existing timetable, a few minutes are saved for each train. In conclusion, these minutes are valuable, as at the end of the day the timetable is optimized. In addition, except from the advantage of reducing the energy consumption, the number of trains that will pass will be increased, thus decongesting the saturated stations at peak hours. For the preparation of this thesis, STASY S.A. data such as route length between stations, route times with the existing speed profiles, as well as the Average Hourly Speed were used. The analysis was based on Newton's 1st and 2nd Laws subject to the motion of a body on various surfaces. Thus, 3 Speed Profiles were calculated, which were optimally applied to the length of the line according to the travel time of each block, the energy consumed in this block and the comfort of passengers. It is noted that the slopes of each section of the line is as close as possible to the actual data, due to the inability to collect them. Finally, the analysis showed that all speed profiles are faster than the existing timetable, with the differences observed being the lower running times, the low energy consumption and the passengers' comfort between the Speed Profiles.

## **Keywords**

Athens metro line 3, blue line, Agia Marina - Doukissis Plakentias, metro routes, energy consumption, passenger comfort, train crossing, peak hours, timetabling optimization.



## Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1.	Ιστορική Αναδρομή στις Αστικές Συγκοινωνίες .....	1
1.2.	Στόχος της Εργασίας.....	9
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	12
2.1.	Εισαγωγή.....	12
2.2.	Προγραμματισμός Δρομολογίων Συρμών .....	12
2.3.	Ελαχιστοποίηση της Κατανάλωσης Ενέργειας .....	16
2.4.	Άνεση των επιβατών .....	20
2.5.	Μοντέλο Βελτιστοποίησης.....	21
3.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	22
3.1.	Εισαγωγή.....	22
3.2.	Ανάλυση της κίνησης του συρμού .....	22
3.3.	Ανάλυση των προφίλ ταχύτητας.....	28
3.4.	Μέθοδος Βελτιστοποίησης .....	31
3.4.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο Γραμμικού Προγραμματισμού.....	31
3.4.2	Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός.....	33
3.5.	Ανάπτυξη Προτύπου .....	33
4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ .....	37
4.1.	Εισαγωγή.....	37
4.1.1	Πρωτογενή δεδομένα.....	37
4.2.	Ανάλυση των Πρωτογενών Δεδομένων και Προσομοίωση Διαδρομής.....	40
4.2.1	Υπολογισμός Δυνάμεων και Επιταχύνσεων των Συρμών.....	40
4.2.2	Υπολογισμός Χρόνων Διαδρομής .....	45
4.2.3	Υπολογισμός Κατανάλωσης Ενέργειας .....	48
4.3.	Δευτερογενή Δεδομένα .....	49
4.4.	Εφαρμογή Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού.....	59
4.4.1	Εισαγωγή.....	59
4.4.2	Γραμμικό Μοντέλο.....	59
4.4.3	Διερεύνηση Περιορισμών .....	60
4.5.	Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης.....	61
4.6.	Σενάρια Προβλήματος και Ανάλυση Ευαισθησίας .....	64
4.6.1	Εισαγωγή.....	64
4.6.2	Μεταβολή των βαρών .....	64
4.6.3	Μεταβολή των ορίων του χρόνου διαδρομής.....	67
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69

5.1. Βασικά Συμπεράσματα.....	69
5.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	70
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74

## Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα 1.1.1:</b> Ο Σιδηρόδρομος που ένωνε τις περιοχές του Πειραιά με τη Κηφισιά (Πηγή : <a href="http://www.ametro.gr">www.ametro.gr</a> ) .....	2
<b>Εικόνα 1.1.2:</b> Γραμμή 4 του Μετρό (Πηγή: <a href="http://www.ametro.gr">www.ametro.gr</a> ).....	6
<b>Εικόνα 1.1.3:</b> Το δίκτυο σταθερών τροχιών στην ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής (Πηγή: <a href="http://www.urbanrail.net">www.urbanrail.net</a> ).....	8
<b>Εικόνα 1.2.1:</b> Το υπό μελέτη τμήμα της γραμμής 3 του μετρό (Πηγή: Wikipedia).....	9
<b>Εικόνα 2.3.1:</b> Διαφορετικά προφίλ σε ξεχωριστούς περιορισμούς ταχύτητας (S. Yang et al., 2018) .....	19
<b>Εικόνα 2.5.1:</b> Παράδειγμα αλγορίθμου Simplex (Πηγή: Wikipedia).....	22
<b>Εικόνα 3.2.1:</b> Διαστάσεις συρμού δεύτερης γενιάς .....	23
<b>Εικόνα 4.1.1:</b> Γενικά χαρακτηριστικά συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε) .....	37
<b>Εικόνα 4.1.2:</b> Χαρακτηριστικά κινητήρα συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)...	38
<b>Εικόνα 4.1.3:</b> Χαρακτηριστικά επιτάχυνσης συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε) .....	38
<b>Εικόνα 4.5.1:</b> Το μοντέλο βελτιστοποίησης στο λογισμικό Solver .....	62

## Ευρετήριο Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.2.1:</b> Διαγράμματα ταχύτητας – απόστασης – χρόνου των τριών προφίλ ταχύτητας (Yin et al., 2017) .....	13
<b>Σχήμα 2.3.1:</b> Τα ενεργειακά κόστη ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε παγκόσμια κλίμακα (Anderson, Maxwell, & Dr. Harris, 2009) .....	16
<b>Σχήμα 2.4.1:</b> Θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση και τίναγμα σε σχέση με το χρόνο κατά την επιβράδυνση του συρμού (Martin & Litwhiler, 2008).....	20
<b>Σχήμα 3.2.1:</b> Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά την επιτάχυνση .....	24
<b>Σχήμα 3.2.2:</b> Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά το ρολλάρισμα .....	25
<b>Σχήμα 3.2.3:</b> Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά την επιβράδυνση .....	25
<b>Σχήμα 3.2.4:</b> Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά την επιτάχυνση .....	26
<b>Σχήμα 3.2.5:</b> Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά το ρολλάρισμα.....	26
<b>Σχήμα 3.2.6:</b> Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά την επιβράδυνση.....	27
<b>Σχήμα 3.2.7:</b> Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά την επιτάχυνση.....	27
<b>Σχήμα 3.2.8:</b> Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά το ρολλάρισμα.....	28
<b>Σχήμα 3.2.9:</b> Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά την επιβράδυνση .....	28
<b>Σχήμα 4.3.1:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω.....	49
<b>Σχήμα 4.3.2:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αιγάλεω - Ελαιώνας .....	49
<b>Σχήμα 4.3.3:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Ελαιώνας - Κεραμεικός ...	50
<b>Σχήμα 4.3.4:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Κεραμεικός - Μοναστηράκι .....	50
<b>Σχήμα 4.3.5:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Μοναστηράκι - Σύνταγμα	50
<b>Σχήμα 4.3.6:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Σύνταγμα - Ευαγγελισμός	51
<b>Σχήμα 4.3.7:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής .....	51
<b>Σχήμα 4.3.8:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι.....	51
<b>Σχήμα 4.3.9:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αμπελόκηποι - Πανόρμου	52
<b>Σχήμα 4.3.10:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Πανόρμου - Κατεχάκη ...	52
<b>Σχήμα 4.3.11:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα .....	52
<b>Σχήμα 4.3.12:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Εθνική Άμυνα - Χολαργός .....	53
<b>Σχήμα 4.3.13:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Χολαργός - Νομισματοκοπείο .....	53
<b>Σχήμα 4.3.14:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Νομισματοκοπείο - Αγία Παρασκευή.....	53
<b>Σχήμα 4.3.15:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αγία Παρασκευή - Χαλάνδρι .....	54
<b>Σχήμα 4.3.16:</b> Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας .....	54
<b>Σχήμα 4.3.17:</b> Συγκριτικό διάγραμμα χρόνων διαδρομής.....	56
<b>Σχήμα 4.3.18:</b> Συγκριτικό διάγραμμα ενεργειών.....	58
<b>Σχήμα 4.6.1:</b> Διάγραμμα μεταβολών μείωσης βαρών .....	65
<b>Σχήμα 4.6.2:</b> Διάγραμμα μεταβολών αύξησης βαρών.....	66
<b>Σχήμα 4.6.3:</b> Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής βαρών .....	66
<b>Σχήμα 4.6.4:</b> Διάγραμμα λύσεων με μεταβολές στο άνω όριο του χρόνου .....	67
<b>Σχήμα 4.6.5:</b> Διάγραμμα λύσεων με μεταβολές στο κάτω όριο του χρόνου.....	68

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ιστορική ανασκόπηση Αστικών Συγκοινωνιών (Πηγή: <a href="http://www.ametro.gr">www.ametro.gr</a> ).....	4
Πίνακας 4.1: Επιβατική κίνηση της γραμμής 3 για το τμήμα Αγ. Μαρίνα - Δουκίσσης Πλακεντίας (Πηγή ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε) .....	39
Πίνακας 4.2: Στοιχεία κάθε τμήματος της γραμμής 3 (Πηγή ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε) .....	40
Πίνακας 4.3: Ομαδοποίηση των τμημάτων ανά κλίση.....	41
Πίνακας 4.4: Συγκριτικός πίνακας χρόνων διαδρομής .....	55
Πίνακας 4.5: Ενέργεια ανά τμήμα και προφίλ σε κιλοβατώρες (kWh) .....	57
Πίνακας 4.6: Επιλεγμένα προφίλ από το μοντέλο βελτιστοποίησης.....	63
Πίνακας 4.7: Μεταβολή μείωσης βαρών .....	64
Πίνακας 4.8: Μεταβολή αύξησης βαρών.....	65
Πίνακας 4.9: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για το άνω όριο .....	67
Πίνακας 4.10: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για το κάτω όριο.....	68
Πίνακας Π.1: Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 1 .....	74
Πίνακας Π.2: Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 2 .....	77
Πίνακας Π.3: Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 3 .....	80
Πίνακας Π.4: Δεδομένα εξόδου από το μοντέλο βελτιστοποίησης .....	84

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Ιστορική Αναδρομή στις Αστικές Συγκοινωνίες

Στην Αθήνα, τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς ήρθαν σχετικά νωρίς σε σχέση με την υπόλοιπη Ευρώπη. 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 Βικτωρίας προς την Πλατεία Αττικής. Τρεις δεκαετίες αργότερα η γραμμή αυτή 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. Υπήρχε ήδη από το 1925, η πρώτη εταιρεία Αστικής Συγκοινωνίας στην Αθήνα με την επωνυμία Ελληνικοί Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι (Ε.Η.Σ.). Σκοπός της ήταν η λειτουργία της μίας και μοναδικής υπόγειας γραμμής σταθερών συγκοινωνιών ταχείας κυκλοφορίας (μετρό), τον Πειραιά μέχρι τα βόρεια προάστια της Αθήνας. Περνούσε μέσω της πλατείας της Ομόνοιας η οποία γνώριζε ένδοξες εποχές ως το εμπορικό κέντρο της Αθήνας, με αποτέλεσμα ήδη το δίκτυο να είναι επιβαρυνόμενο με τις μετακινήσεις. Το 1929, ιδρύεται η Ηλεκτρική Εταιρεία Μεταφορών (Η.Ε.Μ.) με σκοπό τη λειτουργία των τραμ, των τρόλεϊ και των λεωφορείων στις κεντρικές περιοχές της Αθήνας και του Πειραιά. Τονίζεται πως στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, το δίκτυο των αστικών συγκοινωνιών της Αθήνας ήταν ολοκληρωτικά κατεστραμμένο.

Τα μέσα μη σταθερής τροχιάς, δηλαδή τα λεωφορεία και τα ταξί, που κυκλοφορούσαν την προπολεμική περίοδο ήταν ανύπαρκτα, καθώς τα περισσότερα ή είχαν επιταχθεί από τις δυνάμεις κατοχής ή είχαν καταστραφεί. Έτσι, έμενε το περπάτημα να είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος μετακίνησης. Για αυτόν το λόγο, η ελληνική Κυβέρνηση προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτή την κατάσταση απευθύνθηκε σε ιδιώτες, οι οποίοι μόνοι τους ή συνεταιρικά επιθυμούσαν να αναλάβουν τις δημόσιες συγκοινωνίες σε γραμμές της επιλογής τους. Ιδρύεται ο Οργανισμός Ελέγχου Αστικών Συγκοινωνιών (Ο.Ε.Α.Σ.) με σκοπό τον έλεγχο και την εποπτεία της παρεχόμενης εξυπηρέτησης από τους ιδιώτες λεωφορειούχους. Κατά αυτό το τρόπο, ο ιδιοκτήτης ενός υπεραστικού λεωφορείου, που συνήθως ήταν και ο οδηγός του, αναλάμβανε την ευθύνη της λειτουργίας και της συντήρησης του οχήματος σε καθημερινή βάση. Σε αυτήν την προσπάθεια υπήρξε μεγάλη ανταπόκριση και τα πρώτα χρόνια μετά τον πόλεμο, καθιστώντας την επένδυση σε λεωφορείο ιδιαίτερα προσοδοφόρα. Με την αύξηση της ζήτησης για συγκοινωνίες άρχισαν οι τριβές μεταξύ των ιδιοκτητών λεωφορείων, γιατί κάθε ιδιοκτήτης ήθελε να κυκλοφορεί το λεωφορείο του στις πιο επικερδείς διαδρομές με τη μεγαλύτερη ζήτηση. Ειδικότερα είχε παρατηρηθεί πως ήταν προτιμητέες αυτές οι διαδρομές 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. Για το λόγο αυτό, λίγο αργότερα, οι ιδιώτες λεωφορειούχοι οργανώνουν έξι Κοινά Ταμεία Εισπράξεως Λεωφορείων, με το γνωστό έως σήμερα ακρωνύμιο Κ.Τ.Ε.Λ. Ο φορέας αυτός, ήταν υπεύθυνος για τη διαχείριση και το συντονισμό των λεωφορείων. Ο προγραμματισμός όλων των δρομολογίων των λεωφορείων γινόταν από το Γραφείο Κίνησης, το οποίο δρομολογούσε εκ περιτροπής την κυκλοφορία των λεωφορείων σε όλες τις γραμμές, έτσι ώστε μετά τη συμπλήρωση ενός πλήρους κύκλου, κάθε ιδιοκτήτης-οδηγός να έχει ίδιο μερίδιο στις εισπράξεις των εισιτηρίων και κάθε λεωφορείο να εκτίθεται σε όλες τις κυκλοφοριακές συνθήκες, καλές ή κακές ανάλογα με το δρόμο, και κατά συνέπεια οι δαπάνες συντήρησης και καυσίμων να είναι ίδιες για όλους. Σημειώνεται, πως το 1965 κορυφώθηκε η χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών στην Αθήνα, ενώ σημειώθηκε ρεκόρ επιβατικής κίνησης, καθώς 973 εκατομμύρια επιβάτες χρησιμοποιούσαν όλα τα μέσα συγκοινωνίας.

Όσον αφορά το στόλο των λεωφορείων, τα πρώτα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία εμφανίσθηκαν στις γραμμές του Πειραιά στο τέλος της δεκαετίας του 1940 και στις αρχές του 1950 ήρθαν και στην Αθήνα. Μέχρι το 1960 όλες οι τοπικές γραμμές τραμ στην Αθήνα και τον Πειραιά αντικαταστάθηκαν από ηλεκτροκίνητα ή πετρελαιοκίνητα λεωφορεία. Τα τραμ που συνέδεαν τον Πειραιά με το Πέραμα εξακολούθησαν τη λειτουργία τους έως το τέλος της δεκαετίας του '70, που αντικαταστάθηκαν και αυτά από πετρελαιοκίνητα λεωφορεία.



**Εικόνα 1.1.1:** Ο Σιδηρόδρομος που ένωνε τις περιοχές του Πειραιά με τη Κηφισιά (Πηγή : [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))

Οι τότε δημόσιες αστικές συγκοινωνίες, είχαν φθηνά κόμιστρα και μπορούσαν να καλύψουν εύκολα τις λειτουργικές δαπάνες τους αποφέροντας ταυτόχρονα σημαντικά κέρδη στους ιδιοκτήτες ή στους οδηγούς των λεωφορείων. Παρόλο που ο πληθυσμός της Περιφέρειας Αθηνών αυξανόταν με γρήγορο ρυθμό (3,5% ετησίως την δεκαετία του 60' και 1,8% την δεκαετία του 70'), ο σημαντικά υψηλότερος ρυθμός αύξησης των αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης (Ι.Χ) ανέστειλε τη χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, το 1961 κυκλοφορούσαν 39.000 αυτοκίνητα ιδιωτικής χρήσης ενώ 10 χρόνια αργότερα (1971) ο αριθμός έφτασε τις 170.000. Όπως καταλαβαίνει κανείς, ο ρυθμός αύξησής τους έφτανε 15,8% ετησίως. Τα επόμενα χρόνια, αν και ο ρυθμός αυτός υποχώρησε βαθμιαία σε 11,2% και 6,7% τις δεκαετίες του 70' και 80' αντίστοιχα, ο αριθμός των αυτοκινήτων που κυκλοφορούσε στην Αθήνα είχε συνεχή αυξητική τάση.

Μεταξύ άλλων, μέχρι το 1991 είχαν δοθεί άδειες κυκλοφορίας σε πάνω από 16.000 ταξί. Ο συνδυασμός του μεγάλου αριθμού Ι.Χ αυτοκινήτων και ταξί επέδρασε ανασταλτικά στη χρήση των αστικών συγκοινωνιών: η ετήσια επιβατική κίνηση έπεσε από την τιμή ρεκόρ των 973 εκατομμυρίων επιβατών το 1965 σε 510 εκατομμύρια το 1983. Η απώλεια εσόδων καθώς και οι λειτουργικές δαπάνες κατέστησαν τις αστικές συγκοινωνίες οικονομικά ασύμφορες.

Το κράτος αναγνωρίζοντας τη λειτουργικότητα των δημοσίων μέσων μεταφοράς στο κοινωνικό σύνολο, άρχισε να συνδράμει στα έξοδα των λεωφορειούχων με μορφές επιδότησης. Διαπιστώνοντας με ανησυχία την υποβάθμιση του επιπέδου και της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών κατέβαλε προσπάθειες για την αναδιοργάνωσή τους και έτσι, στη δεκαετία του 70', μετά από συστηματικές μελέτες και διεξοδικές συζητήσεις, συντελέστηκαν κάποιες βασικές αλλαγές στην δομή των συγκοινωνιών. Έτσι, έγιναν οι εξής αλλαγές:

- Η ιδιωτική εταιρεία Ηλεκτροκίνητων Μεταφορών, η οποία ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία και εκμετάλλευση των τρόλεϊ στην ευρύτερη Περιφέρεια της Αττικής, διαλύθηκε το 1971 προς αντικατάστασή της από την κρατική, πλέον, εταιρεία ΗΛΠΑΠ (Ηλεκτροκίνητα Λεωφορεία Πειραιώς-Αθηνών και Προαστίων). ([www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))
- Το 1976, το Ελληνικό Δημόσιο αγοράζει την εταιρεία Ελληνικοί Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι (Ε.Η.Σ.) και ιδρύει μια νέα ανώνυμη εταιρεία με την επωνυμία Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι Αθηνών Πειραιώς (Η.Σ.Α.Π.), η οποία αναλαμβάνει τη λειτουργία του ηλεκτρικού σιδηροδρόμου και των λίγων λεωφορειακών γραμμών που διατηρούσε η προκάτοχος της Ε.Η.Σ. (γραμμή 1). ([www.oasa.gr](http://www.oasa.gr))
- Τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία που λειτουργούσαν κάτω από τον έλεγχο των ΚΤΕΛ, περιήλθαν το 1978 στην κατοχή της κρατικής εταιρείας ΕΑΣ (Εταιρεία Αστικών Συγκοινωνιών).

Το 1977 ψηφίζεται ο νόμος 588/1977 «Περί οργανώσεως των Αστικών Συγκοινωνιών Πρωτεύουσας και άλλων τινών διατάξεων», με τον οποίο καταργείται ο Οργανισμός Ελέγχου Αστικών Συγκοινωνιών (Ο.Ε.Α.Σ.) και ιδρύεται ο Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών (Ο.Α.Σ.), ο οποίος ανήκει εξ ολοκλήρου στο Ελληνικό Δημόσιο. Ο οργανισμός αυτός έχει σκοπό τον σχεδιασμό, συντονισμό και την εποπτεία όλου του συστήματος αστικών συγκοινωνιών της Αθήνας. Με τον ίδιο νόμο, ιδρύεται δημόσια επιχείρηση με την επωνυμία Επιχείρηση Αστικών Συγκοινωνιών (Ε.Α.Σ.), με σκοπό την εξυπηρέτηση συγκοινωνιακών αναγκών της περιοχής Αθηνών – Πειραιώς, μέσω λεωφορειακών γραμμών.

Το 1991 ιδρύεται 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. Στο πλαίσιο αυτό, δυο νέες γραμμές Μετρό ξεκίνησαν να κατασκευάζονται στα τέλη του 1992.

Το 1993 ιδρύεται με το νόμο 2175/1993 «Οργάνωση ενιαίου φορέα αστικών συγκοινωνιών στην περιοχή Αθηνών – Πειραιώς και Περιχώρων», με τον οποίο ιδρύεται η δημόσια επιχείρηση κοινωφελούς χαρακτήρα με την επωνυμία Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών Ανώνυμη Εταιρεία (Ο.Α.Σ.Α. Α.Ε.) ως καθολικός διάδοχος του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών (Ο.Α.Σ.). Σκοπός του Ο.Α.Σ.Α. είναι η διεξαγωγή του συγκοινωνιακού έργου με όλα τα μέσα μαζικής μεταφοράς στην περιοχή Αθηνών – Πειραιώς και περιχώρων, με ιδιαίτερη μέριμνα για την εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού και την ποιότητα ζωής στην περιοχή της αρμοδιότητάς του. Σημειώνεται, πως το 1996 το καταστατικό του Ο.Α.Σ.Α. τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε στις διατάξεις του ν.2414 περί εκσυγχρονισμού των Αστικών Συγκοινωνιών.



Στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται χρονολογικά η πορεία για την ανάπτυξη της εταιρίας ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

**Πίνακας 1.1:** Ιστορική ανασκόπηση Αστικών Συγκοινωνιών (Πηγή: [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))

Χρονολογία	Γεγονός
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 Η.Λ.Π.Α.Π.
1976	Αντικατάσταση ιδιωτικής εταιρείας ΕΗΣ από την κρατική εταιρεία ΗΣΑΠ
1978	Ίδρυση Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών (Ο.Α.Σ.)
1991	Ίδρυση ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

Στο τέλος του 1998, με την ψήφιση του ν.2669, οι Αστικές Συγκοινωνίες της περιοχής Αθηνών-Πειραιώς αλλάζουν. 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, τρόλεϊ, ηλεκτρικό σιδηρόδρομο στην περιοχή αρμοδιότητας του Ο.Α.Σ.Α. διενεργείται από τους συμβαλλόμενους με αυτόν Εκτελεστικούς Φορείς Συγκοινωνιακού Έργου (ΕΦΣΕ), οι οποίοι είναι: Ε.ΘΕ.Λ. Α.Ε., Η.Λ.Π.Α.Π. Α.Ε., Η.Σ.Α.Π. Α.Ε. Οι φορείς αυτοί αποτελούν τις θυγατρικές εταιρείες του Ο.Α.Σ.Α.

Στο μεταξύ η κατασκευή των γραμμών 2 και 3 του Μετρό Αθήνας εξελίσσεται κανονικά όλα αυτά τα χρόνια μέχρι και τον Ιανουάριο του 2000, που τίθεται σε λειτουργία το πρώτο στάδιο του έργου: για τη γραμμή 2 το τμήμα «ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΣΕΠΟΛΙΑ» και για τη γραμμή 3 το τμήμα «ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ-ΣΥΝΤΑΓΜΑ», συνολικού μήκους 13 χλμ. με 14 σταθμούς. Το Νοέμβριο του 2000 προστίθεται το τμήμα της γραμμής 2 «ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΔΑΦΝΗ», μήκους 5 χιλιομέτρων 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 τη διαχείριση και την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Τον Απρίλιο του 2003 προστίθεται στο δίκτυο του Μετρό το τμήμα της γραμμής 3 «ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ», με μήκος 1,5 χιλιομέτρου και ένας νέος σταθμός. Στα μέσα του 2004 παραδίδονται και οι πρώτες επεκτάσεις του δικτύου. Για τη γραμμή 3 «ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ-ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ», επεκτείνεται υπογειώς προς τα βόρεια για 5,9 χιλιόμετρα έως τον σταθμό ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ και από εκεί οι νέοι συρμοί του Μετρό αναδύονται στην επιφάνεια και μέσω των γραμμών του Προαστιακού Σιδηροδρόμου ώστε να φθάνουν στον Σταθμό του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών “Ελευθέριος Βενιζέλος”. Για τη γραμμή 2 «ΣΕΠΟΛΙΑ-ΔΑΦΝΗ», επεκτείνεται στα δυο της άκρα και το Μετρό πλέον φθάνει δυτικότερα στο σταθμό ΑΓΙΟ ΑΝΤΩΝΙΟ και νοτιότερα στο σταθμό ΑΓΙΟ ΔΗΜΗΤΡΙΟ/ΑΛΕΚΟ ΠΑΝΑΓΟΥΛΗ.

Αργότερα, το Μάιο του 2007, εντάσσεται στο δίκτυο της γραμμής 3 η επέκταση από το Μοναστηράκι έως το Αιγάλεω, μήκους 4,2 χιλιομέτρων με 3 νέους σταθμούς, βελτιώνοντας σημαντικά την εξυπηρέτηση των κατοίκων των Δυτικών Προαστίων. Στο τέλος του 2013 παραδόθηκε μια νέα επέκταση της γραμμής 3, από το σταθμό Αιγάλεω μέχρι το σταθμό Αγία Μαρίνα συνολικού μήκους 1,4 χιλιομέτρων που εξυπηρετεί καθημερινά πολλούς επιβάτες. Με την παράδοση του σταθμού Αγία Μαρίνα ολοκληρώθηκε η παράδοση 7 συνολικά σταθμών προς το επιβατικό κοινό και συγκεκριμένα των σταθμών Περιστερί, Ανθούπολη, Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό. Επισημαίνεται πως από τα μέσα του 2004, προστέθηκαν στο σύστημα συγκοινωνιών δύο νέα δίκτυα, του TRAM και του Προαστιακού Σιδηροδρόμου. Το δίκτυο του Προαστιακού Σιδηροδρόμου εξασφαλίζει πρόσβαση στο Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών “Ελευθέριος Βενιζέλος” σε 40 περίπου λεπτά από το κέντρο της πόλης.

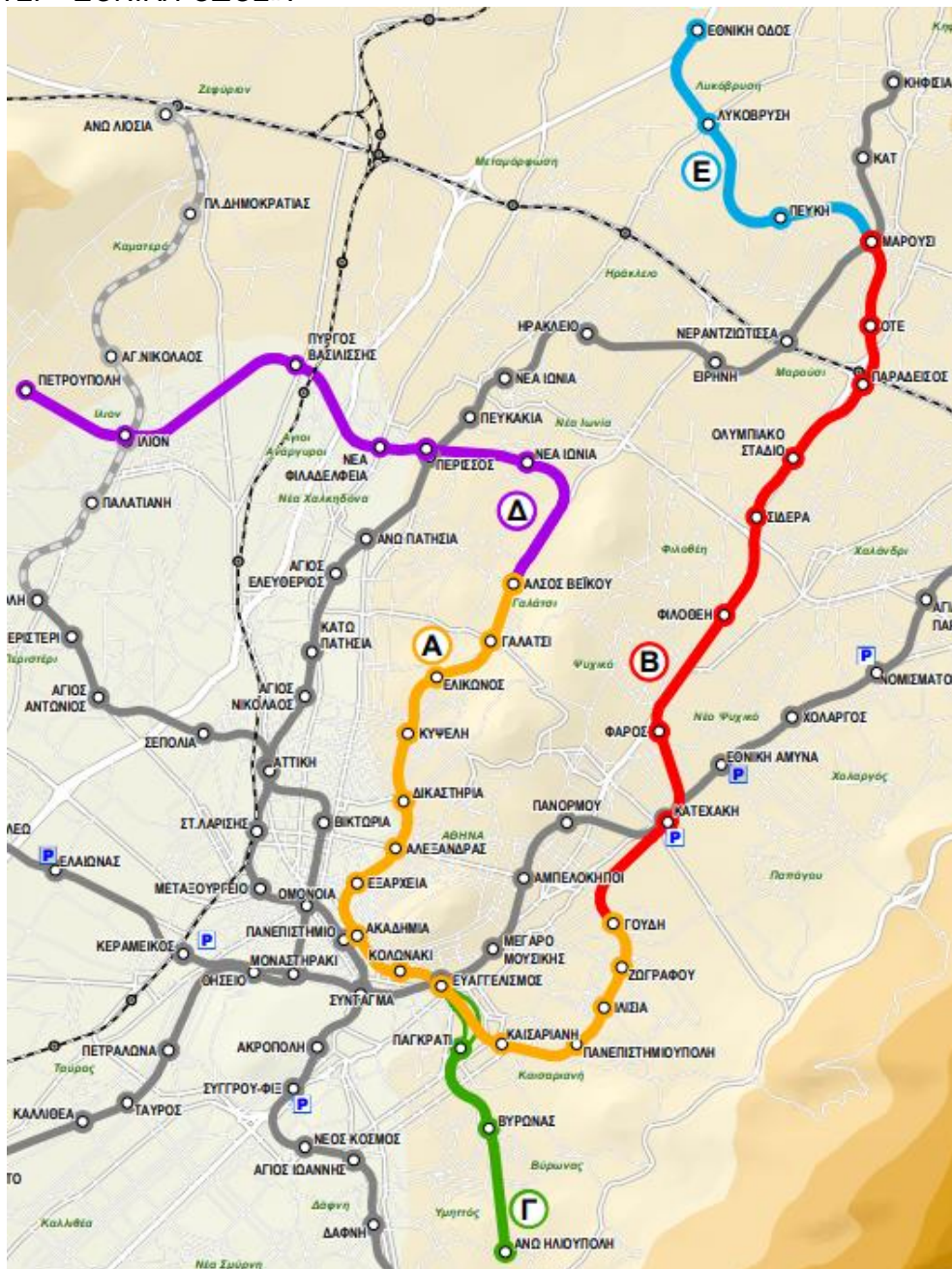
Το TRAM διαθέτει δύο γραμμές συνολικού μήκους 26,1 χιλιομέτρων που συγκλίνουν στο Παλιό Φάληρο. Με τη λειτουργία του TRAM επιτυγχάνεται η σύνδεση του κέντρου της Αθήνας με την παραλιακή ζώνη έως το Ελληνικό (γραμμή T4: «Πλάτωνας») και του Νέου Φαλήρου με τη Γλυφάδα (γραμμή T3: «Θουκυδίδης»).

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. δημοπράτησε το Νοέμβριο του 2008 το διαγωνισμό για την κατασκευή της επέκτασης της γραμμής 3 του Μετρό στα Δυτικά Προάστια με κατάληξη στον Πειραιά και το Μάρτιο του 2012 υπεγράφη η σχετική σύμβαση με την ανάδοχο εταιρία J&P – ΑΒΑΞ Α.Ε., GHELLA SPA, ALSTOM TRANSPORT S.A.

Τον Ιούλιο του 2020 παραδόθηκαν προς χρήση στο επιβατικό κοινό οι τρεις πρώτοι σταθμοί Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός και Νίκαια. Επισημαίνεται πως οι σταθμοί που παραδόθηκαν σε λειτουργία αλλά και αυτοί που είναι υπό κατασκευή, σχεδιάστηκαν με προτεραιότητα στα βιοκλιματικά χαρακτηριστικά και στη ασφαλή μετακίνηση των επιβατών στο δίκτυο του Μετρό. Με τη λειτουργία των τριών πρώτων σταθμών της επέκτασης προς Πειραιά υπολογίζεται μεγάλη αύξηση της επιβατικής ημερήσιας κίνησης, καθώς οι κάτοικοι των Δήμων Αγίας Βαρβάρας, Κορυδαλλού και Νίκαιας έχουν στη διάθεση τους μια σύγχρονη γραμμή Μετρό. Η παράδοση και λειτουργία των 3 πρώτων σταθμών νωρίτερα από την ολοκλήρωση του συνόλου της επέκτασης της γραμμής 3 του Μετρό έχει σημαντικότερα κοινωνικό-οικονομικά οφέλη αλλά κυρίως θετικές επιπτώσεις στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, όπως μείωση κυκλοφορίας Ι.Χ. οχημάτων που έχει ως συνέπεια την περεταίρω μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σημειώνεται, πως το σύνολο της επέκτασης της γραμμής 3 αναμένεται να δοθεί σε εμπορική λειτουργία εντός του καλοκαιριού του 2022.

Σήμερα, οι δύο γραμμές του Μετρό Αθήνας έχουν συνολικό μήκος 59,7 χιλιόμετρα, συμπεριλαμβανομένων των 20,7 χιλιομέτρων της γραμμής του προαστιακού από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας προς το Αεροδρόμιο, και διαθέτουν 40 σύγχρονους σταθμούς, εκ των οποίων οι 4 είναι σε κοινή χρήση με τον Προαστιακό.

Στη διαδικασία της δημοπράτησης βρίσκεται και η γραμμή 4 του μετρό η οποία συνδέει τη περιοχή της Πετρούπολης με αυτή της Εθνικής Οδού στη περιοχή της Κηφισιάς, με την ονομασία «ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗ – ΕΘΝΙΚΗ ΟΔΟΣ». Αποτελείται από 5 τμήματα (Τμήμα Α, Τμήμα Β, Τμήμα Γ, Τμήμα Δ και Τμήμα Ε). Το Τμήμα Α της γραμμής 4 «ΑΛΣΟΣ ΒΕΪΚΟΥ – ΓΟΥΔΗ» αποτελεί τμήμα του προγραμματιζόμενου, μακροπρόθεσμα προς υλοποίηση, συνολικού έργου της γραμμής 4 και έχει μήκος 12,8 χλμ. περίπου και επιπλέον περιλαμβάνει την συνδετήρια σήραγγα της γραμμής 4 με τις γραμμές 2 & 3 και την σήραγγα πρόσβασης και τον χώρο εναπόθεσης - συντήρησης συρμών Κατεχάκη. Το έργο περιλαμβάνει δεκαπέντε υπόγειους σταθμούς. Το τμήμα Α της γραμμής 4 μετρό έχει σχεδιασθεί με σκοπό την εξυπηρέτηση πολλών πυκνοκατοικημένων περιοχών της πόλης και την εξυπηρέτηση πολλών σημαντικών κτιρίων και εγκαταστάσεων, όπως Νοσοκομεία, Εκπαιδευτικά Ιδρύματα, Δικαστήρια και μεγάλα δημόσια κτίρια Οργανισμών ή Υπουργείων. Οι ονομασίες των τμημάτων είναι οι εξής: το Τμήμα Β «ΓΟΥΔΗ – ΜΑΡΟΥΣΙ», το Τμήμα Γ «ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ – ΑΝΩ ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ», το Τμήμα Δ «ΑΛΣΟΣ ΒΕΪΚΟΥ – ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗ» και το Τμήμα Ε «ΜΑΡΟΥΣΙ – ΕΘΝΙΚΗ ΟΔΟΣ».



Εικόνα 1.1.2: Γραμμή 4 του Μετρό (Πηγή: [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))

Καθημερινά, περίπου 1.000.000 επιβάτες εξυπηρετούνται από τις γραμμές 2 και 3 του Μετρό, ενώ η γραμμή 1 των ΗΣΑΠ, μήκους 25,6 χιλιομέτρων με 24 σταθμούς, εξυπηρετεί αντίστοιχα περίπου 500.000 επιβάτες. Οι Αθηναίοι έχουν πλέον τη δυνατότητα να πραγματοποιούν συνδυασμένες διαδρομές εξοικονομώντας χρόνο στις καθημερινές τους μετακινήσεις. Παράλληλα, για τις ανάγκες των δημόσιων μεταφορών, λειτουργεί ένας μεγάλος αριθμός νέων λεωφορείων κινούμενων με φυσικό αέριο ή και πετρέλαιο, ενώ προγραμματίζεται η σταδιακή αντικατάσταση ολόκληρου του υφιστάμενου στόλου με ηλεκτροκίνητα.

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 Αθήνας. Ενδεικτικά, για τους χρήστες των δημοσίων μέσων είναι η ταχύτητα, η άνεση, η ασφάλεια, η αξιοπιστία. Τα γενικότερα οφέλη της πόλης όπως η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η καταπολέμηση του θορύβου κ.ά., είναι σημαντικά.

Για το σκοπό αυτό, το 2011 ιδρύθηκε η ανώνυμη εταιρεία με την επωνυμία ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ με το γνωστό ακρωνύμιο 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 και τροχιόδρομοι-τραμ).

