



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική εργασία

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας  
Προαστιακού σιδηροδρόμου – Εφαρμογή στη Γραμμή Αθήνα - Χαλκίδα**

Κωνσταντίνος Κόφφας

**Επιβλέπουσα:** Τατιάνα Π. Μοσχόβου, Ε.ΔΙ.Π. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, ημερομηνία



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Λυμπέρη, πρώην Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ που εμπνεύστηκε το θέμα της διπλωματικής εργασίας και την επιβλέπουσα κα. Τατιάνα Μοσχόβου, Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ για την άριστη συνεργασία κατά την εκπόνηση αυτής, καθώς και την Καθηγήτρια ΕΜΠ κα. Χ. Πλατή και τον Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κ. Γιοτσαλίτη για τη συμμετοχή τους στην τριμελή Επιτροπή.

Ακόμα ευχαριστώ τον κ. Δημήτρη Γαβαλά, που με φιλοξένησε στις εγκαταστάσεις της Διαχείρισης Γραμμής του ΟΣΕ και μου παρείχε το σύνολο των απαραίτητων γεωμετρικών δεδομένων της Σιδηροδρομικής Γραμμής. Την κα. Μαρία Τάκη, την κα. Άννα Γερωνυμάκη και τον κ. Σωτήρη Γεωργακίδη για την υποστήριξη τους στην συλλογή των δεδομένων από την Δ.Γ. Τον κ. Γιώργο Κορατζάνη για τις πολύτιμες τεχνικές συμβουλές του και το λοιπό προσωπικό του ΟΣΕ για την στήριξη και την κατανόηση που επέδειξαν στην προσπάθεια μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στήριζε πάντα και ήταν δίπλα μου στο μακρύ ταξίδι στο ΕΜΠ.



**Τίτλος:** «Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας Προαστιακού Σιδηροδρόμου – Εφαρμογή στη γραμμή Αθήνα - Χαλκίδα»

**Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας:** Κόφφας Κωνσταντίνος

**Επιβλέπουσα:** Τατιάνα Π. Μοσχόβου, Ε.ΔΙ.Π. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

## Σύνοψη

Η θεωρία της σιδηροδρομικής έλξης και των αντιστάσεων είναι ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο. Η φύση της έλξης βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ στατικής τριβής και παραγόμενης δύναμης στην περίμετρο των κινητήριων τροχών. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογικής προσέγγισης για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας Προαστιακού Σιδηροδρόμου μέσα από την εφαρμογή των θεμελιωδών σχέσεων της σιδηροδρομικής επιστήμης αλλά και της κινηματικής. Η διερεύνηση ξεκίνησε με τη συλλογή γεωμετρικών δεδομένων της Σιδηροδρομικής Γραμμής Αθήνας-Χαλκίδας από τον ΟΣΕ και την ψηφιοποίησή τους. Επιπλέον, έγινε καταγραφή των ελκτικών στοιχείων αντιπροσωπευτικών συρμών, ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων έλξης αλλά και των αντιστάσεων κύλισης αυτών, οι οποίες οφείλονται σε μηχανικές και αεροδυναμικές αντιστάσεις. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν για την ανάπτυξη προγράμματος στην MATLAB. Το πρόγραμμα αυτό εφάρμοσε σχέσεις της σιδηροδρομικής και της φυσικής για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας των συρμών. Πέραν των διαγραμμάτων πορείας, το πρόγραμμα υπολογίζει και εξάγει αναλυτικά αποτελέσματα για την ισχύ ανά χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) της Σ.Γ. και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας πρόωσης. Τέλος, γίνεται μια συνοπτική συγκριτική παρουσίαση των ενεργειακών αποτελεσμάτων, εκπομπών CO<sub>2</sub>, κόστος καυσίμου μεταξύ του σιδηροδρόμου και ενός τυπικού τουριστικού λεωφορείου που εκτελεί το δρομικό δρομολόγιο.

**Λέξεις-κλειδιά:** διάγραμμα πορείας, έλξη, αντίσταση γραμμής, αντίσταση κύλισης

**Title:** "Development of a methodological approach for designing train speed trajectory diagrams for the Suburban Railway - Application on the Athens - Chalkida Line

**Thesis Author:** Koffas Konstantinos

**Supervisor:** Tatiana P. Moschovou, School of Civil Engineering, NTUA

## Abstract

The theory of railway traction and resistances is a multifactorial phenomenon. The nature of traction is based on the balance between static friction and generated force on the perimeter of the driving wheels. The purpose of this thesis is the development of a methodological approach for designing train speed trajectory diagrams for the suburban railway, through the application of the fundamental relationships of railway science and physics. The investigation began by collecting the geometric data of the Athens-Chalkida Railway Line from the Hellenic Railways Organisation (OSE) and their digitization. Moreover, the traction diagrams of representative trains, as well as their running resistance, due to mechanical and aerodynamic resistances, were digitised. These data were manipulated accordingly in order to create a computer program in MATLAB. This program applied relationships and equations from railway and physics to design train speed trajectory diagrams. Furthermore, the computer program provided detailed results of power per kilometer position (KP) of the railway line and the total energy consumption for propulsion. Finally, a concise comparative presentation of energy results, CO<sub>2</sub> emissions, fuel costs between the railway and a typical tourist bus operating in the route was conducted.

**Key words:** train speed trajectory diagram, traction, track resistance, running resistance



## Περίληψη

Η ανάγκη για μεταφορά μεγάλου όγκου εμπορευμάτων και μετακίνηση επιβατών έχει τις ρίζες του στις αρχές της ανθρωπότητας, καθώς σε αυτήν στηρίχθηκε η εξέλιξή του. Αρχικά, αυτή η ανάγκη εξυπηρετήθηκε μέσω των θαλάσσιων μεταφορών, ωστόσο γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι έπρεπε να υπάρχει χερσαία σύνδεση. Με αυτόν τον τρόπο καθιερώθηκε η ιδέα της χερσαίας μεταφοράς μεγάλων όγκων αγαθών χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δρόμου-σιδηροτροχιάς και κύλισης, μεταξύ συγκεκριμένων χώρων υψηλής σημασίας. Οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχώς αναβάθμιζαν την επιδομή αλλά το κομμάτι της έλξης παρέμενε σταθερό. Με την εξάπλωση του σιδηροδρόμου και μέσα από τη χρήση του, άρχισαν να ερευνώνται τα φαινόμενα έλξης και αντιστάσεων. Η φύση της έλξης βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ στατικής τριβής και παραγόμενης δύναμης στην περίμετρο των κινητήριων τροχών. Αυτή ήταν εύκολα κατανοητή για τους ερευνητές της εποχής. Αντίθετα για τις συνολικές αντιστάσεις κίνησης, η μελέτη και ο καθορισμός τους ακόμα και σήμερα αποτελεί ένα ενεργό κεφαλαίο στην έρευνα.

Οι αντιστάσεις διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: α) σε αυτές που εξαρτώνται από τη Σιδηροδρομική Γραμμή (Σ.Γ.) - αντιστάσεις γραμμής και β) στις αντιστάσεις λόγω της κίνησης του συρμού – αντιστάσεις λόγω κύλισης. Ειδικότερα, οι αντιστάσεις γραμμής χωρίζονται σε αντιστάσεις λόγω κλίσης ( $W_R$ ) και αντίσταση λόγω καμπυλοτήτων ( $W_S$ ), ενώ κατά την κύλιση οι αντιστάσεις αναφέρονται σε μηχανικές αντιστάσεις και αεροδυναμικές αντιστάσεις. Ως προς τη δύναμη της έλξης, εξαρτάται από δυο καθοριστικούς παράγοντες: Ο πρώτος είναι η στατική τριβή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς και ο δεύτερος καθοριστικός παράγοντας είναι η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών κινητήρων του συρμού.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογικής προσέγγισης για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας Προαστιακού Σιδηροδρόμου μέσα από την εφαρμογή των θεμελιωδών σχέσεων της σιδηροδρομικής επιστήμης αλλά και της κινηματικής. Η διερεύνηση ξεκίνησε με τη συλλογή γεωμετρικών δεδομένων της Σιδηροδρομικής Γραμμής Αθήνας-Χαλκίδας από τον ΟΣΕ και την ψηφιοποίησή τους.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε χωρίστηκε σε δύο διακριτά μέρη: 1) Η συλλογή και επεξεργασία των ανελαστικών δεδομένων που αφορούν την Σ.Γ. και 2) η απόκτηση των κινηματικών δεδομένων των συρμών που μελετήθηκαν.

Στο πρώτο μέρος, αναζητήθηκαν από τον ΟΣΕ στοιχεία της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής για τη διαδρομή Αθήνα - Χαλκίδα. Απαραίτητα στοιχεία ήταν οι κλίσεις ανά χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.), τα οριζόντια τόξα και οι συναρμογές αυτών της Σ.Γ. ανά Χ.Θ., οι Χ.Θ. των στάσεων του δρομολογίου και τα ανώτερα όρια ταχύτητας κίνησης των συρμών ανά Χ.Θ.

Μετά τη συλλογή των παραπάνω στοιχείων ακολουθηθήκαν τα εξής βήματα:



1. Έγινε η ψηφιοποίηση των σχεδίων της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής της διαδρομής Αθήνα – Χαλκίδας σε περιβάλλον EXCEL.
2. Δημιουργήθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος λάμβανε τα ψηφιοποιημένα δεδομένα της Σ.Γ.
3. Υπολογίστηκε η συνολική αντίσταση της γραμμής ανά 0,01m μήκους γραμμής, ως άθροισμα της αντίστασης λόγω κλίσης ( $W_R$ ) και της αντίστασης λόγω καμπυλότητας ( $W_S$ ). Το μήκος 0,01m επιλέχθηκε γιατί στο χωρικό διάστημα αυτό, η αλλαγή της κινηματικής κατάστασης είναι πρακτικά αμελητέα και επέτρεψε την ακριβέστερη εκτέλεση του προγράμματος καθώς κατακερμάτισε τη γραμμή σε 8,1 εκατομμύρια θέσεις.
4. Εντοπισμός θέσης ενεργών σιδηροδρομικών σταθμών (Σ.Σ.) και σιδηροδρομικών στάσεων (Σ.ΣΤ.).
5. Γνωρίζοντας τα όρια ταχύτητας στην Σ.Γ., τα οποία διαφέρουν ανά Χ.Θ., κατασκευάστηκε ένα ψηφιακό αρχείο το οποίο περιείχε το όριο ταχύτητας ανά Χ.Θ. με σταθερό βήμα 0,01m.
6. Στη συνέχεια, το αρχείο της ταχύτητας τροποποιήθηκε καταλλήλως ώστε να έχει συνέπεια ως προς την φυσική (επιτάχυνση - επιβράδυνση), αλλά και τις Χ.Θ. των στάσεων.

Στο δεύτερο μέρος, αναζητήθηκαν από τον ΟΣΕ τα ελκτικά στοιχεία των συρμών που εκτελούν τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα (Desiro) και συγκεκριμένα: τα διαγράμματα έλξης-αντίστασης, τεχνικά χαρακτηριστικά αξόνων κίνησης, τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών ισχύος και διαμόρφωση θέσεων επιβατών. Τα δεδομένα αυτά τελικά προήλθαν από ανοικτές διαδικτυακές πηγές.

Έτσι, έγινε καταγραφή των ελκτικών δεδομένων των συρμών που εκτελούν το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα-Αθήνα και των μεγεθών των μηχανικών-αεροδυναμικών τους αντιστάσεων. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των χρόνων, της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub> και του κόστους καυσίμου του σιδηροδρόμου σε σχέση με την ανταγωνιστική μορφή χερσαίων μεταφορών που είναι τα τουριστικά λεωφορεία (ΚΤΕΛ) και τέλος έγινε σύγκριση της προσομοίωσης δρομολογίου σε σχέση με το πραγματικό δρομολόγιο.

Συμπερασματικά, κατά την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της Σ.Γ. , έγινε εμφανές πως η γραμμή από τον Σ.Σ. Αθήνας έως τον Σ.Σ. Οινόης βασίζεται στη μεγάλη ανακατασκευή που έγινε το 1964, η οποία βελτιώνει την ήδη υπάρχουσα Σ.Γ. που είχε κατασκευαστεί χρόνια πριν. Παρόλα αυτά έχει περιορισμένη ταχύτητα κίνησης λόγω των μικρών κυκλικών τόξων που υπάρχουν στην οριζοντιογραφία. Αυτό περιορίζει σήμερα την ταχύτητα κίνησης στη μέση τιμή των 88 km/h. Ένας επιπρόσθετος περιοριστικός παράγοντας είναι η γραμμολογία των σταθμών. Με εξαίρεση τον Σ.Σ. Αθήνας, Σ.Σ. Αγ. Αναργύρων και Σ.Σ. Οινόης όλοι οι υπόλοιποι Σ.Σ.

έχουν μία γραμμή ανά κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό περιορίζει αισθητά τη συνολική χωρητικότητα της γραμμής καθώς τα δρομολόγια που έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα αναγκάζονται σε μεγάλης διάρκειας στάσεις ώστε να παραχωρήσουν χώρο στα δρομολόγια Intercity.

Οι συρμοί οι οποίοι ήταν ικανοί να κινηθούν με τη δρομολογιακή ταχύτητα εμφάνισαν σημαντική χρονική ακρίβεια, με αποκλίσεις  $\pm 2$  λεπτά.

Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα ανέδειξε το οικολογικό πλεονέκτημα του σιδηροδρόμου σε σχέση με τις οδικές μεταφορές. Ακόμα και στην περίπτωση της μη αναγεννητικής πέδησης, ο συρμός μεταφέρει πάνω από 5,6 φορές περισσότερους επιβάτες σε σχέση με το τουριστικό λεωφορείο.

Με την ολοκλήρωση της μελέτης, είναι εμφανές πως η επιδομή χρίζει ριζικής ανανέωσης. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι πλέον είναι μεγαλύτεροι καθώς έχουν πυκνώσει τα επιβατικά αλλά και τα εμπορικά δρομολόγια. Απόρροια αυτού είναι οι συχνές καθυστερήσεις που συμβαίνουν στα δρομολόγια, διότι οι συρμοί αναγκάζονται συχνά να παραμείνουν σε κάποιες στάσεις αρκετά λεπτά για λόγους κυκλοφορίας. Έτσι, κρίνεται αναγκαίο να γίνουν παρεμβάσεις στη Σ.Γ, οι οποίες είναι η αλλαγή της οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, στο μέτρο του δυνατού, που θα οδηγήσει στην αύξηση της μέσης ταχύτητας στον κλάδο μεταξύ Σ.Σ. Αθήνας και Σ.Σ. Οινόης στα 120 km/h κατ' ελάχιστον και η αλλαγή γραμμολογίας στους ενδιαμέσους Σ.Σ. ώστε να υπάρχουν παρακαμπτήριες γραμμές για τους διερχόμενους εμπορικούς και Intercity συρμούς.

Αυτές οι τροποποιήσεις κρίνονται απαραίτητες για την αναβάθμιση του κεντρικού σιδηροδρομικού δικτύου της χώρας, αλλά η έκταση αυτών και ο συνδυασμός τους θα πρέπει να αποτελεί προϊόν εντατικής έρευνας. Επιπλέον, αυτών θα πρέπει να πραγματοποιηθεί οικονομοτεχνική μελέτη και ανάλυση κόστους οφέλους (Cost Benefit Analysis).

## Πίνακας περιεχομένων

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>20</b>
1.1 Γενική ανασκόπηση	20
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	22
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	22
<b>2. Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>24</b>
2.1 Η έλξη στον σιδηρόδρομο	24
2.2 Αντιστάσεις κατά την κίνηση	25
2.2.1 Αντιστάσεις γραμμής	25
2.2.2 Αντιστάσεις κατά την κύλιση	29
2.3 Δύναμη έλξης	31
2.4 Κατανάλωση ενέργειας	33
2.5 Διαγράμματα πορείας	34
<b>3. Μεθοδολογική Προσέγγιση</b>	<b>38</b>
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας	38
3.2 Βάση δεδομένων	40
3.2.1 Επιλογή δεδομένων	40
3.2.2 Επιλογή μεταβλητών	44
<b>4. Ανάλυση και Αποτελέσματα</b>	<b>45</b>
4.1 Ανάπτυξη μοντέλου και αποτελέσματα για αντιστάσεις γραμμής	45
4.2 Αποτελέσματα για συρμούς	53
4.2.1 Γαλλική ηλεκτράμαξα Z6100 του SNCF	54
4.2.2 BR-423 (DB)	62
4.2.3 British Rail Class 450	71
4.2.4 British Rail Class 800 (Hybrid)	80
4.2.5 Siemens Desiro	89
4.3 Συγκεντρικά αποτελέσματα μεταξύ συρμών	97
4.3.1 Χρονικά αποτελέσματα	97
4.3.2 Αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας συρμών	98
4.4 Συγκεντρικά αποτελέσματα μεταξύ συρμών και λεωφορείου	98
4.4.1 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης	98
4.4.2 Αποτελέσματα εκπομπών CO <sub>2</sub>	100

4.4.3	Συγκριτικά κόσθη καυσίμου .....	101
<b>5.</b>	<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις.....</b>	<b>102</b>
5.1	Γενικά .....	102
5.2	Βασικά συμπεράσματα.....	102
5.3	Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	104
<b>6.</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>106</b>

## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1. Συνιστώσα Βάρους (Λυμπέρης 2023).....	25
Εικόνα 2. Παράδειγμα οριζοντιογραφίας οδού (Κόφφας 2020) .....	26
Εικόνα 3. Συντελεστές στατικής τριβής κατά Curtious-Kniffler (Λυμπέρης, 2023) ....	28
Εικόνα 4. Οπτικοποίηση ροής αέρα με χρήση λογισμικού CFD (Baker et. al, 2014)..	29
Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση στατικής τριβής (Fftr) μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς. ....	31
Εικόνα 6. Διάγραμμα έλξης ηλεκτράμαξας Z6100. ....	33
Εικόνα 7. Γραφικό δρομολόγιο ελβετικών σιδηροδρόμων 1899 (πηγή: Wikipedia)...	36
Εικόνα 8. Ενδεικτικό διάγραμμα πορείας συρμού παραγόμενο από το πρόγραμμα σε MATLAB.....	37
Εικόνα 9. Διάγραμμα ροής διπλωματικής. ....	40
Εικόνα 10. Απόσπασμα βασικού πίνακα ψηφιοποιημένων δεδομένων της οριζοντιογραφίας, μηκοτομής, στάσεων και ταχυτήτων .....	41
Εικόνα 11. Τελικές καρτέλες μητρώων δεδομένων. ....	43
Εικόνα 12. Τμήμα (απόσπασμα) κώδικα MATLAB για τα δεδομένα της ηλεκτράμαξας Siemens Desiro.....	44
Εικόνα 13. Παραγόμενο γράφημα Καμπυλότητας-Χ.Θ. από MATLAB .....	46
Εικόνα 14. Απόσπασμα μητρώου κλίσεων EXCEL. ....	46
Εικόνα 15. Παραγόμενο γράφημα κλίσεων διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα ανά Χ.Θ. ....	47
Εικόνα 16. Υπολογιστικό φύλλο EXCEL για τα οριζοντιογραφικά δεδομένα. ....	48
Εικόνα 17. Γράφημα καμπυλότητας στο σύνολο της διαδρομής.....	48
Εικόνα 18. Στόχος ταχυτήτων διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα ανά Χ.Θ. ....	50
Εικόνα 19. Καμπυλότητα και Αντιστάσεις λόγω καμπύλης ανά Χ.Θ.....	51
Εικόνα 20. Σύνολο Αντιστάσεων Γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.....	52
Εικόνα 21. Σύνολο Αντιστάσεων Γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα- Αθήνα. ....	52
Εικόνα 22. Συρμός κλάσης Z6100 του SNCF (πηγή : Wikipedia). ....	54
Εικόνα 23. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα. ....	55
Εικόνα 24. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα. ....	55
Εικόνα 25. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	56
Εικόνα 26. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	56
Εικόνα 27. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση. ....	57
Εικόνα 28. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	57
Εικόνα 29. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση. ....	58
Εικόνα 30. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	58
Εικόνα 31. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα. ....	59
Εικόνα 32. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα. ....	59

Εικόνα 33. Συρμός BR-423 Γερμανικών Σιδηροδρόμων ( πηγή : Wikipedia). .....	62
Εικόνα 34. Αποτύπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.....	63
Εικόνα 35.Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων. ....	63
Εικόνα 36. Διάγραμμα Έλξης συρμού.....	64
Εικόνα 37. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα. ....	65
Εικόνα 38. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα. ....	65
Εικόνα 39. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	66
Εικόνα 40. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	66
Εικόνα 41. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	67
Εικόνα 42. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	67
Εικόνα 43.Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση. ....	68
Εικόνα 44. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	68
Εικόνα 45.Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα. ....	69
Εικόνα 46. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα. ....	69
Εικόνα 47. British Rail Class 450 (πηγή: Wikipedia). ....	71
Εικόνα 48. Αποτύπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.....	72
Εικόνα 49.Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων. ....	72
Εικόνα 50. Διάγραμμα Έλξης συρμού.....	73
Εικόνα 51. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα. ....	74
Εικόνα 52. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα. ....	74
Εικόνα 53. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	75
Εικόνα 54. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	75
Εικόνα 55. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	76
Εικόνα 56. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.....	76
Εικόνα 57.Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	77
Εικόνα 58. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	77
Εικόνα 59. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.....	78
Εικόνα 60. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.....	78
Εικόνα 61. British Rail Class 800 (πηγή: Wikipedia). ....	80
Εικόνα 62. Αποτύπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.....	81
Εικόνα 63.Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων. ....	81