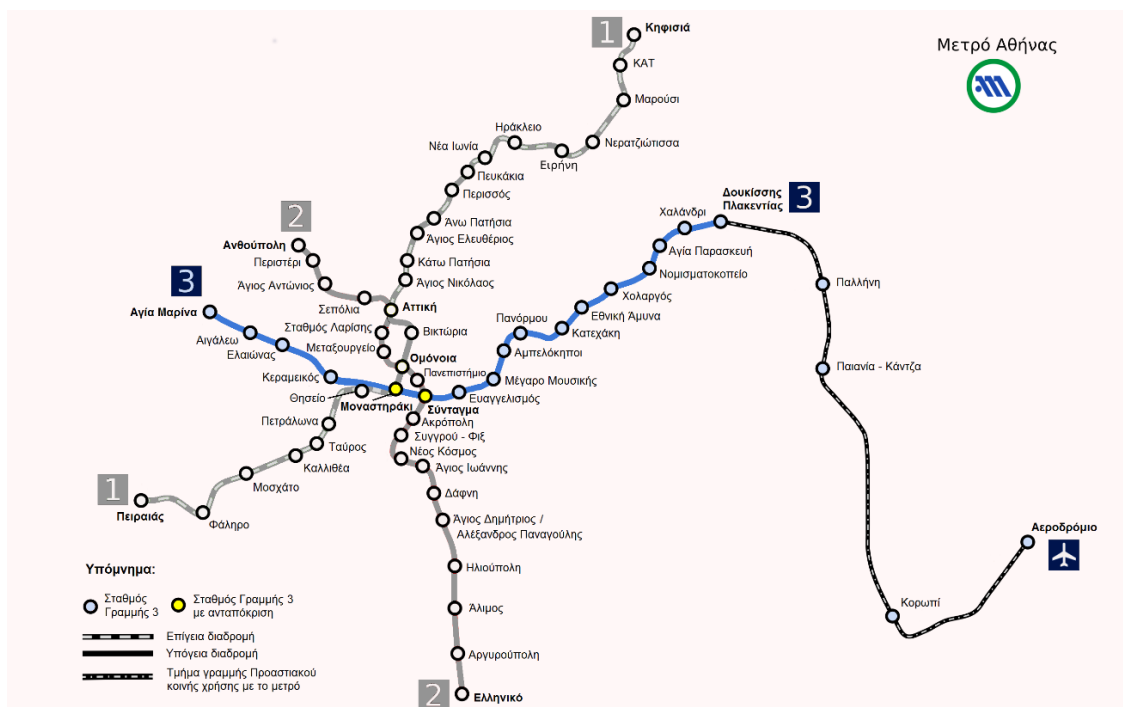


Εικόνα 1.1.3: Το δίκτυο σταθερών τροχιών στην ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής  
(Πηγή: [www.urbanrail.net](http://www.urbanrail.net))

## 1.2. Στόχος της Εργασίας

Τα συστήματα του μετρό είναι από τα αποτελεσματικότερα μέσα μαζικής και ταχείας μεταφοράς. Προσφέρουν γρήγορη, άνετη μεταφορά με χαμηλό κόστος μετακίνησης και σχετικά υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Επίσης είναι από τις οικολογικότερες μεθόδους μετακίνησης, και σε συνδυασμό με τα παραπάνω αποτελούν το κύριο μέσο μεταφοράς εντός της πόλης στην Ελλάδα, αλλά και σε πληθώρα Ευρωπαϊκών πόλεων.

Η γραμμή 3 του μετρό της Αθήνας (γνωστή ως «μπλε γραμμή»), αποτελείται από 24 σταθμούς και τρεις επιπλέον που είναι υπό κατασκευή. Στην εργασία αυτή μελετάται το τμήμα Αγία Μαρίνα - Δουκίσσης Πλακεντίας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.2.1:** Το υπό μελέτη τμήμα της γραμμής 3 του μετρό (Πηγή: Wikipedia)

Το θέμα της βελτιστοποίησης των δρομολογίων του μετρό ανά τον κόσμο έχει απασχολήσει πολλούς επιστήμονες και ερευνητές. Συγκεκριμένα, υπάρχει πληθώρα δημοσιευμάτων πάνω σε αυτό το αντικείμενο μελέτης. Υπάρχουν μελέτες που εξετάζουν το πρόβλημα με δυναμική ζήτηση επιβατών, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο διαδρομής του συρμού, την ενέργεια που καταναλώνεται και τη μέση μέγιστη απόκλιση φορτίου του συρμού και στις δύο κατευθύνσεις (Wu, Dong, & Tse, 2020).

Το τμήμα που διασχίζει ο συρμός μεταξύ δύο σταθμών χωρίζεται σε 3 φάσεις, μέγιστη επιτάχυνση, ρολλάρισμα και μέγιστη επιβράδυνση, με βάση την Αρχή του Pontryagin. Η μέγιστη ταχύτητα στο μετρό της Αθήνας είναι 80 km/h, η οποία ανά τμήματα, αναλόγως και με την οριζοντιογραφία, περιορίζεται. Πολλές φορές, αναλόγως με την μηκοτομή του τμήματος, χρειάζεται να γίνει πιο περίπλοκο το σύστημα κίνησης, αναπτύσσοντας παραπάνω από 3 φάσεις, περιορίζοντας έτσι την ταχύτητα σε διάφορα επιμέρους τμήματα (Haahr, Pisinger, & Sabbaghian, 2017). Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί μία τόσο περίπλοκη κίνηση, χρειάζεται μη γραμμικό προγραμματισμό (S. Yang, Wu, Yang, Sun, & Gao, 2018).

Σημαντική πτυχή του προβλήματος αποτελεί και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, όπως οικονομικότερη οδήγηση λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που καταναλώνεται για την έλξη του συρμού και την ενέργεια που μετατρέπεται



σε ηλεκτρική από την επιβράδυνσή του (X. Li & Lo, 2014). Μελέτες έχουν γίνει και για το πώς μπορεί να γίνει οικολογικότερη η κίνηση των συρμών, μέσω ενός συστήματος που επικοινωνούν τα τρένα μεταξύ τους και συγχρονίζουν τις κινήσεις του (Bai et al, 2019). Επίσης, οι κλίσεις και οι καμπύλες της μηκοτομής και οριζοντιογραφίας αντίστοιχα, συμμετέχουν ενεργά στην κίνηση του συρμού. Έτσι, με εκμετάλλευση αυτών των γεωμετριών, μπορεί να επιτευχθεί ενεργειακή οικονομία στα μέσα σταθερής τροχιάς (Wang & Goverde, 2019). Οι Yang και άλλοι (S. Yang et al., 2019) ανέλυσαν στοιχεία για το αν θα εξοικονομούσε ενέργεια η μη στάση σε ορισμένους σταθμούς, καθώς κατ' αυτόν τον τρόπο ο συρμός θα έχει λιγότερες επιταχύνσεις, που είναι η πιο ενεργοβόρα φάση στην κίνηση του μετρό. Εξετάστηκε από τους Scheepmaker και άλλοι (Scheepmaker, Goverde, & Kroon, 2017) για το πόσο πιθανό είναι να εφαρμοστεί ένα σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας στα συμβουλευτικά συστήματα (DAS) και στα συστήματα αυτόματης λειτουργίας αμαξοστοιχίας (ATO), ενώ από τους Sheu και άλλοι (Sheu & Lin, 2012) εξετάστηκε η εφαρμογή τους σε συστήματα αυτόματης ρύθμισης της αμαξοστοιχίας (ATR).

Προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών του μετρό, πέρα από γρήγορο και οικονομικό θα πρέπει να είναι και άνετο. Το πόσο άνετη είναι μία διαδρομή καθορίζεται από τις κινήσεις του συρμού στον οριζόντιο και στον κάθετο άξονα, που στην αγγλική ορίζεται με τον όρο « *jerk*». Επίσης, θα πρέπει και οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις να είναι εντός κάποιων ορίων, καθώς η άνεση καθορίζεται από την ευκολία με την οποία ένας επιβάτης μένει όρθιος δίχως να κρατιέται (Martin & Litwhiler, 2008).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η βελτιστοποίηση της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας (μπλε γραμμή). Συγκεκριμένα, βελτιστοποιείται το δρομολόγιο ως προς το χρόνο διαδρομής, την ενεργειακή κατανάλωση και την άνεση των επιβατών, μέσω τριών προφίλ ταχύτητας, μέσω εκμετάλλευσης της μηκοτομής της γραμμής.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται εισαγωγή στη διπλωματική εργασία σχετικά με τα προβλήματα τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, αναφέρονται προβλήματα που παρουσιάζονται σε ένα σύστημα μετρό και χρήζουν βελτιστοποίησης.

Το **δεύτερο κεφάλαιο**, που ακολουθεί, αποτελεί το επιστημονικό υπόβαθρο, όπου παρουσιάζονται και αναπτύσσονται βασικά θέματα του ευρύτερου προβλήματος της βελτιστοποίησης του χρονοδιαγράμματος. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή σε βασικές έννοιες που αναφέρονται στο υπόλοιπο της εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της μείωσης του χρόνου διαδρομής μεταξύ δύο σταθμών. Επιπρόσθετα, γίνεται ανάλυση του ζητήματος της ελαχιστοποίησης της ενέργειας και τέλος, αναφέρεται το πρόβλημα της άνεσης των επιβατών. Αυτοί οι τρεις πυλώνες αποτελούν τον κορμό της διπλωματικής εργασίας. Όλα τα παραπάνω αναλύονται με αναφορές σε έρευνες και επιστημονικά άρθρα που έχουν πραγματοποιηθεί σε συναφές ή ίδιο θέμα.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στην μελέτη. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι με τις οποίες επιλύεται το κάθε τμήμα του προβλήματος ξεχωριστά. Εμπειρίχονται σχήματα και διαγράμματα για την καλύτερη δυνατή κατανόηση της λύσης του θέματος. Παράλληλα εξηγείται η λογική πίσω από κάθε μέθοδο αλλά και ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή. Επίσης παρουσιάζονται τα στοιχεία τα οποία αποκτήθηκαν από την εταιρία (ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε.), επεξηγώντας το κάθε ένα μέγεθος και τη χρησιμότητά του. Επίσης, περιγράφονται οι υπολογισμοί και η χρησιμότητα του καθενός από αυτούς.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναλύονται τα πρωτογενή στοιχεία που αποκτήθηκαν. Παρουσιάζεται λεπτομερώς η ανάλυση και οι υπολογισμοί που έγιναν, όπως και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Αρχικά υπολογίζονται οι τιμές των χρόνων του κάθε προφίλ ταχύτητας ξεχωριστά

και έπειτα γίνονται διαγράμματα χρόνου ταχύτητας για το κάθε τμήμα ξεχωριστά. Σε δεύτερη φάση υπολογίζονται η ενέργεια επιτάχυνσης και η ενέργεια επιβράδυνσης, καθώς και η καθαρή κατανάλωση ενέργειας της γραμμής. Τέλος, ακολουθεί το μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού, το οποίο βρίσκει το βέλτιστο προφίλ ταχύτητας για το κάθε τμήμα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** εμπεριέχονται τα συμπεράσματα από την έρευνα. Συγκεκριμένα τονίζονται τα βασικά προβλήματα και ο στόχος της διπλωματικής και στη συνέχεια γίνεται ένας έλεγχος για το αν αυτά επιλύθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού επισημαίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση, σχετικές με το θέμα της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, στο **έκτο κεφάλαιο**, περιέχονται βιβλιογραφικές αναφορές και δημοσιεύματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.



## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1. Εισαγωγή

Για πολλούς, τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς αποτελούν μέρος του τρόπου ζωής, καθώς τα χρησιμοποιούν αρκετές ώρες της ημέρας. Είναι ο οικονομικότερος τρόπος γρήγορης μετακίνησης εντός της πόλης. Όμως οι συρμοί, σε αντίθεση με τα λεωφορεία, κινούνται σε σταθερή τροχιά, παρακάμπτοντας έτσι την κίνηση που πιθανόν να συναντήσει το λεωφορείο. Αυτό τα καθιστά ανταγωνιστικά απέναντι στα λεωφορεία, με το επιπλέον πλεονέκτημα ότι είναι γρηγορότερα, ασφαλέστερα και παρέχουν υψηλότερης ποιότητας υπηρεσίες. Παρ' όλα αυτά, οι αμαξοστοιχίες καταναλώνουν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Επιστήμονες ανά τον κόσμο ερευνούν τρόπους και αναλύουν στοιχεία προκειμένου να γίνουν περισσότερο ανταγωνιστικά τα συστήματα μετρό από αυτά των λεωφορείων. Έτσι, το να μειωθεί ο χρόνος διαδρομής του κάθε συρμού, να γίνουν οικονομικότερα αλλά και να αυξηθεί η ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρουν είναι μονόδρομος.

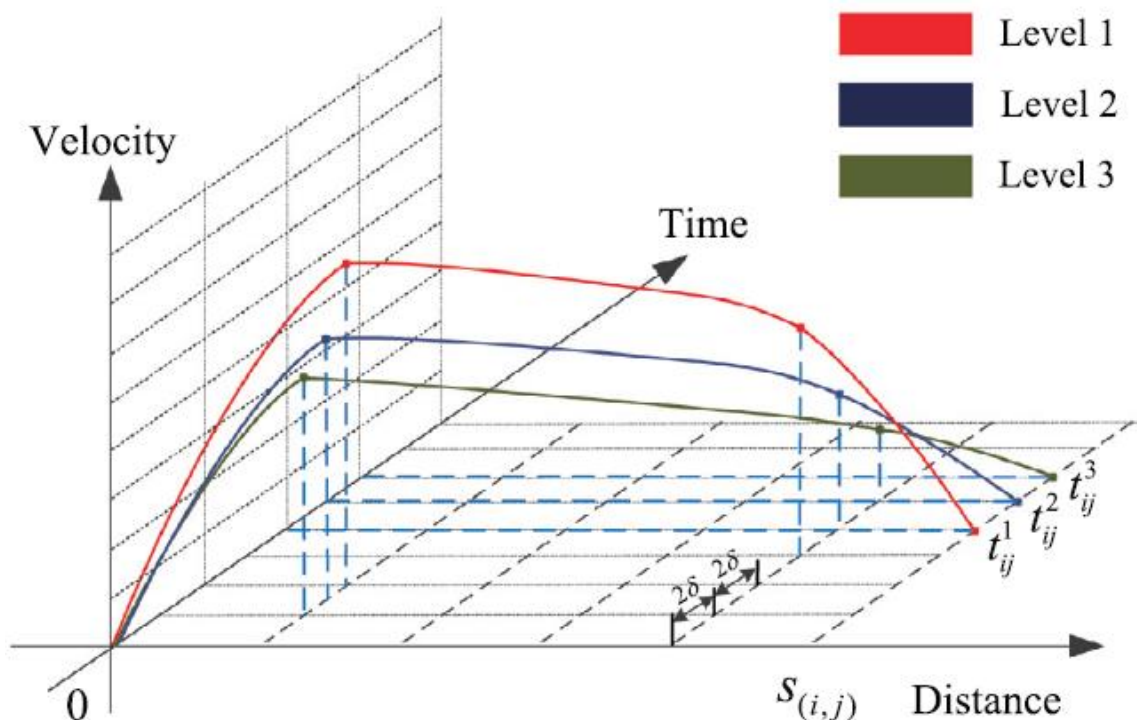
### 2.2. Προγραμματισμός Δρομολογίων Συρμών

Τα συστήματα μετρό αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι για τη δημόσια συγκοινωνία, μιας και είναι αξιόπιστα και αποτελεσματικά για τη μετακίνηση μεγάλου όγκου πληθυσμού σε λίγο χρόνο. Υποστηρίζεται σχεδόν από όλες τις χώρες ανά το κόσμο, καθώς έχει τις λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα άλλα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς. Καθώς όμως τα δίκτυα του μετρό γίνονται ολοένα μεγαλύτερα και πιο περίπλοκα, ολοένα και αυξάνεται η ανάγκη για ικανοποίηση του επιβατικού κοινού με την ταχύτερη διέλευση των αμαξοστοιχιών αλλά με την ταυτόχρονη σμίκρυνση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αυτού του μέσου μεταφοράς.

Για το μεγαλύτερο κομμάτι του μετακινούμενου πληθυσμού με το μετρό, θα ήταν χρήσιμο να γνωρίζουν πότε θα περνάει ο συρμός σύμφωνα με ένα χρονοδιάγραμμα (timetable). Όμως, ένα μοντέλο προγραμματισμού δρομολογίων επιβατικά προσανατολισμένο, δεν αποτυπώνει τις επιθυμίες για μετακίνηση όλου του πληθυσμού που χρησιμοποιεί το μετρό, παρά μόνο ενός ποσοστού του. Για τον παραπάνω λόγο έχει δημιουργηθεί ένα πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης της ζήτησης για μετακίνηση προς αντικατάσταση του ντετερμινιστικού μοντέλου που προϋπήρχε με σκοπό την εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού, θεωρώντας πως η ζήτηση για μετακίνηση είναι ελαστική τόσο στις ώρες αιχμής, όσο και κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας (Robenek, Azadeh, Maknoon, de Lapparent, & Bierlaire, 2018). Η έρευνα προσομοιώθηκε για το δίκτυο μετρό του Ισραήλ, λαμβάνοντας υπόψιν τα έσοδα και την επιθυμία πληρωμής για ταχύτερη μεταφορά από τους επιβάτες. Έτσι, για τα μη κυκλικά δρομολόγια, τόσο τα έσοδα όσο και η κίνηση των επιβατών αυξήθηκε, με αποτέλεσμα να είναι το ιδανικό πρόγραμμα για δρομολόγηση συρμών για τα δεδομένα του δικτύου του Ισραήλ. Οι Shi και άλλοι (Shi, Yang, Yang, & Gao, 2018), προσανατολισμένοι στις υπηρεσίες που προσφέρει το δίκτυο του μετρό, δημιούργησαν ένα μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό την βελτιστοποίηση ενός κορεσμένου από επιβάτες σύστημα μετρό. Αυτό στοχεύει να βελτιώσει τους χρόνους αναμονής των επιβατών στην αποβάθρα με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται πλέον συμφόρηση, με ό,τι κινδύνους αυτό συνεπάγεται. Παράλληλα, οι Haahr και η ομάδα του (Haahr et al., 2017), επίσης με την υπόθεση ότι υπάρχει δυναμική προσέλευση των επιβατών στις αποβάθρες, ανέπτυξαν ένα μοντέλο Δυναμικού Προγραμματισμού με σκοπό τη λύση των απροσδόκητων περιστατικών, όπως μία πιθανή μείωση της ταχύτητας, με τη ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός νέου προφίλ ταχύτητας. Αυτή η

μέθοδος καθιστά το πρόγραμμα πιο ευέλικτο με αποτέλεσμα να δίνει μείωση, κατά μέσο όρο, 3,3% στο σύστημα μετρό που θα εφαρμοστεί. Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των πινάκων δρομολογίων του μετρό για την αποσυμφόρηση των σταθμών, οι Canca και άλλοι (Canca, Andrade-Pineda, De los Santos, & Calle, 2018) μελέτησαν και το θέμα της ασφάλειας που τίθεται σε κορεσμένα συστήματα μετρό.

Για την εφαρμογή των παραπάνω στοιχείων προτάθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης προγραμμάτων του μετρό πραγματικού χρόνου συναρτήσει των παραμέτρων κατανάλωσης ενέργειας και ταχύτητας του δικτύου για το υπάρχον χρονοδιάγραμμα των συρμών. Επιπλέον, σχεδιάστηκε αλγόριθμος που τροφοδοτείται συνεχώς από δεδομένα του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, όπως καθυστερήσεις συρμών, και ανατροφοδοτεί το πρόγραμμα με διορθώσεις για τον βέλτιστο χρόνο άφιξης των συρμών (Zhang, Li, & Yang, 2019). Πρόσθετα, επίσης σε πραγματικό χρόνο, έχει μελετηθεί η προσέλευση των μετακινούμενων ώστε να μειωθεί η αναμονή τους στο σταθμό. Οι Yin και άλλοι (Yin, Yang, Tang, Gao, & Ran, 2017) ανέπτυξαν ένα σύστημα αποτελούμενο από τρία προφίλ ταχύτητας, το οποίο ανταποκρίνεται στη δυναμική ζήτηση των επιβατών. Τα προφίλ αυτά είναι τρισδιάστατα, δηλαδή έχουν ως μεταβλητές το χρόνο, την ταχύτητα και τη θέση του συρμού. Οι Niu και Zhou, (Niu & Zhou, 2013) πρότειναν ένα μοντέλο που είναι πλήρως εξαρτημένο από το χρόνο. Ερεύνησαν το σύστημα του μετρό κάτω από συνθήκες κορεσμού των επιβατών και τον τρόπο κατά τον οποίο αυτοί οι επιβάτες θα μειώσουν το χρόνο παραμονής τους στην αποβάθρα. Επιπλέον, έχει γίνει μελέτη από τους Howlett και Pudney, (Howlett P.G., 1995) σχετικά με το ότι υπάρχει συγκεκριμένη στρατηγική για την κίνηση των συρμών. Κατέληξαν στο ότι το βέλτιστο προφίλ ταχύτητας θα είναι αυτό που θα αποτελείται από τις 3 εξής φάσεις: επιτάχυνση – ρολάρισμα ή coasting – επιβράδυνση, σύμφωνα με την αρχή του Pontryagin. Η αρχή αυτή, βασίζεται στη θεωρία πως χρησιμοποιείται μία βέλτιστη θεωρία ελέγχου μίας κατάστασης, προκειμένου ένα δυναμικό σύστημα να βρεθεί από μία δυσμενή κατάσταση σε μία καλύτερη, λαμβάνοντας υπόψιν κάποιους περιορισμούς ή κάποια άλλα στοιχεία.



**Σχήμα 2.2.1:** Διαγράμματα ταχύτητας – απόστασης – χρόνου των τριών προφίλ ταχύτητας (Yin et al., 2017)

Το πρόβλημα της αναμονής των επιβατών στις αποβάθρες εντείνεται και με την αργοπορία κάποιας αμαξοστοιχίας. Αν για κάποιο λόγο ο συρμός καθυστερήσει σε ένα σταθμό ή σε μία αποβάθρα, τότε αυτή η καθυστέρηση ή μεταφέρεται και στους άλλους σταθμούς ή γίνεται ακόμη μεγαλύτερη στο τέλος της ημέρας. Οι Yang και άλλοι, (S. Yang et al., 2018; X. Yang, Chen, Wu, Gao, & Tang, 2019), πρότειναν ένα μοντέλο κατά το οποίο γίνεται απόσβεση της καθυστέρησης του συρμού, φθάνοντας έτσι στην προγραμματισμένη ώρα στον επόμενο σταθμό.

Εν συνεχεία, οι Howlett και η ομάδα του (Pudney & Howlett, 2009) διατύπωσαν μία θεωρητική πρόταση για το πώς θα κρατηθεί σταθερή η ταχύτητα σε ιδιαίτερα απότομες κλίσεις. Προσέγγισαν το θέμα των απότομων κατωφερειών και ανωφερειών της γραμμής και τον τρόπο που η δυναμική της κίνησης του συρμού μπορεί να κρατήσει ή να αναπτύξει τη μέγιστη ταχύτητα, χρησιμοποιώντας σημεία αλλαγής του προφίλ. Κατέληξαν πως για απότομα ανωφερικά τμήματα το ρολλάρισμα πρέπει να διακόπτεται από μικρές επιταχύνσεις και σε απότομα κατωφερικά τμήματα το ρολλάρισμα θα πρέπει να συνοδεύεται από μικρής κλίμακας φρενάρισμα. Πραγματοποιήθηκε επίσης μελέτη για τη δημιουργία κάποιων προφίλ αλλά και το μοντέλο κίνησης του συρμού σε μεταβλητές κλίσεις κατά μήκος της τροχιάς (Khmelnitsky, 2000). Οι Albrecht και άλλοι (Albrecht, Howlett, Pudney, & Vu, 2013) απέδειξαν πως τα σημεία αλλαγής που προαναφέρθηκαν και βελτιστοποιούν το μοντέλο, είναι μοναδικά και διακριτά.

Σε άλλες μελέτες έχει ερευνηθεί η εφαρμογή των βελτιστοποιήσεων του χρονοδιαγράμματος, σε αυτόματες μεθόδους καθορισμών των χρονοδιαγραμμάτων (ATO) (Domínguez, Fernández, Cucala, & Lukaszewicz, 2011). Με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων και τη βοήθεια προγραμμάτων, κατέληξαν στο γεγονός πως το μετρό της Μαδρίτης, μπορεί να γίνει οικονομικότερο έως και 13% ενώ ταυτόχρονα γίνεται αρκετά πιο γρήγορο. Αντίστοιχο πρόβλημα για τις αυτόματες ρυθμίσεις των δρομολογίων αντιμετώπισαν οι Li και άλλοι, (S. Li, Zhou, Yang, & Gao, 2018) όταν παρατήρησαν πως σε ένα σύστημα μετρό υπάρχουν πολλές διαταραχές ως προς το συντονισμό των τρένων σε σταθμούς μετεπιβίβασης προς άλλες γραμμές του δικτύου μετρό. Ανέπτυξαν ένα μοντέλο το οποίο ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις του χρονοδιαγράμματος της εκάστοτε γραμμής και συντονίζει τα τρένα σε κάθε διαφορετική γραμμή του δικτύου. Οι Han και άλλοι, (Han et al., 1999) χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγορίθμους (GA) σε αυτόνομους συρμούς, συνέκρινε τα αποτελέσματά του με αυτά του P. Howlett που χρησιμοποίησε ένα μοντέλο με περιορισμούς.

Προκειμένου, όμως, να είναι όσο ακριβέστερα γίνεται αυτά τα προφίλ ταχύτητας, μελετήθηκε με μεγάλη ακρίβεια η μηχανική κίνησης του συρμού (Jong & Chang, 2005). Αυτό έγινε με αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό σε περιβάλλον προσομοίωσης (TrainSim). Η *Ισοδύναμη Μάζα* προτάθηκε από τον Andrew (1986) και είναι το άθροισμα της μάζας του συρμού και αυτής των επιβατών.

Με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας και των τεχνικών του προγραμματισμού, αναπτύχθηκαν μέθοδοι βάσεων δεδομένων και αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (K. Huang et al., 2019). Για την κάλυψη του κενού που δημιουργούν οι εμπειρικές εξισώσεις και οι κινηματικές του συρμού με τα πραγματικά δεδομένα που συλλέγονται, δημιουργούνται δύο αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, *Random Forest Regression (RFR)* και *Support Vector Machine Regression (SVR)* οι οποίοι δημιουργούν τα βέλτιστα προφίλ ταχύτητας βάσει πραγματικών δεδομένων, με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Τέτοιοι αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν στη γραμμή Changring του Πεκίνο δίνοντας μείωση περίπου 3% στη κατανάλωση ενέργειας. Αντίστοιχη μελέτη έχει γίνει από τους Nitisiri et al (Nitisiri, Gen, & Ohwada, 2019) όταν συνδύασαν πολυαντικειμενικό προγραμματισμό με μεθόδους μηχανικής μάθησης που βασίζεται σε μία διαδικασία αλλαγής για κάθε δεδομένο που εισέρχεται στο σύστημα.

Στις περισσότερες από τις παραπάνω έρευνες, έγινε χρήση της εξίσωσης του Davis. Η σχέση αυτή σχετίζεται κυρίως με τη κίνηση του συρμού και πιο συγκεκριμένα με την αντίσταση της κίνησης του συρμού (rolling resistance) (Szanto, 2016). Είναι μία τετραγωνική συνάρτηση κατά την οποία υπάρχουν 3 σταθεροί συντελεστές οι οποίοι παίρνουν τιμές αναλόγως με το πρόβλημα που εξετάζεται. Η εξίσωση είναι η εξής:  $R = A + B * v + C * v^2$ , όπου  $v$  είναι η τιμή της ταχύτητας και  $A$ ,  $B$ ,  $C$  οι σταθεροί συντελεστές του Davis (Davis coefficients). Στη μελέτη αυτή εξετάζονται διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει η σχέση, καθώς γίνεται και μία διερεύνηση για τις τιμές που μπορεί να πάρει η συνάρτηση με διαφορετικές τιμές ταχύτητας αλλά με σταθερούς συντελεστές. Παρακάτω γίνεται επίσης διερεύνηση με διαφορετικές τιμές και στους συντελεστές της σχέσης Davis.

Επίσης, εκτεταμένη έρευνα έχει γίνει για την επιβράδυνση του συρμού και τις ασφαλείς αποστάσεις επιβράδυνσης (Barney, Haley, & Nikandros, 2001). Επειδή αφήνοντας μεγάλες αποστάσεις για το σταμάτημα του συρμού μειώνεται η χωρητικότητα της γραμμής, ενώ αφήνοντας μικρές αποστάσεις μπορεί να δημιουργηθούν συγκρούσεις, δημιουργήθηκε ένα εργαλείο για ηλεκτρονικό υπολογιστή που θα υπολογίζει τις αποστάσεις ασφαλείας για στάση αναλόγως με τον τύπο της αμαξοστοιχίας. Από την έρευνα αυτή εξήχθησαν πολύ σημαντικά στοιχεία για τις επιβραδύνσεις των συρμών. Το σημαντικότερο από τα στοιχεία είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόσταση στάσης και μερικοί από αυτούς είναι οι εξής:

- Η ταχύτητα του τρένου πριν γίνει η εφαρμογή της πέδησης
- Ο ρυθμός της επιβράδυνσης που έχει το εκάστοτε τρένο όταν εφαρμοστεί σε πλήρη λειτουργία η πέδησή του, εξαρτάται από το συντελεστή τριβής του τροχαίου υλικού (επαφή σιδηροτροχιάς – τροχού)
- Ειδικά σε υψηλότερες ταχύτητες, ο χρόνος καθυστέρησης από την εντολή ενεργοποίησης των φρένων έως τη στιγμή που θα ενεργοποιηθούν πραγματικά (*brake delay time*)
- Τη κατάσταση του συστήματος πέδησης (φθαρμένα φρένα, χαμηλή πίεση αέρα στα συστήματα των φρένων)
- Η κλίση της γραμμής και πιο συγκεκριμένα η κλίση στο τμήμα που εφαρμόζεται η πέδηση
- Η κατανομή βάρους στους συρμούς και ειδικότερα στις αμαξοστοιχίες που μεταφέρουν βαριά εμπορεύματα (μέταλλα, καύσιμα, κ.α.) και στα συστήματα μετρό

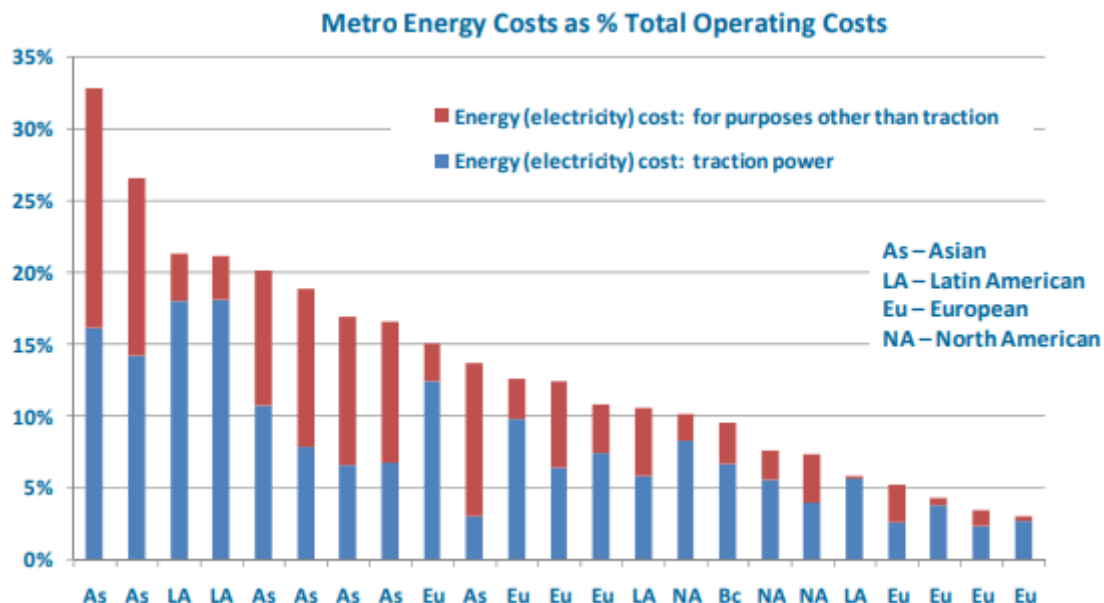
Στη παραπάνω έρευνα, δόθηκε ένα παράδειγμα υπό μία συγκεκριμένη κλίση, προκειμένου να γίνουν οι υπολογισμοί και να γίνει πλήρως κατανοητό πως θα δουλεύει το συγκεκριμένο εργαλείο.

### 2.3. Ελαχιστοποίηση της Κατανάλωσης Ενέργειας

Στις μέρες μας, για τις εταιρίες γραμμών μετρό ανά το κόσμο, αποτελεί προτεραιότητα η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, λόγω του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του οικονομικού κόστους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες στρατηγικές, οι οποίες συνήθως εστιάζονται στο τροχαίο υλικό της γραμμής και γενικότερα στην υποδομή ή/και λειτουργία της. Λαμβάνοντας υπόψη τα βραχυπρόθεσμα μέτρα και τις στρατηγικές λειτουργίας της κυκλοφορίας, εξετάζονται διάφορες προσεγγίσεις από πολλούς επιστήμονες. Μία από τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές που μειώνουν την καθαρή κατανάλωση ενέργειας είναι η χρήση αποδοτικότερων τεχνικών οδήγησης της αμαξοστοιχίας.

Γενικά, ένα σύστημα μετρό συνήθως είναι ασταθές, όπου καθυστερήσεις τρένων αυξάνουν την διάρκεια παραμονής των επιβατών στους χώρους της αποβάθρας. Έτσι, συναρτήσει με τη κίνηση του συρμού, θα πρέπει να μειωθεί όσο γίνεται περισσότερο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των συστημάτων του μετρό. Η μείωση του χρόνου αναμονής των επιβατών, συνεπάγεται με την αύξηση των δρομολογίων και κατά συνέπεια με την αύξηση κατανάλωσης ενέργειας. Αυτές είναι δύο αντικρουόμενες μεταβλητές. Ο αλγόριθμος *Κατά Παρέτο Βέλτιστο*, έχει απόλυτη εφαρμογή στο συγκεκριμένο πρόβλημα, βρίσκοντας την ιδανική λύση άμεσα σε ανταγωνιστικές μεταβλητές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει γίνει χρήση του από πολλούς ερευνητές (Chang et al, 1999, (Domínguez et al., 2011).

Δυστυχώς όμως, τέτοιες μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι επιρρεπείς στην αποτυχία, όταν ένας η περισσότεροι συρμοί καθυστερήσουν στους σταθμούς. Υπάρχουν έρευνες (S. Yang et al., 2019), κατά τις οποίες αναπτύχθηκε ένα μοντέλο αέριου προγραμματισμού σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο βέλτιστης κατανομής, με αποτέλεσμα να εξαλείφονται οι καθυστερήσεις των αμαξοστοιχιών με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση. Ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε στο μετρό του Πεκίνο, έδειξε μείωση 8,19% στην καθαρή κατανάλωση ενέργειας από τους παραδοσιακούς τρόπους αναδιάρθρωσης των δρομολογίων.



**Σχήμα 2.3.1:** Τα ενεργειακά κόστη ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε παγκόσμια κλίμακα (Anderson, Maxwell, & Dr. Harris, 2009)

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας του συρμού, προτάθηκε από τον Feng και την ομάδα του (Feng, Li, Liu, Gao, & Mao, 2017) μοντέλο κατά το οποίο αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής μιας αμαξοστοιχίας στο σταθμό συναρτήσει της αποβίβασης και επιβίβασης των επιβατών της και στη συνέχεια βελτιστοποιείται το πρόγραμμα όλου του μετρό βάσει των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου. Για καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, προτείνεται ο συγχρονισμός των συρμών σε επιβράδυνση και επιτάχυνση προκειμένου η ενέργεια που ανανεώνεται από τον συρμό που επιβραδύνει να τροφοδοτεί τον συρμό που επιταχύνει. Στο ίδιο μήκος κύματος, προτείνουν επίσης την μείωση της μέγιστης ταχύτητας προκειμένου να μειωθεί και η ελκτική δύναμη που δέχεται η αμαξοστοιχία, με αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας. Στην ίδια μελέτη, εφαρμόστηκαν τα παραπάνω σε ένα μοντέλο προσομοίωσης με αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας στο δίκτυο μετρό του Πεκίνο κατά 22%. Άλλη μελέτη, λαμβάνει υπόψιν τις επιλογές των επιβατών και τον τρόπο αυτή η διακίνηση γίνεται στους σταθμούς εναλλαγής γραμμών καθώς και τις φάσεις των ταχυτήτων του συρμού (επιτάχυνση, ρολλάρισμα και επιβράδυνση). Κατ' αυτό το τρόπο, εξάγει το καλύτερο συνδυασμό ταχυτήτων για την ανατροφοδότηση του δικτύου με ρεύμα, όταν η αμαξοστοιχία δεν χρησιμοποιεί την ώθηση (S. Yang et al., 2018). Επιπλέον, έχει μελετηθεί η ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από όλα τα τρένα και την μεγιστοποίηση της την ανανεώσιμης ενέργειας που παράγεται κατά την επιβράδυνση με ένα γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης δύο βημάτων (Gurta, Tobin, & Pavel, 2016).

Βασιζόμενοι στις επιλογές των επιβατών σε διάστημα της ημέρας εκτός αιχμής, οι Feng και άλλοι (Feng et al., 2017) αναπτύσσουν μία προσομοίωση για την ενεργειακά αποδοτικότερη κίνηση των συρμών υπό τους βελτιωμένους περιορισμούς του χρονοδιαγράμματος οι οποίοι προσδιορίζουν με ακρίβεια το χρόνο παραμονής των επιβατών στο σταθμό. Λόγω της πολυπλοκότητας και τις αβέβαιες απαιτήσεις των επιβατών σε περιόδους εκτός αιχμής, διαμορφώθηκε ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό του χρόνου αναμονής και ένα για τη κίνηση του συρμού με σταθερό χρόνο πορείας. Τα παραπάνω οδήγησαν σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 21,9% στη γραμμή 2 του μετρό του Πεκίνο.