Εικόνα 64. Διάγραμμα Έλξης συρμού.....	82
Εικόνα 65. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα. ....	83
Εικόνα 66. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα. ....	83
Εικόνα 67. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	84
Εικόνα 68. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	84
Εικόνα 69. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση. ....	85
Εικόνα 70. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	85
Εικόνα 71.Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση. ....	86
Εικόνα 72. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	86
Εικόνα 73.Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.....	87
Εικόνα 74. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.....	87
Εικόνα 75. Siemens Desiro (πηγή: Wikipedia).....	89
Εικόνα 76. Διάγραμμα Έλξης συρμού.....	90
Εικόνα 77. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα. ....	91
Εικόνα 78. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα. ....	91
Εικόνα 79. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.....	92
Εικόνα 80. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.....	92
Εικόνα 81. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση. ....	93
Εικόνα 82. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	93
Εικόνα 83.Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση. ....	94
Εικόνα 84. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση. ....	94
Εικόνα 85.Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.....	95
Εικόνα 86. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.....	95

## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Z6100 (πηγή: Wikipedia).....	54
Πίνακας 2. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Z6100. ....	61
Πίνακας 3. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Z6100. ....	61
Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού BR-423. ....	62
Πίνακας 5. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό BR-423. ....	70
Πίνακας 6. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό BR-423. ....	70
Πίνακας 7. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Class 450. ....	71
Πίνακας 8. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα- Χαλκίδα για τον συρμό Class-450. ....	79
Πίνακας 9. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Class-450	79
Πίνακας 10. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού British Rail Class 800. ....	80
Πίνακας 11. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Class-800.	88
Πίνακας 12. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Class-800.	88
Πίνακας 13. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Siemens Desiro. ....	89
Πίνακας 14. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Siemens Desiro. ....	96
Πίνακας 15. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Siemens Desiro. ....	96
Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας χρονικών αποτελεσμάτων δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα. ....	97
Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας χρονικών αποτελεσμάτων δρομολόγιο Χαλκίδα-Αθήνα. ....	97
Πίνακας 18. Κατανάλωση ενέργειας δρομολογίων. ....	98
Πίνακας 19. Μέσος όρος κατανάλωσης ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς. ....	99
Πίνακας 20. Μέσος όρος κατανάλωσης ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο. ....	99
Πίνακας 21. Μέσος όρος εκπομπών CO2 ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς. ....	100
Πίνακας 22. Μέσος όρος εκπομπών CO2 ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο. ...	100
Πίνακας 23. Μέσος όρος κόστος καυσίμου ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς. ....	101



Πίνακας 24. Μέσος όρος κόστος καυσίμου ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο..	101
Πίνακας 25. Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας ανά χιλιόμετρο και ανά επιβάτη μεταξύ του συρμού Siemens Desiro και τουριστικού λεωφορείου.....	103

## Ευρετήριο Εξισώσεων

Εξίσωση 1. Αντίσταση λόγω κλίσης, .....	25
Εξίσωση 2. Γενική μορφή αντίστασης λόγω καμπυλότητας, .....	27
Εξίσωση 3. Αντίσταση καμπυλότητας Γαλλικών σιδηροδρόμων, .....	27
Εξίσωση 4. Αντίσταση καμπυλότητας Γερμανικών Σιδηροδρόμων για επιβατικούς συρμούς (τύπος του Frank), .....	27
Εξίσωση 5. Αντίσταση καμπυλότητας Γερμανικών σιδηροδρόμων για εμπορικούς συρμούς (τύπος του Frank), .....	27
Εξίσωση 6. Αντίσταση καμπυλότητας κατά Röckl για ακτίνα μεγαλύτερη ή ίση των 350m .....	27
Εξίσωση 7. Αντίσταση καμπυλότητας κατά Röckl για ακτίνα μικρότερη 350m .....	27
Εξίσωση 8. Συντελεστής στατικής τριβής για στεγνή και αμμοβολημένη σιδηροτροχιά, .....	28
Εξίσωση 9. Συντελεστής στατικής τριβής για υγρή σιδηροτροχιά, .....	28
Εξίσωση 10. Γενική μορφή εξίσωσης αντίστασης κύλισης κατά Davis, .....	30
Εξίσωση 11. Γενική μορφή εξίσωσης αντίστασης κύλισης κατά Πυργίδη, .....	30
Εξίσωση 12. Στατική τριβή, .....	31
Εξίσωση 13. Συνολική στατική τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ συρμού και σιδηροτροχιάς, .....	32
Εξίσωση 14. Περιστροφική ισχύς, .....	32
Εξίσωση 15. Ισχύς, .....	32
Εξίσωση 16. Παραγόμενη δύναμη έλξης από τους κινητήριους άξονες, .....	32
Εξίσωση 17. Ενέργεια, .....	34
Εξίσωση 18. Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρόωσης, .....	34
Εξίσωση 19. Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την πέδηση, .....	34



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενική ανασκόπηση

Η ανθρωπότητα από την αρχή του πολιτισμού βασιζόταν στην μεταφορά προσώπων και αγαθών μεταξύ των κέντρων πληθυσμού. Αρχικά ήταν κρίσιμη η μεταφορά των παραγόμενων αγροτικών, κτηνοτροφικών προϊόντων αλλά και των διαφόρων πρώτων υλών (πχ μεταλλεύματα, ξυλεία), από τους χώρους παραγωγής στους χώρους κατανάλωσης. Με τη πάροδο του χρόνου, έγινε αντιληπτό στους αρχαίους πολιτισμούς πως ήταν απαραίτητο πως πέραν την μεταφορά των προϊόντων, έπρεπε να εξασφαλιστεί ένας αποδοτικός τρόπος για μεταφορά προσώπων (κυρίως στρατευμάτων) σε μεγάλες αποστάσεις. Η ανάγκη αυτή παρακίνησε την ανθρώπινη σκέψη και εφευρετικότητα. Η πρώτη μεγάλη εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού στο τομέα των μεταφορών ήταν οι θαλάσσιες μεταφορές. Οι πολιτισμοί που ήταν παραθαλάσσιοι και απέκτησαν στόλο πλοίων, μπόρεσαν να αναπτυχθούν οικονομικά, πολιτισμικά αλλά και γεωστρατηγικά. Η λεκάνη της Μεσογείου φιλοξένησε σημαντικούς αρχαίους πολιτισμούς, που η ισχύς τους προήλθε σε μεγάλο βαθμό από την ναυτιλία. Η οικονομική και πληθυσμιακή άνθηση που γνώρισαν αυτοί, έκανε πιο έντονη την ανάγκη των χερσαίων μεταφορών. Ιστορικά σύλληψη της ιδέας του σιδηροδρόμου μπορεί να εντοπιστεί χρονικά τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. στη Δίολκο της Κορίνθου. Οι πλοιοκτήτες της εποχής σκέφτηκαν έναν τρόπο να μειώσουν της ημέρες που θα ήθελε ένα πλοίο να κάνει το περίπλου της Πελοποννήσου αλλά και να μειώσουν τον κίνδυνο για τα πλοία τους. Την εποχή εκείνη ήταν τεχνικά δύσκολη η κατασκευή ενός εκτεταμένου τεχνικού έργου όπως ο Ισθμός της Κορίνθου. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκε ο Δίολκος που ήταν ένας πλακοστρωμένος δρόμος όπου τα σκάφη κύλιαν από τον Κορινθιακό κόλπο στον Αργοσαρωνικό κόλπο. Έτσι πρώτη φορά στην ιστορία κατέστη δυνατό να μεταφερθεί ένα μεγάλο εμπόρευμα, στην προκειμένη περίπτωση ένα εμπορικό πλοίο, που το μέγεθος του ήταν ασύλληπτο για την εποχή. Με αυτόν τον τρόπο καθιερώθηκε η ιδέα της χερσαίας μεταφοράς μεγάλων όγκων αγαθών χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δρόμου-σιδηροτροχιάς και κύλισης, μεταξύ συγκεκριμένων χώρων υψηλής σημασίας. Η εμφάνιση των συστημάτων αυτών συνεχίστηκε και στην περίοδο της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, κυρίως σε ορυχεία. Με το πέρασμα των αιώνων, η έννοια της σιδηροτροχιάς άρχισε να προσεγγίζει την σημερινή της μορφή, καθώς από το «δρόμος» της Δίολκου μετεξελίσσονταν σε μία περιορισμένη οδό μέχρι την κατασκευή της πρώτης ξύλινης ράγας.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχώς αναβάθμιζαν την επιδομή αλλά το κομμάτι της έλξης παρέμενε σταθερό. Αυτό άλλαξε τον 18<sup>ο</sup> αιώνα με την έλευση της ατμομηχανής. Η ιδέα ήταν να αξιοποιήσουν την μηχανή αυτή που ήταν στατική, να την τροποποιήσουν κατάλληλα ώστε το παραγόμενο έργο να χρησιμοποιηθεί για την έλξη. Ο πρώτος σύγχρονος σιδηρόδρομος που χρησιμοποιούσε μηχανική έλξη και κινούταν σε σιδηροτροχιά ήταν το 1804 σε ορυχεία στην Ουαλία, όπου μετέφερε 5

τόνους ορυκτών σε απόσταση 16 χιλιομέτρων με ταχύτητα 8 km/h. Γρήγορα αντιλήφθηκαν τις προοπτικές του σιδηροδρόμου με μηχανική έλξη οι οικονομικοί παράγοντες στην Ευρώπη. Μεγάλα οικονομικά κεφάλαια κατευθύνθηκαν στην έρευνα αλλά και στην κατασκευή σιδηροδρομικών έργων, με τα αποτελέσματα να είναι θεαματικά μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα (Wikipedia, 2023).

Με την εξάπλωση του σιδηροδρόμου και μέσα από την χρήση του, άρχισαν να ερευνώνται τα φαινόμενα έλξης και αντιστάσεων. Η φύση της έλξης βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ στατικής τριβής και παραγόμενης δύναμης στην περίμετρο των κινητήριων τροχών. Αυτή ήταν εύκολα κατανοητή για τους ερευνητές της εποχής. Αντίθετα για τις συνολικές αντιστάσεις κίνησης, η μελέτη και ο καθορισμός τους είναι ακόμα και σήμερα είναι ένα ενεργό κεφάλαιο στην έρευνα. Πέραν των αντιστάσεων λόγω κλίσης, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια αφού απορρέουν από την Νευτώνεια φυσική, οι υπόλοιπες μορφές αντιστάσεων μελετήθηκαν εκτενέστερα, από το χρονικό σημείο που η επιρροή τους ήταν εμφανής στην κίνηση τω συρμών. Αυτό αποκαλύπτεται από το γεγονός πως οι βασικές εξισώσεις για την αντίσταση κύλισης του συρμού καθιερώθηκαν στο πρώτο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα και δεν είναι κοινές για τον σιδηρόδρομο σε παγκόσμιο επίπεδο. Κάθε οργανισμός έχει την δική του εκδοχή των εξισώσεων αυτών τόσο σε γενικό επίπεδο (EMU, Μηχανή έλξης και ελκόμενα οχήματα) όσο και σε ειδικό (Siemens Desiro, CAF Sprinter NG). Έτσι είναι εμφανές πως δεν υπάρχει ένας μαθηματικός τύπος που να παράγει ακριβή αποτελέσματα εκ των προτέρων, αλλά γίνεται μια στοχαστική προσέγγιση στην τάξη μεγέθους η οποία θα βελτιωθεί με την χρήση του εκάστοτε συρμού σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον των αντιστάσεων κύλισης του συρμού, οι αντιστάσεις καμπυλότητας εμφανίζουν και αυτές την ίδια στοχαστική προσέγγιση λόγω του πολυπαραγοντικού χαρακτήρα που έχουν. Εξαρτώνται από πολλές μεταβλητές (π.χ. επαφή όνυχα τροχού με σιδηροτροχιά, οφιοειδής κίνηση, κατάσταση επιδομής) και όπως στην περίπτωση των αντιστάσεων κύλισης, έτσι και εδώ δεν υπάρχει κάποια μαθηματική εξίσωση που να έχει διεθνές χαρακτήρα. Αντίστοιχα για τον συντελεστή στατικής τριβής υπάρχει η σχέση των Curtious-Kniffler που χρησιμοποιείται διεθνώς, αλλά στο πεδίο παρατηρούνται συχνά αποκλίσεις (Πυργίδης, 2009).

Όλα όσα προαναφέρθηκαν, αποκαλύπτουν την σχετική αδυναμία της σιδηροδρομικής κοινότητας να καταρτίσει μαθηματικές εξισώσεις υπολογισμού αντιστάσεων με μεγάλη ακρίβεια πριν από τις δοκιμές στο πεδίο. Ιστορικά μπορεί να εξηγηθεί πως μετά τον Β Παγκόσμιο Πόλεμο, ο σιδηρόδρομος θεωρήθηκε ως αναχρονιστικό μέσο μεταφοράς και η πολιτική και οικονομική προσοχή των καρτών, εκχωρήθηκε στα πρωτοπόρα μέσα του αυτοκινήτου και των αεροσκαφών. Το ιστορικής σημασίας γεγονός του Federal-Aid Highway Act του 1956, έδωσε μεγάλη προτεραιότητα στην κατασκευή αυτοκινητοδρόμων στις ΗΠΑ χωρίς να υπάρχει αντίστοιχα ένα παρόμοιο πρόγραμμα, ίδιας βαρύτητας, για τον σιδηρόδρομο. Η πράξη αυτή, παρά το ότι αφορούσε το εσωτερικό των ΗΠΑ, επηρέασε όμως στο σύνολο τη μεταπολεμική Δυτική κοινότητα. Με την πάροδο των χρόνων το άλλοτε ακμαίο και πυκνό σιδηροδρομικό δίκτυο των ΗΠΑ, που εξυπηρετούσε εκατομμύρια επιβάτες αλλά και

εκατομμύρια τόνους εμπορευμάτων, έχασε το επιβατικό του κοινό μετατρέποντας τον σιδηρόδρομο κυρίως σε μέσο μεταφοράς εμπορευμάτων. Η Ευρώπη ως στενός σύμμαχος των ΗΠΑ, ακολούθησε την πρακτική αυτή, δίνοντας χώρο στο αυτοκίνητο και το αεροσκάφος, χωρίς όμως να παραμελήσει εντελώς τις σιδηροδρομικές της υποδομές. Σημείο καμπής αυτής της πορείας ήταν η πετρελαιϊκή κρίση του 1973, που αποκάλυψε την αδυναμία των μεταφορικών συστημάτων που βασίζονται αποκλειστικά σε εισαγόμενη μορφή ενέργειας. Με πρωτοπόρο στην Ευρώπη τη Γαλλία και στην Ασία την Ιαπωνία, αποδείχθηκε πως ο σιδηρόδρομος είναι ικανός να ανταγωνιστεί ευθέως την αεροπορική βιομηχανία και μάλιστα διαθέτει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα. Έτσι από τη δεκαετία του 1980 υπάρχει σημαντική αύξηση της χρηματοδότησης στην έρευνα, στα συστήματα ασφαλείας και στις υποδομές.

## **1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας Προαστιακού Σιδηροδρόμου και η εμβάθυνση των γνώσεων στη θεωρία της έλξης στον σιδηρόδρομο καθώς και η σύγκριση της προσομοίωσης δρομολογίου σε σχέση με το πραγματικό δρομολόγιο. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται στην Σιδηροδρομική Γραμμή (Σ.Γ.) Αθήνα-Χαλκίδα. Για τον σκοπό αυτό, συλλέγονται από τον ΟΣΕ και καταγράφονται τα γεωμετρικά στοιχεία της γραμμής και συγκεκριμένα η μηκοτομή και η οριζοντιογραφία, γίνεται ψηφιοποίηση καθώς και ανάπτυξη προγράμματος στη MATLAB ώστε να υπολογιστεί ανά χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) η συνολική αντίσταση της Σ.Γ. Γίνεται καταγραφή των ελκτικών στοιχείων των συρμών που εκτελούν το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα-Αθήνα καθώς και άλλων αντιπροσωπευτικών συρμών και των μεγεθών των μηχανικών-αεροδυναμικών τους αντιστάσεων. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα στη MATLAB με βάση το σύνολο των επεξεργασμένων δεδομένων παράγει και συντάσσει τα διαγράμματα πορείας των συρμών και τα μητρώα έλξης-αντίσταση κίνησης. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των χρονικών, ενεργειακών αποτελεσμάτων, των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub> και του κόστους καυσίμου του σιδηροδρόμου σε σχέση με την ανταγωνιστική μορφή χερσαίων μεταφορών που είναι τα τουριστικά λεωφορεία (ΚΤΕΛ).

## **1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας**

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και βοηθάει στην κατανόηση του περιεχομένου της, με την παράθεση γενικών στοιχείων σχετικών με την έλξη στο σιδηρόδρομο.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιέχει το θεωρητικό υπόβαθρο των στοιχείων εκείνων που καθορίζουν τη συνολική αντίσταση, τη δύναμη έλξης, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την πρόωση του συρμού αλλά και τη σύνταξη των διαγραμμάτων πορείας.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, την περιγραφή της διαδικασίας συλλογής δεδομένων καθώς και της δημιουργίας της βάσης δεδομένων όλων των στοιχείων που ψηφιοποιήθηκαν.

Το τέταρτο κεφάλαιο παραθέτει αναλυτικά τη διαδικασία ανάπτυξης υπολογιστικού προγράμματος (σε γλώσσα MATLAB), τα αποτελέσματα που παρήγαγε το πρόγραμμα για τους επιλεγμένους συρμούς (διαγράμματα πορείας, ισχύς ανά Χ.Θ. και κατανάλωση ενέργειας) αλλά και τη σύγκριση των κυριότερων αποτελεσμάτων τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των κυριότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και αναφέρονται οι δυνατότητες για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιογραφία.

## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Η έλξη στον σιδηρόδρομο

Αν και ο σιδηρόδρομος αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τρόπους μεταφοράς αγαθών και προσώπων στον ανθρώπινο πολιτισμό τα τελευταία 200 χρόνια, δεν έχει λάβει την ίδια επιστημονική «προσοχή» όπως έχει συμβεί στις άλλες μεθόδους χερσαίων, θαλάσσιων και εναέριων μεταφορών. Πλέον με την έντονη κλιματική κρίση, η οικονομική κοινότητα έχει αντιληφθεί τα προτερήματα του πιο φιλικού για το περιβάλλον και του πιο οικονομικού χερσαίου μέσου μεταφοράς, με αποτέλεσμα να υπάρχει σταθερή αύξηση της κίνησης εμπορευμάτων και προσώπων. Έτσι είναι εμφανές πως ο σιδηρόδρομος έχει κάνει δυναμική επανεμφάνιση στην οικονομική – κοινωνική ζωή του ανθρώπινου πολιτισμού αλλά και στην έρευνα λόγω τις συνεχώς αυξανόμενης σημασίας αυτού.

Στα πρώτα χρόνια του σιδηροδρόμου, οι τότε μηχανικοί και ερευνητές είχαν ρίξει το βάρος στην εξέλιξη του σιδηροδρόμου από ένα πειραματικό, επικίνδυνο και απρόβλεπτο μέσο σε ένα βιώσιμο εμπορικά. Μέχρι το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα ο σιδηρόδρομος είχε μεταμορφωθεί και απέδειξε πως μπορεί να διαδραματίσει έναν σημαντικότερο ρόλο στην οικονομία, έχοντας ως παράδειγμα την ανοικοδόμηση των ΗΠΑ τον εκείνο αιώνα.

Η πρώτη έννοια της Θεωρίας Έλξης υπήρχε από τις πρώτες ημέρες του σιδηροδρόμου, κυρίως με εμπειρική μορφή. Οι τότε μηχανικοί ήταν σε θέση να υπολογίσουν την δυνατότητα εκκίνησης και πορείας ενός συρμού για μια συγκεκριμένη διαδρομή. Συνεχώς παρατηρούσαν αποκλίσεις στους υπολογισμούς τους που ευθύνονταν στις διάφορες αντιστάσεις (κλίσεις, καμπυλότητας, μηχανικές, αεροδυναμικές). Αυτό οδήγησε στην περαιτέρω μελέτη του φαινομένου αυτού που θα αναλυθεί στα παρακάτω κεφάλαια.