Άλλες μελέτες έχουν μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, βασιζόμενοι στην δυναμική της κίνησης των συρμών αλλά και στη δυναμική προσέλευση των επιβατών (Zhang et al., 2019). Το μοντέλο αυτό βελτιστοποιεί σε πραγματικό χρόνο, φτιάχνοντας έτσι έναν αλγόριθμο πρόβλεψης ο οποίος παίρνει δεδομένα από την αργοπορία ορισμένων συρμών και στέλνει ανανεωμένα δεδομένα στους ίδιους συρμούς προκειμένου να φτιάξουν το πρόγραμμά τους. Μελέτη έχει γίνει και για το κατά πόσο θα λειτουργούσε ένα σύστημα «*Communication – Based Train Control*» (Bai et al., 2019). Εξετάζοντας το πρόβλημα μακροσκοπικά, αναλύεται το κατά πόσο είναι εφικτό να επικοινωνούν τα τρένα με τον κεντρικό σταθμό, μέσω του οποίου θα καταγράφεται η άφιξη και αναχώρηση κάθε αμαξοστοιχίας σε κάθε σταθμό. Εξελίσσοντας ένα συνεργατικό – εξελικτικό αλγόριθμο, το μοντέλο συγχρονίζει τις αναχωρήσεις και αφίξεις των αμαξοστοιχιών προκειμένου να επιτευχθεί μία δρομολόγηση συρμών πραγματικού χρόνου (real time). Οι φάσεις της κίνησης των συρμών χωρίζονται σε *motoring*, κατά την οποία θα γίνεται η επιτάχυνση του συρμού, *cruising*, κατά την οποία ο συρμός θα κινείται με σταθερή ταχύτητα, *coasting*, κατά την οποία ο συρμός θα κινείται χωρίς τη χρήση γκαζιού, δηλαδή μόνο με την αδράνιά του, και η τελευταία φάση είναι η *braking*, κατά την οποία ο συρμός επιβραδύνει. Έτσι, βελτιστοποιείται το δρομολόγιο και συνεργατικά με τους υπόλοιπους συρμούς, μειώνοντας ταυτόχρονα και την ενέργεια που καταναλώνεται.

Λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική κίνηση των επιβατών, τους χρόνους αποβίβασης και επιβίβασης, τον συνολικό χρόνο ταξιδιού αλλά και τη μάζα του τρένου, οι Huang και άλλοι (Y. Huang, Yang, Tang, Gao, & Cao, 2017), (K. Huang et al., 2019) πρότειναν έναν αλγόριθμο πολυαντικειμενικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση των προγραμμάτων των συρμών στο μετρό. Η ενέργεια χωρίζεται σε 3 τμήματα: αυτή που καταναλώνεται για την

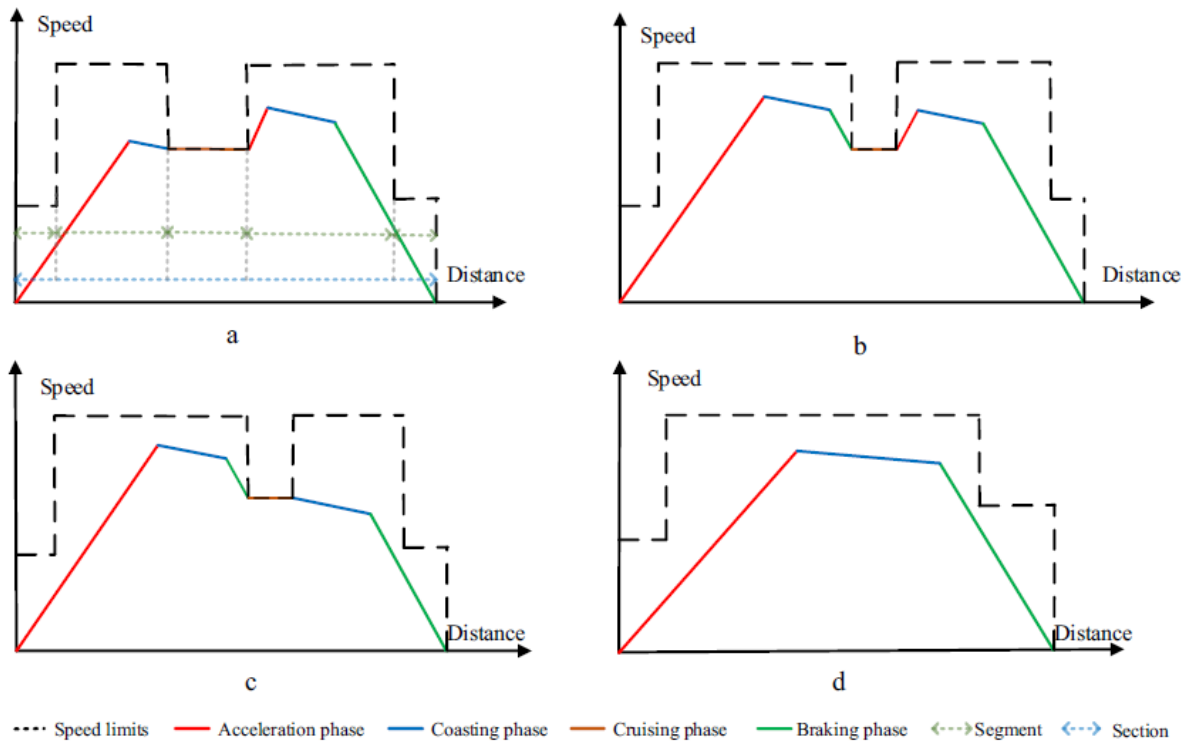
προώθηση του συρμού, αυτή που τροφοδοτεί τα συστήματα υποβοήθησης και αυτή που παράγεται από τις γεννήτριες. Αρκετοί έχουν εισηγηθεί την τοποθέτηση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας στους συρμούς, προκειμένου στις επιβραδύνσεις να φορτίζονται και έτσι η κατανάλωση από το δίκτυο, στις επιταχύνσεις, να είναι μηδαμινή (Gunselmann, 2005, (Su, Tang, & Roberts, 2015), (Ahmadi, Dastfan, & Assili, 2018). Επίσης, οι Huang και άλλοι (Y. Huang et al., 2018) μελέτησαν τις ενεργειακές καταναλώσεις με ενσωματωμένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και βάση αυτού υπολογίστηκαν οι φάσεις του προφίλ ταχύτητας, βελτιστοποιημένες με βάση την κατανάλωση ενέργειας. Σημειώνεται πως οι παραπάνω μελέτες έγιναν για το μετρό του Πεκίνο.

Όπως και προηγουμένως, πολλοί καταπιπίστηκαν με το πρόβλημα της ενεργειακής οικονομίας για τους αυτόνομους συρμούς. Οι Sheu και Lin, (Sheu & Lin, 2012), παίρνοντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα από το σύστημα του αυτόματου προγραμματισμού των δρομολογίων (ATR) και λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αλλά και την κίνηση των συρμών, κατέληξαν σε ένα μοντέλο διπλού ευρετικού προγραμματισμού για τον επανασχεδιασμό των δρομολογίων με εξοικονόμηση ενέργειας μέσω του ρολλαρίσματος της αμαξοστοιχίας και του χρόνου διακίνησης των επιβατών στις αποβάθρες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η αυτόματη μέθοδος έχει ενεργειακά υψηλότερη απόδοση. Παλαιότερα, το 1984, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το *Συμβουλευτικό Σύστημα Οδηγού (Driver Advisory System - DAS)*, ως ένα σύστημα που θα δουλεύει ενεργειακά αποδοτικότερα και θα ειδοποιεί τον οδηγό τότε θα εισέρχεται στο τμήμα για ρολλάρισμα του συρμού και τότε στο τμήμα για επιβράδυνση. Αυτό δούλευε ταυτόχρονα με ένα σύστημα, το *Metromiser*. Εφαρμόστηκε στα αστικά τρένα της Αδελαΐδα της Αυστραλίας και αργότερα σε άλλες πόλεις της Αυστραλίας αλλά και στο Τορόντο του Καναδά. Έρευνες έδειξαν πως υπήρξε 15% μείωση στην ενέργεια που καταναλωνόταν από τους συρμούς με το σύστημα *Metromiser*, σε αντίθεση με αυτούς που κινούνταν χωρίς αυτό. Αργότερα οι Pudney και Howlett (Pudney & Howlett, 2009) απέδειξαν πως το σύστημα αυτό δουλεύει και έχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 20% στις εντός πόλης διαδρομές, αλλά σε διαδρομές πολλών χιλιομέτρων, με πολλές αλλαγές κλίσης και τμήματα με πολλαπλά όρια ταχύτητας, δεν δουλεύει.

Με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου, οι Li και Lo, (X. Li & Lo, 2014) διατύπωσαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που βελτιστοποιεί ενεργειακά, από κοινού, τα χρονοδιαγράμματα και τα προφίλ ταχύτητας. Εφαρμόζοντας τη μελέτη αυτό στο μετρό του Πεκίνο, βρέθηκε πως όσο μεγαλύτερο είναι το προβάδισμα του επόμενου συρμού, τόσο το σύστημα οδηγείται σε πιο ενεργοβόρα κατάσταση. Η οικονομικότερη κατά περίπου 25% κατάσταση, επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται το ελάχιστο προβάδισμα των συρμών, τα 90 δευτερόλεπτα. Στο μετρό της Βαλένθια, μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση της καθαρής ενέργειας κατά 19% συγκριτικά με την πραγματική κατανάλωση, μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου που βελτιστοποιεί τα προφίλ ταχύτητας βάσει των περιορισμών του χρόνου προπόρευσης του προηγούμενου συρμού, του χρόνου κύκλου των συρμών, τις αποστάσεις μεταξύ των συρμών και κάποιων ορίων επιτάχυνσης (Sanchis & Zuriaga, 2016). Στο ίδιο μήκος κύματος, οι Wang και Goverde (Wang & Goverde, 2019) από τα πραγματικά χρονοδιαγράμματα του ολλανδικού σιδηροδρομικού δικτύου έκαναν ανακατανομή του χρόνου πορείας των τρένων, προς βελτιστοποίηση των υπαρχόντων χρονοδιαγραμμάτων και της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι χρόνοι άφιξης και αναχώρησης των συρμών μετατρέπονται σε χρονικά περιθώρια προκειμένου να χαλαρώσει το υπάρχον πρόγραμμα δρομολογίων. Στη συνέχεια, σύμφωνα με δύο μεθόδους υπολογίζονται οι βέλτιστοι χρόνοι διαδρομής συναρτήσει της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Οι δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης σχετίζονται, η μία για γραμμές μίας κίνησης αμαξοστοιχιών και η άλλη για βελτιστοποίηση τροχιάς πολλαπλών αμαξοστοιχιών, και εφαρμόζονται σε μελέτες περιπτώσεων διαφορετικών κλίσεων, τύπων καμπυλών, ταχυτήτων και διαφορετικές διαδρομές συρμών.

Τέλος, από τους Yang και άλλοι (S. Yang et al., 2019) εξετάστηκαν μοτίβα *stop – skipping*, κατά τα οποία προσδιορίζεται ένα σύνολο από παραλειπόμενους σταθμούς, στους οποίους η αμαξοστοιχία δεν κάνει στάση. Με ένα σύστημα έξυπνων καρτών μετακίνησης παραλείπονται οι σταθμοί που έχουν τη λιγότερη επιβατική κίνηση και με τη βοήθεια μη γραμμικού προγραμματισμού βελτιώνονται τα χρονοδιαγράμματα και τα προφίλ ταχύτητας των συγκεκριμένων συρμών. Ο αλγόριθμος αυτός εκτελέστηκε με δεδομένα μίας γραμμής του μετρό του Πεκίνο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η κατανάλωση της ενέργειας κατά περίπου 15% και να αυξάνεται η πληρότητα στους συρμούς κατά 4 περίπου άτομα το λεπτό, σύμφωνα με το τρέχον χρονοδιάγραμμα.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια στο δίκτυο του μετρό του Πεκίνο, εξετάστηκε κατά πόσο βοηθά στη μείωση η εφαρμογή περισσότερων από ένα προφίλ ταχύτητας σε ένα τμήμα μεταξύ δύο σταθμών (S. Yang et al., 2018). Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή και με τη βοήθεια του μοντέλου Taylor, εξάγονται τα συμπεράσματα κατά τα οποία υπάρχει μαθηματική σχέση στις διάφορες φάσεις της ταχύτητας (multi-phase) στο τμήμα μεταξύ των δύο σταθμών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα διαφορετικά προφίλ που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη μέγιστη ταχύτητα που έχει η κάθε φάση του τμήματος.



**Εικόνα 2.3.1:** Διαφορετικά προφίλ σε ξεχωριστούς περιορισμούς ταχύτητας (S. Yang et al., 2018)

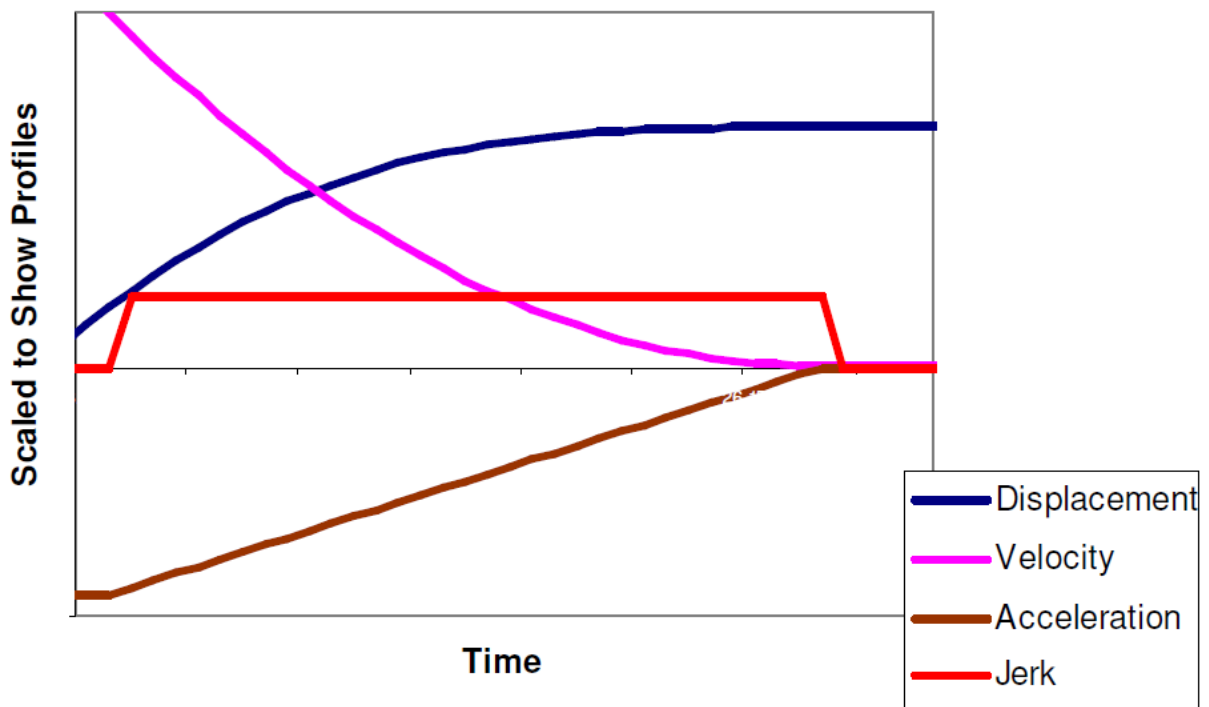


## 2.4. Άνεση των επιβατών

Ταυτόχρονα με τις μελέτες που έχουν γίνει και αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να διερευνηθεί και η ποιότητα υπηρεσιών του μετρό. Με αυτό τον όρο, εννοείται η άνεση των επιβατών εντός και εκτός του συρμού. Η διπλωματική αυτή εργασία, εφόσον πραγματεύεται την κίνηση του συρμού, διερευνά την άνεση των επιβατών εντός αυτού. Μέσα στο συρμό υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός θέσεων. Ειδικά σε ώρες αιχμής, ο αριθμός των ελεύθερων θέσεων είναι αρκετά περιορισμένος. Έτσι, η πλειοψηφία των επιβατών είτε αναγκάζεται να είναι όρθιοι είτε παραχωρούν εθελοντικά τη θέση τους. Όμως κατά τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις αναπτύσσονται δυνάμεις στους επιβάτες με αποτέλεσμα να μην είναι άνετη η διαδρομή τους.

Έτσι, έχουν γίνει μελέτες σχετικά με την ανάπτυξη αυτών των δυνάμεων και τις επιταχύνσεις που είναι ανεκτές (Martin & Litwhiler, 2008). Όταν ο επιβάτης είναι όρθιος, έχει υψηλότερο κέντρο μάζας, με αποτέλεσμα στις συχνές της επιτάχυνσης να χάνει την ισορροπία του. Έτσι, όταν η αμαξοστοιχία επιταχύνει ή αντίστοιχα επιβραδύνει, τότε ο άνθρωπος θα πρέπει να ασκήσει μεγάλες δυνάμεις στα άκρα του ώστε να διατηρήσει την ισορροπία του. Σύμφωνα με εξισώσεις της γραμμικής κίνησης, όπως η σχέση της θέσης ως προς το χρόνο αναφέρεται ως ταχύτητα, η μεταβολή της ταχύτητας ως προς το χρόνο αναφέρεται ως επιτάχυνση, κ.ά., ενδιαφέρον παρουσιάζει πως η μεταβολή της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο αναφέρεται με τον όρο *jerk*, ο οποίος στην ελληνική γλώσσα θα μπορούσε να μεταφραστεί με την έννοια τίναγμα. Στο γράφημα που ακολουθεί, αναπαριστά την έννοια του όρου αυτού σε σχέση με τη θέση του συρμού (μπλε χρώμα), την ταχύτητα (ροζ χρώμα), την επιτάχυνση (καφέ χρώμα) και το τίναγμα (κόκκινο χρώμα), σε σχέση με το χρόνο κατά την επιβράδυνση.

### Displacement, Velocity, Acceleration, and Jerk



Σχήμα 2.4.1: Θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση και τίναγμα σε σχέση με το χρόνο κατά την επιβράδυνση του συρμού (Martin & Litwhiler, 2008)

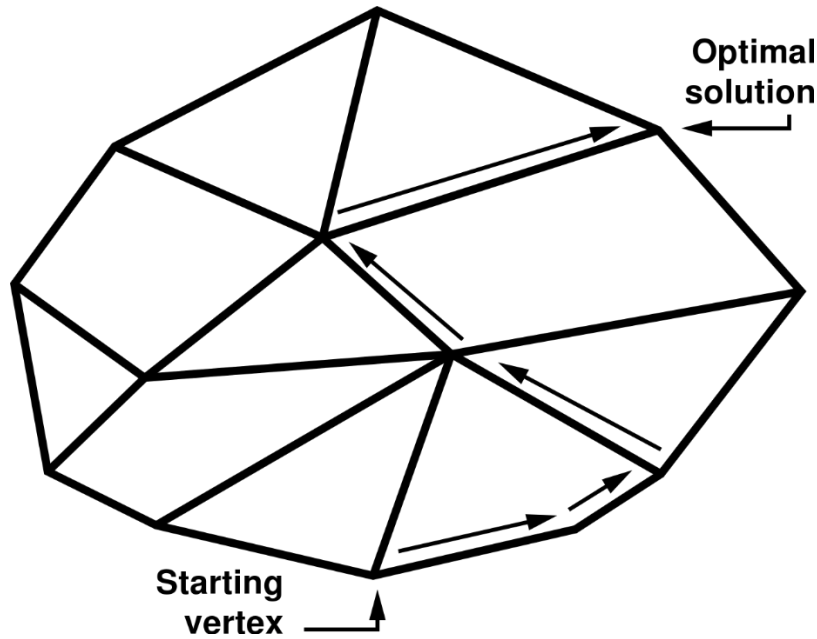
Όπως καταλαβαίνει κανείς, όσο πιο απότομη είναι η αλλαγή στην επιτάχυνση τόσο μεγαλύτερο τίναγμα νιώθει και ο επιβάτης. Έτσι, κατά τη μελέτη τους, βρέθηκε πως σε επιτάχυνση μικρότερη ή ίση των  $0,93 \text{ m/s}^2$ , ένας μέσος επιβάτης μπορεί να σταθεί όρθιος με τα πόδια του σε ευρεία στάση, χωρίς να χρειάζεται να κρατηθεί από κάπου. Εν συνεχεία, βρέθηκε επίσης πως το μεγαλύτερο τίναγμα που μπορεί να δεχθεί ένας άνθρωπος πριν χάσει την ισορροπία του είναι περίπου  $0,60 \text{ m/s}^3$ .

## 2.5. Μοντέλο Βελτιστοποίησης

Αρχικά, η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλη ποικιλία από θέματα. Από προβλήματα εφοδιασμού εμπορευμάτων έως και σε θέματα που άπτονται σε κοινωνικές επιστήμες, συνδυαστικά προβλήματα όπως μείωση εξόδων σε μία εταιρία και κυρίως προβλήματα χωροθέτησης, επιλύονται με τον Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (Genova & Guliaschi, 2011). Οι περισσότερες έρευνες που έχουν δημοσιευτεί, βασίζονται πάνω σε μία μέθοδο βελτιστοποίησης. Μία τέτοια μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί και στη παρούσα διπλωματική εργασία και ονομάζεται Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Integer Linear Programming – LIP). Η μέθοδος αυτή βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα, δίνοντας σε μία συνάρτηση τη μέγιστη ή την ελάχιστη δυνατή τιμή της σύμφωνα με κάποιες μεταβλητές. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση.

Η αντικειμενική συνάρτηση, είναι ένα άθροισμα όρων οι οποίοι υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς αναλόγως το πρόβλημα που εξετάζεται κάθε φορά. Έτσι, για το πρόβλημα της μείωσης των ταχυτήτων των συρμών που προκαλείται από τις εργασίες στα τμήματα που συντηρούνται οι σιδηροτροχιές, αναπτύσσεται ένα Μοντέλο Ακέραιου Προγραμματισμού προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος αναμονής των επιβατών στις αποβάθρες (Argyroulou, Iliorouliou, & Keraptsoglou, 2019). Στην έρευνα αυτή, βελτιστοποιείται ο προγραμματισμός των εργασιών συντήρησης για τις γραμμές 2 και 3 του μετρό της Αθήνας. Έτσι, μέσω δυαδικών λύσεων, δημιουργείται ένα πρόγραμμα με 0 και 1, όπου το 0 συμβολίζει πως δεν θα γίνεται εργασία τη συγκεκριμένη μέρα και το 1 πως θα πραγματοποιείται αυτή η εργασία. Οι μεταβλητές οι οποίες παίρνουν τις τιμές 0 και 1 ονομάζονται διακριτές μεταβλητές (discrete variables). Τέτοιου είδους μεταβλητές χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης, όταν η μαθηματική προσέγγιση δεν είναι γραμμική (Glover, 1975). Κατά αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα γίνεται υπολογιστικά απλούστερο, μειώνοντας έτσι το χρόνο υπολογισμού της λύσης των προβλημάτων με μεγάλο όγκο δεδομένων.

Ήδη πριν το 1945, υπήρχαν 4 συγγράμματα τα οποία ερευνούσαν τον γραμμικό προγραμματισμό (Fourier (1824), de la Vallde Poussin (1911), Kantorovich (1939) και Hitchcock (1941)). Έτσι, υπό το πρίσμα μίας ιδέας για γρήγορους και απλούς υπολογισμούς στο γραμμικό προγραμματισμό, επινοήθηκε ο αλγόριθμος Simplex (Dantzig, 1980). Μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, ορίζεται ένας τόπος ο οποίος ονομάζεται *πολύτοπος (polytope)*. Το σχήμα του καθορίζεται από τους περιορισμούς που εφαρμόζονται στην αντικειμενική συνάρτηση και η λειτουργία της μεθόδου αυτής βασίζεται στις γωνίες αυτού του γεωμετρικού αυτού αντικειμένου, δηλαδή στις γειτονιές των υπο-χώρων του πολυτόπου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ο αλγόριθμος Simplex βρίσκει πιο εύκολα την βέλτιστη λύση, σε ένα παράδειγμα για την γρηγορότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων σε μία σφαίρα.



Εικόνα 2.5.1: Παράδειγμα αλγορίθμου Simplex (Πηγή: Wikipedia)

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1. Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση του κεφαλαίου της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, στο οποίο έγινε εκτενής ανάλυση των βασικών εννοιών που διέπουν ένα σύστημα του μετρό, ακολουθεί η μεθοδολογία που εφαρμόζεται προκειμένου να υπολογιστούν τα προφίλ ταχύτητας. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, μελετήθηκαν διάφορες σκοπιές των ερευνητών ανά το κόσμο, που δούλεψαν στο ίδιο ή παρόμοιο θέμα.

Η διαδικασία κατά την οποία παρουσιάζονται η δυναμική της κίνησης του συρμού και τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που έγιναν, είναι κρίσιμο να γίνει προκειμένου να αναλυθούν τα στοιχεία της ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε, καθώς και τα πρωτογενή στοιχεία που συλλέχθηκαν.

#### 3.2. Ανάλυση της κίνησης του συρμού

Η ανάλυση της κίνησης του συρμού είναι από τα βασικότερα θέματα που έπρεπε να εξεταστούν. Αυτό έγινε διότι, ανάλογα με τη μηκοτομή της γραμμής που εξετάζεται (γραμμή 3), θα πρέπει να προσαρμοστούν καλύτερα τα ενεργειακά, και όχι μόνο τα οικονομικότερα προφίλ ταχύτητας. Σε αυτήν τη γραμμή υπάρχουν και οι 3 τύποι τμηματικών κλίσεων: ανωφερικό τμήμα, κατωφερικό τμήμα και οριζόντιο τμήμα. Στη γραμμή 3 του μετρό κινούνται αμαξοστοιχίες οι οποίες είναι 2<sup>ης</sup> γενιάς, με 1<sup>ης</sup> να είναι αυτές του ηλεκτρικού σιδηροδρόμου (Πειραιάς – Κηφισιά) και 3<sup>ης</sup> να είναι αυτές της γραμμής 3 (Ανθούπολη – Ελληνικό). Η κάθε μία αμαξοστοιχία, όπως είναι λογικό, έχει διαφορετικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Διαμόρφωση Συρμού	Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων κατοπτρικά Κινητήριο/Ιθυντήριο Όχημα – Ρυμουλκούμενο Όχημα – Κινητήριο Όχημα
Μήκος συρμού	106μ.
Πλάτος Οχήματος	2800χιλ.
Ύψος Οχήματος	3690χιλ.
Εσωτερικό Ύψος Οροφής Οχήματος	2100χιλ. έως 2200χιλ.

**Εικόνα 3.2.1:** Διαστάσεις συρμού δεύτερης γενιάς

Ο συρμός διαμορφώνεται από δύο μονάδες τριών οχημάτων κατοπτρικά συνδεδεμένων, με την εξής σειρά: κινητήριο/ιθυντήριο όχημα, ρυμουλκούμενο όχημα και κινητήριο όχημα. Εφόσον σε αυτήν τη γραμμή κινείται ο συρμός που απαρτίζεται με 6 οχήματα, που το καθένα έχει ξεχωριστό βάρος και έτσι αλλάζει η μηχανική του κίνηση, θεωρήθηκε ως μεμονωμένο σώμα με ενιαία μάζα, για ευκολότερους υπολογισμούς. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αναλύσεις έγιναν κατά την ώρα αιχμής, όπου και θεωρήθηκε πως οι συρμοί ήταν μεστοί από επιβάτες.

Έτσι, σύμφωνα με τη ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε, οι συρμοί έχουν χωρητικότητα 1062 επιβατών ανά συρμό, εκ των οποίων οι 196 είναι καθήμενοι και οι 866 όρθιοι. Θεωρήθηκε δε, πως στην ώρα αιχμής μετακινούνται περίπου 900 επιβάτες ανά συρμό. Με μέσο όρο βάρους τα 71 κιλά ανά αναβάτη και απόβαρο συρμού 202 τόνους, υπολογίστηκε πως το μεικτό βάρος του συρμού ανέρχεται στους 266 τόνους. Το βάρος του συρμού έχει μεγάλη σημασία για την μετέπειτα ανάλυση.

Η κίνηση του συρμού περιγράφεται από νόμους της φυσικής. Συγκεκριμένα, έγινε εκτενής χρήση του Δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα (ή Θεμελιώδης Νόμος της Μηχανικής) κατά τον οποίο η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με το γινόμενο της μάζας του σώματος επί την επιτάχυνση. Βασικό νόμο αποτελεί και ο Πρώτος Νόμος του Νεύτωνα (ή Νόμος της Αδράνειας), κατά τον οποίο ένα σώμα εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση εφόσον καμία δύναμη δεν επιδρά στο εξωτερικό περιβάλλον του σώματος. Βέβαια, με τόσες τριβές που εμφανίζονται στο τροχαίο υλικό των αμαξοστοιχιών, είναι αδύνατο να μην επιδρούν εξωτερικές δυνάμεις στο σώμα που θεωρείται η αμαξοστοιχία. Έτσι, για διευκόλυνση των υπολογισμών, θεωρήθηκε πως οι τριβές μεταξύ ράγας και πέλματος τροχού, όπως και η αντίσταση του αέρα στο τούνελ, είναι αμελητέες.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι τύποι των κινήσεων που κάνει ένας συρμός είναι τρεις: ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση (κατά το ξεκίνημα), ευθύγραμμη ομαλή κίνηση (κατά το ρολλάρισμα) και ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση (κατά το σταμάτημα). Κατά την ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση, ο συρμός εφαρμόζει ονομαστική επιτάχυνση  $1 \text{ m/s}^2$ , τιμή η οποία χρησιμοποιείται παρακάτω. Στην ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, ο συρμός θεωρείται ότι κάνει το ρολλάρισμα (coasting) κατά το οποίο στην αμαξοστοιχία δεν εφαρμόζεται επιτάχυνση, δηλαδή δεν γίνεται χρήση γκαζιού (S. Yang et al., 2018). Στην ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση, εφαρμόζεται ονομαστική επιβράδυνση ίση με  $1,1 \text{ m/s}^2$ , που και αυτό το δεδομένο χρειάζεται παρακάτω για την εξαγωγή της πραγματικής επιτάχυνσης. Η μέγιστη ταχύτητα που επιτυγχάνει ο συγκεκριμένος συρμός είναι  $80 \text{ km/h}$  ή  $22.22 \text{ m/s}$  κατά την επιτάχυνση και κατά το ρολλάρισμα στο οριζόντιο τμήμα. Παρακάτω, παρατίθενται συνολικά τα στοιχεία που έχει ένας συρμός 2<sup>ης</sup> γενιάς.

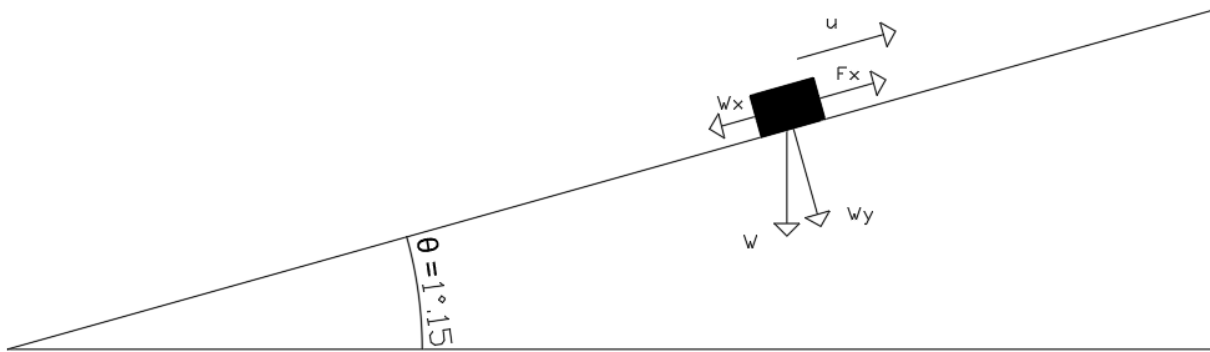
Παρατηρώντας το ανάγλυφο των περιοχών από όπου περνάει η γραμμή, έγινε εξαγωγή τριών μηκοτομών που πλησιάζουν κατά το μέγιστο τη πραγματικότητα. Ουσιαστικά, θεωρήθηκε

ένας μέσος όρος των κλίσεων που υπάρχουν σε κάθε τμήμα. Έτσι, η γραμμή 3 κατατμήθηκε σε 3 ζώνες κλίσεων:

- Ανωφερικά τμήματα με κλίση 2.00%
- Οριζόντια τμήματα με κλίση 0.00%
- Κατωφερικά τμήματα με κλίση -2.00%

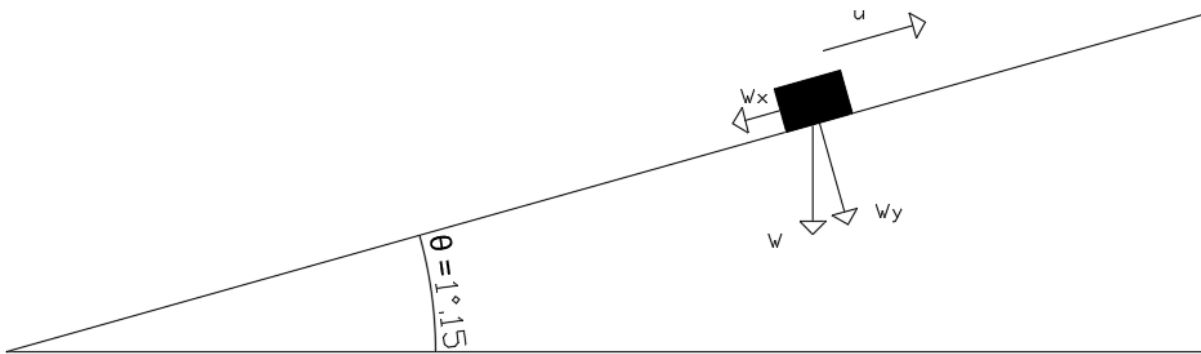
### Ανωφέρειες

Η κατάτμηση της γραμμής σε ζώνες με ορισμένη κλίση είναι σημαντικό να γίνει, καθώς η πορεία της αμαξοστοιχίας σε αυτά τα τμήματα δέχεται διαφορετικές δυνάμεις. Σύμφωνα με το Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις που επιδρούν στο κάθε τμήμα μεταβάλλουν σημαντικά την επιτάχυνση του σώματος στο σύνολό του, συγκεκριμένα της αμαξοστοιχίας. Έτσι, στην ανωφέρεια όταν ο συρμός βρίσκεται στη φάση της επιτάχυνσης, αυτή θα έχει μικρότερο μέτρο από την ονομαστική του (που δίνεται από τη ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε.), καθώς η συνιστώσα  $W_x$  του βάρους του είναι αντίρροπη της ελκτικής δύναμης του συρμού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.



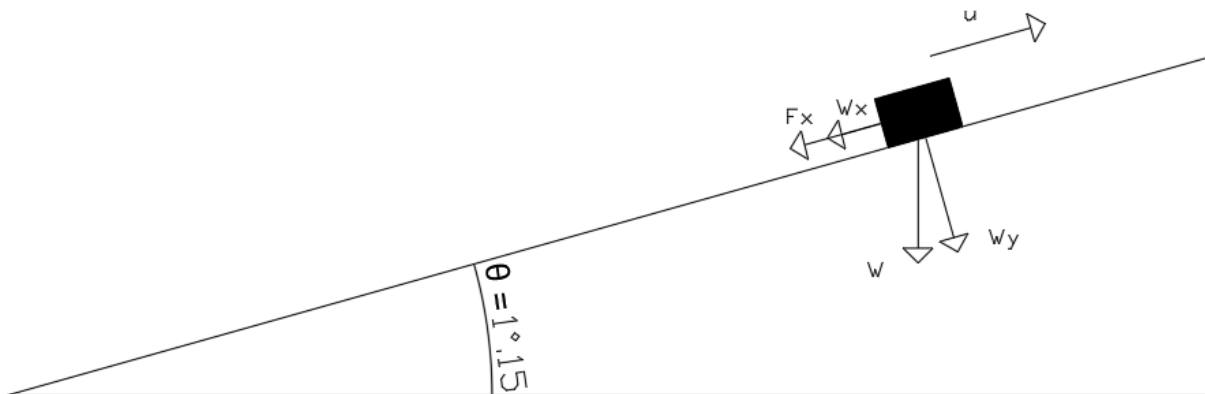
**Σχήμα 3.2.1:** Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά την επιτάχυνση

Μετά ακολουθεί η φάση του ρολλαρίσματος, στην οποία το τρένο δεν επιταχύνει αλλά ούτε και επιβραδύνει με πέδηση. Η ταχύτητα μειώνεται καθώς βρίσκεται σε ανηφορικό τμήμα και ασκείται μόνο η δύναμη της συνιστώσας του βάρους, που είναι αντίθετη της κίνησης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τονίζεται πως σε αυτήν την περίοδο η ταχύτητα του συρμού μειώνεται, και αυτό σημαίνει επιβραδύνει (αρνητική επιτάχυνση), η οποία επιβράδυνση υπολογίζεται παρακάτω. Άρα, το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση.



**Σχήμα 3.2.2:** Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά το ρολλάρισμα

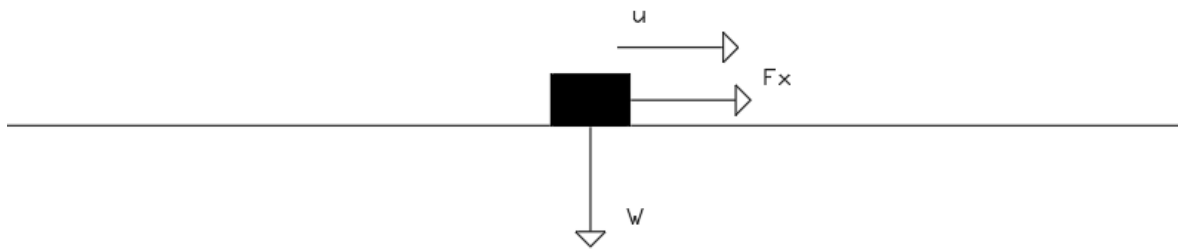
Τέλος, κατά την επιβράδυνση του συρμού, ασκείται ομόρροπη δύναμη (η δύναμη της πέδησης) με αυτή της συνιστώσας του βάρους ( $w_x$ ), με αποτέλεσμα ο συρμός να έχει μεγαλύτερη επιβράδυνση από αυτή του ρολλαρίσματος. Το σύστημα δυνάμεων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση. Σημειώνεται, πως η επιβράδυνση του συρμού θα είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική επιβράδυνση που δίνει η εταιρία ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε.



**Σχήμα 3.2.3:** Δυνάμεις συρμού σε ανωφέρεια κατά την επιβράδυνση

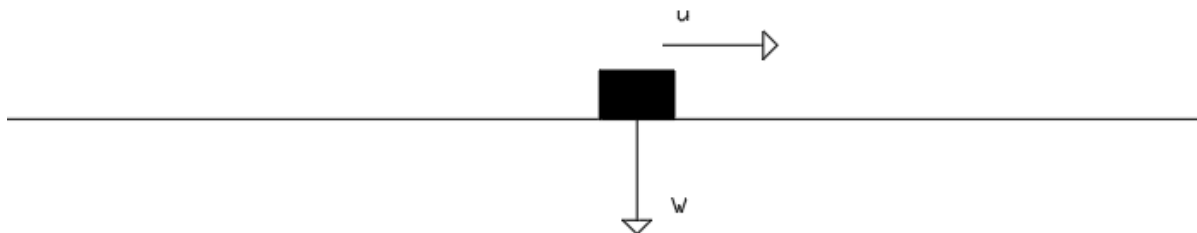
### Οριζόντιο τμήμα

Εφόσον έχει γίνει η παραδοχή πως στην αμαξοστοιχία δεν επενεργούν δυνάμεις οι οποίες σχετίζονται με την αντίσταση του αέρα και την τριβή, τότε στο συρμό θα ασκείται μόνο η δύναμη από την μηχανή του. Άρα, η επιτάχυνση που θα έχει ο συρμός θα είναι και η ονομαστική του. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο συρμό.



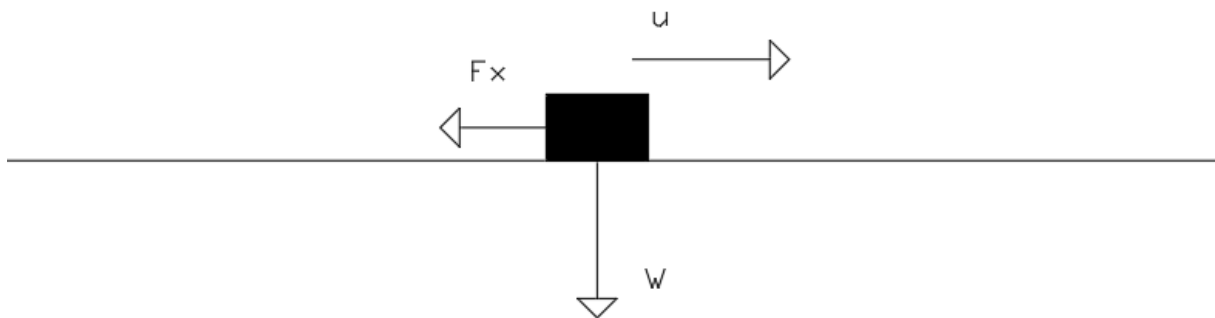
**Σχήμα 3.2.4:** Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά την επιτάχυνση

Επίσης, κατά το ρολλάρισμα δεν ασκείται καμία δύναμη στο συρμό, με αποτέλεσμα να διατηρεί τη μέγιστη ταχύτητά του ( $V_{max} = 80 \text{ km/h}$  ή  $22.22 \text{ m/s}$ ) χωρίς την παρεμβολή κάποιας δύναμης, για αυτό και η επιτάχυνση είναι μηδενική. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση.



**Σχήμα 3.2.5:** Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά το ρολλάρισμα

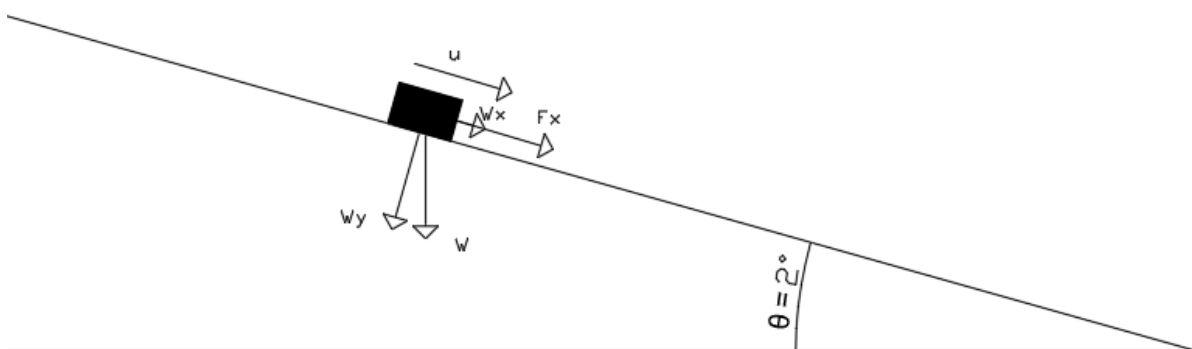
Στο ίδιο μήκος κύματος κινείται και η επιβράδυνση του συρμού, καθώς στο σώμα ασκείται μόνο η δύναμη της πέδησης, που είναι αντίθετη από τη φορά της ταχύτητας. Άρα το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.2.6:** Δυνάμεις συρμού σε οριζόντιο τμήμα κατά την επιβράδυνση

### Κατωφέρειες

Η κατάτμηση της ενιαίας γραμμής Αγία Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας περιέχει και τμήματα αρνητικής κλίσης, δηλαδή κατωφέρειες. Στις κατωφέρειες ισχύει περίπου ό,τι και στις ανωφέρειες. Το πρώτο τμήμα της κίνησης του συρμού, δηλαδή η επιταχυνόμενη κίνηση, «υποβοηθάται» με την κλίση που υπάρχει στο τμήμα αυτό. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, σύμφωνα με τη συνιστώσα του βάρους του συρμού και τη δύναμη του τρένου για να επιταχύνει, αναπόφευκτα η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.

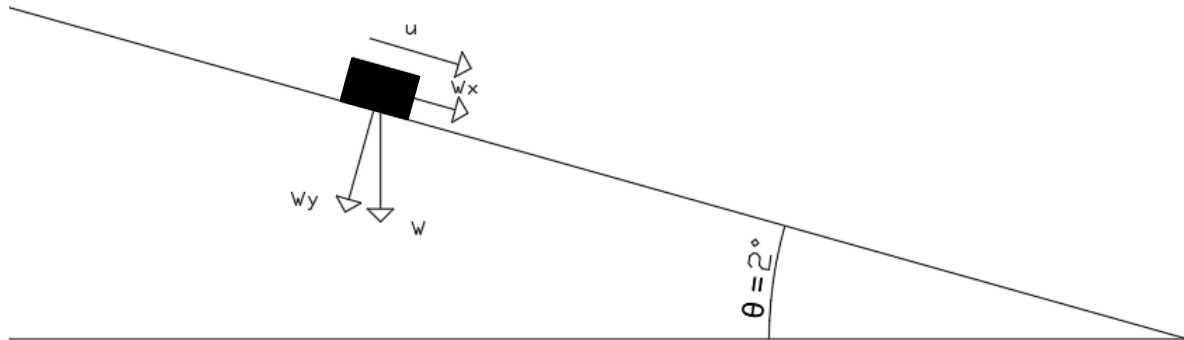


**Σχήμα 3.2.7:** Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά την επιτάχυνση

Στη δεύτερη φάση του τμήματος της κίνησης του συρμού, στο ρολάρισμα, δηλαδή όταν ο συρμός δεν επιταχύνει, στη περίπτωση της κατωφέρειας χρειάζεται να εφαρμοστεί πέδηση, τόσο όσο ώστε η ταχύτητα να παραμένει σταθερή και ίση με 22,22 m/s (80 km/h). Θεωρείται

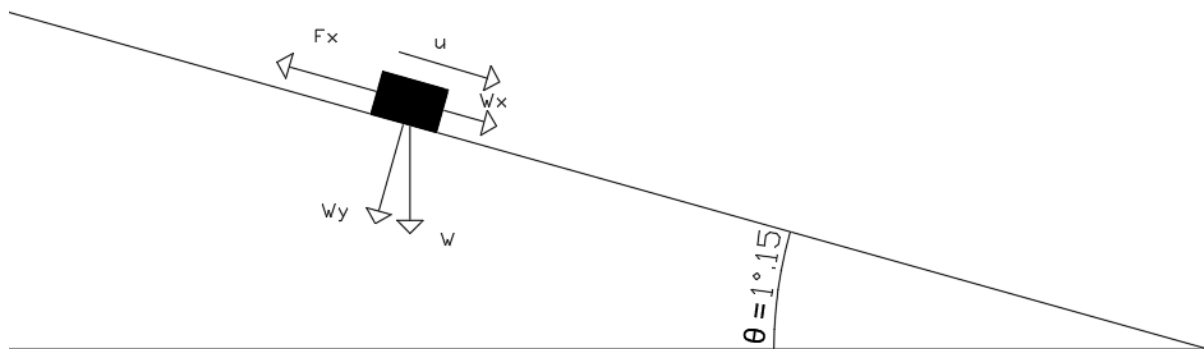


πως οι δυνάμεις της πέδησης και της συνιστώσας του βάρους αλληλοεξουδετερώνονται. Το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση.



**Σχήμα 3.2.8:** Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά το ρολλάρισμα

Τέλος, το σταμάτημα του συρμού δυσχεραίνεται από την κλίση της κατωφέρειας, με αποτέλεσμα η συνιστώσα του βάρους να είναι αντίθετης φοράς με αυτής της δύναμης της πέδησης. Έτσι, η ονομαστική επιβράδυνση της αμαξοστοιχίας είναι μικρότερη από το μέτρο της επιβράδυνσης που πραγματικά εφαρμόζεται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Άρα, το σώμα κάνει ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση.



**Σχήμα 3.2.9:** Δυνάμεις συρμού σε κατωφέρεια κατά την επιβράδυνση

### 3.3. Ανάλυση των προφίλ ταχύτητας

Μετά την ανάλυση για την κίνηση των συρμών, ακολουθεί η διαδικασία για τη δημιουργία των βέλτιστων προφίλ ταχύτητας. Σύμφωνα με τα δεδομένα της εταιρίας, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά, δρομολογούνται εκ νέου οι συρμοί λόγω των διαφορετικών επιταχύνσεων που υπάρχουν στα διαφορετικά κομμάτια της γραμμής. Έτσι, σύμφωνα με τις εξισώσεις των κινήσεων και το μήκος των επιμέρους τμημάτων, βρέθηκαν οι περιοχές στις οποίες ο συρμός θα επιταχύνει, θα ρολλάρει και θα επιβραδύνει. Πρέπει να σημειωθεί πως το κάθε τμήμα μεταξύ δύο σταθμών χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, καθώς έτσι το μοντέλο δίνει

πληρέστερη εικόνα για το πώς κινείται ο συρμός και για το χρόνο διαδρομής που απαιτείται σε κάθε τμήμα (επιτάχυνση – ρολλάρισμα – επιβράδυνση).

### Πρώτο προφίλ ταχύτητας

Το πρώτο προφίλ ταχύτητας θα αξιοποιεί το 100% της δύναμης της αμαξοστοιχίας, με αποτέλεσμα τους μικρότερους χρόνους διαδρομής του κάθε τμήματος αλλά σχετικά ενεργοβόρα ρύθμιση του δρομολογίου. Στην επιτάχυνση, σύμφωνα πάντα με τις κινηματικές εξισώσεις, βρέθηκε επίσης και ο χρόνος που χρειάζεται για να διανύσει 7 μέτρα ο συρμός, σύμφωνα με την εκάστοτε κλίση του τμήματος της γραμμής. Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ταχύτητα που έχει ο συρμός σε κάθε ένα από αυτά τα τμήματα, μήκους 7 μέτρων, μέχρι να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα της χάραξης της γραμμής 3.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ανωφέρειας κατά την επιτάχυνση, ο συρμός κινείται με επιτάχυνση η οποία είναι μειωμένη από την ονομαστική του, λόγω του βάρους του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ανακτήσει τη μέγιστη ταχύτητά του. Έτσι, λογικά, φαίνεται στις επιταχύνσεις να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Κατά το ρολλάρισμα, τη στιγμή όπου ο συρμός κινείται «ελεύθερος», υπάρχει μια επιβράδυνση η οποία οφείλεται στο βάρος του, με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά η ταχύτητα του συρμού. Σημειώνεται πως η επιβράδυνση θα έχει μία τιμή όχι τόσο μεγάλη, όμως, ώστε να ακινητοποιηθεί η αμαξοστοιχία πριν φτάσει στο προορισμό της. Όπως και προηγουμένως, βρίσκεται ο χρόνος διαδρομής ο οποίος αντιστοιχεί στο κομμάτι των 7 μέτρων που διανύει ο συρμός ενώ ρολλάρει με την επιτάχυνση που αναφέρθηκε. Κατά την επιβράδυνση, ο συρμός σταματάει διανύοντας σχετικά μικρή απόσταση, καθώς έχει την επιβράδυνση από την πέδηση αλλά και αυτή του βάρους του.

Για την περίπτωση της οριζόντιας κλίσης, η επιτάχυνση είναι αυτή που δίνει και ο κατασκευαστής της αμαξοστοιχίας, καθώς δεν επιδρά εξωτερική δύναμη πάνω στο συρμό. Κατά το ρολλάρισμα, ο συρμός κινείται με σταθερή ταχύτητα καθώς δεν επιδρούν δυνάμεις πάνω του, και κατά την επιβράδυνση ο συρμός έχει την ονομαστική του επιβράδυνση για τους παραπάνω λόγους.

Στη περίπτωση της κατωφέρειας, όπως είναι λογικό, ο συρμός αναπτύσσει τη μέγιστη ταχύτητά του σε λίγο χρόνο και στη μικρότερη απόσταση από τις δύο άλλες περιπτώσεις. Στο ρολλάρισμα χρειάζεται η χρήση φρένου κατά την οδήγηση, προκειμένου να μην αναπτύξει ταχύτητα μεγαλύτερη των 80 km/h. Αντίστοιχα, στην επιβράδυνση χρειάζεται μεγάλη απόσταση πέδησης, καθώς επιδρά πάνω στο συρμό η συνιστώσα της δύναμης του βάρους του.

### Δεύτερο προφίλ ταχύτητας

Στο δεύτερο προφίλ της ταχύτητας, εξετάστηκαν οι χρόνοι και η κατανάλωση της ενέργειας, αν χρησιμοποιούταν το 85% της ισχύος της αμαξοστοιχίας. Έτσι, τόσο η επιτάχυνση, όσο και η επιβράδυνση, μειώθηκε κατά 15%.

Στα ανωφερικά τμήματα, όπως είναι φυσικό λόγω του βάρους, η επιτάχυνση είναι ακόμη μειωμένη, με αποτέλεσμα ο συρμός να αργεί ακόμη περισσότερο να αναπτύξει την μέγιστη ταχύτητά του. Η καθυστέρηση της επίτευξης της μέγιστης ταχύτητας, έχει αρνητικό αντίκτυπο στη κατανάλωση της ενέργειας επειδή ο συρμός επιταχύνει για μεγάλο χρόνο. Στο ρολλάρισμα υπάρχει η ίδια επιτάχυνση που υπήρχε και στο πρώτο προφίλ.

Στα οριζόντια τμήματα ισχύει ακριβώς ό,τι και στο πρώτο προφίλ, με την μόνη διαφορά να είναι πως το μέτρο της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης είναι μειωμένο κατά 15%.

Στη κατωφέρεια, η αμαξοστοιχία, όπως και πριν, επιταχύνει σε μικρό χρονικό διάστημα έως τη μέγιστη ταχύτητα με διαφορετική επιτάχυνση. Το ρολλάρισμα δεν αλλάζει, καθώς δεν εφαρμόζονται επιταχύνσεις από τους κινητήρες του συρμού. Το μέτρο της επιβράδυνσης είναι μειωμένο σε σχέση με το πρώτο προφίλ.

Φαίνεται πως το δεύτερο προφίλ είναι ενεργειακά οικονομικότερο από το πρώτο, αλλά αρκετά πιο αργό στους χρόνους διαδρομής.

### Τρίτο προφίλ ταχύτητας

Στο πρώτο προφίλ ταχύτητας δόθηκε βάση στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διαδρομής του συρμού. Στο δεύτερο προφίλ έγινε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ελάττωση της κατανάλωσης της ενέργειας διατηρώντας ταυτόχρονα το χρόνο διαδρομής μικρό. Στο τρίτο και τελευταίο προφίλ δίνεται βάση στην άνεση των επιβατών. Από τη βιβλιογραφία, οι επιβάτες, με επιτάχυνση μικρότερη ή ίση των  $0,93 \text{ m/s}^2$ , μπορούν να σταθούν όρθιοι με ανοιχτά τα πόδια χωρίς να κρατιούνται από κάπου (Martin & Litwhiler, 2008). Έτσι, δημιουργείται αυτό το προφίλ, καθώς θεωρείται άνετη μετακίνηση αυτή που ο όρθιος επιβάτης μετακινείται χωρίς να κρατιέται από πουθενά.

Σε αυτό το προφίλ προσαρμόζεται έτσι η δύναμη του συρμού ώστε, στα ανωφερικά, οριζόντια και κατωφερικά τμήματα να κινείται με σταθερή επιτάχυνση, καθ' όλη τη γραμμή, και ίση με  $0,93 \text{ m/s}^2$ . Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, πως η ονομαστική επιτάχυνση στα ανωφερικά τμήματα θα είναι μικρότερη από την ονομαστική μέγιστη και μικρότερη από  $0,93 \text{ m/s}^2$ . Το προφίλ αυτό, θεωρείται τόσο ενεργειακά όσο και χρονικά, κατά αύξουσα σειρά, ανάμεσα στο πρώτο και στο δεύτερο.

Αξίζει να σημειωθεί πως και στα τρία προφίλ ταχύτητας η ανάκτηση της ενέργειας βασίστηκε στην αρχή κατά την οποία, όταν η αμαξοστοιχία επιβραδύνει με πέδηση (φρένα) για μεγάλο διάστημα, τότε η ενέργεια αυτή μεταφέρεται μέσω διαφόρων πηνίων, γνωστό ως σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας (*regenerative braking system*), και μετατρέπεται σε ηλεκτρική (Sun, Cai, Hou, Zhang, & Dong, 2014). Οπότε, κάθε μεταβολή στο μέτρο της επιβράδυνσης της αμαξοστοιχίας, έχει άμεσο αντίκτυπο στο ποσοστό της ενέργειας που ανακτάται, λόγω της πέδησης.

Στη συνέχεια και αφού ελέγχθηκαν τα προφίλ ταχύτητας ως προς την ορθότητά τους, ακολουθεί το μοντέλο της βελτιστοποίησης. Σε αυτό το κομμάτι ζητείται να βρεθεί το βέλτιστο προφίλ για κάθε τμήμα της γραμμής ξεχωριστά. Το πρόβλημα επιλύεται με Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό. Έτσι δημιουργείται μία εξίσωση με βεβαρυσμένους όρους, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Έχει ως όρους το χρόνο διαδρομής του συρμού μεταξύ δύο σταθμών, την ενέργεια που καταναλώνεται και τις μέγιστες επιταχύνσεις του κάθε κομματιού. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στο χρόνο διαδρομής και στο μέτρο της ενέργειας, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δε δίνεται καθόλου βάρος στην άνεση των επιβατών. Έτσι, δημιουργείται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, με δυαδικές μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν την επιλογή συγκεκριμένου προφίλ για κάθε τμήμα της γραμμής.

Προκειμένου να παρουσιαστούν αναλυτικότερα οι τύποι και τα αποτελέσματα της εργασίας, σκόπιμο είναι να παρουσιαστούν παρακάτω τα πρωτογενή δεδομένα, δηλαδή τα αρχικά στοιχεία που με κατάλληλους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν στο πρόβλημα.

### 3.4. Μέθοδος Βελτιστοποίησης

#### 3.4.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Γραμμικού Προγραμματισμού

Η παραπάνω ανάλυση που έγινε, αφορά πλέον τα δεδομένα εισόδου για το πρόβλημα. Δηλαδή, οι χρόνοι διαδρομής, οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις, η ενέργεια κ.ά., αποτελούν τα δεδομένα που με κατάλληλη επεξεργασία, είναι τα δεδομένα εισόδου για το πρόβλημα.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να υπολογιστούν τα βέλτιστα προφίλ ταχύτητας, λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους. Οι άλλες παράμετροι, όπως είναι επόμενο, είναι οι χρόνοι διαδρομής, η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε τμήμα της γραμμής και η δυαδική μεταβλητή.

Το μαθηματικό μοντέλο του Γραμμικού Προγραμματισμού (*Linear Programming*) προσπαθεί να βρει τη βέλτιστη λύση υπό κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι είναι γραμμικοί όροι. Η βελτιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται μέσα από μία συνάρτηση η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (*M. Καρλαύτη*). Ουσιαστικά, εκφράζει τη σχέση που έχουν οι μεταβλητές ανάμεσά τους. Αυτή, ανάλογα με το πρόβλημα κάθε φορά, είτε μεγιστοποιείται είτε ελαχιστοποιείται, με την προϋπόθεση πάντα ότι θα ικανοποιούνται οι περιορισμοί. Στο μαθηματικό πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της αναλογικότητας, της προσθετικότητας, της βεβαιότητας και της διαιρετότητας (*Κώστογλου Β., 2015*).

Καθορίζονται κάποιες μεταβλητές, οι οποίες ποσοτικοποιούν την απόφαση που πρέπει να παρθεί, με αποτέλεσμα να λέγονται μεταβλητές απόφασης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί όταν ορίζονται οι μεταβλητές απόφασης, διότι λάθος μεταβλητές οδηγούν και σε λάθος συμπεράσματα.

Μαθηματικά, το πρότυπο μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού έχει τη μορφή:

$$\max Z \text{ (ή } \min Z) = C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + \dots + C_n * X_n \quad (3.1)$$

Έτσι ώστε:

$$a_{11} * X_1 + a_{12} * X_2 + \dots + C_{1n} * X_n (\leq, =, \geq) b_1 \quad (3.2)$$

$$a_{21} * X_1 + a_{22} * X_2 + \dots + C_{2n} * X_n (\leq, =, \geq) b_2 \quad (3.3)$$

.....

$$a_{m1} * X_1 + a_{m2} * X_2 + \dots + C_{mn} * X_n (\leq, =, \geq) b_m \quad (3.4)$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0 \quad (3.5)$$

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω παράδειγμα, το σύνολο των συναρτήσεων, δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί, πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις μεταβλητές  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

Οι λύσεις του γραμμικού προγραμματισμού διακρίνονται στις εξής 7 (Κώστογλου Β., 2015):

- Εφικτή λύση (feasible solution): Μία λύση στην οποία θεωρείται ότι υπάρχει διάνυσμα  $X$  που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση.
- Βέλτιστη εφικτή λύση (optimal feasible solution): Η εφικτή λύση ενός ακραίου σημείου που δίνει στην αντικειμενική συνάρτηση τη βέλτιστη τιμή (μέγιστη ή ελάχιστη). Η βέλτιστη λύση μπορεί να είναι μόνο μία, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις με άπειρες βέλτιστες λύσεις, καμία βέλτιστη λύση ή η τιμή της συνάρτησης να τείνει στο άπειρο. Σε κάθε περίπτωση το πλήθος των εφικτών λύσεων ακραίου σημείου είναι πεπερασμένο. Όταν δηλαδή μία εφικτή λύση ακραίου σημείου είναι καλύτερη από τις γειτονικές της, τότε είναι η βέλτιστη.
- Εφικτή λύση ακραίου σημείου (corner point feasible solution): Είναι μία από τις κορυφές της εφικτής περιοχής.
- Γειτονικές εφικτές λύσεις ακραίου σημείου (adjacent corner feasible solution): οι εφικτές λύσεις που συνδέονται με μία ακμή (σύνορο) της εφικτής περιοχής.
- Μη εφικτή λύση (not feasible solution): Μία λύση που δεν ικανοποιεί τουλάχιστον έναν από τους περιορισμούς.
- Βασική λύση ακραίου σημείου (basic solution): Μία λύση που αντιστοιχεί σε κορυφή (έχει μη μηδενικές μεταβλητές όσες και το πλήθος των περιορισμών).
- Βασική εφικτή λύση (basic feasible solution): Βασική λύση που αντιστοιχεί σε κορυφή της εφικτής περιοχής και ουσιαστικά έχει όλες τις μεταβλητές μη αρνητικές.

Προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα του γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μέθοδοι. Μία από αυτές, της οποίας έγινε χρήση στην παρούσα έρευνα, είναι η μέθοδος Simplex. Χρησιμοποιείται στα προβλήματα όπου υπεισέρχονται πολλές λύσεις και σύμφωνα με διαδοχικά βήματα υπολογισμών δίνει μία καλύτερη λύση της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος ξεκινά από το ακρότατο σημείο της περιοχής εφικτών λύσεων (αρχική εφικτή λύση) και, μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, καταλήγει στο ένα κοντινότερο ακρότατο. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται μέχρις ότου να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή λύση.

### 3.4.2 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός επιλύει γραμμικά προβλήματα όπου οι μεταβλητές των προβλημάτων επιβάλλεται να είναι ακέραιες. Υπάρχουν πολλές τεχνικές επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων, όπως μέθοδοι διακλάδωσης και ορίου, περιορισμού του εφικτού χώρου, απαρίθμησης, κ.ά. Τα προβλήματα όμως αυτά είναι δυαδικής μορφής (binary) «0-1», όπου ανάλογα με τι αριθμό θα πάρουν οι μεταβλητές, μεγιστοποιείται η ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση, ανάλογα με το πρόβλημα.

Επειδή, ουσιαστικά, το μοντέλο βελτιστοποιείται με βάση τους περιορισμούς και τις συνθήκες που ορίζονται εκείνη τη στιγμή, μπορεί για κάποια άλλη στιγμή το μοντέλο να μην είναι το βέλτιστο, καθώς οι συνθήκες δεν είναι στατικές. Για το μέγεθος των αλλαγών των λύσεων και για την ποσοτικοποίηση του πόσο επιρρεπείς στις αλλαγές των βαρών είναι οι όροι της συνάρτησης, γίνεται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Η ανάλυση αυτή παρέχει στοιχεία για τη δυναμικότητα της βέλτιστης λύσης του μοντέλου στις αλλαγές των παραμέτρων.

Το αρχικό πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού ονομάζεται πρωτεύον πρόβλημα. Όμως, μετά την παρουσίαση των περιορισμών και εφόσον το πρωτεύον πρόβλημα είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης, τότε δημιουργείται ένα δεύτερο πρόβλημα, το δευτερεύον ή δυϊκό. Το δυϊκό αυτό πρόβλημα, είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που καθορίζεται από το πρωτεύον μοντέλο, δηλαδή αυτό που χρειάζεται να βελτιστοποιηθεί. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένα, καθώς με τη λύση του αρχικού προβλήματος, επέρχεται και η λύση του δυϊκού. Το είδος τόσο του προβλήματος όσο και των περιορισμών (ανισότητες ή ισότητες), προσδιορίζουν ανάλογα το είδος του δυϊκού και συγκεκριμένα οι μεταβλητές του πρώτου προβλήματος επηρεάζουν τους περιορισμούς του δυϊκού και αντίστροφα. Συμπληρωματικά, η αντίθεση αυτή ισχύει και για τις λύσεις τους, δηλαδή αν το πρόβλημα του πρώτου προβλήματος είναι ελαχιστοποίησης, τότε το πρόβλημα του δυϊκού είναι μεγιστοποίησης και αντίστροφα. Αξίζει να σημειωθεί, πως το δυϊκό πρόβλημα έχει ίδιο αριθμό μεταβλητών με αυτό των περιορισμών του πρωτεύοντος, και το αντίστροφο.

### 3.5. Ανάπτυξη Προτύπου

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Έτσι είναι αναγκαίο να οριστεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και στη συνέχεια να γίνει επεξήγηση των όρων και των μεταβλητών, καθώς και των περιορισμών που τίθενται στο πρόβλημα αυτό. Έτσι, σύμφωνα και με τα παραπάνω, το πρότυπο που αναπτύσσεται είναι το εξής:

#### Μεταβλητές απόφασης

1. Χρόνος διαδρομής ( $r_i$ )
2. Κατανάλωση Ενέργειας ( $E_i$ )
3. Η δυαδική μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την επιλογή προφίλ ταχύτητας ( $Y_i^k$ )

### Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\min f = a * p \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Y_i^k * r_i^k * d_i + b * P_{kWh} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Y_i^k * E_i^k + c * C$$

$$* \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Y_i^k * a_i^k * d_i * L_i^k \quad (3.6)$$

Όπου:

$$\bullet \sum_{k \in K} Y_i^k * r_i^k \leq d_{imax} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.7)$$

$$\bullet \sum_{k \in K} Y_i^k * r_i^k \geq d_{imin} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.8)$$

$$\bullet \sum_{k \in K} Y_i^k = 1 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.9)$$

$$\bullet \sum_{k \in K} Y_i^k * a_i^k \leq 0.93 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.10)$$

$$\bullet Y_{i1} = \begin{cases} 1, & \text{αν το προφίλ ταχύτητας στο τμήμα } i \text{ είναι } k = 1 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.11)$$

$$\bullet Y_{i2} = \begin{cases} 1, & \text{αν το προφίλ ταχύτητας στο τμήμα } i \text{ είναι } k = 2 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.12)$$

$$\bullet Y_{i3} = \begin{cases} 1, & \text{αν το προφίλ ταχύτητας στο τμήμα } i \text{ είναι } k = 3 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.13)$$

### Σύμβολα

**a, b, c:** συντελεστές βάρους της εξίσωσης

**p:** αξία χρόνου για τους επιβάτες εντός του συρμού, Value Of Time ή VOT (Kouwenhoven et al., 2014)

**P<sub>kWh</sub>:** τιμή κιλοβατώρας

**C:** μεταβλητή κοστολόγησης της δυσφορίας από τους επιβάτες σε χρήματα

**a<sub>max</sub>:** η μέγιστη επιτάχυνση άνεσης των επιβατών, δηλαδή 0,93 m/s<sup>2</sup>

**d<sub>imax</sub>:** η μέγιστη τιμή του χρόνου διαδρομής από τα πρωτογενή δεδομένα προσαυξημένη κατά 10%

**d<sub>imin</sub>:** η μέγιστη τιμή του χρόνου αναμονής στο σταθμό από τα πρωτογενή δεδομένα

**d<sub>i</sub>:** ο μέσος όρος επιβατών που υφίσταται την επιτάχυνση

**L<sub>i</sub><sup>k</sup>:** η απόσταση που η επιταχύνσεις είναι μεγαλύτερες των 0,93 m/s<sup>2</sup> στο κάθε προφίλ ταχύτητας

**i:** το τμήμα μεταξύ δύο σταθμών

**k:** [1, 2, 3], τα τρία προφίλ ταχύτητας

**r<sub>i</sub><sup>k</sup>:** ο χρόνος διαδρομής του τμήματος i ανάμεσα σε δύο γειτονικούς σταθμούς για το προφίλ k

$a_i^k$ : η μέγιστη επιτάχυνση ή επιβράδυνση στο τμήμα  $i$  ανάμεσα σε δύο γειτονικούς σταθμούς για το προφίλ  $k$

Σημειώνεται πως ο όρος VOT ή Value Of Time, είναι η προθυμία του μετακινούμενου να πληρώσει (*willingness to pay*) προκειμένου να εξοικονομήσει χρόνο από τη μετακίνησή του (Hensher, 2020).

Όπως έχει ειπωθεί, στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (3.6), αποτελεί η βελτιστοποίηση των δρομολογίων της γραμμής 3 του μετρό στο τμήμα Αγία Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας, όσον αφορά στο χρόνο διαδρομής, στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται και στην άνεση των επιβατών. Όσον αφορά τους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτοί έχουν κάποια βάρη η επίπτωση των οποίων θα εξετασθεί στην ανάλυση της ευαισθησίας παρακάτω.

Συνοπτικά, ο πρώτος όρος τη συνάρτησης αφορά το χρόνο διαδρομής στο εκάστοτε τμήμα  $i$ , ο δεύτερος όρος αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται στο συγκεκριμένο τμήμα και ο τρίτος αφορά τις επιταχύνσεις που δέχεται ο επιβάτης στο τμήμα  $i$ .

Για τον πρώτο όρο, ο χρόνος διαδρομής του συρμού μετατρέπεται σε χρήματα με βάση την αξία του χρόνου για τους μετακινούμενους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των μετακινούμενων σε κάθε σταθμό.

Ο δεύτερος όρος της συνάρτησης αφορά στην κατανάλωση της ενέργειας, η οποία επίσης μετατρέπεται σε χρήματα με βάση την τιμή της κιλοβατώρας.

Ο τρίτος όρος είναι αυτός της άνεσης των επιβατών. Για τον υπολογισμό της σχετικής επιβάρυνσης χρησιμοποιείται η μέγιστη επιτάχυνση που δέχονται οι επιβάτες ανά προφίλ ταχύτητας  $k$ , ο μέσος όρος των επιβατών, και η απόσταση για την οποία δέχονται οι επιβαίνοντες τη μέγιστη επιτάχυνση. Για τον υπολογισμό της επιβάρυνσης σε οικονομικούς όρους χρησιμοποιείται η τιμή της αξίας του χρόνου ταξιδιού προσαυξημένη κατά 50%.

Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τους χρόνους διαδρομής, δηλαδή να είναι μέσα σε ένα κατώτατο και σε ένα ανώτατο όριο. Όπως είναι φυσικό, θα πρέπει η επιτάχυνση σε κάθε τμήμα της γραμμής να μην υπερβαίνει το όριο της μέγιστης επιτάχυνσης για την άνεση των επιβαινόντων. Επισημαίνεται πως το όριο αυτό μπορεί να υπερβεί την τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης, μόνο όταν ο φόρτος στο συγκεκριμένο τμήμα συναρτήσει της ενέργειας και του χρόνου διαδρομής δικαιολογεί την δυσφορία των επιβατών για το συγκεκριμένο τμήμα. Δηλαδή, θα πρέπει να ο χρόνος διαδρομής και η κατανάλωση να είναι πολύ μικρότερα, σε μέτρο, από το προφίλ 3 που έχει τιμή το όριο της επιτάχυνσης. Για αυτόν το λόγο, οι παραπάνω όροι έχουν μετατραπεί σε χρήματα, προκειμένου να συγκρίνονται όμοιες μονάδες μέτρησης. Οι τρεις τελευταίοι περιορισμοί αφορούν στη μορφή των μεταβλητών καθώς αυτή πρέπει να παίρνει τη τιμή της μονάδας όταν επιλέγεται συγκεκριμένο προφίλ και συγκεκριμένα το άθροισμά τους να ισούται με τη μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι θα επιλέγεται σίγουρα ένα από τα τρία προφίλ σε κάθε τμήμα.

Συγκεκριμένα:

Ο περιορισμός (3.7), ορίζει ότι για το σύνολο των χρόνων διαδρομής σε όλα τα τμήματα, δεν υπάρχει υπέρβαση του ορίου  $d_{imax}$ .

Η συνάρτηση (3.8), ορίζει ότι ο συνολικός χρόνος διαδρομής δεν είναι μικρότερος από το  $d_{imin}$ .

Η εξίσωση (3.9), αφορά την επιλογή του προφίλ ταχύτητας. Επιβάλλει δηλαδή να γίνει χρήση ενός μόνο προφίλ ταχύτητας σε κάθε τμήμα  $i$ .



Ο περιορισμός (3.10), ορίζει ότι σε όλα τα τμήματα δεν γίνεται υπέρβαση της τιμής της μέγιστης επιτάχυνσης  $a_{\max}$ .

Οι περιορισμοί (3.11), (3.12) και (3.13), ορίζουν ότι οι μεταβλητές είναι δυαδικές (binary), δηλαδή αν επιλέγεται το αντίστοιχο προφίλ ταχύτητας  $k$  σε τμήμα  $i$  να είναι 1, αλλιώς να είναι 0.

## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

### 4.1. Εισαγωγή

Πρωτεύον στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των δρομολογίων της γραμμής 3 του μετρό ως προς τον χρόνο διαδρομής, την ενέργεια που καταναλώνεται και την άνεση των επιβατών. Προκειμένου να επιλεγθεί ένα προφίλ ταχύτητας για κάθε τμήμα της διαδρομής Αγ. Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας, είναι σημαντικό τα πρωτογενή δεδομένα που αποκτήθηκαν από την εταιρία να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία προκειμένου να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για το πρότυπο μοντέλο που έχει δημιουργηθεί. Στο παρόν κεφάλαιο, εφόσον προσδιορίστηκε το μαθηματικό πρόβλημα, αναλύονται πλήρως οι τακτικές και οι υπολογισμοί μέσω των οποίων παράχθηκαν τα δευτερογενή δεδομένα, το πώς δουλεύει το μοντέλο στην πράξη, καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας που ακολούθησε, προκειμένου να βρεθούν πόσο ευαίσθητοι είναι οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης στα βάρη που έχουν.

#### 4.1.1 Πρωτογενή δεδομένα

Το παρόν υποκεφάλαιο αποτελείται κυρίως από εικόνες και πίνακες πρωτογενών στοιχείων που παραχωρήθηκαν από την εταιρία ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε. Παρακάτω, τα στοιχεία αυτά αναλύονται μέσω μίας διαδικασίας που θα περιγραφεί και εν τέλει βρίσκονται τα προφίλ ταχύτητας για κάθε τμήμα ξεχωριστά.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ	
Αριθμός Συρμών	21 (7 Συρμοί DC/AC και 14 Συρμοί DC)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Πόρτες ανά Όχημα	4 ολισθαίνουσες θύρες εφαρμοστού τύπου ανά πλευρά
Χωρητικότητα Συρμών DC	196 Καθίσματα 866 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1062 Επιβάτες/Συρμό
Χωρητικότητα Συρμών DC-AC	158 Καθίσματα 868 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1026 Επιβάτες/Συρμό
Διευκολύνσεις Επιβατών	Κλιματισμός στους Συρμούς. Εσωτερικές πινακίδες προορισμού με δυνατότητες εναλλασσόμενων μηνυμάτων. Χώροι αποκλειστικής χρήσης από άτομα με ειδικές ανάγκες. Γέφυρες επικοινωνίας μεγάλου εύρους που επιτρέπουν να κατανέμεται ισομερώς η φόρτιση των επιβατών στα οχήματα. Κομβία ανοίγματος θυρών προς χρήση από τους επιβάτες σε ώρες μη αιχμής.