Σήμερα, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την έλξη στον σιδηρόδρομο καθώς και τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας. Το 1992 ο Radosavljević πρότεινε μια μέθοδο για τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών έλξης των σιδηροδρομικών οχημάτων με πειραματικά δεδομένα. Οι Jong και Chang, (2005) ανέπτυξαν ένα πρόγραμμα προσομοίωσης σε γλώσσα προγραμματισμού C++ με χρήση του object oriented προγράμματος. Οι Albrecht et al (2006) περιέγραψαν την κίνηση του συρμού με βάση τις κινηματικές εξισώσεις και βαθμονόμησαν τις παραμέτρους (ταχύτητα και επιτάχυνση. Οι Medeossi et al. (2011) χρησιμοποίησαν μια δυναμική εξίσωση για κάθε φάση της κίνησης του συρμού (επιτάχυνση, κίνηση, πέδηση) και προσαρμόζουν τις αντίστοιχες παραμέτρους με δεδομένα από GPS επί των συρμών. Οι Kerman και Goverde (2013) πρότειναν μια μέθοδο για προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο που αναπαριστά τα διαγράμματα πορείας μέσω γραφημάτων που εξελίσσονται δυναμικά κάθε φορά που συλλέγονται νέες πληροφορίες από το πεδίο. Οι Wang et al. (2013) προτείνουν μέθοδο σύνταξης διαγραμμάτων πορείας με τη χρήση



προβλήματος μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Οι Beširović et al. (2013) χρησιμοποίησαν μέθοδο προσομοίωσης που στηρίζεται σε πρόγραμμα βελτιστοποίησης για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων των δυνάμεων των συρμών από δεδομένα πεδίου. Ο Razmjou (2021) ανέπτυξε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB ένα λογισμικό που προσομοιώνει την κίνηση ενός συρμού και μπορεί να υπολογίσει τη ροή ενέργειας σύμφωνα με την κίνηση πολλαπλών συρμών και των χρονοδιαγραμμάτων τους. Οι Havaei και Sandidzadeh (2023) εφάρμοσαν έναν ευρετικό αλγόριθμο (conscious search) για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προφίλ ταχύτητας. Οι Zeng et al. (2024) συνδυάζουν τη Νευτώνεια φυσική αλλά και την εμπειρία ειδικών καθώς και τη χρήση μεγάλων δεδομένων (big data) και προτείνουν μια μέθοδο αυτόματης σύνταξη εικονικών διαγραμμάτων πορείας.

## 2.2 Αντιστάσεις κατά την κίνηση

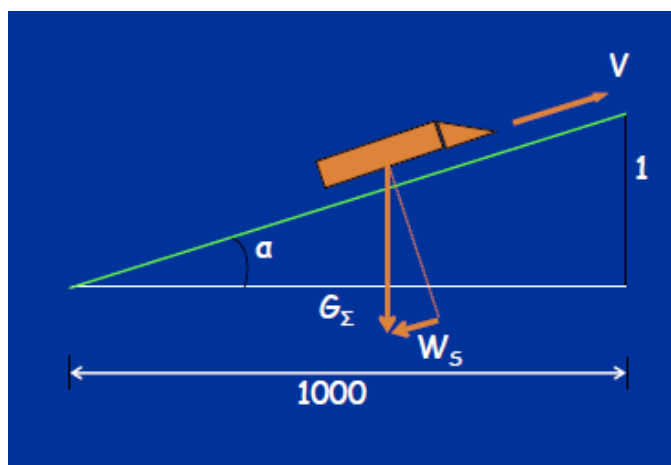
Οι αντιστάσεις μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: σε αυτές που εξαρτώνται από την Σιδηροδρομική Γραμμή (Σ.Γ.) και σε αυτές της κίνησης του συρμού.

### 2.2.1 Αντιστάσεις γραμμής

Πιο αναλυτικά για τις αντιστάσεις της Σ.Γ. :

#### Αντιστάσεις λόγω κλίσης Σ.Γ.

Από την Νευτώνεια φυσική, θεωρώντας την κλίση  $\alpha = \tan \alpha \cong \alpha$ , είναι εύκολος ο υπολογισμός της συνιστώσας του βάρους που αντιστέκεται στην κίνηση από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1. Συνιστώσα Βάρους (Λυμπερίης 2023)

$$W_S = G_Z \frac{s}{1000} [N] \rightarrow w_S = \frac{W_S}{G_Z} = s [N/kN]$$

Εξίσωση 1. Αντίσταση λόγω κλίσης.

όπου:

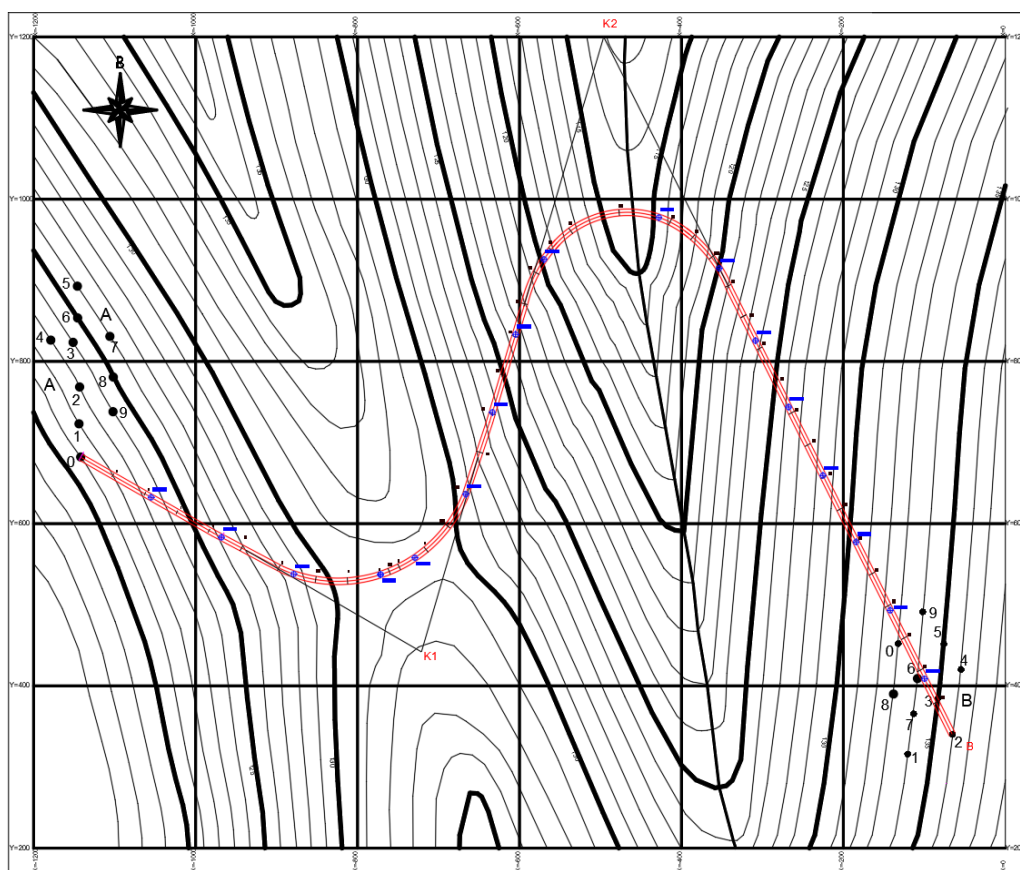
$G_S$  το συνολικό βάρος συρμού [kN]

$s$  η κλίση (‰]

Είναι εμφανές πως η αντίσταση είναι σταθερή ως προς ποσοστό του συνολικού βάρους του συρμού και ίση με το ποσοστό της κλίσης επί τοις χιλίοις.

### Αντίσταση λόγω καμπυλοτήτων

Όπως και στην οδοποιία είναι αναγκαίες οι καμπύλες για την ομαλή αλλαγή της κατεύθυνσης της οδού ή της Σ.Γ. . Καθώς εισέρχεται αλλά και κατά την κίνηση του συρμού εντός της καμπύλης, η φορά του διανύσματος της ταχύτητας κίνησης του συνεχώς αλλάζει. Λόγω της αδράνειας του συρμού, υπάρχει αντίσταση στην αλλαγή αυτής της κινηματικής κατάστασης. Ο παράγοντας που εξαναγκάζει τελικά τον συρμό στην αλλαγή αυτή είναι η αλληλεπίδραση των ονύχων των εξωτερικών τροχών με τη σιδηροτροχιά. Έτσι προκύπτει η επιπλέον αντίσταση.



Εικόνα 2. Παράδειγμα οριζοντιογραφίας οδού (Κόρφας 2020)

Οι διάφοροι Σιδηροδρομικοί Οργανισμοί ανά τον κόσμο και ερευνητές του σιδηροδρόμου, έχουν καταλήξει στο γενικό συμπέρασμα πως η αντίσταση είναι της μορφής:

$$W_R = A * \left(\frac{1}{R}\right)$$

*Εξίσωση 2. Γενική μορφή αντίστασης λόγω καμπυλότητας.*

Όπου το A είναι ένας μεταβαλλόμενος παράγοντας που εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές, ενώ το  $\left(\frac{1}{R}\right)$  που είναι η καμπυλότητα είναι κοινή για όλες τις μεθόδους εκτίμησης των αντιστάσεων λόγω καμπυλότητας.

Πιο αναλυτικά, οι Γαλλικοί Σιδηρόδρομοι έχουν καταλήξει στην σχέση:

$$W_R = G * \frac{800}{R} \quad [N/kN]$$

*Εξίσωση 3. Αντίσταση καμπυλότητας Γαλλικών σιδηροδρόμων.*

Γερμανικοί Σιδηρόδρομοι (τύπος του Frank):

$$W_R = \frac{2\alpha}{R} \left(180 - 1000 \frac{2\alpha}{R}\right) \quad [N/kN]$$

*Εξίσωση 4. Αντίσταση καμπυλότητας Γερμανικών Σιδηροδρόμων για επιβατικούς συρμούς (τύπος του Frank).*

$$W_R = \frac{2\alpha}{R} \left(1800 - 2000 \frac{2\alpha}{R}\right) \quad [N/kN]$$

*Εξίσωση 5. Αντίσταση καμπυλότητας Γερμανικών σιδηροδρόμων για εμπορικούς συρμούς (τύπος του Frank).*

Όπου  $2\alpha$  : διαξόνιο φορέων (m)

R : (m)

Για την επεξεργασία των δεδομένων της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Röckl:

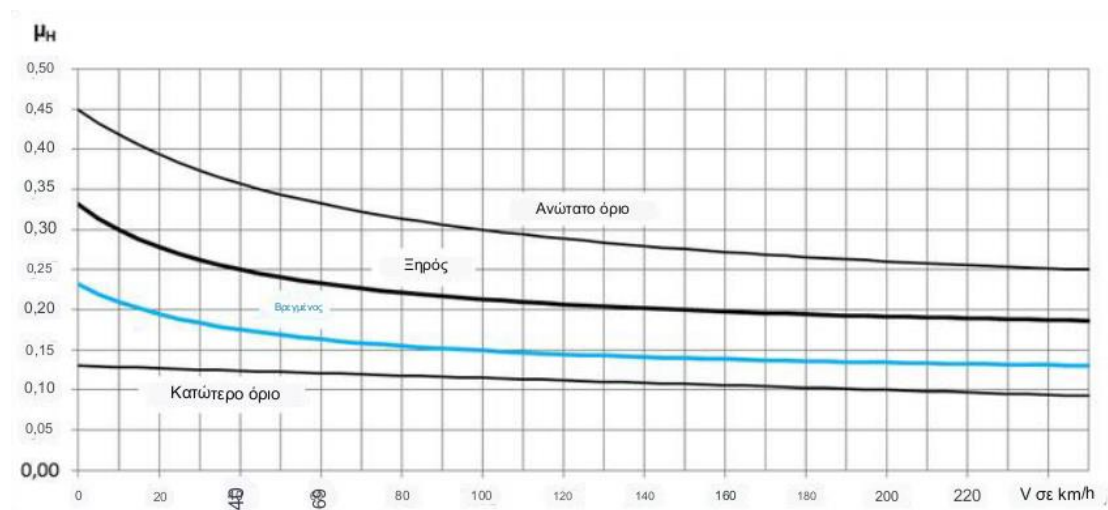
$$W_R = \frac{650}{R - 55} \quad [N/kN], \quad R \geq 350m$$

*Εξίσωση 6. Αντίσταση καμπυλότητας κατά Röckl για ακτίνα μεγαλύτερη ή ίση των 350m .*

$$W_R = \frac{500}{R - 30} \quad [N/kN], \quad R < 350m$$

*Εξίσωση 7. Αντίσταση καμπυλότητας κατά Röckl για ακτίνα μικρότερη 350m .*

Για να μπορέσει ο συρμός να κινηθεί ομαλά, χωρίς να παρατηρείται ολίσθηση των τροχών επί της σιδηροτροχιάς, έπρεπε να προσδιοριστεί με σχετική ακρίβεια ο συντελεστής στατικής τριβής του συστήματος αυτού. Η προσέγγιση αυτή έγινε με τις εμπειρικές σχέσεις των Curtious-Kniffler, οι οποίες δίνουν σημαντική ακρίβεια για ταχύτητες έως 160 km/h.



Εικόνα 3. Συντελεστές στατικής τριβής κατά Curtious-Kniffler (Λυμπερίας, 2023)

Για ξηρή κατάσταση σιδηροτροχιάς, αμμοβολημένη:

$$\mu = 0,161 + \frac{7,5}{V + 44}$$

Εξίσωση 8. Συντελεστής στατικής τριβής για στεγνή και αμμοβολημένη σιδηροτροχιά.

Για υγρή κατάσταση σιδηροτροχιάς, αμμοβολημένη:

$$\mu = 0,130 + \frac{7,5}{V + 44}$$

Εξίσωση 9. Συντελεστής στατικής τριβής για υγρή σιδηροτροχιά.

Για χιόνι – πάγο :

$$0,05 \leq \mu \leq 0,1$$

Με  $V = km/h$

Είναι εμφανές πως σε όλες τις περιπτώσεις διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η ταχύτητα στην τελική τιμή του συντελεστή στατικής τριβής. Επιπλέον επηρεάζουν την τιμή του, οι κλιματολογικές συνθήκες, η ύπαρξη ξένων σωμάτων (π.χ. πτώση φύλλων

πάνω στην Σ.Γ.), η λίπανση της Σ.Γ., το υλικό των επισώτρων των τροχών και χημικοί ρύποι (π.χ. SO<sub>2</sub>).

Για την ασφαλέστερη εξαγωγή αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο η ξηρή κατάσταση σιδηροτροχιάς και αμμοβολημένη.

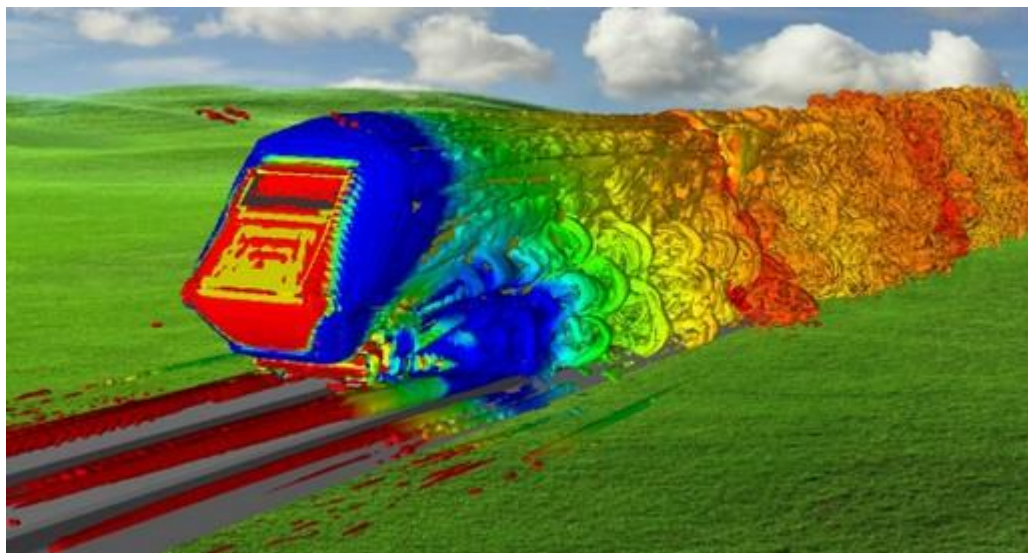
### 2.2.2 Αντιστάσεις κατά την κύλιση

Οι αντιστάσεις κατά την κύλιση χωρίζονται σε:

#### **Μηχανικές Αντιστάσεις**

Οφείλονται στις τριβές που εντοπίζονται στα ένσφαιρα έδρανα περιστροφής (ρουλεμάν), στην λειτουργία των λιποκιβωτίων και σε υδραυλικές απώλειες σε υδραυλικά συστήματα έλξης. Το μέγεθος αυτών προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή με υπολογιστικές μεθόδους και πειραματικές δοκιμές.

#### **Αεροδυναμικές Αντιστάσεις**



Εικόνα 4. Οπτικοποίηση ροής αέρα με χρήση λογισμικού CFD (Baker et. al, 2014)

Κατά την κίνηση του συρμού, ο αέρας συνεχώς αντιστέκεται στην κίνηση του συρμού με το φαινόμενο αυτό να γίνεται ακόμα πιο έντονο όσο η ταχύτητα αυξάνεται. Για αυτό τον λόγο, τα πρώτα χρόνια ύπαρξης του σιδηροδρόμου δεν είχε ληφθεί υπόψη από τους μηχανικούς, καθώς οι ταχύτητες κίνησης ήταν χαμηλές. Με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των ταχυτήτων, το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε καθώς αποτελούσε σημαντικό μέγεθος της αντίστασης κύλισης του συρμού.

Σύμφωνα με την Τεχνική Αναφορά 7664 Federal Railroad Administration 1977, «Resistance of a Freight Train to Forward Motion» (Technical Report 7664, 1977) τα πρώτα πειράματα στις ΗΠΑ για την αεροδυναμική αντίσταση συρμών έγιναν το 1906. Σκοπός τους ήταν να υπολογίσουν την αεροδυναμική αντίσταση ενός συρμού Τραμ. Το 1910 ο καθηγητής Schmidt (Schmidt και Dunn, 1918), δημοσίευσε μια σειρά από εμπειρικές εξισώσεις που περιέγραφαν την αεροδυναμική αντίσταση εμπορικού συρμού για ταχύτητες έως 40mph. Αντίστοιχα το 1913 δημοσιοποιήθηκε από τον Strahl, η δική του εκδοχή, όπως και από τον Davis το 1926 (Davis, 1926) και τον Mukhachev το 1927 και τον Πρωτοπαπαδάκη (Πρωτοπαπαδάκης, 1925). Με την πάροδο των ετών υπήρξαν αρκετές τροποποιήσεις ώστε οι εξισώσεις αυτές να γίνουν πιο ακριβείς.

Πλέον οι περισσότεροι σιδηροδρομικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν την γενική μορφή της εξίσωσης του Davis η οποία είναι η εξής:

$$W_R = A + BV + CV^2$$

*Εξίσωση 10. Γενική μορφή εξίσωσης αντίστασης κύλισης κατά Davis.*

A: Καθορίζεται από τις μηχανικές αντιστάσεις του συρμού και είναι πλήρως ανεξάρτητη από την ταχύτητα κίνησης

B: Καθορίζεται από διάφορους παράγοντες που διαφέρουν από οργανισμό σε οργανισμό. Συνήθως καθορίζεται από τη μάζα του συρμού.

C: Αεροδυναμική αντίσταση.

Σύμφωνα με τον Πυργίδη (Πυργίδης, 2009) η αντίσταση κύλισης είναι:

$$W_R = \lambda M \sqrt{\frac{10}{m}} + 0.01MV + (K_1A + K_2S)V^2 \text{ [daN]}$$

*Εξίσωση 11. Γενική μορφή εξίσωσης αντίστασης κύλισης κατά Πυργίδη.*

$\lambda$  : παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο του τροχαίου υλικού με συνήθεις τιμές από 0,9 έως 1,5

$M$ : μάζα συρμού σε τόνους

$m$  : μάζα αξόνων σε τόνους

$k_1$ : εξαρτάται από την αεροδυναμικότητα του μετώπου του συρμού στην αρχή και στο τέλος του

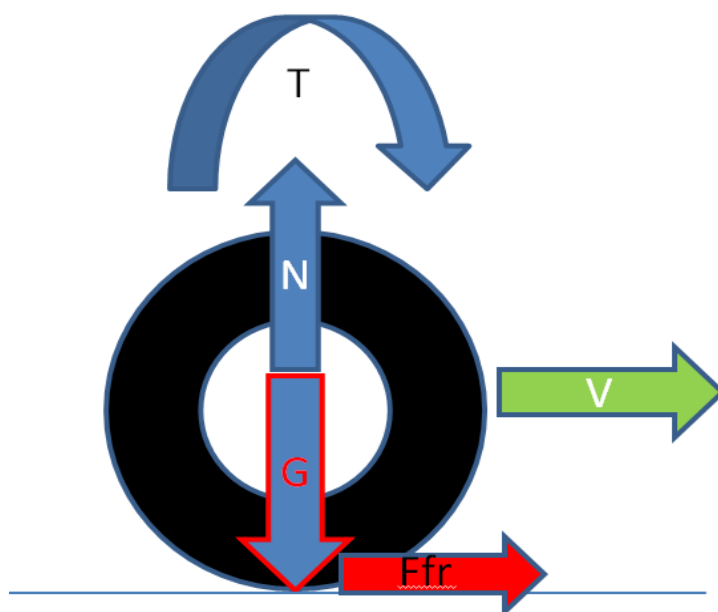
A: εμβαδόν μετώπου σε  $m^2$

$k_2$ : εξαρτάται από την αεροδυναμικότητα των πλαϊνών επιφανειών, της οροφής και του κάτω τμήματος του συρμού,

S: πλευρική επιφάνεια (περίμετρος μετώπου επί μήκος συρμού)

### 2.3 Δύναμη έλξης

Η δύναμη έλξης εξαρτάται από δυο καθοριστικούς παράγοντες. Ο πρώτος είναι στατική τριβή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς. Κάθε ζεύγος σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή, τα οποία δεν έχουν λεία επιφάνεια και στο σύστημα επενεργεί μια δύναμη που τείνει να θέσει σε σχετική κίνηση τα σώματα αυτά, αναπτύσσεται στατική τριβή μέχρις το όριο της μέγιστης στατικής τριβής προτού μετατραπεί σε τριβή ολίσθησης. Σκοπός της θεωρίας έλξης είναι να εκμεταλλεύεται στο σύνολο της η στατική τριβή και να αποφεύγεται η ολίσθηση των κινητήριων αξόνων.