**Εικόνα 4.1.1:** Γενικά χαρακτηριστικά συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)

Τάση Λειτουργίας Συρμού DC/AC	750VDC/25kVAC
Τάση Λειτουργίας Συρμού DC	750VDC
Κινητήρες Έλξης	4 X 170kW AC ανά κινητήριο όχημα
Έλεγχος Έλξης Συρμού DC/AC	Converter AC-DC, VVVF Inverter (IGBT technology)
Έλεγχος Έλξης Συρμού DC	VVVF Inverter (IGBT technology)

**Εικόνα 4.1.2:** Χαρακτηριστικά κινητήρα συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)

Στην παραπάνω εικόνα 4.1.2 φαίνονται οι δύο τάσεις λειτουργίας για την έλξη των συρμών, οι διαφορετικοί τύποι αμαξοστοιχιών του εναλλασσόμενου (AC) και συνεχούς (DC) ρεύματος. Σε αυτή την εργασία οι συρμοί θεωρείται πως έχουν συστήματα και εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Πέδηση	Ανάκτησης ενέργειας/Δυναμική/Πνευματική
Μέση Επιτάχυνση	1.00μ. / δευτερόλεπτο <sup>2</sup>
Μέση Επιβράδυνση	1,1μ./δευτ.2 (Υπό Κανονικές Συνθήκες) 1,20μ./δευτ.2 (Σε Συνθήκες Έκτακτης Ανάγκης)
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC/AC	120χλμ. / ώρα
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC	80χλμ. / ώρα
Κατασκευή Αμαξώματος	Ανοξείδωτος Χάλυβας
Άλλες πληροφορίες	Πλήρες σύστημα ένδειξης και διάγνωσης βλαβών. Δοκιμές προσομοίωσης εμπορικής λειτουργίας. Πρόγραμμα απόδειξης αξιοπιστίας.

**Εικόνα 4.1.3:** Χαρακτηριστικά επιτάχυνσης συρμών 2ης γενιάς (Πηγή: ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)

Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα λόγω της οριζοντιογραφίας της γραμμής οριοθετείται στα 80 km/h και όχι στα 120 km/h, που δύναται να αναπτύσσει η συγκεκριμένη αμαξοστοιχία.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τη ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε. και τα οποία αφορούν τους χρόνους διαδρομής του υπάρχοντων δρομολογίων και λοιπά στοιχεία που ισχύουν για τα καθημερινά δρομολόγια.

**Πίνακας 4.1:** Επιβατική κίνηση της γραμμής 3 για το τμήμα Αγ. Μαρίνα - Δουκίσσης Πλακεντίας (Πηγή ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)

<b>ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΠΙΒΑΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ</b>		
<b>ΣΤΑΘΜΟΣ</b>	<b>ΕΠΙΒΙΒΑΣΕΙΣ</b>	<b>ΠΟΣΟΣΤΟ</b>
ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ	16 763	7.21%
ΑΙΓΑΛΕΩ	17 234	7.41%
ΕΛΑΙΩΝΑΣ	3 289	1.41%
ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ	10 455	4.50%
ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	24 032	10.34%
ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ	23 227	9.99%
ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ	21 986	9.46%
ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	24 758	10.65%
ΠΑΝΟΡΜΟΥ	17 837	7.67%
ΚΑΤΕΧΑΚΗ	13 337	5.74%
ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ	10 328	4.44%
ΧΟΛΑΡΓΟΣ	8 871	3.82%
ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ	8 842	3.80%
ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	6 431	2.77%
ΧΑΛΑΝΔΡΙ	6 782	2.92%
ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ	18 309	7.88%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>232 481</b>	<b>100.00%</b>

**Πίνακας 4.2:** Στοιχεία κάθε τμήματος της γραμμής 3 (Πηγή ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε)

	ΑΠΟ	ΠΡΟΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (m)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΑΞΙΔΙΟΥ
<b>ΑΓ. ΜΑΡΙΝΑ ΠΡΟΣ Δ. ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ</b>	ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ ΠΛ.1	ΑΙΓΑΛΕΩ ΠΛ.1	1429	0:01:39
	ΑΙΓΑΛΕΩ ΠΛ.1	ΕΛΑΙΩΝΑΣ ΠΛ.1	1122	0:01:24
	ΕΛΑΙΩΝΑΣ ΠΛ.1	ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ ΠΛ.1	1890	0:02:01
	ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ ΠΛ.1	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ ΠΛ. 1	1312	0:01:39
	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ ΠΛ. 1	ΣΥΝΤΑΓΜΑ 3 ΠΛ.1	923	0:01:15
	ΣΥΝΤΑΓΜΑ 3 ΠΛ.1	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ ΠΛ.1	970	0:01:16
	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ ΠΛ.1	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΠΛ.1	750	0:01:04
	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΠΛ.1	ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ ΠΛ.1	940	0:01:12
	ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ ΠΛ.1	ΠΑΝΟΡΜΟΥ ΠΛ.1	920	0:01:13
	ΠΑΝΟΡΜΟΥ ΠΛ.1	ΚΑΤΕΧΑΚΗ ΠΛ.1	1270	0:01:30
	ΚΑΤΕΧΑΚΗ ΠΛ.1	ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ ΠΛ.1	1030	0:01:17
	ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ ΠΛ.1	ΧΟΛΑΡΓΟΣ ΠΛ.1	1026	0:01:23
	ΧΟΛΑΡΓΟΣ ΠΛ.1	ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ ΠΛ.1	1170	0:01:23
	ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ ΠΛ.1	ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΠΛ.1	1110	0:01:22
	ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΠΛ.1	ΧΑΛΑΝΔΡΙ ΠΛ.1	937	0:01:13
ΧΑΛΑΝΔΡΙ ΠΛ.1	Δ. ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ ΠΛ.1	1057	0:01:19	

## 4.2. Ανάλυση των Πρωτογενών Δεδομένων και Προσομοίωση Διαδρομής

### 4.2.1 Υπολογισμός Δυνάμεων και Επιταχύνσεων των Συρμών

Τα δεδομένα παραχωρήθηκαν από την εταιρία ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε και πιο συγκεκριμένα αφορούν σε τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των συρμών καθώς και στοιχεία σχετικά με τα δρομολόγια που ισχύουν. Αξίζει να σημειωθεί πως έγιναν κάποιες εύλογες παραδοχές, είτε προς απλοποίηση του προβλήματος, είτε λόγω έλλειψης δεδομένων που δεν μπορούσαν να παραχωρηθούν από την εταιρία.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά στην κίνηση των αμαξοστοιχιών, δεν ελήφθησαν υπόψη οι δυνάμεις της αντίστασης του αέρα, καθώς το σχήμα του συρμού είναι ακανόνιστο και η διαδικασία για τον υπολογισμό των αντιδράσεων του αέρα είναι αρκετά πολύπλοκη. Εξάλλου το σχήμα του είναι τέτοιο ώστε πληροί τις προϋποθέσεις της αεροδυναμικής. Για την γραμμή, θεωρήθηκε πως η οριζοντιογραφία είναι επαρκής για μέγιστη ταχύτητα 80 km/h λόγω ανεπαρκών στοιχείων στο τμήμα Αγ. Μαρίνα – Δουκίσσης Πλακεντίας. Επίσης, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, οι κλίσεις των σταθμών περιορίζονται σε 3 ομάδες, αυτές με 2.00%, με 0.00% και με -2.00% κλίση. Η ομαδοποίηση των σταθμών δεν έγινε τυχαία αφού με τη γνώση και την εποπτεία της ευρύτερης περιοχής, περίπου αυτές οι τιμές είναι οι μέσοι όροι των εκάστοτε τμημάτων. Η παραπάνω θεώρηση έγινε λόγω ελλειπών στοιχείων από τη ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε. Επίσης, εντός των συρμών θεωρήθηκε πως σε κάθε δρομολόγιο επιβαίνουν 900 επιβάτες, δηλαδή περίπου το 85% της πληρότητας του συρμού, καθότι αυτοί οι σταθμοί έχουν

την περισσότερη κίνηση. Έτσι, το βάρος του συρμού ανέρχεται στους 266 τόνους, όπου 202 τόνοι είναι το βάρος του κενού συρμού και 900 επιβάτες \* 75 κιλά (ο μέσος όρος βάρους του Έλληνα).

Οι παραπάνω απλοποιήσεις όχι μόνο εξυπηρετούν τους υπολογισμούς και διευκολύνουν τη μελέτη, αλλά προσδίδουν ευελιξία στην προσέγγιση του προβλήματος της παρούσας εργασίας και μεθοδολογίας, που δεν περικλείεται στα όρια της γραμμής 3 του μετρό αλλά και σε συστήματα άλλων περιοχών μέσω κατάλληλων μεταβολών και παραδοχών.

Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί ταξινομούνται τα τμήματα των σταθμών σύμφωνα με τις κλίσεις που θεωρήθηκαν σωστές.

**Πίνακας 4.3:** Ομαδοποίηση των τμημάτων ανά κλίση

A/A	Τμήμα	Κλίσεις
1	Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω	0.00%
2	Αιγάλεω - Ελαιώνας	2.00%
3	Ελαιώνας - Κεραμεικός	-2.00%
4	Κεραμεικός - Μοναστηράκι	-2.00%
5	Μοναστηράκι - Σύνταγμα	-2.00%
6	Σύνταγμα - Ευαγγελισμός	0.00%
7	Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής	2.00%
8	Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι	2.00%
9	Αμπελόκηποι - Πανόρμου	0.00%
10	Πανόρμου - Κατεχάκη	0.00%
11	Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα	0.00%
12	Εθνική Άμυνα - Χολαργός	0.00%
13	Χολαργός - Νομισματοκοπείο	2.00%
14	Νομισματοκοπείο - Αγ. Παρασκευή	2.00%
15	Αγ. Παρασκευή - Χαλάνδρι	2.00%
16	Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας	0.00%

Μετά τον καθορισμό των κλίσεων του κάθε τμήματος, ακολουθεί η ανάλυση της μηχανικής της κίνησης των αμαξοστοιχιών. Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, η κίνηση αυτή ακολουθεί ρητά τους Νόμους του Νεύτωνα. Έτσι, αρχικά μελετήθηκε για το κάθε τμήμα η φύση της κλίσης του (αρνητική, μηδέν ή θετική) και πώς αυτή επιδρά στην επιτάχυνση, στο ρολλάρισμα και στην επιβράδυνση. Η βασική ιδέα είναι να βρεθούν οι επιταχύνσεις που υφίσταται ο συρμός, μέσω της Νευτώνειας Φυσικής, προκειμένου μετέπειτα να βρεθούν οι χρόνοι διαδρομής.

Η ανάλυση που ακολουθεί εφαρμόστηκε και στα 3 προφίλ ταχύτητας. Στο πρώτο προφίλ, όπου η επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις είναι οι μέγιστες δυνατές, και στο δεύτερο, με το 85% της ισχύς της αμαξοστοιχίας, εφαρμόστηκε αμιγώς η παρακάτω μέθοδος. Όμως στο τρίτο προφίλ, που προτέρημά του είναι η άνεση των επιβατών, θα πρέπει οι επιταχύνσεις να μην ξεπερνούν το μέτρο των  $0,93 \text{ m/s}^2$ . Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την εύρεση των επιταχύνσεων, μόνο που σε αυτή τη περίπτωση είναι εξαρχής γνωστή η επιτάχυνση και η επιβράδυνση που δέχονται οι επιβάτες, με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστή η ισχύς που χρησιμοποιείται και έτσι αλλάζουν ελάχιστα οι σχέσεις.

### Υπολογισμός ταχυτήτων σε ανωφερικά τμήματα

Κατά την επιτάχυνση του συρμού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.1, υπάρχει η συνιστώσα του βάρους που επενεργεί αντίθετα από τη δύναμη κίνησης του συρμού. Σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής, ισχύει η εξίσωση:

$$\sum F = m * a \quad (4.1)$$

όπου:

**F**: το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που δέχεται ο συρμός

**m**: το συνολικό βάρος του συρμού

**a**: η επιτάχυνση του συρμού

Για τη συνιστώσα  $W_x$ , ισχύει:

$$W_x = m * g * \sin(\theta) \Rightarrow W_x = 266000 * 9.81 * \sin(1.1458) \Rightarrow W_x = 52180.46 \text{ N} \quad (4.2)$$

με  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  να είναι το μέτρο της επιτάχυνσης της βαρύτητας και  $\theta = 1^\circ,1458$  να είναι η γωνία της κλίσης (2.00%) εκφρασμένη σε μοίρες.

Μέσω της εξίσωσης:

$$F_x = m * a \quad (4.3)$$

βρίσκεται η δύναμη έλξης του συρμού, όταν το  $m$  είναι το βάρος του συρμού (266000 kg) και το  $a$  η ονομαστική επιτάχυνσή του ( $a_{\text{nom-acceleration}} = 1 \text{ m/s}^2$ ). Αφού βρεθεί η δύναμη αυτή, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα τροποποιείται ως εξής:

$$\sum F = m * a \Rightarrow F_x - W_x = m * a \Rightarrow a = \frac{F_x - W_x}{m} \quad (4.4)$$

μέσω του οποίου βρίσκεται το  $a$ , το οποίο είναι η επιτάχυνση που τελικά έχει ο συρμός κατά την επιτάχυνση σε ανηφορικό τμήμα. Στο τρίτο προφίλ, η συνολική επιτάχυνση της αμαξοστοιχίας δεν ξεπερνά τα  $0,93 \text{ m/s}^2$  οπότε δεν χρειάζεται κάποιος μετασχηματισμός.

Κατά το ρολλάρισμα, ο συρμός δέχεται μία σταθερή επιβράδυνση που προκαλείται από τη δύναμη της συνιστώσας του βάρους του. Σύμφωνα με το σχήμα 3.2.2, η συνεχής δύναμη  $W_x$  που ασκείται στο συρμό έχει ως αποτέλεσμα:

$$W_x = m * a \Rightarrow a = \frac{W_x}{m} \quad (4.5)$$

όπου το  $a$  θα είναι η επιβράδυνση που δέχεται κατά το ρολλάρισμα και έχει ως συνέπεια τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας. Και σε αυτό το τμήμα, για το τρίτο προφίλ δεν χρειάζεται κάποιος μετασχηματισμός, αφού η επιβράδυνση δεν ξεπερνά τα όρια.

Κατά την επιβράδυνση, σύμφωνα με το σχήμα 3.2.3, οι δυνάμεις  $F_x$  και  $W_x$  είναι ομόρροπες, που σημαίνει πως παρόμοια στη προηγούμενη εξίσωση η δύναμη  $W_x$  έχει θετικό πρόσημο και έτσι προσδιορίζεται:

$$\sum F = m * a \Rightarrow F_x + W_x = m * a \Rightarrow a = \frac{F_x + W_x}{m} \quad (4.6)$$

Το θετικό πρόσημο σημαίνει πως ο συρμός έχει μεγαλύτερη επιβράδυνση από την ονομαστική καθώς «υποβοηθείται» και από την κλίση της ανωφέρειας (η συνιστώσα του βάρους είναι αντίθετη από αυτή της έλξης του συρμού).

Όμως, η δύναμη  $F_x$  θα είναι διαφορετική από αυτή που ήταν προηγουμένως. Επειδή η ονομαστική επιβράδυνση είναι διαφορετική από αυτή της επιτάχυνσης προσδιορίζεται το νέο μέτρο της  $F_x$ , αντίστοιχα με πριν, δηλαδή:

$$F_x = m * a \quad (4.7)$$

όπου  $m$  είναι το βάρος του συρμού (266000 kg) και το  $a$  η ονομαστική του επιβράδυνση ( $a_{\text{nom-deceleration}} = 1.1 \text{ m/s}^2$ ). Όμως η επιβράδυνση αυτή ξεπερνά το όριο της άνεσης των επιβατών. Έτσι για το τρίτο προφίλ, η επιτάχυνση περιορίζεται στα  $0,93 \text{ m/s}^2$  και χρειάζεται να βρεθεί η ισχύς του συρμού. Με τον τρόπο αυτό η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\sum F = m * a \Rightarrow F_x + W_x = m * 0,93 \Rightarrow m * a_{\text{tr}} = m * 0,93 - W_x \Rightarrow \quad (4.8)$$
$$a_{\text{tr}} = \frac{m * 0,93 - W_x}{m}$$

Με τους παραπάνω τρόπους υπολογίστηκαν οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις για τα τμήματα που είναι ανωφερικά με κλίση 2.00%. Εν συνεχεία, ακολουθεί ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής, καθώς και της ενέργειας που καταναλώνεται.

### Υπολογισμός ταχυτήτων σε οριζόντια τμήματα

Στις μηδενικές κλίσεις τα πράγματα είναι πολύ πιο απλά. Σύμφωνα με τα σχήματα 3.2.4, 3.2.5 και 3.2.6, φαίνεται πως στο συρμό δεν ασκείται η συνιστώσα του βάρους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις που ισχύουν για τα ανωφερικά τμήματα, δεν επηρεάζεται η δύναμη της έλξης του συρμού. Άρα, δεν επηρεάζονται και οι επιταχύνσεις που δέχεται ο συρμός και έτσι τόσο οι επιταχύνσεις όσο και οι επιβραδύνσεις έχουν τα μέτρα του κατασκευαστή, δηλαδή τις ονομαστικές τους, ενώ κατά το ρολλάρισμα του συρμού η ταχύτητά του δεν μεταβάλλεται. Οι τύποι που ισχύουν είναι αυτοί της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης. Εφόσον δεν υπάρχει μεταβολή της ονομαστικής επιτάχυνσης, η μελέτη συνεχίζεται για τον υπολογισμό των χρόνων διαδρομής και της ενέργειας κατανάλωσης. Όσον αφορά τις επιταχύνσεις του τρίτου προφίλ, αυτές περιορίζονται στα  $0,93 \text{ m/s}^2$ , καθώς το σύστημα του συρμού δεν δέχεται εξωτερικές δυνάμεις.

### Υπολογισμός ταχυτήτων σε οριζόντια τμήματα

Για τις κατωφέρειες, στα αριθμητικά μοντέλα ισχύουν περίπου τα ίδια με διαφορετικά πρόσημα. Πιο συγκεκριμένα, οι επιταχύνσεις σε αυτά τα τμήματα, γίνονται σε πολύ λιγότερο χρόνο και



διαδρομή έως τη μέγιστη ταχύτητα καθώς η συνολική επιτάχυνση του συρμού είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής. Σύμφωνα με την εικόνα 3.2.7, η συνιστώσα του βάρους είναι ομόρροπη αυτής της έλξης του συρμού. Όπως και πριν ισχύει ο Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα, δηλαδή η εξίσωση:

$$\sum F = m * a \quad (4.9)$$

με τις γνωστές μεταβλητές. Επίσης, η συνιστώσα του βάρους:

$$W_x = m * g * \sin(\theta) \quad (4.10)$$

δεν αλλάζει μέτρο, καθώς ούτε η συνολική μάζα του συρμού ( $m = 266000 \text{ kg}$ ) άλλαξε, ούτε η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), αλλά ούτε και η γωνία της κλίσης ( $\theta = 1^\circ, 1458$ ). Το μόνο που αλλάζει είναι η φορά της δύναμης  $W_x$ . Για αυτό το λόγο, ο Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα παίρνει την εξής μορφή:

$$\sum F = m * a \Rightarrow F_x + W_x = m * a \Rightarrow a = \frac{F_x + W_x}{m} \quad (4.11)$$

Αξίζει να σημειωθεί, πως το μέτρο της δύναμης της έλξης του συρμού ( $F_x$ ) δεν άλλαξε καθώς παρέμειναν σταθερά η μάζα του συρμού ( $m$ ) και η ονομαστική επιτάχυνση ( $a_{\text{nom-acceleration}} = 1 \text{ m/s}^2$ ). Για το τρίτο προφίλ, επειδή το μέτρο της επιτάχυνσης στην κατωφέρεια ξεπερνά το όριο της άνεσης, η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται ως εξής, προκειμένου να βρεθεί η ισχύς του συρμού:

$$\begin{aligned} \sum F = m * a \Rightarrow F_x + W_x = m * 0,93 \Rightarrow m * a_{\text{tr}} = m * 0,93 - W_x \Rightarrow \\ a_{\text{tr}} = \frac{m * 0,93 - W_x}{m} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Όπως τονίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά το ρολλάρισμα (coasting), υπάρχει μία επιτάχυνση που θα είναι ίση σε μέτρο με αυτή της επιβράδυνσης στα ανωφερικά τμήματα. Αυτό γίνεται λόγω της δύναμης  $W_x$  (συνιστώσας του βάρους) που συνεχίζει να ασκείται στο σώμα, σύμφωνα με το σχήμα 3.2.8. Όμως, εφόσον ο συρμός θα έχει αναπτύξει ήδη τη μέγιστη ταχύτητα πριν το ρολλάρισμα, εφαρμόζεται πέδηση προκειμένου η ταχύτητα να μην ξεπεράσει τα  $80 \text{ km/h}$ , το όριο της γραμμής. Έτσι, τα διαγράμματα ταχύτητας – απόστασης ( $u-x$ ) που ακολουθούν θα μοιάζουν με αυτά των οριζοντίων τμημάτων. Το τρίτο προφίλ δεν επηρεάζεται και χρησιμοποιούνται οι πράξεις των υπολοίπων.

Η επιβράδυνση όμως δυσχεραίνεται, καθώς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.9, εξακολουθεί να ασκείται στο σώμα η δύναμη  $W_x$ . Προφανώς, για αυτόν το λόγο η επιτάχυνση του συρμού τη συγκεκριμένη περίοδο είναι μικρότερη της ονομαστικής ( $a_{\text{nom-deceleration}} = 1.1 \text{ m/s}^2$ ). Όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\sum F = m * a \Rightarrow W_x - F_x = m * a \Rightarrow a = \frac{W_x - F_x}{m} \quad (4.13)$$

όπου, όπως και προηγουμένως όλοι οι συντελεστές έχουν το ίδιο μέτρο. Το τρίτο προφίλ δεν επηρεάζεται και χρησιμοποιούνται οι πράξεις των υπολοίπων.

#### 4.2.2 Υπολογισμός Χρόνων Διαδρομής

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την καλύτερη διερεύνηση του προβλήματος, το κάθε τμήμα επιτάχυνσης, ρολλαρίσματος και επιβράδυνσης, καταμήθηκε σε επιμέρους κομμάτια, με απόσταση 7 μέτρα μεταξύ τους. Γνωρίζοντας εξαρχής την απόσταση που θα διανύσει η αμαξοστοιχία ανά πάσα στιγμή, βρίσκεται ο χρόνος που κάνει ο συρμός για να καλύψει κάθε 7 μέτρα. Έτσι, σύμφωνα με τους τύπους της κινηματικής:

##### Ευθύγραμμη Ομαλή Κίνηση (ΕΟΚ)

$$1. \begin{cases} U = \frac{dx}{t} \\ dx = U * t \end{cases} \quad (4.14)$$

##### Ευθύγραμμη Ομαλά Επιταχυνόμενη Κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα

$$2. \begin{cases} U = a * t \\ dx = \frac{1}{2} * a * t^2 \end{cases} \quad (4.15)$$

##### Ευθύγραμμη Ομαλά Επιταχυνόμενη Κίνηση με αρχική ταχύτητα

$$3. \begin{cases} U = U_0 + a * t \\ dx = U_0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \end{cases} \quad (4.16)$$

##### Ευθύγραμμη Ομαλά Επιβραδυνόμενη Κίνηση

$$4. \begin{cases} U = U_0 - a * t \\ dx = U_0 * t - \frac{1}{2} * a * t^2 \end{cases} \quad (4.17)$$

όπου,

**U:** η ταχύτητα τη συγκεκριμένη στιγμή t σε m/s

**t:** ο χρόνος σε s

**dx:** η μετατόπιση της αμαξοστοιχίας σε m

**a:** η επιτάχυνση σε m/s

**U<sub>0</sub>:** η αρχική ταχύτητα της αμαξοστοιχίας

Αρχικά, θεωρείται ότι ο συρμός επιταχύνει καθ' όλη τη διάρκεια των πρώτων 7 μέτρων με ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα διότι είναι σταματημένος. Για αυτό το λόγο η σχέση 2 γίνεται ως εξής:

$$t = \sqrt{\frac{2 * dx}{a}} \quad (4.18)$$

Όπου το dx είναι γνωστό και ίσο με 7 μέτρα και η επιτάχυνση a επίσης γνωστή και ίση με το εκάστοτε προφίλ ταχύτητας. Επειδή η εξίσωση είναι 2<sup>ου</sup> βαθμού, γίνεται η επίλυσή της με διακρίνουσα και βγαίνουν πάντα δύο λύσεις. Απορρίπτεται η αρνητική, καθώς η μονάδα μέτρησης είναι το δευτερόλεπτο (second). Βρίσκοντας το χρόνο διαδρομής, βρίσκεται και η ταχύτητα που έχει αναπτύξει στα 7 μέτρα και είναι ίση με:

$$U = a * t \quad (4.19)$$

Μετά το πέρας των πρώτων 7 μέτρων, η αμαξοστοιχία θεωρείται ότι κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση με αρχική ταχύτητα διότι επιτάχυνε προηγουμένως. Σε όλο το τμήμα και λίγο πριν την έναρξη της φάσης του ρολλαρίσματος χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$dx = U_0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \Rightarrow \Delta = U_0^2 + 4 * \frac{1}{2} * a * dx \Rightarrow$$

$$t_{1,2}^2 = \frac{-U_0 \pm \sqrt{U_0^2 + 4 * \frac{1}{2} * a * dx}}{a} \quad (4.20)$$

από τις οποίες με τη μέθοδο της διακρίνουσας προκύπτουν 2 τιμές χρόνου, από τις οποίες επιλέγεται η μη αρνητική. Η τιμή του dx συνεχίζει να είναι 7m. Στη συνέχεια, υπολογίζεται και η τιμή της ταχύτητας σε καθένα από τα επιμέρους τμήματα των 7 μέτρων μέσω της σχέσης:

$$U = U_0 + a * t \quad (4.21)$$

όπου t θα είναι ο χρόνος που υπολογίστηκε και U<sub>0</sub> η αρχική ταχύτητα του προηγούμενου τμήματος.

Όταν όμως η ταχύτητα πλησιάσει τα 22.22 m/s (80 km/h), γίνεται η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή υπολογίζεται ακριβώς σε ποια θέση επιτυγχάνει τη μέγιστη ταχύτητά του. Μέσω της σχέσης 3, η σχέση της ταχύτητας μετασχηματίζεται ως εξής:

$$t = \frac{U_0 - U}{a} \quad (4.22)$$

με γνωστές τις ταχύτητες U = 22.22 m/s, U<sub>0</sub> η τιμή του προηγούμενου τμήματος και a η επιτάχυνση της εκάστοτε μηκοτομής του τμήματος μεταξύ δύο σταθμών. Έπειτα, λύνοντας ως προς dx βρίσκεται η απόσταση που διανύει έως ότου φτάσει τα 22.22 m/s. Έτσι, σε όλες τις μηκοτομές οι συρμοί επιταχύνουν αλλά με διαφορετικές επιταχύνσεις κάθε φορά.

Ανάλογα με την κλίση διαφέρει και η φάση του ρολλαρίσματος. Πιο συγκεκριμένα, στα ανωφερικά τμήματα ο συρμός επιβραδύνει με τον τρόπο που εξηγήθηκε παραπάνω. Έτσι, η κίνησή του είναι ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη. Και σε αυτό το τμήμα βρίσκονται ταχύτητες και χρόνοι διάλυσης του συρμού. Σύμφωνα με τις εξισώσεις 4, αντίστοιχα με

προηγουμένως, υπολογίζονται αρχικά οι χρόνοι διαδρομής και έπειτα οι ταχύτητες σε κάθε τμήμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο ισχύει:

$$dx = U_0 * t - \frac{1}{2} * a * t^2 \Rightarrow \Delta = U_0^2 - 4 * \frac{1}{2} * a * dx \Rightarrow$$

$$t_{1,2}^2 = \frac{U_0 \pm \sqrt{U_0^2 - 4 * \frac{1}{2} * a * dx}}{a} \quad (4.23)$$

Επειδή είναι 2<sup>ου</sup> βαθμού εξίσωση, υπολογίζονται δύο λύσεις από τις οποίες επιλέγεται η μικρότερη, καθώς η μεγαλύτερη από αυτήν ξεπερνά ακόμα και το όριο της μέγιστης τιμής του χρόνου διαδρομής που τίθεται σαν περιορισμός. Η τιμή του dx παραμένει 7 μέτρα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ταχύτητα σε κάθε τμήμα χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$U = U_0 - a * t \quad (4.24)$$

Στα οριζόντια και στα κατωφερικά τμήματα, τα πράγματα είναι πολύ πιο απλά. Συγκεκριμένα, στα οριζόντια τμήματα, εφόσον θεωρείται ότι η αμαξοστοιχία κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, ισχύουν οι σχέσεις της μορφής 1. Έτσι, υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής κατά το ρολάρισμα με την εξής σχέση:

$$U = \frac{dx}{t} \Rightarrow t = \frac{dx}{U} \quad (4.25)$$

με το dx να είναι γνωστό και ίσο με 7 μέτρα ενώ η ταχύτητα (U) είναι σταθερή και ίση με 22.22 m/s, εφόσον πραγματοποιείται κίνηση αυτής της μορφής.

Όσον αφορά την κίνηση στα κατωφερικά τμήματα, δεν αλλάζει κάτι ως προς την επίλυση με αυτής στα οριζόντια τμήματα, διότι θεωρείται ότι εφαρμόζεται πέδηση τόση ώστε η ταχύτητα να διατηρείται σταθερή στα 22.22 m/s. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θεωρείται ότι ο συρμός κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση και σε αυτήν την κλίση, με αποτέλεσμα να ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις.

Για τη φάση της επιβράδυνσης του συρμού γίνεται χρήση των ίδιων σχέσεων με οποιαδήποτε κλίση. Αλλάζει μόνο το μήκος από την αρχή της επιβράδυνσης έως και τη στάση της αμαξοστοιχίας. Εφόσον εξετάζεται η φάση της επιβράδυνσης, χρησιμοποιούνται και οι ανάλογες σχέσεις της ευθύγραμμης ομαλά επιβραδυνόμενης κίνησης, δηλαδή η σχέση 4. Αρχικά βρίσκεται ο χρόνος που επιβραδύνει στο τμήμα των 7 μέτρων με την σχέση:

$$dx = U_0 * t - \frac{1}{2} * a * t^2 \Rightarrow \Delta = U_0^2 - 4 * \frac{1}{2} * a * dx \Rightarrow$$

$$t_{1,2}^2 = \frac{U_0 \pm \sqrt{U_0^2 - 4 * \frac{1}{2} * a * dx}}{a} \quad (4.26)$$

και έπειτα προσδιορίζεται η ταχύτητα για το κάθε ένα τμήμα, μέσω της σχέσης:

$$U = U_0 - a * t \quad (4.27)$$

Κατά αυτό το τρόπο, ολοκληρώνεται η μελέτη κίνησης των συρμών, και η εύρεση των χρόνων διαδρομής καθώς και των αλλαγών των ταχυτήτων στο τμήμα ανάμεσα των σταθμών. Σημειώνεται πως οι παραπάνω υπολογισμοί και σχέσεις παρέμειναν ίδιοι και στα 3 προφίλ ταχύτητας, καθώς το μόνο που αλλάζει είναι οι επιταχύνσεις στο κάθε προφίλ.

#### 4.2.3 Υπολογισμός Κατανάλωσης Ενέργειας

Η εύρεση των χρόνων διαδρομής για κάθε ένα από τα τμήματα επιτάχυνσης, ρολαρίσματος και επιβράδυνσης ήταν μεγάλης σημασίας. Το άθροισμα των χρόνων κάθε τμήματος 7 μέτρων, είναι ο συνολικός χρόνος των 3 σταδίων αντίστοιχα. Επίσης, το άθροισμα αυτών των τριών αθροισμάτων παράγει το συνολικό χρόνο διαδρομής του συρμού.

Όμως, ο υπολογισμός του χρόνου του καθενός ξεχωριστά βοηθάει στον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνεται από το συρμό. Σύμφωνα με τον Yang και την ομάδα του, υπάρχουν δύο σχέσεις οι οποίες υπολογίζουν την ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη και ορισμένες παραμέτρους (S. Yang et al., 2018). Έτσι, η ενέργεια κατανάλωσης κατά την επιτάχυνση υπολογίζεται ως εξής:

$$E_i^{c,a} = \frac{M * a^2 * (t_i^b)^2}{2 * \theta_1} \quad (4.28)$$

όπου:

**M:** η μάζα του συρμού, ίση με 266000 kg

**a:** η επιτάχυνση του συρμού, ίση με αυτή που έχει οριστεί στο εκάστοτε προφίλ ταχύτητας

**t<sub>i</sub>:** ο χρόνος που χρειάζεται ο συρμός να επιταχύνει έως τη μέγιστη ταχύτητά του σε κάθε σταθμό

**θ<sub>1</sub>:** η παράμετρος της σχέσης, ίση με 0.7

Χρειάζεται όμως να βρεθούν οι καθαρές καταναλώσιμες τιμές της ενέργειας του συρμού. Αφού υπολογιστούν οι τιμές μέσω της παραπάνω σχέσης, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ αυτής της τιμής και της ενέργειας που αποκτάται από την πέδηση του συρμού. Αυτή η τιμή προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$E_i^{c,b} = \frac{M * b^2 * \theta_2 * (t_i^b)^2}{2} \quad (4.29)$$

όπου:

**M:** η μάζα του συρμού, ίση με 266000 kg

**b:** η επιβράδυνση του συρμού, ίση με αυτή που έχει οριστεί στο εκάστοτε προφίλ ταχύτητας

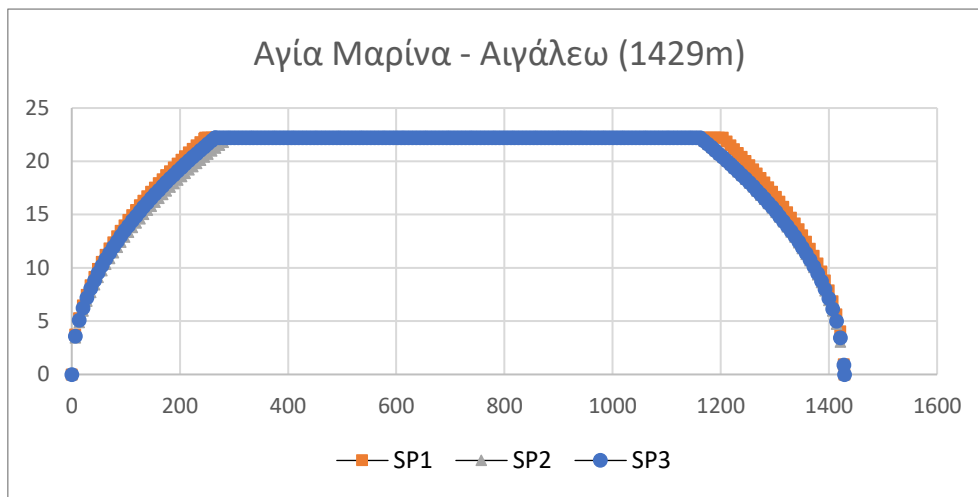
**t<sub>i</sub>:** ο χρόνος που χρειάζεται ο συρμός να επιβραδύνει από τη ταχύτητα εξόδου στο ρολαρίσμα έως την ακινητοποίησή του στον επόμενο σταθμό

$\theta_2$ : η παράμετρος της σχέσης, ίση με 0.5

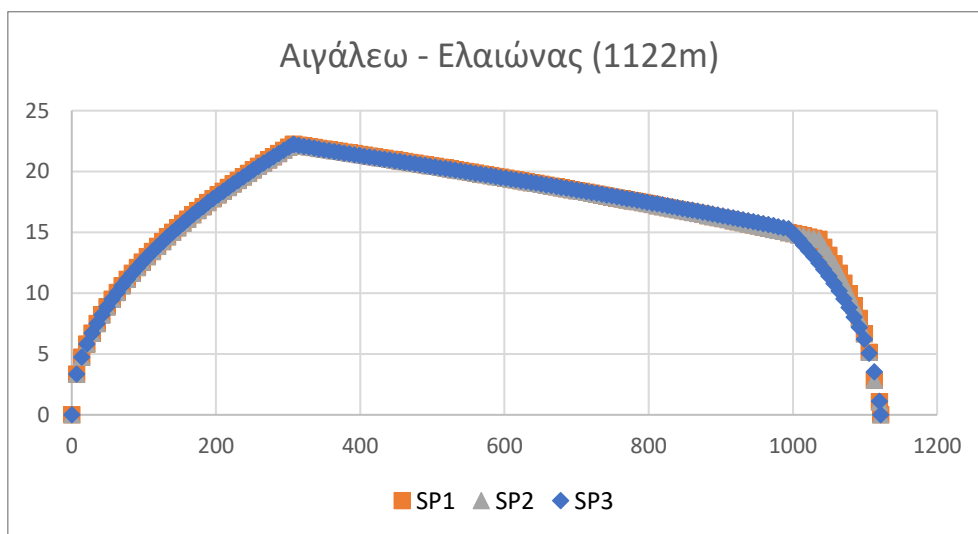
Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει η δεύτερη μεταβλητή απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά αυτών των δύο τιμών που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις, είναι η καθαρή κατανάλωση ενέργειας του συρμού. Θεωρείται ότι στη φάση του ρολλαρίσματος ο συρμός δεν καταναλώνει ενέργεια και ειδικότερα στις κατωφύριες δεν ανακτά σημαντικά ποσά ενέργειας από το ήπιο «φρενάρισμα».

#### 4.3. Δευτερογενή Δεδομένα

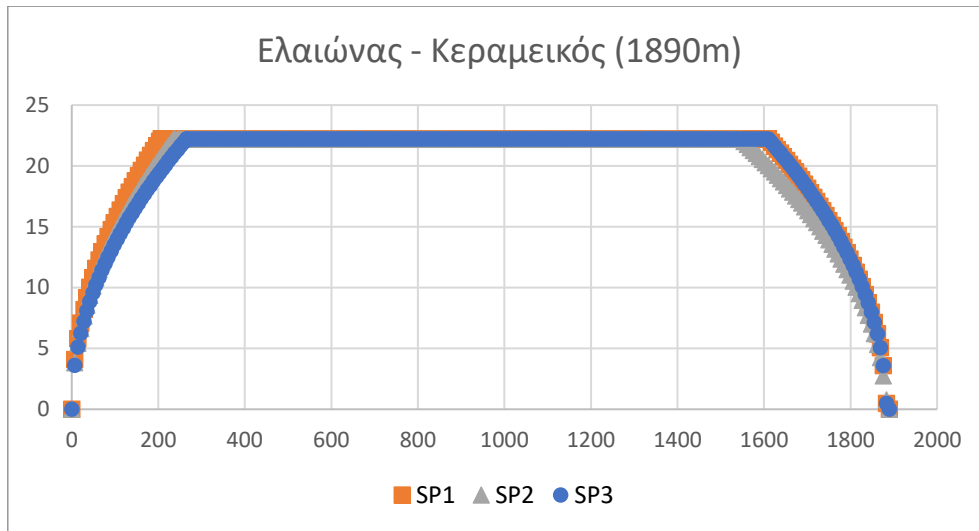
Μετά τον υπολογισμό των δευτερογενών στοιχείων, η ανάλυση προχωρά με το μοντέλο βελτιστοποίησης. Πριν από αυτό όμως, σκόπιμο είναι να παρουσιαστούν κάποια από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παραπάνω ανάλυση. Λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων, παρουσιάζονται τα προφίλ ταχύτητας σε συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας – απόστασης, οι χρόνοι διαδρομής και τα ποσά της ενέργειάς του καθενός τμήματος, καθώς και τα συγκριτικά διαγράμματά τους.



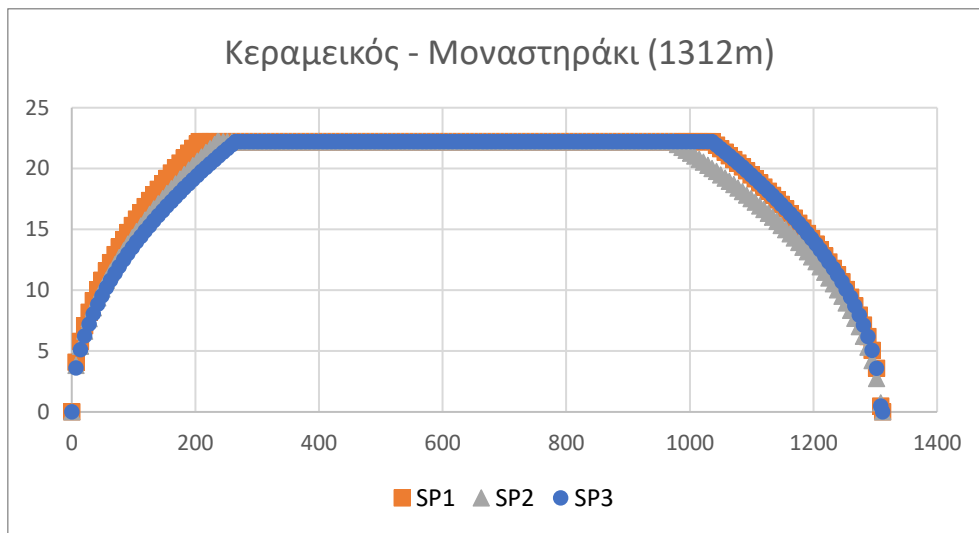
Σχήμα 4.3.1: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω



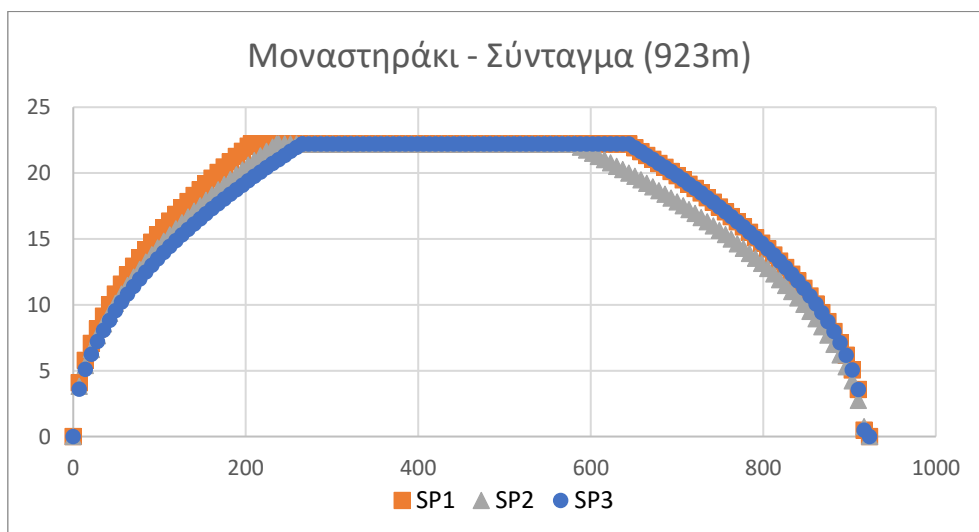
Σχήμα 4.3.2: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αιγάλεω - Ελαιώνας



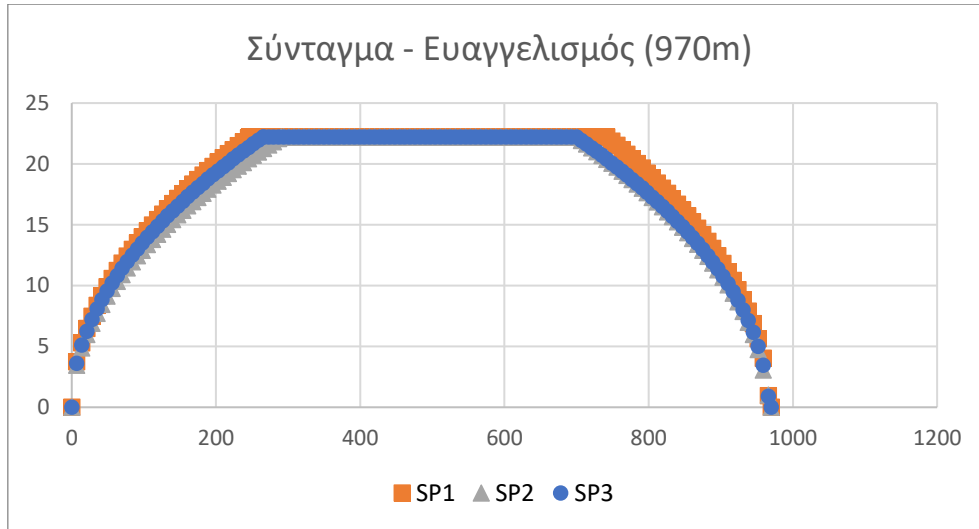
Σχήμα 4.3.3: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Ελαιώνας - Κεραμεικός



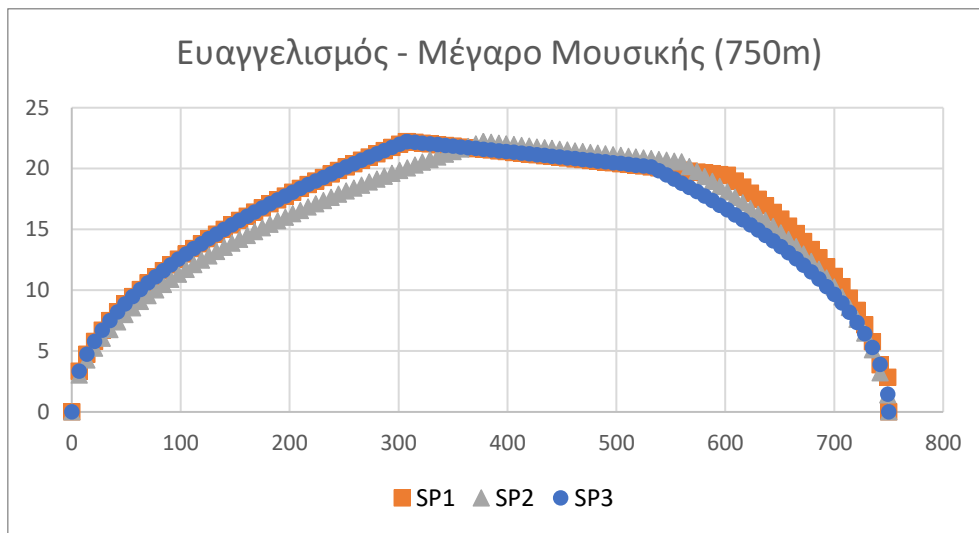
Σχήμα 4.3.4: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Κεραμεικός - Μοναστηράκι



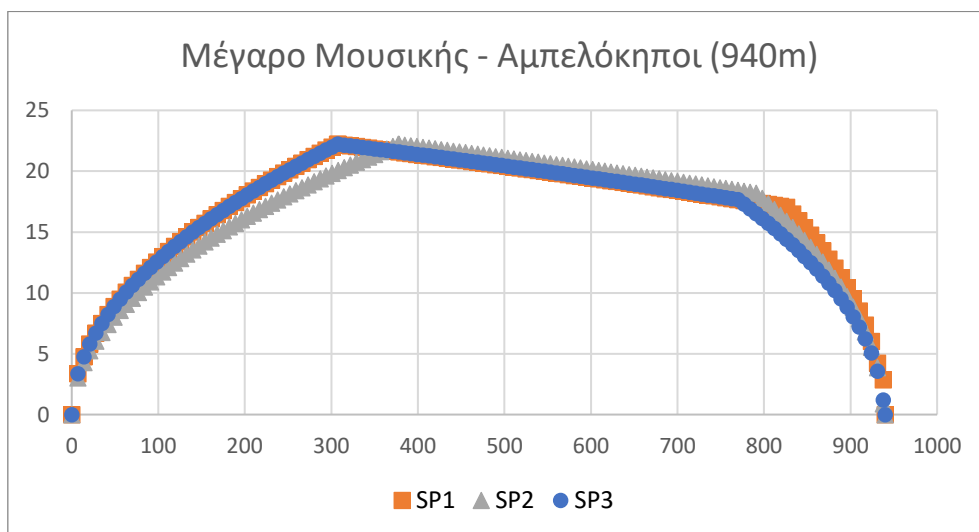
Σχήμα 4.3.5: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Μοναστηράκι - Σύνταγμα



Σχήμα 4.3.6: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Σύνταγμα - Ευαγγελισμός

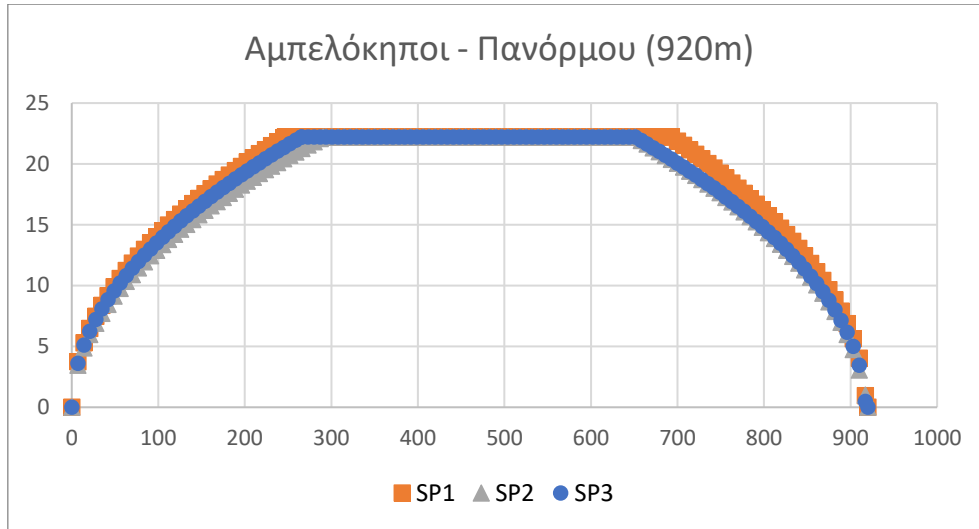


Σχήμα 4.3.7: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής

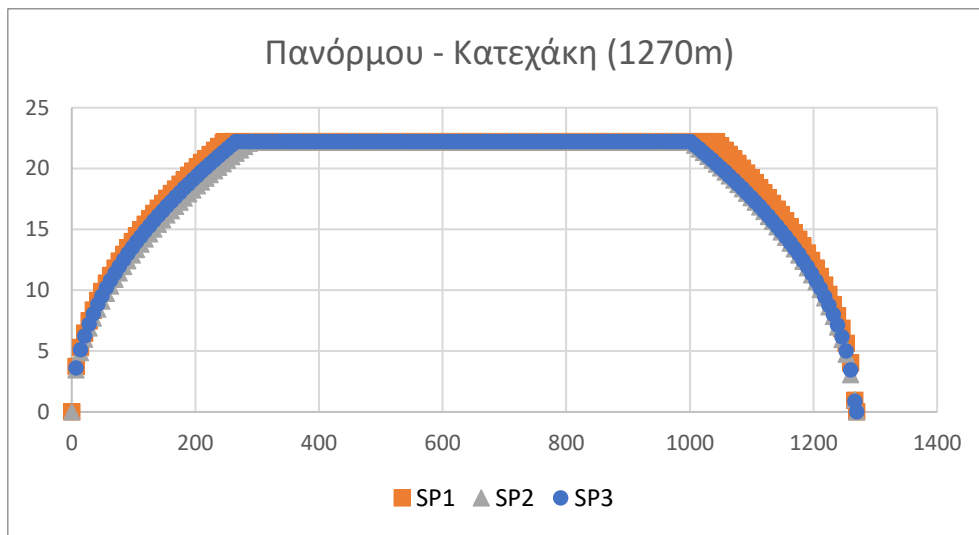


Σχήμα 4.3.8: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι

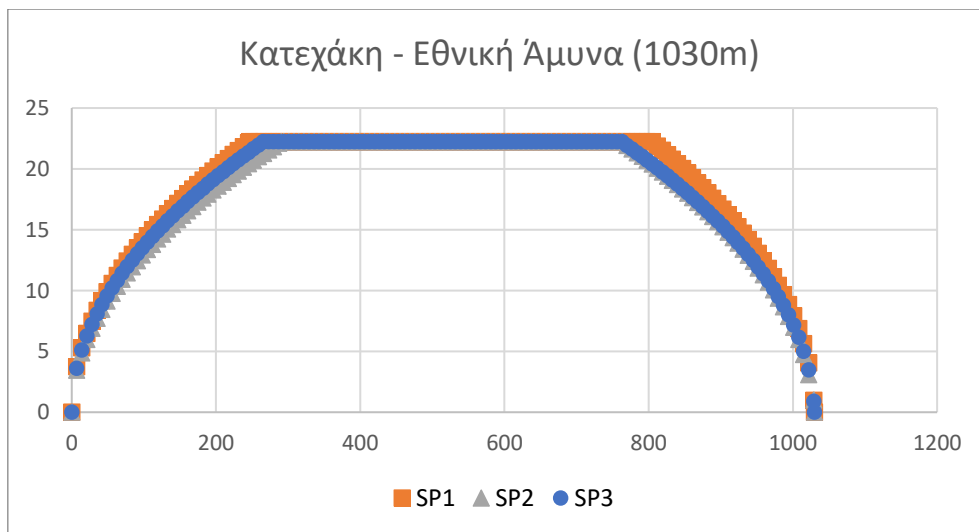




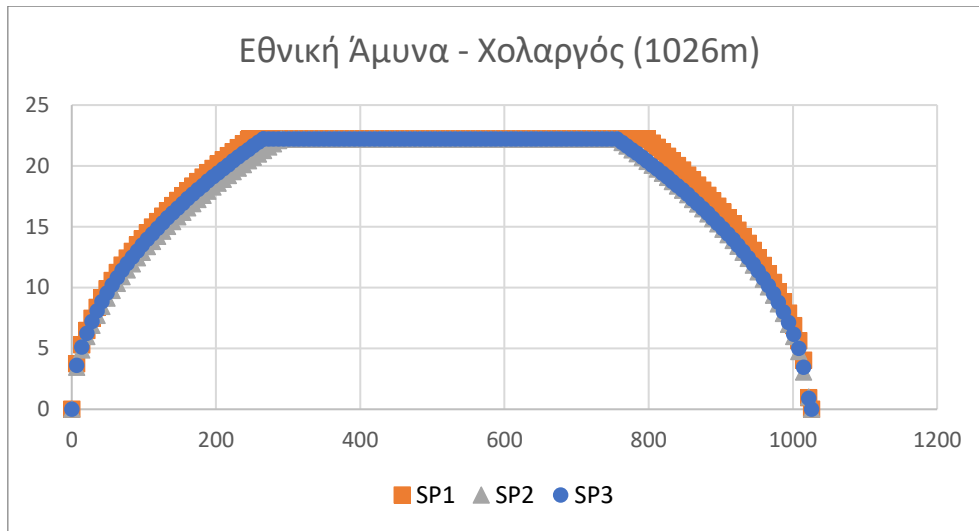
Σχήμα 4.3.9: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αμπελόκηποι - Πανόρμου



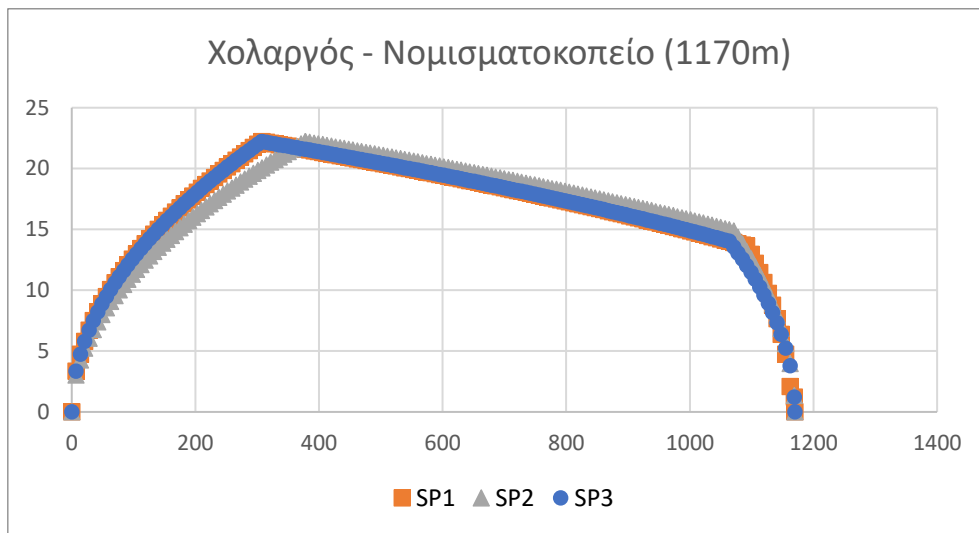
Σχήμα 4.3.10: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Πανόρμου - Κατεχάκη



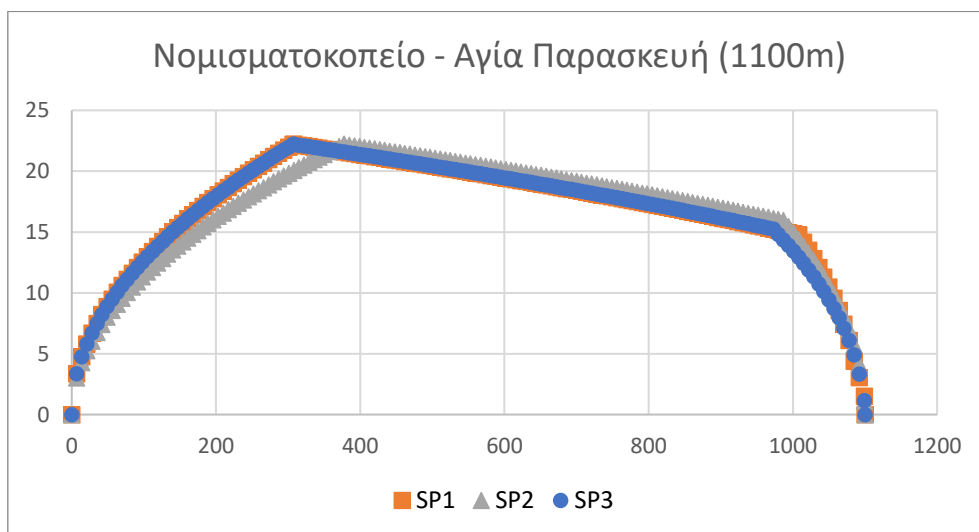
Σχήμα 4.3.11: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα



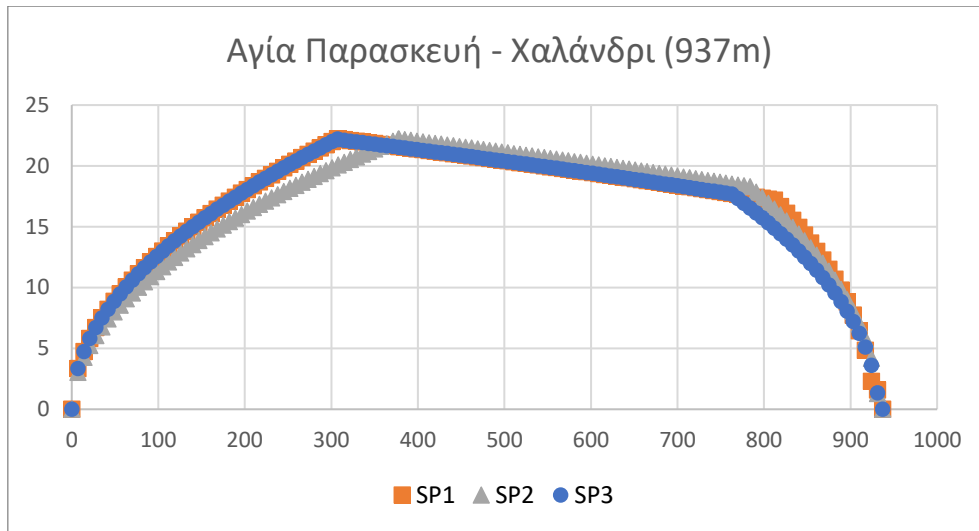
Σχήμα 4.3.12: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Εθνική Άμυνα - Χολαργός



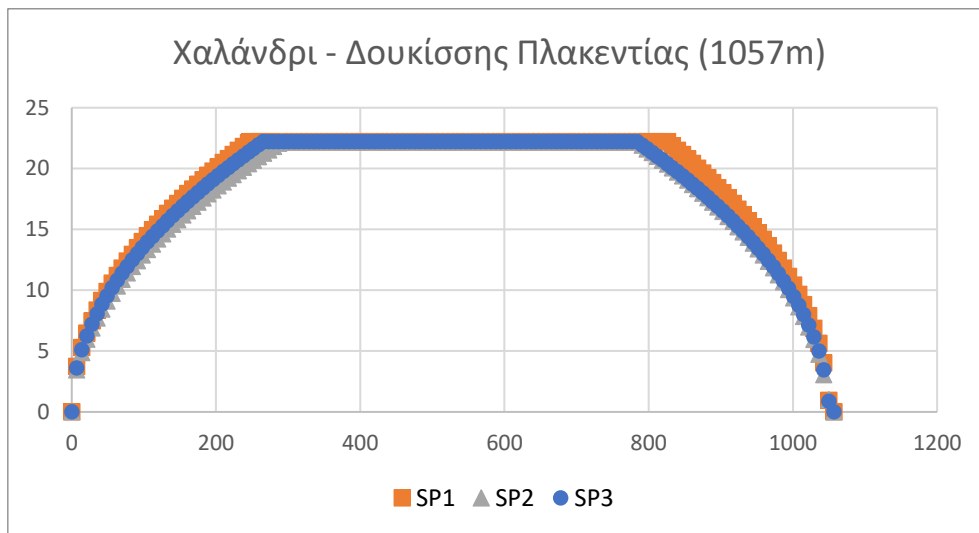
Σχήμα 4.3.13: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Χολαργός - Νομισματοκοπείο



Σχήμα 4.3.14: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Νομισματοκοπείο - Αγία Παρασκευή



Σχήμα 4.3.15: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Αγία Παρασκευή - Χαλάνδρι



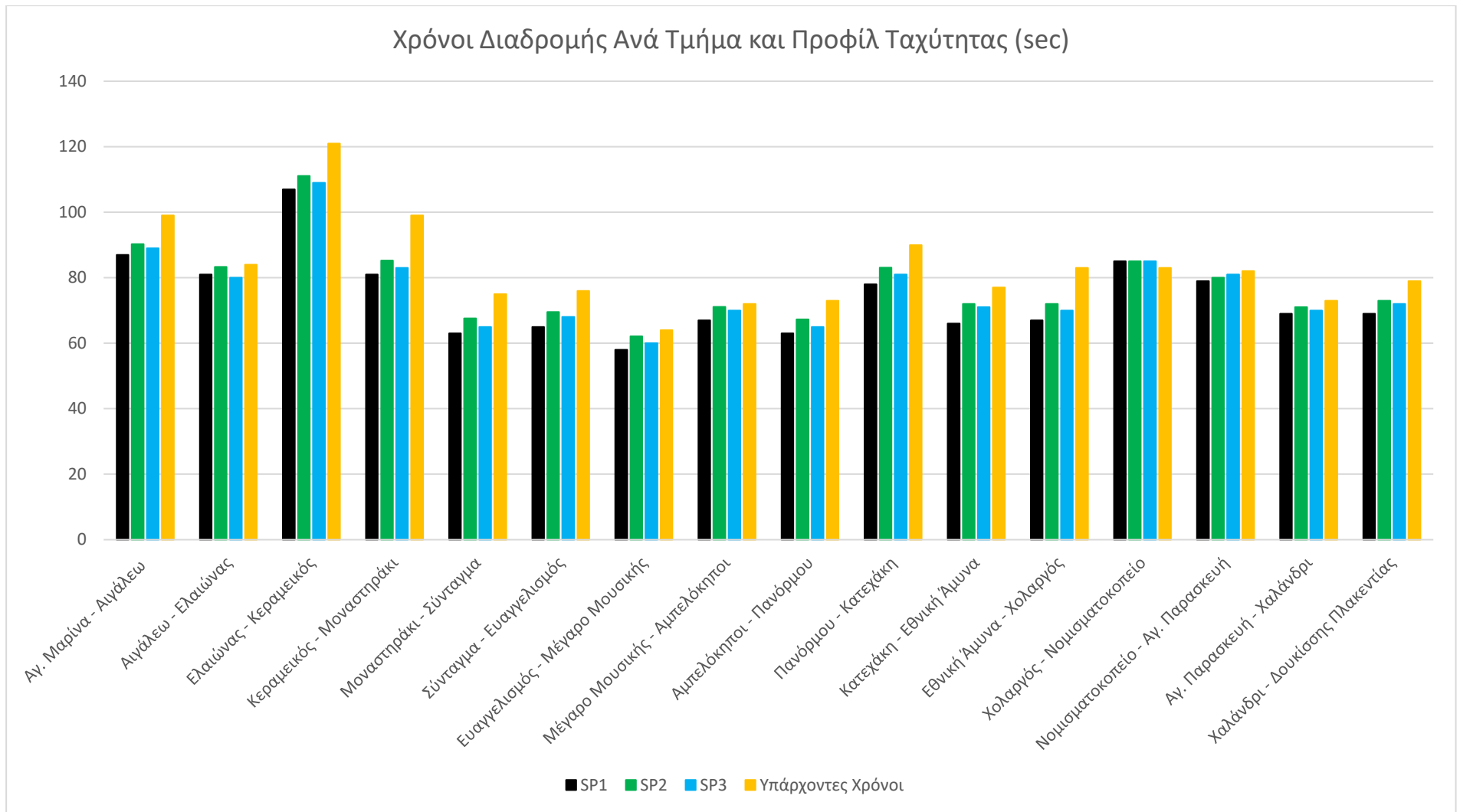
Σχήμα 4.3.16: Συγκριτικά προφίλ ταχύτητας για το τμήμα Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας

Τα διαγράμματα ταχύτητας – απόστασης χρησιμεύουν ιδιαίτερα στην κατανόηση των εναλλαγών των φάσεων επιτάχυνσης – ρολλαρίσματος και ρολλαρίσματος – επιβράδυνσης, τουλάχιστον οπτικά. Για παράδειγμα, στο σταθμό Αγία Παρασκευή – Χαλάνδρι, στον άξονα των τετμημένων φαίνεται το μήκος του τμήματος και στον άξονα των τεταγμένων φαίνονται οι ταχύτητες που αναπτύσσονται. Επίσης, φαίνεται καθαρά πως μέχρι περίπου τα 300 μέτρα για τα προφίλ 1 και 3 η αμαξοστοιχία επιταχύνει, ενώ για το προφίλ 4 η φάση αυτή ξεκινάει στα περίπου 380 μέτρα. Επίσης, για τα προφίλ 2 και 3 η αμαξοστοιχία ρολλάρει έως περίπου τα 800 μέτρα ενώ για το προφίλ 1 η αμαξοστοιχία ρολλάρει έως τα 820 μέτρα περίπου. Οι διαφορές μεταξύ των τριών προφίλ δείχνουν πόσο διαφορετικά αποτελέσματα βγάζουν μεταξύ τους.

Το κατά πόσο επηρεάζουν το χρόνο διαδρομής του τμήματος, φαίνεται στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα τιμών, όπου παρουσιάζονται οι χρόνοι διαδρομής όλων των τμημάτων συγκριτικά με κάθε ένα προφίλ.

**Πίνακας 4.4:** Συγκριτικός πίνακας χρόνων διαδρομής

Τμήμα	Προφίλ Ταχύτητας 1 (h:min:sec)	Προφίλ Ταχύτητας 2 (h:min:sec)	Προφίλ Ταχύτητας 3 (h:min:sec)	Υπάρχοντες χρόνοι διαδρομής(h:min:sec)
Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω	0:01:27	0:01:28	0:01:29	0:01:39
Αιγάλεω - Ελαιώνας	0:01:20	0:01:21	0:01:20	0:01:24
Ελαιώνας - Κεραμεικός	0:01:48	0:01:48	0:01:49	0:02:01
Κεραμεικός - Μοναστηράκι	0:01:28	0:01:23	0:01:23	0:01:39
Μοναστηράκι - Σύνταγμα	0:01:04	0:01:05	0:01:05	0:01:15
Σύνταγμα - Ευαγγελισμός	0:01:05	0:01:07	0:01:08	0:01:16
Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής	0:01:04	0:01:02	0:01:00	0:01:04
Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι	0:01:08	0:01:11	0:01:10	0:01:12
Αμπελόκηποι - Πανόρμου	0:01:03	0:01:05	0:01:05	0:01:13
Πανόρμου - Κατεχάκη	0:01:19	0:01:21	0:01:21	0:01:30
Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα	0:01:07	0:01:10	0:01:11	0:01:17
Εθνική Άμυνα - Χολαργός	0:01:08	0:01:10	0:01:10	0:01:23
Χολαργός - Νομισματοκοπείο	0:01:28	0:01:24	0:01:25	0:01:23
Νομισματοκοπείο - Αγ. Παρασκευή	0:01:20	0:01:21	0:01:21	0:01:22
Αγ. Παρασκευή - Χαλάνδρι	0:01:08	0:01:10	0:01:10	0:01:13
Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας	0:01:09	0:01:11	0:01:12	0:01:19

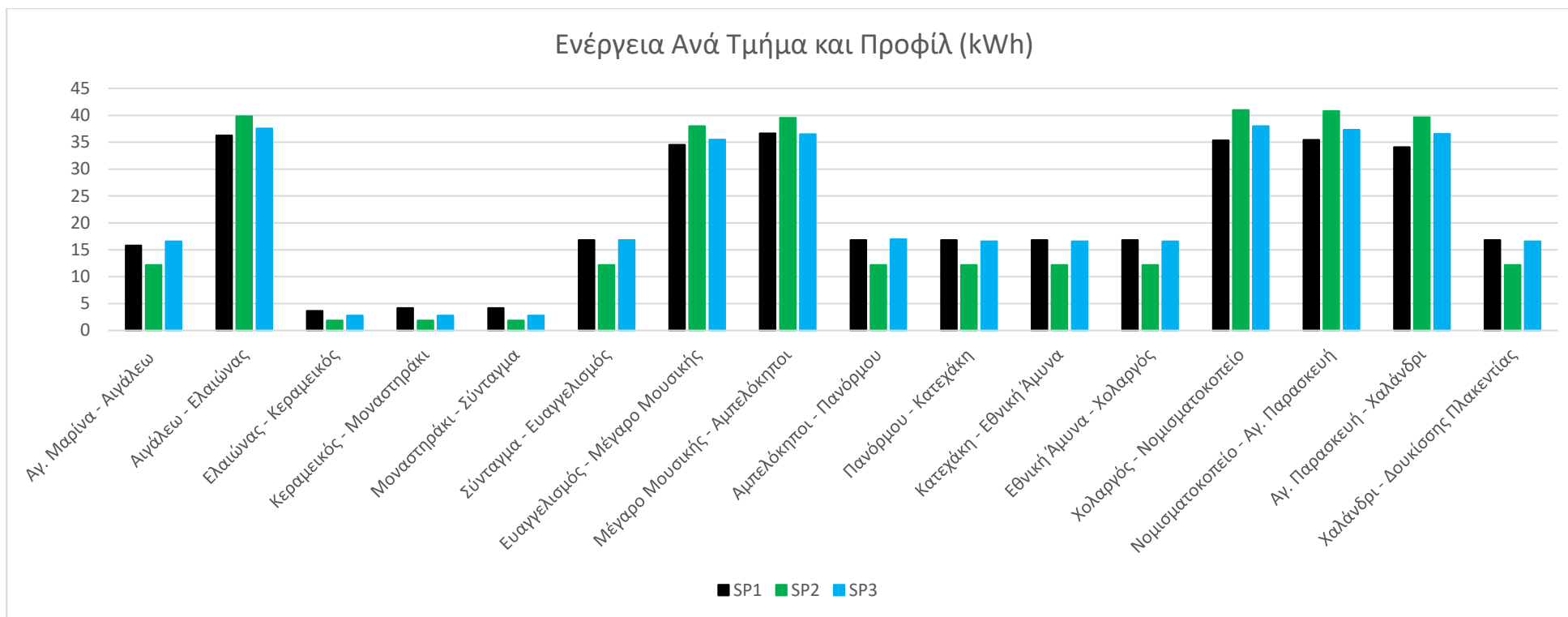


**Σχήμα 4.3.17:** Συγκριτικό διάγραμμα χρόνων διαδρομής

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω χρόνοι, χρειάζεται να καταναλωθεί ενέργεια. Σύμφωνα με τη λογική, όσο λιγότερο χρόνο κάνει ο συρμός να διανύσει το κάθε τμήμα, τόσο περισσότερο ενέργεια θα καταναλώνει. Εν μέρει είναι σωστή υπόθεση, όμως επειδή ο συρμός επιβραδύνει με σύστημα ανάκτησης ενέργειας, όση περισσότερη ώρα θα επιβραδύνει τόσο περισσότερη ενέργεια θα ανακτά. Πρέπει δηλαδή να βρεθεί μια ισορροπία ανάμεσα σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας και μικρότερο χρόνο διαδρομής, αλλά και άνεσης επιβατών. Η καθαρή κατανάλωση ενέργειας κάθε τμήματος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα ανά προφίλ ταχύτητας. Επειδή τα ποσά κατανάλωσης ενέργειας είναι μεγάλα, παρουσιάζονται με τη μονάδα μέτρησης της κιλοβατώρας (kWh). Η μετατροπή από Joules (J) σε κιλοβατώρα έγινε με τη σχέση:  $kWh = Joules * 2.78 * 10^{-7}$

**Πίνακας 4.5:** Ενέργεια ανά τμήμα και προφίλ σε κιλοβατώρες (kWh)

Τμήμα	Προφίλ Ταχύτητας 1 (kWh)	Προφίλ Ταχύτητας 2 (kWh)	Προφίλ Ταχύτητας 3 (kWh)
Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω	15.80394819	12.16634749	16.55573426
Αιγάλεω - Ελαιώνας	36.25889884	39.85487364	37.55489201
Ελαιώνας - Κεραμεικός	3.625311008	1.848164117	2.757368384
Κεραμεικός - Μοναστηράκι	4.190713132	1.848164117	2.757368384
Μοναστηράκι - Σύνταγμα	4.190713132	1.848164117	2.757368384
Σύνταγμα - Ευαγγελισμός	16.82525832	12.16634749	16.80805082
Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής	34.54657942	38.00747489	35.47685566
Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι	36.63843112	39.56265487	36.50354975
Αμπελόκηποι - Πανόρμου	16.82525832	12.16634749	16.94137114
Πανόρμου - Κατεχάκη	16.82525832	12.16634749	16.55573426
Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα	16.82525832	12.16634749	16.55573426
Εθνική Άμυνα - Χολαργός	16.82525832	12.16634749	16.55573426
Χολαργός - Νομισματοκοπείο	35.36175483	40.97200567	38.00608141
Νομισματοκοπείο - Αγ. Παρασκευή	35.46376767	40.8196394	37.3084717
Αγ. Παρασκευή - Χαλάνδρι	34.08456596	39.63877853	36.56259181
Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας	16.82525832	12.16634749	16.55573426



**Σχήμα 4.3.18:** Συγκριτικό διάγραμμα ενεργειών

Όπως είναι φανερό, σε μερικά τμήματα τα διαφορετικά προφίλ έχουν και διαφορετικές τιμές ενέργειας. Το πρώτο προφίλ σε μερικά τμήματα είναι οικονομικότερο από τα άλλα, αν και σε αυτό χρησιμοποιείται όλη η δύναμη του συρμού, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα 4.3.18.