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση στατικής τριβής ( $F_{fr}$ ) μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς.

Η μαθηματική έκφραση της στατικής τριβής είναι:

$$F_{fr} = G * \mu \quad [kN]$$

Εξίσωση 12. Στατική τριβή.

Όπου:

$G$  = η κάθετη δύναμη ως προς την επιφάνεια επαφής  $[kN]$

$\mu$  = συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς

Μελετώντας μακροσκοπικά τον συρμό ως ένα σημειακό σώμα, το σύνολο της τριβής που θα αναπτυχθεί στους κινητήριους άξονες είναι ίσο με:

$$F_{tractive} = G_{Κινητήριων αξόνων} * \mu \quad [kN]$$

*Εξίσωση 13. Συνολική στατική τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ συρμού και σιδηροτροχιάς.*

Ο δεύτερος καθοριστικός παράγοντας είναι η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών κινητήρων του συρμού. Η εξίσωση που περιγράφει την περιστροφική ισχύς είναι ίση με :

$$P = \omega T \quad [kW]$$

*Εξίσωση 14. Περιστροφική ισχύς.*

Όπου:

$$\omega = \eta \text{ γωνιακή ταχύτητα } [rad/sec]$$

$$T = \eta \text{ ροπή στον άξονα περιστροφής } [kNm]$$

Με κατάλληλες αντικαταστάσεις η Εξίσωση 14 μετατρέπεται στην γενική εξίσωση ισχύος.

$$P = \omega T \xrightarrow{T=FR} P = \omega FR \xrightarrow{\omega R=v} P = Fv$$

$$P = Fv \quad [kW]$$

*Εξίσωση 15. Ισχύς.*

$$F = \text{ασκούμενη δύναμη στο σώμα } [kN]$$

$$v = \text{ταχύτητα κέντρου μάζας σώματος } [m/sec]$$

Η παραγόμενη δύναμη έλξης από τους ηλεκτρικού κινητήρες στην περίμετρο των τροχών, προέρχεται από την Εξίσωση 15. Επιπλέον όπως είναι γνωστό στην φυσική, κατά την μετατροπή της ενέργειας από την μια μορφή στην άλλη υπάρχει ένα ποσοστό απωλειών ενέργειας. Στους Η/Κ η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε περιστροφική στο μεγαλύτερο ποσοστό, αλλά ένα τμήμα της καταναλώνεται στις θερμικές απώλειες του Η/Κ.

$$F_{motors} = \frac{P_{el} * n}{v} \quad [kN]$$

*Εξίσωση 16. . Παραγόμενη δύναμη έλξης από τους κινητήριους άξονες.*

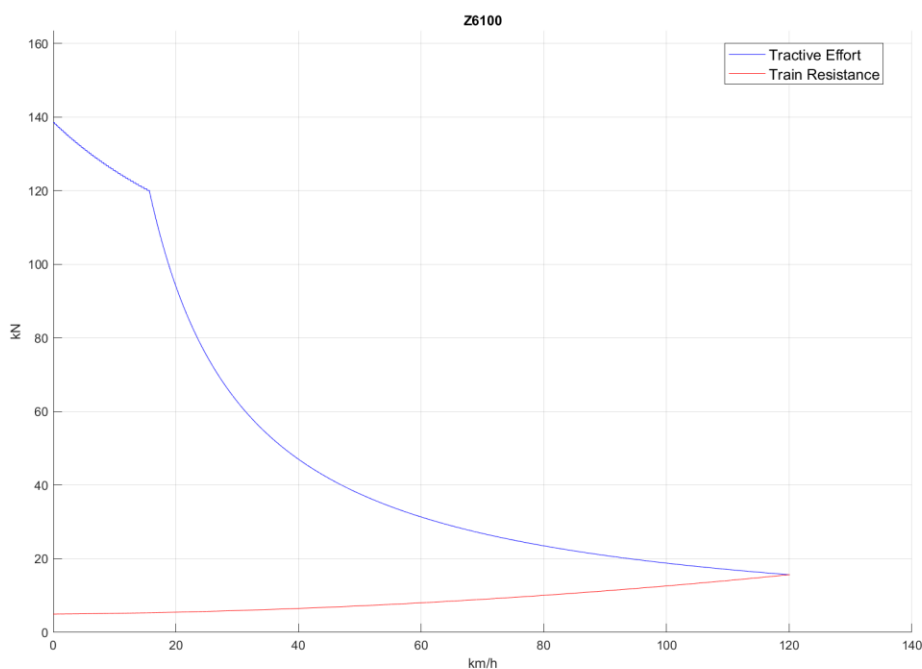
$$F_{motors} = \text{παραγόμενη δύναμη έλξης στην περίμετρο των τροχών } [kN]$$

$$P_{el} = \text{ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα } [kW]$$

$$v = \text{ταχύτητα κέντρου μάζας σώματος } [m/sec]$$



$n =$  βαθμός απόδοσης H/K



Εικόνα 6. Διάγραμμα έλξης ηλεκτράμαζας Z6100.

Κατά την εκκίνηση ενός συρμού καθοριστικό ρόλο στην ελκτική δύναμη διαδραματίζει η στατική τριβή μεταξύ των κινητήριων τροχών και της σιδηροτροχιάς. Αυτό συμβαίνει διότι, η παραγόμενη δύναμη έλξης από τους κινητήριους άξονες είναι πολύ μεγαλύτερη από την ικανότητα πρόσφυσης αυτών. Με την αύξηση της ταχύτητας η παραγόμενη δύναμη έλξης γίνεται μικρότερη της δύναμης πρόσφυσης και πλέον είναι αυτή καθοριστικός παράγοντας. Αυτό είναι εμφανές από την Εικόνα 6, στην οποία από την εκκίνηση έως την ταχύτητα περίπου των 18 km/h υπάρχει ένας κλάδος που αποτυπώνει την ικανότητα πρόσφυσης. Από την ταχύτητα αυτή έως την τελική των 120 km/h διαγράφεται ο δεύτερος κλάδος που εκφράζει την δύναμη έλξης που παράγεται από τους κινητήριους άξονες.

Η δύναμη έλξης κατά την εκκίνηση, μπορεί να αυξηθεί με την αντικατάσταση του υλικού των επισώτρων που θα επιφέρει την αλλαγή του συντελεστή στατικής τριβής ή και με τη χρήση συστήματος άμμου, ώστε να μπορέσει να εκκινήσει ο συρμός ευκολότερα σε συνθήκες χαμηλής πρόσφυσης.

## 2.4 Κατανάλωση ενέργειας

Η ενέργεια ως φυσικό μέγεθος είναι ίση με την ισχύς επί τον χρόνο.

$$E = Fv t \quad [kWs]$$

*Εξίσωση 17. Ενέργεια.*

Όπου:

$E$  = ενέργεια [kWs]

$F$  = ασκούμενη δύναμη στο σώμα [kN]

$v$  = ταχύτητα κέντρου μάζας σώματος [ $m/sec$ ]

$t$  = χρόνος [sec]

Με συνδυασμό των Εξίσωση 16 και Εξίσωση 17 προκύπτει η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την επιτάχυνση και κατά το ρολάρισμα:

$$E_{el,con} = \frac{F_{motors} * v * t}{n} \quad [kWs]$$

*Εξίσωση 18. Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρόωσης.*

Η αναγεννητική πέδηση διαδραματίζει σημαντικό λόγο στην κίνηση του συρμού. Συμβάλει καθοριστικά στην πέδη καθώς χρησιμοποιεί τους Η/Κ, καθώς αυτοί λειτουργούν ως γεννήτριες. Η αλλαγή της λειτουργίας τους, ασκεί ροπή αντίθετη στην περιστροφή των κινητήρων αξόνων. Έτσι η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, η οποία είτε ανατροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο, είτε καταναλώνεται από αντιστάσεις που βρίσκονται επί του συρμού. Πέραν από τα προφανή οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, που υπάρχουν στην περίπτωση που γίνεται ανατροφοδότηση του δικτύου, υπάρχει και ένα πολύ σημαντικό μηχανικό πλεονέκτημα. Αποφεύγεται η χρήση των φρενών τριβής, με αποτέλεσμα την μείωση των αναγκαίων ενεργειών για την συντήρηση. Το τελικό μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά την πέδηση, με τις αναμενόμενες απώλειες κατά την μετατροπή της κινητικής σε ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