Με την εύρεση των τιμών των ενεργειών τελειώνει η ανάλυση των δευτερογενών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά γίνονται δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο προφίλ για το κάθε ένα τμήμα της γραμμής.

#### 4.4. Εφαρμογή Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού

##### 4.4.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος που βελτιστοποιεί τους παράγοντες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, λειτουργεί για κάθε ένα τμήμα ξεχωριστά. Θα έχει σαν δεδομένα εισόδου τις 3 βασικές τιμές που είναι το επίκεντρο ενδιαφέροντος της διπλωματικής αυτής εργασίας. Έτσι, επιλέγονται οι τιμές του χρόνου διαδρομής, της ενέργειας που καταναλώνεται και οι μέγιστες επιταχύνσεις σε κάθε τμήμα. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, οι όροι αυτοί έχουν κάποια βάρη. Για αυτόν το λόγο κρίθηκε αναγκαίο να γίνει μία ανάλυση ευαισθησίας, από την οποία φαίνονται ποιοι όροι είναι ευαίσθητοι σε συγκεκριμένο εύρος τιμών.

##### 4.4.2 Γραμμικό Μοντέλο

Για την επίλυση του γραμμικού μοντέλου, δημιουργήθηκε ένας πίνακας ο οποίος στις γραμμές του έχει τα στοιχεία για κάθε διαφορετικό προφίλ (τιμές χρόνων διαδρομής, ενεργειών και επιταχύνσεων) καθώς επίσης τη μέση επιβατική κίνηση στα τμήματα των σταθμών. Το μοντέλο, σύμφωνα με τα παραπάνω, θα πρέπει να συγκρίνει για ένα τμήμα της γραμμής 9 νούμερα. Τα τρία πρώτα θα είναι το γινόμενο του βάρους  $a$ , του συντελεστή  $P$  και του συνόλου της μεταβλητής  $Y_{ik}$  επί του χρόνου διαδρομής επί της μέσης επιβατικής κίνησης  $d_i$  του συρμού. Τα άλλα τρία θα είναι το γινόμενο του βάρους  $b$ , της τιμής της κιλοβατώρας  $P_{kWh}$  και του συνόλου της μεταβλητής  $Y_{ik}$  επί της ενέργειας που καταναλώνεται  $E_{ik}$ . Τα υπόλοιπα τρία θα είναι το γινόμενο του βάρους  $c$ , του συντελεστή  $C$  και του συνόλου της μεταβλητής  $Y_{ik}$  επί τη τιμή της επιτάχυνσης  $a_{ik}$  επί της μέσης επιβατικής κίνησης  $d_i$  επί της απόστασης της επιβράδυνσης  $L_{ik}$ . Σημειώνεται πως η επιβατική κίνηση  $d_i$  είναι το ημιάθροισμα των ακραίων σταθμών του κάθε τμήματος. Από αυτά, η συνάρτηση θα πρέπει να παίρνει τιμές προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή να βρει τη «χρυσή τομή» ανάμεσα σε αυτά τα νούμερα για το κάθε ένα τμήμα της γραμμής 3. Έτσι, ένας πίνακας μεταβλητών  $Y_{ik}$  θα έχει στοιχεία 0 ή 1, όπου την τιμή 0 θα παίρνει το προφίλ το οποίο δεν επιλέγεται, ενώ την τιμή 1 θα παίρνει αυτό που επιλέγεται. Σημειώνεται πως η κάθε σειρά του πίνακα θα πρέπει να περιέχει μόνο μία μονάδα, καθώς αν δεν έχει καμία μονάδα σημαίνει πως δεν επιλέγεται κανένα προφίλ και έτσι ο συρμός δεν κινείται, πράγμα το οποίο είναι άτοπο. Αν, επίσης, έχει παραπάνω από μία μονάδες σημαίνει πως επιλέγονται παραπάνω από ένα προφίλ, γεγονός το οποίο είναι εξίσου άτοπο.



Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο να κανονικοποιηθούν οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης. Με τον όρο κανονικοποίηση, γίνεται αναφορά σε μία μέθοδο κατά την οποία οι όροι μίας συνάρτησης γίνονται περισσότερο «κανονικοί», δηλαδή γίνονται ίδιας τάξης μεγέθη προκειμένου να γίνουν ακριβέστερα οι υπολογισμοί της σχέσης. Αυτή η διαδικασία γίνεται διαιρώντας τον κάθε όρο της αντικειμενικής με ένα νούμερο που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη δυνατή κατάσταση του συστήματος. Η δυσμενέστερη κατάσταση του συστήματος λοιπόν, είναι μεγαλύτεροι χρόνοι διέλευσης συρμών, η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας στο κάθε τμήμα και οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις που δέχονται οι επιβάτες. Έτσι, και οι τρεις όροι που αναφέρθηκαν παραπάνω, διαιρέθηκαν από το δυσμενέστερο αποτέλεσμα που αποφέρει το κάθε προφίλ ταχύτητας σε όλα τα τμήματα της γραμμής 3. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνάρτηση έχει ως όρους τιμές με τάξη μεγέθους από 0 έως και 1.

#### 4.4.3 Διερεύνηση Περιορισμών

Οι περιορισμοί που τέθηκαν στην αντικειμενική συνάρτηση εξήχθησαν βάσει λογικής και διαφόρων επιστημονικών μελετών (Wu et al., 2020), (S. Yang et al., 2018), κ.ά. Οι περισσότεροι περιορισμοί τέθηκαν σύμφωνα με νόμους που διέπουν τα μαθηματικά. Για παράδειγμα, ο περιορισμός 3.9 ελέγχει την επιλογή ενός προφίλ ταχύτητας καθώς δεν είναι λογικό ο συρμός να λειτουργεί χωρίς ένα πρόγραμμα επιταχύνσεων. Ο περιορισμός αυτός εισέρχεται στον αλγόριθμο με τη μορφή ενός πίνακα που κάθε του γραμμή είναι το άθροισμα των τριών μεταβλητών  $Y_{ik}$ . Έτσι, με τον έλεγχο αν όλες οι τιμές του παραπάνω πίνακα είναι μονάδα, ελέγχεται αν ικανοποιείται ο περιορισμός.

Οι περιορισμοί 3.7 και 3.8 επιλέχθηκαν βάσει λογικής, καθώς δεν θα ήταν χρήσιμο ένα μοντέλο που βελτιστοποιεί το χρόνο διέλευσης των συρμών, τελικά να εξαγει αποτελέσματα όπου οι αμαξοστοιχίες να αργούν ακόμη περισσότερο. Επίσης δεν είναι λογικό ένας συρμός να διαπερνά ένα τμήμα μιας συγκεκριμένης απόστασης σε πολύ λίγο χρόνο, ο οποίος χρόνος να μην αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα, αλλά να είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη. Ο τρόπος με τον οποίο εισέρχονται και οι δύο περιορισμοί στην αντικειμενική συνάρτηση είναι ο ίδιος. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργείται ένας πίνακας στον οποίο κάθε γραμμή είναι το άθροισμα των γινομένων των μεταβλητών  $Y_{ik}$  επί των χρόνων  $t_{ik}$ . Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, οι πίνακες αυτοί εισέρχονται στον αλγόριθμο με τον έλεγχο αν όλες οι τιμές του πίνακα αυτού δεν ξεπερνούν την μέγιστη επιτρεπόμενη.

Ο περιορισμός 3.10, αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης. Σύμφωνα με τους Martin και Litwhiler (Martin & Litwhiler, 2008), η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης που μπορεί να αντέξει ένας επιβάτης σε όρθια στάση με τα πόδια ελαφρώς ανοιγμένα, είναι η τιμή  $0.93 \text{ m/s}^2$ . Η τιμή αυτή θεωρείται το κατώφλι των επιταχύνσεων. Μόνο αν συντρέχει σημαντικός χρονικός ή ενεργειακός λόγος θα πρέπει να οι επιταχύνσεις να υπερβούν αυτό το κατώφλι. Δηλαδή, αν η διαφορά μεταξύ των τριών προφίλ ταχύτητας στο χρόνο ή στην ενέργεια είναι τόσο μεγάλη ώστε να δικαιολογεί τη διαφοροποίηση των επιταχύνσεων, τότε μόνο η επιτάχυνση μπορεί να υπερβεί το όριο των  $0.93 \text{ m/s}^2$ . Αυτές οι διαφοροποιήσεις συγκρίνονται μέσω της διαδικασίας των βαρών στους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης. Όσον αφορά τον περιορισμό για το αν ξεπερνάται ή όχι το όριο αυτό, δημιουργείται επίσης ένας πίνακας στον οποίο η κάθε γραμμή είναι το άθροισμα των γινομένων των μεταβλητών  $Y_{ik}$  με τις επιταχύνσεις που έχει το κάθε ένα προφίλ ταχύτητας  $a_{ik}$ .

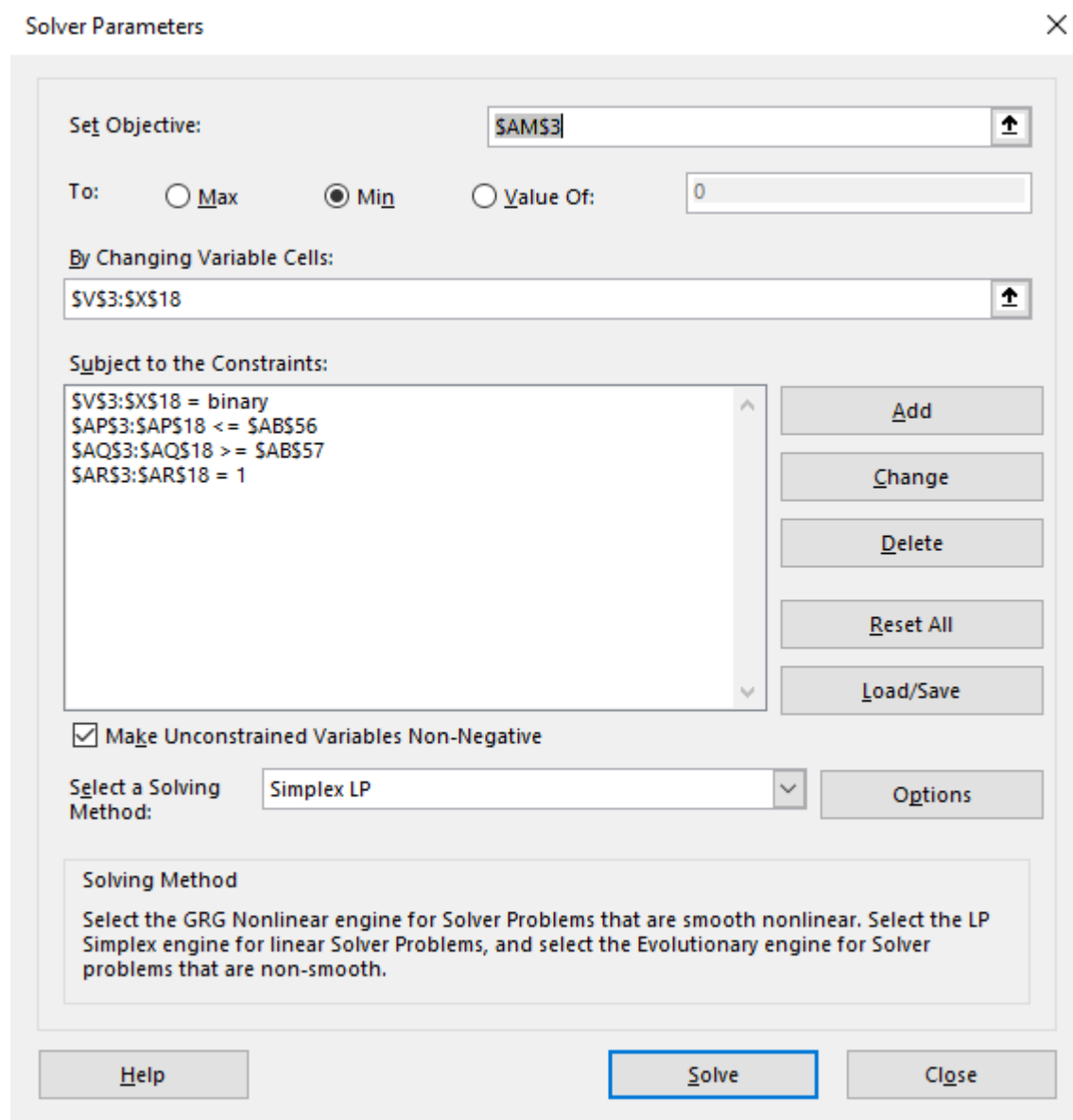
Οι περιορισμοί 3.11, 3.12 και 3.13, αναφέρονται στη μεταβλητή  $Y_{ik}$  και δηλώνουν πως είναι δυαδικές ανάλογα με το προφίλ ταχύτητας στο οποίο αναφέρονται. Για τον περιορισμό 3.11, δηλώνεται πως η μεταβλητή θα είναι μονάδα αν επιλέγεται το προφίλ ταχύτητας 1. Αντίστοιχα για τον περιορισμό 3.12, η μεταβλητή είναι μονάδα αν επιλέγεται το προφίλ 2 και για τον περιορισμό 3.13 είναι μονάδα αν επιλέγεται το προφίλ 3. Σε κάθε άλλη περίπτωση από αυτές που αναφέρθηκαν, η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0. Οι περιορισμοί αυτοί, εισέρχονται στον αλγόριθμο με την εντολή «δυναδικοί» (binary).

#### 4.5. Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης

Η εφαρμογή του αλγορίθμου του Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού γίνεται μέσω ενός πρόσθετου (add in) που είναι ειδικά σχεδιασμένο για το λογισμικό Microsoft Excel. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται Solver. Είναι ένα εργαλείο της εταιρίας Microsoft, το οποίο ειδικεύεται στην εύρεση βέλτιστων λύσεων είτε πρόκειται για προβλήματα μεγιστοποίησης είτε ελαχιστοποίησης, αλλά και διάφορων άλλων αναλύσεων. Το μόνο πρόβλημα που θα μπορούσε να εμφανιστεί με το πρόσθετο Solver είναι να μην εμφανίζει λύση λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων. Όμως, για το παρόν πρόβλημα της διπλωματικής, το πρόσθετο εμφάνισε λύση διότι ο όγκος δεδομένων δεν είναι τόσο μεγάλος.

Όπως αναφέρθηκε, το μοντέλο επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης μεγιστοποιώντας, ελαχιστοποιώντας ή ορίζοντας μία συγκεκριμένη τιμή που θα πρέπει να πάρει η συνάρτηση. Το κελί στο οποίο έχει οριστεί η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ονομάζεται αντικειμενικό κελί ή, καλύτερα, objective cell. Στο συγκεκριμένο κελί εφαρμόζονται οι παραπάνω επιλογές. Στην παρακάτω επιλογή του παραθύρου παραμετροποίησης του Solver, πρέπει να επιλεγούν τα κελιά που έχουν οριστεί ως μεταβλητές (variables cells). Τα κελιά αυτά, σε αντιδιαστολή με αυτό της αντικειμενικής συνάρτησης (objective cell), παίρνουν τιμές που ουσιαστικά βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση και είναι διαφορετικά για την κάθε προσέγγιση του προβλήματος. Τα κελιά αυτά είναι τα  $Y_{ik}$ . Στον Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό, τα κελιά αυτά με τη λύση του προβλήματος παίρνουν τιμές 0 ή 1. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, υπάρχουν 16 τμήματα \* 3 προφίλ ταχύτητας = 48 μεταβλητές.

Τέλος, στο παράθυρο των παραμέτρων, υπάρχει το πεδίο εισαγωγής των περιορισμών (constraints). Οι περιορισμοί αντιστοιχούν στα κελιά των πινάκων που δημιουργήθηκαν και αναφέρονται παραπάνω. Ουσιαστικά, επιβάλλουν κάποιους «κανόνες» προκειμένου να γίνουν οι σωστές επιλογές από τον αλγόριθμο όπως ορίζει και θέλει ο χρήστης. Έτσι, το μοντέλο βελτιστοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τον χρήστη. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος πρέπει να βελτιστοποιηθεί, δηλαδή να ελαχιστοποιηθεί η τιμή της λαμβάνοντας υπόψη τους χρόνους διάλυσης του κάθε τμήματος, την ενέργεια που καταναλώνεται σε αυτά τα τμήματα και την άνεση των επιβατών, που έχει άμεση σχέση με τις επιταχύνσεις του συρμού. Κατά αυτόν τον τρόπο και σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, η αντικειμενική συνάρτηση θα πάρει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται πώς υλοποιήθηκε το πρόβλημα στο λογισμικό Excel με το πρόσθετο Solver. Αξίζει να σημειωθεί πως το μοντέλο λύθηκε με τη μέθοδο Simplex.



**Εικόνα 4.5.1:** Το μοντέλο βελτιστοποίησης στο λογισμικό Solver

Έτσι, μετά την εφαρμογή του μοντέλου τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Με 0 φαίνεται το προφίλ που δεν επιλέγεται για το συγκεκριμένο τμήμα, ενώ με 1 φαίνεται το προφίλ ταχύτητας που επιλέγεται για το εκάστοτε τμήμα.

**Πίνακας 4.6:** Επιλεγμένα προφίλ από το μοντέλο βελτιστοποίησης

Τμήμα	Yi1	Yi2	Yi3
Αγ. Μαρίνα - Αιγάλεω	0	1	0
Αιγάλεω - Ελαιώνας	1	0	0
Ελαιώνας - Κεραμεικός	0	1	0
Κεραμεικός - Μοναστηράκι	0	0	1
Μοναστηράκι - Σύνταγμα	0	0	1
Σύνταγμα - Ευαγγελισμός	0	1	0
Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής	1	0	0
Μέγαρο Μουσικής - Αμπελόκηποι	1	0	0
Αμπελόκηποι - Πανόρμου	0	1	0
Πανόρμου - Κατεχάκη	0	1	0
Κατεχάκη - Εθνική Άμυνα	0	1	0
Εθνική Άμυνα - Χολαργός	0	1	0
Χολαργός - Νομισματοκοπείο	1	0	0
Νομισματοκοπείο - Αγ. Παρασκευή	1	0	0
Αγ. Παρασκευή - Χαλάνδρι	1	0	0
Χαλάνδρι - Δουκίσσης Πλακεντίας	0	1	0
Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης βασικού σεναρίου			
21.8006085758			

## 4.6. Σενάρια Προβλήματος και Ανάλυση Ευαισθησίας

### 4.6.1 Εισαγωγή

Για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχουν οι διάφοροι συντελεστές στα αποτελέσματα του μοντέλου εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια. Έγινε εφαρμογή 4 σεναρίων: Κατά το πρώτο γίνεται έλεγχος για την μείωση των βαρών κατά το ήμισυ κάθε φορά. Το δεύτερο σενάριο αποβλέπει στις επιπτώσεις από την αύξηση των βαρών, κατά το διπλάσιο κάθε φορά. Στο τρίτο και τέταρτο σενάριο αντίστοιχα, μελετώνται τα άνω και κάτω όρια του χρόνου διαδρομής προκειμένου να ελεγχθεί πότε μία λύση είναι εφικτή και πότε γίνεται βέλτιστη.

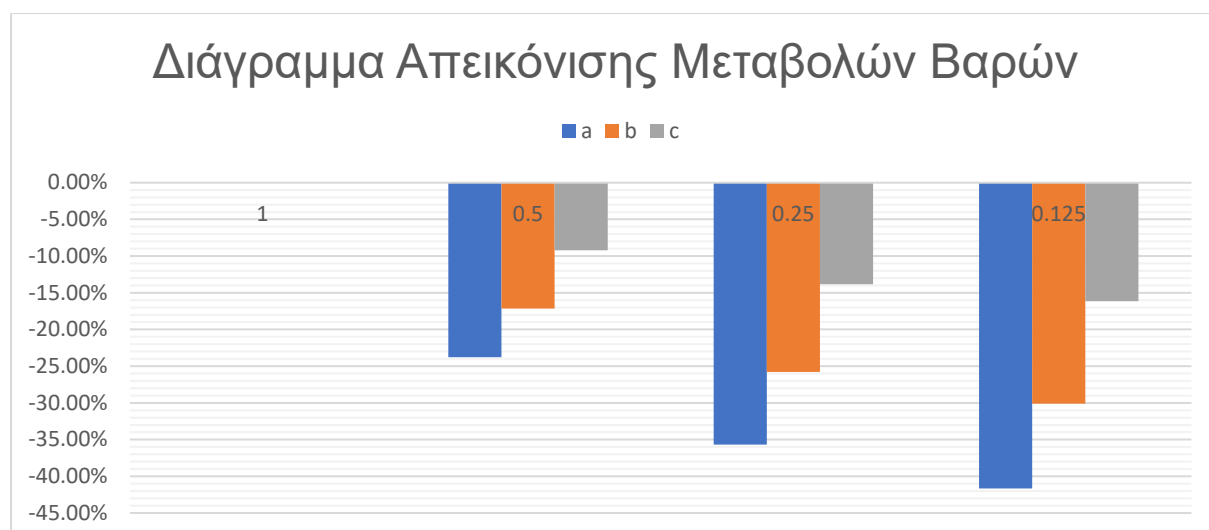
Στο βασικό σενάριο όλοι οι όροι της αντικειμενικής θεωρήθηκαν ισοβαρείς. Το βάρος που τους δόθηκε ήταν μονάδα για όλους τους όρους. Με το βασικό σενάριο καθίσταται εύκολη και γρήγορη η σύγκριση των υπόλοιπων σεναρίων. Με τις αλλαγές στα βάρη και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντικειμενικής συνάρτησης εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Ίσως το πιο χρήσιμο να είναι η επιλογή του βάρους που επιδρά περισσότερο στην αντικειμενική συνάρτηση. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούν να δοθούν τέτοια βάρη στους συντελεστές ώστε κάθε φορά να αλλάζουν και να δίνεται περισσότερο βάρος είτε στο χρόνο διαδρομής, είτε στην ενέργεια, είτε στην άνεση των επιβατών.

### 4.6.2 Μεταβολή των βαρών

Στο πρώτο σενάριο επιλέχθηκε να μειώνονται οι τιμές των βαρών. Στο σενάριο αυτό, κάθε φορά μεταβάλλεται ένας συντελεστής, κρατώντας σταθερούς τους υπολοίπους. Η μείωση αυτή σε κάθε υπό - σενάριο υποδιαιρείται. Έτσι, ξεκινώντας από τη μονάδα, γίνεται 0,5, έπειτα 0,25 και τέλος 0,125. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή τους, διαιρώντας τη διαφορά της τιμής του σεναρίου που προέκυψε με την τιμή του Z του βασικού σεναρίου, διά την τιμή του βασικού σεναρίου. Παρακάτω, φαίνονται τα νούμερα που προέκυψαν καθώς και η διαγραμματική απεικόνιση των μεταβολών τους.

**Πίνακας 4.7: Μεταβολή μείωσης βαρών**

<b>Βάρος a</b>				
	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>0.25</b>	<b>0.125</b>
<b>Βασική τιμή Z</b>	21.8	-	-	-
<b>Τιμή Z</b>	-	16.62	14.02	12.72
<b>Ποσοστιαία Μεταβολή (%)</b>	0.00%	-23.76%	-35.69%	-41.65%
<b>Βάρος b</b>				
<b>Βασική τιμή Z</b>	21.8	-	-	-
<b>Τιμή Z</b>	-	18.07	16.18	15.24
<b>Ποσοστιαία Μεταβολή (%)</b>	0.00%	-17.13%	-25.77%	-30.10%
<b>Βάρος c</b>				
<b>Βασική τιμή Z</b>	21.8	-	-	-
<b>Τιμή Z</b>	-	19.79	18.79	18.28
<b>Ποσοστιαία Μεταβολή (%)</b>	0.00%	-9.22%	-13.83%	-16.14%



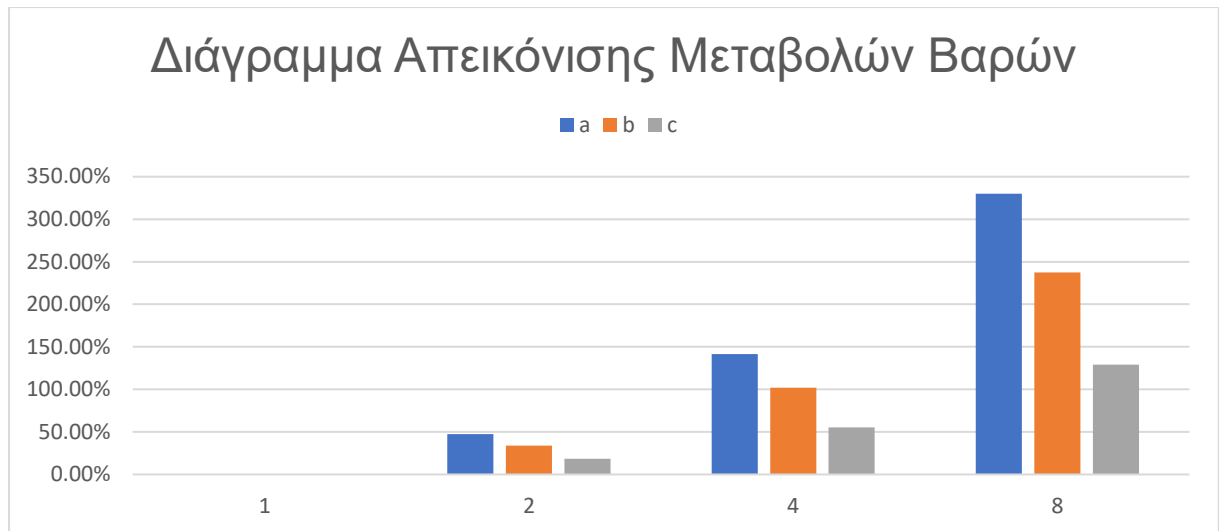
**Σχήμα 4.6.1:** Διάγραμμα μεταβολών μείωσης βαρών

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, το βάρος a του πρώτου όρου της αντικειμενικής (χρόνου διάλυσης) έχει μεγάλη επιρροή στον συγκεκριμένο όρο, δηλαδή ο όρος είναι πιο ευαίσθητος στις μεταβολές που υφίσταται το συγκεκριμένο βάρος. Το δεύτερο βάρος b, φαίνεται να είναι λιγότερο σημαντικό για την εξίσωση, αφού έχει μικρότερη βαρύτητα για τον δεύτερο όρο, αυτόν της ενέργειας. Ο τρίτος συντελεστής c, φαίνεται να έχει την ελάχιστη συμμετοχή στην αντικειμενική συνάρτηση αφού τη μεταβάλλει λιγότερο από όλους του υπόλοιπους συντελεστές. Υπενθυμίζεται πως η παραπάνω ανάλυση αφορά στην μείωση των τιμών των συντελεστών.

Για το δεύτερο σενάριο, επιλέχθηκε να αυξάνονται τα βάρη με τον διπλασιασμό της προηγούμενης τιμής. Και σε αυτό το σενάριο, κάθε φορά που μεταβάλλεται ένας συντελεστής οι υπόλοιποι είναι σταθεροί. Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τη μονάδα, αυξάνεται σε 2, μετά σε 4 και τέλος γίνεται 8. Όπως και πριν, υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή τους, διαιρώντας τη διαφορά της τιμής του σεναρίου που προέκυψε με την τιμή του Z του βασικού σεναρίου, διά την τιμή του βασικού σεναρίου. Παρακάτω, φαίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και η διαγραμματική τους απεικόνιση.

**Πίνακας 4.8:** Μεταβολή αύξησης βαρών

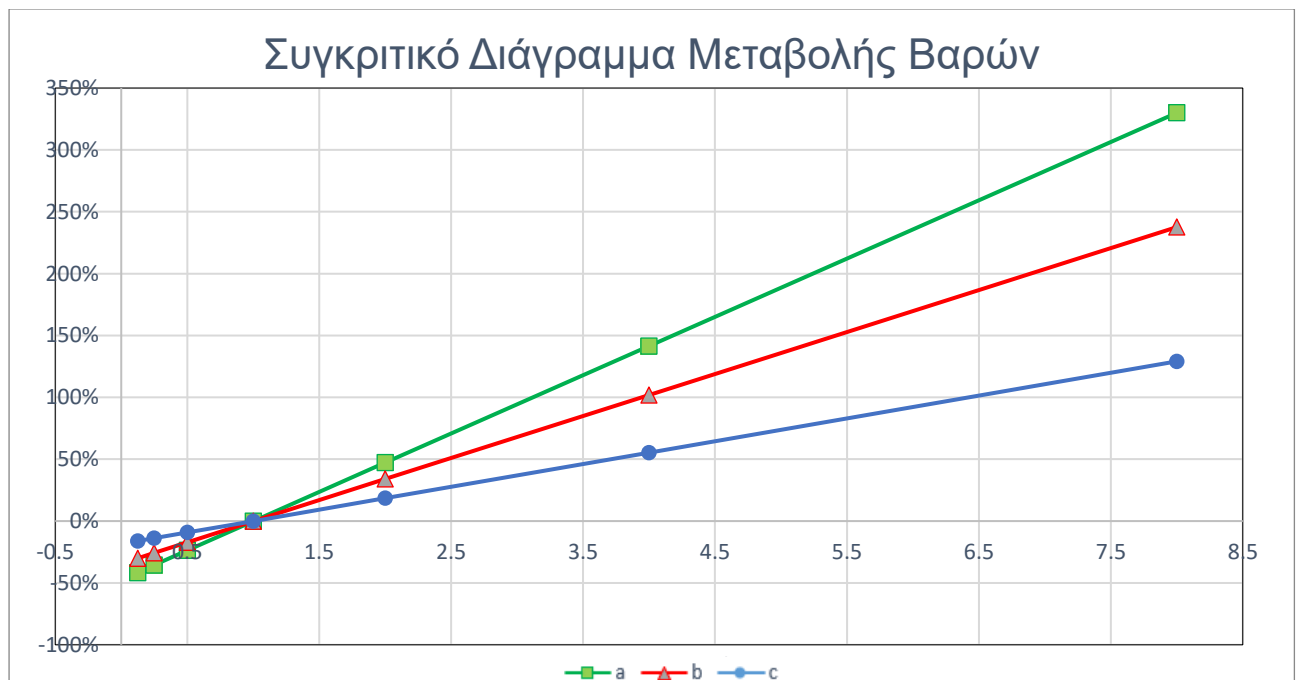
Βάρος a				
	1	2	4	8
Βασική τιμή Z	21.8	-	-	-
Τιμή Z	-	32.11	52.66	93.73
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.00%	47%	141.55%	329.94%
Βάρος b				
Βασική τιμή Z	21.8	-	-	-
Τιμή Z	-	29.22	44.01	73.60
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.00%	34.03%	101.89%	237.60%
Βάρος c				
Βασική τιμή Z	21.8	-	-	-
Τιμή Z	-	25.82	33.86	49.94
Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	0.00%	18.44%	55.32%	129.09%



**Σχήμα 4.6.2:** Διάγραμμα μεταβολών αύξησης βαρών

Όπως και προηγουμένως, σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, το βάρος a του πρώτου όρου (χρόνου διάνυσης) έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στον πρώτο όρο της συνάρτησης και έτσι αυξάνει η ευαισθησία του στις μεταβολές που υφίσταται το βάρος a. Το δεύτερο βάρος b και το τρίτο βάρος c φαίνεται να είναι τα λιγότερο σημαντικά για την εξίσωση, αφού έχουν τις μικρότερες βαρύτητες για την αντικειμενική συνάρτηση.

Μια γενικότερη παρατήρηση είναι πως οι όροι της συνάρτησης είναι πιο ευαίσθητοι στις αυξήσεις των τιμών των βαρών σε σχέση με τις μειώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι στόχος του μοντέλου είναι η βελτιστοποίηση των μεγαλύτερων τιμών των όρων της συνάρτησης, γεγονός που συμπεραίνεται και από τα νούμερα των αυξητικών μεταβολών των συντελεστών αν παρατηρηθούν οι ποσοστιαίες μεταβολές. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται συγκριτικά οι παραπάνω μεταβολές.



**Σχήμα 4.6.3:** Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής βαρών

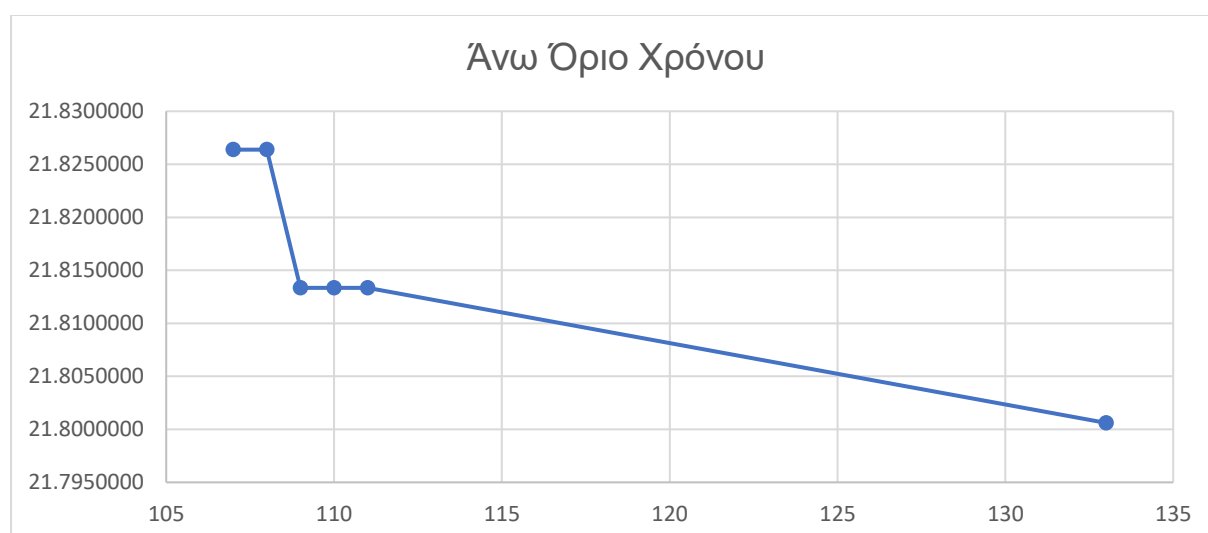
### 4.6.3 Μεταβολή των ορίων του χρόνου διαδρομής

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, διερευνήθηκαν τα όρια του χρόνου διαδρομής που επιλέχθηκαν για το βασικό σενάριο. Το άνω όριο που είχε επιλεγεί ήταν 133 δευτερόλεπτα αφού έγινε η υπόθεση ότι ήταν ο δυσμενέστερος χρόνος προσαυξημένος κατά 10% από τις τιμές της ΣΤΑ.ΣΥ Α.Ε. Το κάτω όριο που είχε τεθεί είναι 45 δευτερόλεπτα, αφού επιλέχθηκε να είναι ο μέγιστος χρόνος αναμονής σε σταθμό και υποτέθηκε πως αυτός ο χρόνος δεν δύναται να ξεπεραστεί από το συρμό. Σε αυτή την ανάλυση εξετάζονται η επιπτώσεις των μεταβολών του άνω και κάτω ορίου αυτού του συντελεστή του χρόνου διαδρομής.

Για το άνω όριο, εξετάστηκε σε ποια τιμή δεν επιτυγχάνεται εφικτή λύση. Επίσης υπολογίστηκε η τιμή της βέλτιστης λύσης αλλά και κάποιες τιμές της αντικειμενικής οι οποίες δεν είναι οι βέλτιστες. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται οι τιμές των επιμέρους λύσεων με τις δοκιμές των ορίων των χρόνων, καθώς και το διάγραμμά τους για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 4.9:** Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για το άνω όριο

Άνω Όριο Χρόνου	Τιμή Α.Σ	
106	Μη εφικτή λύση	
107	21.8263814	Εφικτή λύση
108	21.8263814	
109	21.8133346	
110	21.8133346	
111	21.8133346	
133	21.80060858	Βέλτιστη λύση



**Σχήμα 4.6.4:** Διάγραμμα λύσεων με μεταβολές στο άνω όριο του χρόνου

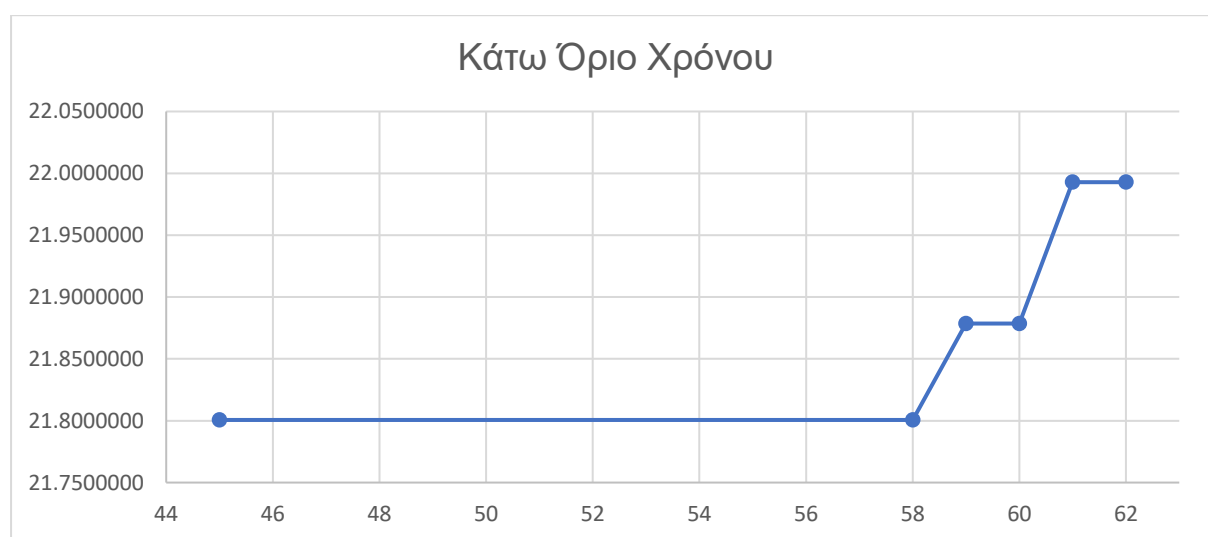


Εφόσον χρειάζεται να ελαχιστοποιηθεί η τιμή της συνάρτησης, τότε φαίνεται πως η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται στα 112 δευτερόλεπτα και άνω. Έτσι, εφικτή λύση βρίσκεται στα όρια των 111 έως 107 δευτερολέπτων και οι μη εφικτές λύσεις εμφανίζονται από τα 106 δευτερόλεπτα και κάτω.

Για το κάτω όριο του χρόνου, ακολούθησε ακριβώς η ίδια διαδικασία. Μελετήθηκαν κάποιες τιμές των κάτω ορίων και βρέθηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα αποτελεσμάτων και στο συγκριτικό διάγραμμα.

**Πίνακας 4.10:** Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για το κάτω όριο

Κάτω Όριο Χρόνου	Τιμή Α.Σ	
45	21.8006086	Βέλτιστη λύση
58	21.8006086	
59	21.8785510	Εφικτή λύση
60	21.8785510	
61	21.9928425	
62	21.9928425	
63	Μη εφικτή λύση	



**Σχήμα 4.6.5:** Διάγραμμα λύσεων με μεταβολές στο κάτω όριο του χρόνου

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα 4.10, η μη εφικτή λύση είναι από τα 63 δευτερόλεπτα και άνω. Στα 61 και 62 δευτερόλεπτα βρίσκεται η μία ομάδα λύσεων οι οποίες είναι οι βέλτιστες, όπως ακριβώς και στα 59 και 60 δευτερόλεπτα, που βρίσκεται μία άλλη ομάδα βέλτιστων λύσεων. Όμως στο διάστημα 45 – 58 δευτερολέπτων βρίσκεται η καλύτερη από τις βέλτιστες λύσεις η οποία ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Αξίζει να σημειωθεί πως οι παραπάνω αναλύσεις έγιναν με μοναδιαία βάρη στους όρους, ό,τι δηλαδή ίσχυε στο βασικό σενάριο.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1. Βασικά Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η βελτιστοποίηση των δρομολογίων της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας. Η βελτιστοποίηση αυτή έγινε σε 3 βασικούς άξονες: Ο πρώτος άξονας ήταν η συχνότερη διέλευση των συρμών μέσω της ελαχιστοποίησης του χρόνου διαδρομής της αμαξοστοιχίας, ο δεύτερος άξονας είναι η οικονομικότερη μετακίνηση των συρμών μέσω της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης της ενέργειας και ο τρίτος άξονας είναι η άνεση των επιβατών που ποσοτικοποιείται μέσω των επιταχύνσεων που δέχονται οι επιβαίνοντες.

Αρχικά, διερευνήθηκε η μηχανική των συρμών και πως αυτά κινούνται πάνω στις τροχιές. Έγιναν κάποιες βασικές παραδοχές, όπως ο μέσος όρος των κλίσεων των επιμέρους τμημάτων. Βρέθηκαν οι δυνάμεις που δέχεται η κάθε αμαξοστοιχία μέσω της Νευτώνειας Φυσικής και στη συνέχεια βρέθηκαν οι επιταχύνσεις που θα έχει συνολικά η αμαξοστοιχία. Επίσης, θεωρήθηκε ότι οι συρμοί θα έχουν περίπου 85% πληρότητα σε επιβάτες καθώς το τμήμα της γραμμής 3 που εξετάστηκε έχει τη μεγαλύτερη επιβατική κίνηση. Η φάση της κίνησης των συρμών χωρίστηκε σε 3 τμήματα: την επιτάχυνση, το ρολάρισμα και την επιβράδυνση.

Εν συνεχεία, μέσω των σχέσεων της κινηματικής, βρέθηκαν οι χρόνοι που χρειάζεται η κάθε φάση της κίνησης του συρμού και στη συνέχεια, με το άθροισμα των χρόνων των φάσεων αυτών, προέκυψε ο συνολικός χρόνος διαδρομής του τμήματος μεταξύ δύο σταθμών. Έπειτα, μέσω στοιχειωδών σχέσεων της ενέργειας, βρέθηκε η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε τμήμα ξεχωριστά. Έτσι, δημιουργήθηκαν τα 2 προφίλ ταχύτητας. Ένα τρίτο προφίλ, ήταν αυτό που έδινε περισσότερο βάρος στην άνεση των επιβατών εντός του συρμού. Έτσι, εφόσον η άνεση αυτή ποσοτικοποιήθηκε ως επιτάχυνση, στο τρίτο προφίλ υπήρξε ένα άνω όριο στις επιταχύνσεις του συρμού.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν μία προεργασία για την παρούσα διπλωματική. Αυτά ήταν τα δεδομένα εισόδου για το μοντέλο της βελτιστοποίησης. Το μοντέλο, ήταν ο Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, στον οποίο υπάρχει μία αντικειμενική συνάρτηση, το αποτέλεσμα της οποίας ελαχιστοποιήθηκε. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι αναλύσεις έγιναν με το πρόσθετο Solver του λογισμικού Microsoft Excel.

Αρχικά, παρατηρώντας όλους τους χρόνους διαδρομής από τον παραπάνω πίνακα 4.4, φαίνεται πως όντως το πρόγραμμα βελτιστοποιήθηκε ως προς τους χρόνους διαδρομής. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φαίνεται πως επιλέχθηκαν περισσότερες φορές τα προφίλ 1 και 2, δηλαδή τα προφίλ που δίνουν περισσότερη βάση στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διαδρομής και στην ελάττωση της ενέργειας που καταναλώνεται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σκοπός της εργασίας εξ αρχής ήταν να μειωθούν οι χρόνοι διαδρομής των συρμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διαφορά των δευτερολέπτων του υπάρχοντος δρομολογίου με του βέλτιστου, να συγκεντρωθούν στο τέλος των δρομολογίων. Κατά αυτόν τον τρόπο θα υπάρχει μεγάλη διαφορά στους χρόνους αναχώρησης και άφιξης και πιο συγκεκριμένα θα υπάρχουν συχνότερες διελεύσεις συρμών αφού θα υπάρχει οικονομία χρόνου στα δρομολόγια. Φλέγων θέμα αποτελούν, επίσης, οι περιβαλλοντικά φιλικότερες μετακινήσεις. Κατά αυτόν τον

τρόπο, η μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται είναι εξίσου σημαντική με τη μείωση του χρόνου διαδρομής. Άρα, όταν οι διαφορές αυτών των δύο τιμών είναι αμελητέες αριθμητικά, τότε θα πρέπει να διερευνάται και η άνεση των επιβατών. Έτσι, ορθά επιλέχθηκαν περισσότερες φορές τα προφίλ 1 και 2 καθώς εκεί δόθηκε το περισσότερο βάρος στη μελέτη.

Είναι εξαιρετικά χρήσιμο να υπάρχουν οι επιλογές των προφίλ ταχύτητας. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να ρυθμιστεί η λειτουργία του μετρό για οποιοδήποτε θέμα αφορά τη κίνηση των συρμών. Συνεπώς, αν για κάποιον λόγο έπρεπε να δοθεί έμφαση στην άνεση των επιβατών, τότε ο όρος που σχετίζεται με τις επιταχύνσεις θα έπαιρνε και το ανάλογο βάρος.

## 5.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Όπως καταλαβαίνει κανείς, η παρούσα εργασία δεν αποτελεί πανάκεια για όλα τα μετρό του πλανήτη. Κάθε ένα σύστημα μετρό έχει τη δικιά του μηκοτομή και για αυτόν το λόγο προτείνεται να μελετηθεί το ίδιο θέμα της βελτιστοποίησης με δυναμικές κλίσεις, δηλαδή οι κλίσεις να είναι μεταβλητές, όπως είναι και στην πραγματικότητα. Επίσης, θα μπορούσαν να φτιαχτούν περισσότερα προφίλ ταχύτητας προκειμένου να υπάρχουν περισσότερες επιλογές για βελτιστοποίηση.

Εκτός των παραπάνω, θα μπορούσε να γίνει επέκταση του μεγέθους υπάρχουσας μελέτης και για τις υπόλοιπες γραμμές. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει η ίδια διαδικασία για τη γραμμή 2 σε συνδυασμό με την γραμμή 1 (ηλεκτρικός) ή, ακόμα πιο σύνθετα, για τις γραμμές του προαστιακού. Στην τελευταία γραμμή, αξίζει να γίνει ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, αφού ο προαστιακός καλύπτει μεγάλες αποστάσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Επίσης, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί έρευνα, για την ίδια γραμμή, για συνθήκες εκτός ώρας αιχμής. Έτσι, θα υπήρχαν διάφορα προγράμματα ταχύτητας των αμαξοστοιχιών για τη δυναμική ζήτηση των επιβατών. Αντίστοιχο ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη αυτού του συστήματος σε συνθήκες κορεσμού. Αυτό προτείνεται διότι αλλάζει το βάρος του συρμού και ακολούθως αυξάνεται η κατανάλωση της ενέργειας, ειδικά στα ανωφερικά τμήματα.

Έγινε χρήση τριών συντελεστών για την βελτιστοποίηση του προγράμματος. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν παραπάνω συντελεστές, όπως όρια ταχύτητας ανά χιλιομετρική θέση. Σε αυτήν την περίπτωση θα εξεταζόταν η σχέση της ταχύτητας και της άνεσης των επιβατών συμπεριλαμβανομένης της οριζοντιογραφίας. Ο περιορισμός της ταχύτητας ανά τμήματα οριζοντιογραφίας αποβλέπει στην ποιότητα της μεταφοράς των επιβαίνοντων στο συρμό.

Πρόσθετα, αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να καλυφθεί χρονικά μία τυχαία καθυστέρηση του συρμού. Επίσης, σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα μπορεί να προβλεφθεί αυτή η τυχαιότητα ώστε το σύστημα να είναι ευέλικτο και ευπροσάρμοστο στις αλλαγές. Τέλος, το ενδιαφέρον μονοπωλεί το πρόβλημα της λύσης σε πραγματικό χρόνο (real time) του προβλήματος της καθυστέρησης των συρμών λόγω διαφόρων συμβάντων.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmadi, S., Dastfan, A., & Assili, M. (2018). Energy saving in metro systems: Simultaneous optimization of stationary energy storage systems and speed profiles. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8(1), 78-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.03.003>
- Albrecht, A. R., Howlett, P. G., Pudney, P. J., & Vu, X. (2013). Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*, 49(10), 3072-3078. doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.07.008>
- Anderson, R., Maxwell, R., & Dr. Harris, N. G. (2009). Maximizing the potential for metros to reduce energy consumption and deliver low-carbon transportation in cities. *Imperial College London*.
- Argyropoulou, K., Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2019). Model for corrective maintenance scheduling of rail transit networks: Application to athens metro. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(1), 04018035.
- Bai, Y., Cao, Y., Yu, Z., Ho, T. K., Roberts, C., & Mao, B. (2019). Cooperative control of metro trains to minimize net energy consumption. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(5), 2063-2077.
- Barney, D., Haley, D., & Nikandros, G. (2001). *Calculating train braking distance*. Paper presented at the Conferences in Research and Practice in Information Technology Series.
- Canca, D., Andrade-Pineda, J. L., De los Santos, A., & Calle, M. (2018). The Railway Rapid Transit frequency setting problem with speed-dependent operation costs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 494-519.
- Dantzig, G. B. (1980). *Expected Number of Steps of the Simplex Method for a Linear Program with a Convexity Constraint*. Retrieved from
- Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A., & Lukaszewicz, P. (2011). Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5), 463-474.
- Feng, J., Li, X., Liu, H., Gao, X., & Mao, B. (2017). Optimizing the Energy-Efficient Metro Train Timetable and Control Strategy in Off-Peak Hours with Uncertain Passenger Demands. *Energies*, 10(4), 436.
- Genova, K., & Guliashki, V. (2011). Linear Integer Programming Methods and Approaches—A Survey. *Cybernetics and Information Technologies*, 11.
- Glover, F. (1975). Improved linear integer programming formulations of nonlinear integer problems. *Management Science*, 22(4), 455-460.
- Gupta, S. D., Tobin, J. K., & Pavel, L. (2016). A two-step linear programming model for energy-efficient timetables in metro railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 93, 57-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.003>
- Haahr, J. T., Pisinger, D., & Sabbaghian, M. (2017). A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 167-182.
- Han, S. H., Byen, Y. S., Baek, J. H., An, T. K., Lee, S. G., & Park, H. J. (1999). *An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA)*.

- Paper presented at the Proceedings of IEEE. IEEE Region 10 Conference. TENCON 99.'Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure'(Cat. No. 99CH37030).
- Hensher, D. A. (2020). Chapter 20 - Cultural contrasts of preferences for bus rapid transit and light rail transit\*\*This is an adapted version from the original publication: Hensher, D.A., Balbontin, C., Ho, C., Mulley, C., 2019. Cross-cultural contrasts of preferences for bus rapid transit and light rail transit. *Journal of Transport Economics and Policy* 53 (1), 47–73. It has not been reviewed by the Editors of JTEP and the Journal bares no responsibility for the contents. In D. A. Hensher (Ed.), *Bus Transport* (pp. 235-253): Elsevier.
- Howlett P.G., P. P. J. (1995). The Train Control Problem. In *Energy-Efficient Train Control. Advances in Industrial Control*. London: Springer.
- Huang, K., Wu, J., Yang, X., Gao, Z., Liu, F., & Zhu, Y. (2019). Discrete train speed profile optimization for urban rail transit: A data-driven model and integrated algorithms based on machine learning. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., & Cao, F. (2017). Joint train scheduling optimization with service quality and energy efficiency in urban rail transit networks. *Energy*, 138, 1124-1147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.117>
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., & Li, K. (2018). Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 149-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.024>
- Jong, J.-C., & Chang, S. (2005). Algorithms for generating train speed profiles. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 356-371.
- Khmelnitsky, E. (2000). On an optimal control problem of train operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(7), 1257-1266. doi:10.1109/9.867018
- Kouwenhoven, M., de Jong, G. C., Koster, P., van den Berg, V. A., Verhoef, E. T., Bates, J., & Warffemius, P. M. (2014). New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 47, 37-49.
- Li, S., Zhou, X., Yang, L., & Gao, Z. (2018). Automatic train regulation of complex metro networks with transfer coordination constraints: A distributed optimal control framework. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 228-253.
- Li, X., & Lo, H. K. (2014). An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 64, 73-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.006>
- Martin, D., & Litwhiler, D. (2008). AC 2008-1330: AN INVESTIGATION OF ACCELERATION AND JERK PROFILES OF PUBLIC TRANSPORTATION VEHICLES. *age*, 13, 1.
- Nitisiri, K., Gen, M., & Ohwada, H. (2019). A parallel multi-objective genetic algorithm with learning based mutation for railway scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 381-394.
- Niu, H., & Zhou, X. (2013). Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 212-230.

- Pudney, P., & Howlett, P. (2009). Optimal driving strategies for a train journey with speed limits. *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*, 36(1), 38-49. doi:10.1017/S0334270000010225
- Robenek, T., Azadeh, S. S., Maknoon, Y., de Lapparent, M., & Bierlaire, M. (2018). Train timetable design under elastic passenger demand. *Transportation research Part b: methodological*, 111, 19-38.
- Sanchis, I. V., & Zuriaga, P. S. (2016). An Energy-efficient Metro Speed Profiles for Energy Savings: Application to the Valencia Metro. *Transportation Research Procedia*, 18, 226-233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.031>
- Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>
- Sheu, J., & Lin, W. (2012). Energy-Saving Automatic Train Regulation Using Dual Heuristic Programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(4), 1503-1514. doi:10.1109/TVT.2012.2187225
- Shi, J., Yang, L., Yang, J., & Gao, Z. (2018). Service-oriented train timetabling with collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: An integer linear optimization approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 26-59.
- Su, S., Tang, T., & Roberts, C. (2015). A Cooperative Train Control Model for Energy Saving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 622-631. doi:10.1109/TITS.2014.2334061
- Sun, X., Cai, H., Hou, X., Zhang, M., & Dong, H. (2014). *Regenerative braking energy utilization by multi train cooperation*. Paper presented at the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Szanto, F. (2016). *Rolling resistance revisited*.
- Wang, P., & Goverde, R. M. P. (2019). Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling. *European Journal of Operational Research*, 272(2), 621-635. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.034>
- Wu, X., Dong, H., & Tse, C. K. (2020). Multi-Objective Timetabling Optimization for a Two-Way Metro Line Under Dynamic Passenger Demand. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-11. doi:10.1109/TITS.2020.2980556
- Yang, S., Wu, J., Yang, X., Liao, F., Li, D., & Wei, Y. (2019). Analysis of energy consumption reduction in metro systems using rolling stop-skipping patterns. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 129-142. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.048>
- Yang, S., Wu, J., Yang, X., Sun, H., & Gao, Z. (2018). Energy-efficient timetable and speed profile optimization with multi-phase speed limits: Theoretical analysis and application. *Applied Mathematical Modelling*, 56, 32-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.11.017>
- Yang, X., Chen, A., Wu, J., Gao, Z., & Tang, T. (2019). An energy-efficient rescheduling approach under delay perturbations for metro systems. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 386-400. doi:10.1080/21680566.2017.1421109
- Yin, J., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., & Ran, B. (2017). Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 182-213.

Zhang, H., Li, S., & Yang, L. (2019). Real-time optimal train regulation design for metro lines with energy-saving. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1282-1296.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας Π.1:** Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 1

Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής (750μ) - Ανωφέρεια 2.00%						
x (m)	t (sec)	U (m/s)	m (kg)	$\alpha_{nom-acceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{coasting}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{nom-deceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )
0	0	0	266000	1	0.20	1.10
	0			$\alpha_{acceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )		$\alpha_{deceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )
7	4.17	3.35		0.80		1.30
	-4.17			$Fx_{acceleration}$ (N)		$Wx$ (N)
14	1.73	4.74		266000	52181	292600
	-10.08					
21	1.33	5.81		<b>r (sec)</b>	<b>r<sub>total</sub> (sec)</b>	
	-13.13			$t_{acceleration}$	28	58
28	1.12	6.71		$t_{coasting}$		
	-15.58			$t_{deceleration}$	14	
35	0.99	7.50				
	-17.68			<b>Joules</b>		
42	0.89	8.22		145181764.9	<b>Acceleration Energy</b>	
	-19.55			20814079.1	<b>Deceleration Energy</b>	
49	0.82	8.88		124367685.8	<b>Consumption energy</b>	
	-21.26					
56	0.76	9.49				
	-22.85					
63	0.72	10.06				
	-24.32					
70	0.68	10.61				
	-25.72					
77	0.64	11.13				
	-27.04					
84	0.62	11.62				
	-28.30					
91	0.59	12.10				
	-29.50					
98	0.57	12.55				
105	0.55	12.99				
	-31.78					
112	0.53	13.42				
	-32.86					
119	0.51	13.83				
	-33.90					
126	0.50	14.23				
	-34.91					
133	0.49	14.62				
	-35.90					
140	0.47	15.00				
	-36.85					
147	0.46	15.37				
	-37.79					
154	0.45	15.73				
	-38.70					
161	0.44	16.09				
	-39.59					
168	0.43	16.43				
	-40.46					
175	0.42	16.77				
	-41.31					

182	0.41 -42.15	17.11			
189	0.41 -42.97	17.43			
196	0.40 -43.77	17.75			
203	0.39 -44.56	18.07			
210	0.38 -45.33	18.37			
217	0.38 -46.09	18.68			
224	0.37 -46.84	18.98			
231	0.37 -47.58	19.27			
238	0.36 -48.31	19.56			
245	0.36 -49.02	19.85			
252	0.35 -49.73	20.13			
259	0.35 -50.43	20.41			
266	0.34 -51.11	20.68			
273	0.34 -51.79	20.95			
280	0.33 -52.46	21.22			
287	0.33 -53.12	21.48			
294	0.32 -53.77	21.74			
301	0.32 -54.41	22.00			
307.079	0.28	22.22	<b>Milestone dx 6.079</b>		
308	135.45 0.04	22.21			
315	226.14 0.32	22.15			
322	225.51 0.32	22.09			
329	224.88 0.32	22.03			
336	224.24 0.32	21.96			
343	223.60 0.32	21.90			
350	222.96 0.32	21.84			
357	222.32 0.32	21.77			
364	221.68 0.32	21.71			
371	221.03 0.32	21.65			
378	220.39 0.32	21.58			
385	219.74 0.32	21.52			
392	219.09 0.33	21.46			
399	218.44 0.33	21.39			
406	217.78 0.33	21.33			
413	217.12 0.33	21.26			
420	216.47	21.20			



	0.33				
427	215.81	21.13			
	0.33				
434	215.14	21.07			
	0.33				
441	214.48	21.00			
	0.33				
448	213.81	20.94			
	0.33				
455	213.14	20.87			
	0.33				
462	212.47	20.81			
	0.34				
469	211.80	20.74			
	0.34				
476	211.13	20.67			
	0.34				
483	210.45	20.61			
	0.34				
490	209.77	20.54			
	0.34				
497	209.09	20.47			
	0.34				
504	208.40	20.41			
	0.34				
511	207.72	20.34			
	0.34				
518	207.03	20.27			
	0.34				
525	206.34	20.20			
	0.35				
532	205.65	20.14			
	0.35				
539	204.95	20.07			
	0.35				
546	204.25	20.00			
	0.35				
553	203.55	19.93			
	0.35				
560	202.85	19.86			
	0.35				
567	202.15	19.79			
	0.35				
574	201.44	19.72			
	0.35				
581	200.73	19.65			
	0.36				
588	200.02	19.58			
	0.36				
595	199.30	19.51			
	0.36				
602	198.58	19.44			
	0.36				
609	29.64	18.97	Milestone		
	0.36				
616	28.90	18.49			
	0.37				
623	28.14	17.99			
	0.38				
630	27.36	17.48			
	0.39				
637	26.56	16.95			
	0.41				
644	25.73	16.41			
	0.42				
651	24.88	15.84			
	0.43				
658	24.00	15.26			
	0.45				
665	23.08	14.65			
	0.47				

672	22.12	14.02				
	0.49					
679	21.12	13.36				
	0.51					
686	20.07	12.66				
	0.54					
693	18.96	11.92				
	0.57					
700	17.79	11.13				
	0.61					
707	16.53	10.29				
	0.65					
714	15.16	9.36				
	0.71					
721	13.66	8.34				
	0.79					
728	11.96	7.17				
	0.90					
735	9.98	5.77				
	1.08					
742	7.45	3.88				
	1.45					
749	13.46	2.84				
	2.08					
750	-	0.00				
	2.00					

**Πίνακας Π.2:** Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 2

Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής (750μ) - Ανωφέρεια 2.00%						
x (m)	t (sec)	u (m/s)	m (kg)	$\alpha_{nom-acceleration} * 0.85 (m/s^2)$	$\alpha_{coasting} (m/s^2)$	$\alpha_{nom-deceleration} * 0.85 (m/s^2)$
0	0	0	266000	0.85	0.20	0.94
	0			$\alpha_{acceleration} (m/s^2)$		$\alpha_{deceleration} (m/s^2)$
7	4.63	3.03		0.65		1.13
	-4.63			$F_{x_{acceleration}} (N)$	$W_x (N)$	$F_{x_{deceleration}} (N)$
14	1.92	4.28		226100	52181	248710
	-11.17					
21	1.47	5.24			$r (sec)$	
	-14.56			$t_{acceleration}$	34	
28	1.24	6.05		$t_{coasting}$	9	$r_{total} (sec)$
	-17.27			$t_{deceleration}$	19	62
35	1.09	6.77				
	-19.60				<b>Joules</b>	
42	0.99	7.41			158543476.8	<b>Acceleration Energy</b>
	-21.68				21716567.24	<b>Deceleration Energy</b>
49	0.91	8.00			136826909.5	<b>Consumption energy</b>
	-23.58					
56	0.85	8.56				
	-25.33					
63	0.79	9.08				
	-26.97					
70	0.75	9.57				
	-28.51					
77	0.71	10.03				
	-29.98					
84	0.68	10.48				
	-31.38					
91	0.65	10.91				
	-32.71					
98	0.63	11.32				
	-34.00					
105	0.61	11.72				
	-35.24					
112	0.59	12.10				
	-36.43					
119	0.57	12.47				

	-37.59				
126	0.55	12.84			
	-38.71				
133	0.54	13.19			
	-39.80				
140	0.52	13.53			
	-40.86				
147	0.51	13.86			
	-41.90				
154	0.50	14.19			
	-42.91				
161	0.49	14.51			
	-43.90				
168	0.48	14.82			
	-44.86				
175	0.47	15.13			
	-45.81				
182	0.46	15.43			
	-46.73				
189	0.45	15.72			
	-47.64				
196	0.44	16.01			
	-48.53				
203	0.43	16.29			
	-49.40				
210	0.43	16.57			
	-50.26				
217	0.42	16.85			
	-51.11				
224	0.41	17.11			
	-51.94				
231	0.41	17.38			
	-52.76				
238	0.40	17.64			
	-53.56				
245	0.39	17.90			
	-54.36				
252	0.39	18.15			
	-55.14				
259	0.38	18.40			
	-55.91				
266	0.38	18.65			
	-56.67				
273	0.37	18.89			
	-57.42				
280	0.37	19.13			
	-58.16				
287	0.36	19.37			
	-58.90				
294	0.36	19.61			
	-59.62				
301	0.35	19.84			
	-60.33				
308	0.35	20.07			
	-61.04				
315	0.35	20.30			
	-61.74				
322	0.34	20.52			
	-62.43				
329	0.34	20.74			
	-63.11				
336	0.34	20.96			
	-63.78				
343	0.33	21.18			
	-64.45				
350	0.33	21.39			
	-65.11				
357	0.33	21.61			
	-65.77				
364	0.32	21.82			
	-66.41				

371	0.32	22.03			
	-67.06		<b>Milestone</b>		
377.566	0.30	22.22	<b>dx</b>		
			6.566		
378	226.52	22.22			
	0.02				
385	226.18	22.15			
	0.32				
392	225.55	22.09			
	0.32				
399	224.92	22.03			
	0.32				
406	224.28	21.97			
	0.32				
413	223.65	21.90			
	0.32				
420	223.01	21.84			
	0.32				
427	222.37	21.78			
	0.32				
434	221.72	21.72			
	0.32				
441	221.08	21.65			
	0.32				
448	220.43	21.59			
	0.32				
455	219.78	21.53			
	0.32				
462	219.13	21.46			
	0.33				
469	218.48	21.40			
	0.33				
476	217.83	21.33			
	0.33				
483	217.17	21.27			
	0.33				
490	216.51	21.20			
	0.33				
497	215.85	21.14			
	0.33				
504	215.19	21.07			
	0.33				
511	214.53	21.01			
	0.33				
518	213.86	20.94			
	0.33				
525	213.19	20.88			
	0.33				
532	212.52	20.81			
	0.34				
539	211.85	20.75			
	0.34				
546	211.17	20.68			
	0.34				
553	210.50	20.61			
	0.34				
560	209.82	20.55			
	0.34				
567	35.98	20.16	<b>Milestone</b>		
	0.34				
574	35.29	19.76			
	0.35				
581	34.58	19.36			
	0.36				
588	33.86	18.94			
	0.37				
595	33.12	18.52			
	0.37				
602	32.36	18.09			
	0.38				
609	31.59	17.64			

	0.39					
616	30.79	17.19				
	0.40					
623	29.98	16.72				
	0.41					
630	29.14	16.24				
	0.42					
637	28.28	15.75				
	0.44					
644	27.39	15.24				
	0.45					
651	26.47	14.71				
	0.47					
658	25.52	14.16				
	0.49					
665	24.53	13.59				
	0.50					
672	23.50	12.99				
	0.53					
679	22.42	12.37				
	0.55					
686	21.28	11.71				
	0.58					
693	20.09	11.01				
	0.62					
700	18.81	10.27				
	0.66					
707	17.44	9.47				
	0.71					
714	15.96	8.59				
	0.78					
721	14.32	7.61				
	0.86					
728	12.46	6.49				
	0.99					
735	10.26	5.12				
	1.21					
742	7.38	3.23				
	1.68					
749	7.74	1.42				
	3.02					
750	-	0				
	1					

**Πίνακας Π.3:** Παράδειγμα παραγωγής δευτερογενών δεδομένων για το Προφίλ Ταχύτητας 3

Ευαγγελισμός - Μέγαρο Μουσικής (750μ) - Ανωφέρεια 2.00%						
x (m)	t (sec)	u (m/s)	m (kg)	$\alpha_{nom-acceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{coasting}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{nom-deceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )
0	0	0	266000	1	0.20	0.73
	0			$\alpha_{acceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )		$\alpha_{deceleration}$ (m/s <sup>2</sup> )
7	4.17	3.35		0.80		0.93
	-4.17			$F_{x_{acceleration}}$ (N)	$W_x$ (N)	$F_{x_{deceleration}}$ (N)
14	1.73	4.74		266000	52180.92	195199.08
	-10.08					
21	1.33	5.81			$r$ (sec)	
	-13.13			$t_{acceleration}$	28	
28	1.12	6.71			11	$r_{total}$ (sec)
	-15.58			$t_{coasting}$	22	60
35	0.99	7.50				
	-17.68				<b>Joules</b>	
42	0.89	8.22			145181764.9	<b>Acceleration Energy</b>
	-19.55				17465084.64	<b>Deceleration Energy</b>
49	0.82	8.88			127716680.3	<b>Consumption energy</b>
	-21.26					
56	0.76	9.49				
	-22.85					
63	0.72	10.06				
	-24.32					

70	0.68	10.61			
	-25.72				
77	0.64	11.13			
	-27.04				
84	0.62	11.62			
	-28.30				
91	0.59	12.10			
	-29.50				
98	0.57	12.55			
	-30.66				
105	0.55	12.99			
	-31.78				
112	0.53	13.42			
	-32.86				
119	0.51	13.83			
	-33.90				
126	0.50	14.23			
	-34.91				
133	0.49	14.62			
	-35.90				
140	0.47	15.00			
	-36.85				
147	0.46	15.37			
	-37.79				
154	0.45	15.73			
	-38.70				
161	0.44	16.09			
	-39.59				
168	0.43	16.43			
	-40.46				
175	0.42	16.77			
	-41.31				
182	0.41	17.11			
	-42.15				
189	0.41	17.43			
	-42.97				
196	0.40	17.75			
	-43.77				
203	0.39	18.07			
	-44.56				
210	0.38	18.37			
	-45.33				
217	0.38	18.68			
	-46.09				
224	0.37	18.98			
	-46.84				
231	0.37	19.27			
	-47.58				
238	0.36	19.56			
	-48.31				
245	0.36	19.85			
	-49.02				
252	0.35	20.13			
	-49.73				
259	0.35	20.41			
	-50.43				
266	0.34	20.68			
	-51.11				
273	0.34	20.95			
	-51.79				
280	0.33	21.22			
	-52.46				
287	0.33	21.48			
	-53.12				
294	0.32	21.74			
	-53.77				
301	0.32	22.00			
	-54.41		<b>Milestone</b>		
307.110	0.28	22.22	<b>dx</b>		
			6.110		
308	49.90	22.22			

	0.01				
315	226.21	22.16			
	0.32				
322	225.57	22.09			
	0.32				
329	224.94	22.03			
	0.32				
336	224.31	21.97			
	0.32				
343	223.67	21.91			
	0.32				
350	223.03	21.84			
	0.32				
357	222.39	21.78			
	0.32				
364	221.75	21.72			
	0.32				
371	221.10	21.65			
	0.32				
378	220.45	21.59			
	0.32				
385	219.81	21.53			
	0.32				
392	219.16	21.46			
	0.33				
399	218.50	21.40			
	0.33				
406	217.85	21.34			
	0.33				
413	217.19	21.27			
	0.33				
420	216.53	21.21			
	0.33				
427	215.87	21.14			
	0.33				
434	215.21	21.08			
	0.33				
441	214.55	21.01			
	0.33				
448	213.88	20.95			
	0.33				
455	213.21	20.88			
	0.33				
462	212.54	20.81			
	0.34				
469	211.87	20.75			
	0.34				
476	211.20	20.68			
	0.34				
483	210.52	20.62			
	0.34				
490	209.84	20.55			
	0.34				
497	209.16	20.48			
	0.34				
504	208.47	20.41			
	0.34				
511	207.79	20.35			
	0.34				
518	207.10	20.28			
	0.34				
525	206.41	20.21			
	0.35				
532	205.72	20.14			
	0.35				
539	42.97	19.82	<b>Milestone</b>		
	0.35				
546	42.26	19.49			
	0.36				
553	41.54	19.15			
	0.36				

560	40.81	18.81				
	0.37					
567	40.07	18.46				
	0.38					
574	39.31	18.10				
	0.38					
581	38.54	17.74				
	0.39					
588	37.75	17.37				
	0.40					
595	36.94	16.99				
	0.41					
602	36.12	16.60				
	0.42					
609	35.27	16.20				
	0.43					
616	34.41	15.80				
	0.44					
623	33.52	15.38				
	0.45					
630	32.61	14.95				
	0.46					
637	31.67	14.51				
	0.48					
644	30.71	14.05				
	0.49					
651	29.71	13.58				
	0.51					
658	28.68	13.09				
	0.52					
665	27.61	12.59				
	0.55					
672	26.50	12.06				
	0.57					
679	25.33	11.50				
	0.59					
686	24.12	10.92				
	0.62					
693	22.83	10.31				
	0.66					
700	21.47	9.66				
	0.70					
707	20.02	8.96				
	0.75					
714	18.45	8.20				
	0.82					
721	16.74	7.36				
	0.90					
728	14.82	6.42				
	1.02					
735	12.61	5.31				
	1.19					
742	9.90	3.89				
	1.52					
749	5.76	1.47				
	2.61					
750	-	0				
	2					



Πίνακας Π.4: Δεδομένα εξόδου από το μοντέλο βελτιστοποίησης

$Y_{i1}$	$Y_{i2}$	$Y_{i3}$	$p \cdot r_{i1} \cdot Y_{i1} \cdot d_i$	$p \cdot r_{i2} \cdot Y_{i2} \cdot d_i$	$p \cdot r_{i3} \cdot Y_{i3} \cdot d_i$	$\text{sum}(a \cdot p \cdot r_{ik} \cdot Y_{ik} \cdot d_i)$	$P_{(kwh)} \cdot E_{i1} \cdot Y_{i1}$	$P_{(kwh)} \cdot E_{i2} \cdot Y_{i2}$	$P_{(kwh)} \cdot E_{i3} \cdot Y_{i3}$	$\text{sum}(b \cdot P_{(kwh)} \cdot E_{ik} \cdot Y_{ik})$	$C \cdot a_{i1} \cdot Y_{i1} \cdot d_i \cdot L_{i1}$	$C \cdot a_{i2} \cdot Y_{i2} \cdot d_i \cdot L_{i2}$	$C \cdot a_{i3} \cdot Y_{i3} \cdot d_i \cdot L_{i3}$	$\text{sum}(c \cdot C \cdot a_{ik} \cdot Y_{ik} \cdot d_i \cdot L_{ik})$	obj Z
0	1	0	0.000	2344.977	0.000	0.961	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	9520.577	0.000	0.357	21.801
1	0	0	1269.861	0.000	0.000	0.520	5.822	0.000	0.000	0.885	2415.087	0.000	0.000	0.091	
0	1	0	0.000	1166.174	0.000	0.478	0.000	0.297	0.000	0.045	0.000	3901.937	0.000	0.146	
0	0	1	0.000	0.000	2186.572	0.896	0.000	0.000	0.443	0.067	0.000	0.000	9755.173	0.366	
0	0	1	0.000	0.000	2346.541	0.962	0.000	0.000	0.443	0.067	0.000	0.000	13367.928	0.501	
0	1	0	0.000	2400.501	0.000	0.984	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	12807.618	0.000	0.480	
1	0	0	2071.019	0.000	0.000	0.849	5.547	0.000	0.000	0.843	9817.701	0.000	0.000	0.368	
1	0	0	2180.036	0.000	0.000	0.893	5.883	0.000	0.000	0.894	6789.022	0.000	0.000	0.255	
0	1	0	0.000	1602.612	0.000	0.657	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	8797.173	0.000	0.330	
0	1	0	0.000	1501.333	0.000	0.615	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	6678.164	0.000	0.250	
0	1	0	0.000	1055.945	0.000	0.433	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	5376.520	0.000	0.202	
0	1	0	0.000	974.215	0.000	0.399	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	5017.613	0.000	0.188	
1	0	0	991.684	0.000	0.000	0.406	5.678	0.000	0.000	0.863	1615.279	0.000	0.000	0.061	
1	0	0	797.368	0.000	0.000	0.327	5.694	0.000	0.000	0.866	1672.958	0.000	0.000	0.063	
1	0	0	1322.505	0.000	0.000	0.542	5.473	0.000	0.000	0.832	4410.266	0.000	0.000	0.165	
0	1	0	0.000	1020.981	0.000	0.418	0.000	1.953	0.000	0.297	0.000	5245.605	0.000	0.197	

Περιορισμός 1 (sec) (< 133)	Περιορισμός 2 (sec) (< 45)	Περιορισμός 3	Περιορισμός 4 (m/s <sup>2</sup> ) (< 0.93 m/s <sup>2</sup> )
90.29585464	90.29585464	1	0.94
81	81	1	1.3
109	109	1	0.93
83	83	1	0.93
65	65	1	0.93
69.50377543	69.50377543	1	0.94
58	58	1	1.3
67	67	1	1.3
67.29855491	67.29855491	1	0.94
83.05013007	83.05013007	1	0.94
72	72	1	0.94
72	72	1	0.94
85	85	1	1.3
79	79	1	1.3
69	69	1	1.3
73	73	1	0.94