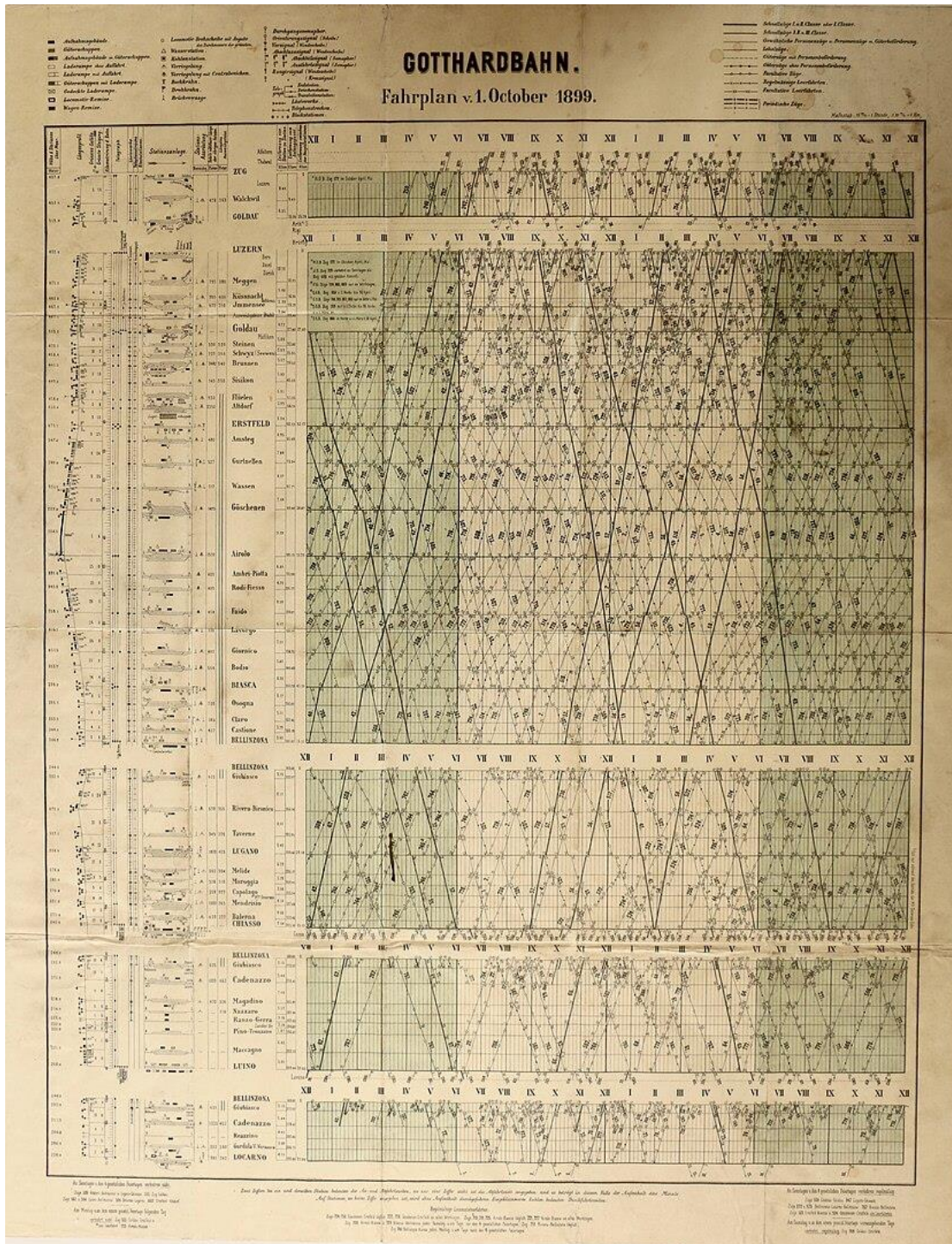
$$E_{el,regen} = F_{motors} * v * t * n \quad [kWs]$$

*Εξίσωση 19. Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την πέδηση.*

## 2.5 Διαγράμματα πορείας

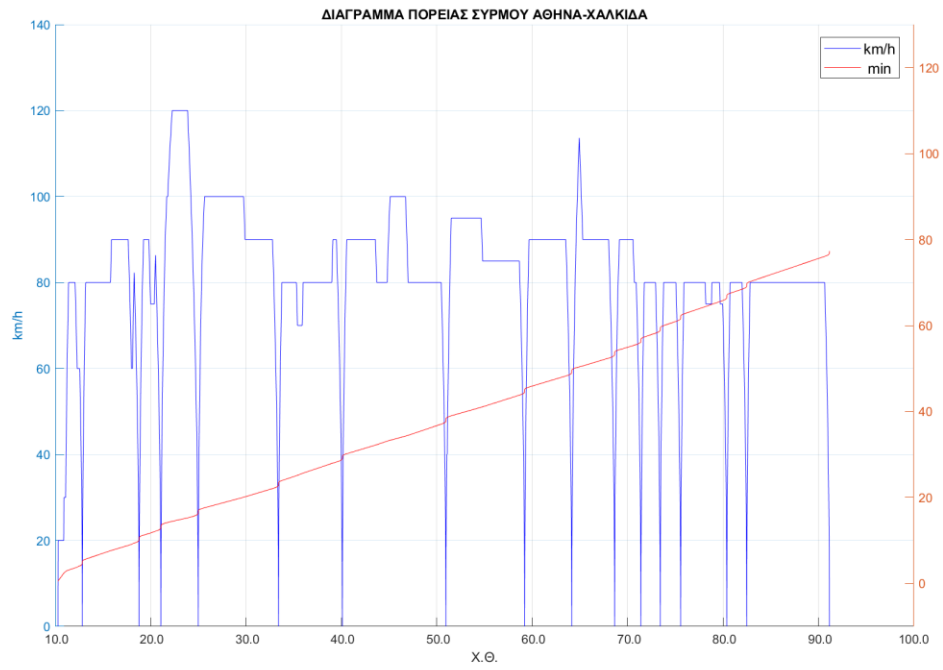
Ο κυριότερος σκοπός της προσομοίωσης σιδηροδρομικού δρομολογίου, είναι η γραφική αναπαράσταση των στοιχείων του χρόνου ως προς την Χ.Θ. . Αυτό είναι απαραίτητο για τον σιδηροδρομικό οργανισμό, καθώς θα είναι σε θέση να παραβάλλει

γραφικά τα δρομολόγια και τους συρμούς που θα τα εκτελούν ώστε να εξασφαλίσει την βέλτιστη κυκλοφορική ικανότητα του δικτύου, σύντομες αναμονές για μετεπιβιβάσεις αλλά και την διαμόρφωση των βαρδιών του προσωπικού των συρμών. Τέλος, από αυτά προκύπτει η πιο σημαντική πληροφορία για το επιβατικό κοινό που είναι οι χρονικές στιγμές διέλευσης των συρμών.



Εικόνα 7. Γραφικό δρομολόγιο ελβετικών σιδηροδρόμων 1899 (πηγή: Wikipedia)

Το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε σε MATLAB, παρουσιάζει εντός του γραφικού δρομολογίου και την ταχύτητα κίνησης του συρμού.



*Εικόνα 8. Ενδεικτικό διάγραμμα πορείας συρμού παραγόμενο από το πρόγραμμα σε MATLAB.*

## 3. Μεθοδολογική Προσέγγιση

### 3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε χωρίστηκε σε δύο διακριτά μέρη. Το πρώτο μέρος ήταν η συλλογή και επεξεργασία των ανελαστικών δεδομένων που αφορούν την Σ.Γ. Το δεύτερο μέρος αφορούσε στην απόκτηση των κινηματικών δεδομένων των συρμών που μελετήθηκαν. Αναλυτικότερα:

1. Στο πρώτο μέρος, αναζητήθηκαν από τον ΟΣΕ στοιχεία της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής για τη διαδρομή Αθήνα - Χαλκίδα. Απαραίτητα στοιχεία ήταν:
  - οι κλίσεις ανά χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.),
  - τα οριζόντια τόξα και οι συναρμογές αυτών της Σ.Γ. ανά Χ.Θ.,
  - οι Χ.Θ. των στάσεων του δρομολογίου και
  - τα ανώτερα όρια ταχύτητας κίνησης των συρμών ανά Χ.Θ.

Μετά από σχετική επικοινωνία με τη Γενική Διεύθυνση Συντήρησης Δικτύου, Έργων & Κυκλοφορίας του ΟΣΕ, επιτράπη η πρόσβαση στα εν λόγω στοιχεία που φυλάσσονταν στη Διεύθυνση Συντήρησης Γραμμής που εδρεύει στον Σ.Σ. Λαρίσης στην Αθήνα. Εκεί εντοπίστηκαν όλα τα ανωτέρω στοιχεία. Αυτά ήταν αποτυπωμένα στα αντίστοιχα σχέδια οριζοντιογραφίας και μηκοτομής.

Μετά τη συλλογή των παραπάνω στοιχείων ακολουθηθήκαν τα εξής βήματα:

1. Έγινε η ψηφιοποίηση των σχεδίων της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής της διαδρομής Αθήνα – Χαλκίδας σε περιβάλλον EXCEL.
  2. Δημιουργήθηκε κώδικας στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος λάμβανε τα ψηφιοποιημένα δεδομένα της Σ.Γ.
  3. Υπολογίστηκε η συνολική αντίσταση της γραμμής ανά 0,01m μήκους γραμμής, ως άθροισμα της αντίστασης λόγω κλίσης ( $W_R$ ) και της αντίστασης λόγω καμπυλότητας ( $W_S$ ). Το μήκος του 0,01m επιλέχθηκε γιατί είναι στο χωρικό διάστημα αυτό, η αλλαγή της κινηματικής κατάστασης είναι πρακτικά αμελητέα και επέτρεψε την ακριβέστερη εκτέλεση του προγράμματος καθώς κατακερμάτισε την γραμμή σε 8,1 εκατομμύρια θέσεις.
  4. Εντοπισμός θέσης ενεργών σιδηροδρομικών σταθμών (Σ.Σ.) και σιδηροδρομικών στάσεων (Σ.ΣΤ.).
  5. Γνωρίζοντας τα όρια ταχύτητας στην Σ.Γ., τα οποία διαφέρουν ανά Χ.Θ., κατασκευάστηκε ένα ψηφιακό αρχείο το οποίο περιείχε το όριο ταχύτητας ανά Χ.Θ. με σταθερό βήμα 0,01m.
  6. Στη συνέχεια το αρχείο της ταχύτητας τροποποιήθηκε καταλλήλως ώστε να έχει συνέπεια ως προς την φυσική (επιτάχυνση - επιβράδυνση), αλλά και τις Χ.Θ. των στάσεων.
2. Στο δεύτερο μέρος, αναζητήθηκαν από τον ΟΣΕ τα ελκτικά στοιχεία των συρμών που εκτελούν τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα (Desiro) και συγκεκριμένα: τα

διαγράμματα έλξης-αντίστασης, τεχνικά χαρακτηριστικά αξόνων κίνησης, τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών ισχύος και διαμόρφωση θέσεων επιβατών.

Λόγω της διάσπασης του Οργανισμού δεν υπήρχαν πλέον στην κυριότητά τους τα στοιχεία αυτά. Αυτά μεταφέρθηκαν στον μετέπειτα χρήστη των συρμών, την Hellenic Train και τη μητρική της Ferrovie Dello Stato. Παρ' όλα αυτά, δεν κατέστη δυνατή η επικοινωνία με την εν λόγω εταιρία αλλά ούτε και με την εταιρία κατασκευής των συρμών.

Με βάση τα παραπάνω, οι συρμοί που επιλέχθηκαν να πραγματοποιήσουν την ψηφιακή προσομοίωση δρομολογίου είναι οι εξής:

- Z6100, SNCF
- BR-423, DB
- British Rail Class 450
- British Rail Class 800
- Siemens Desiro, OSE σειρά 460

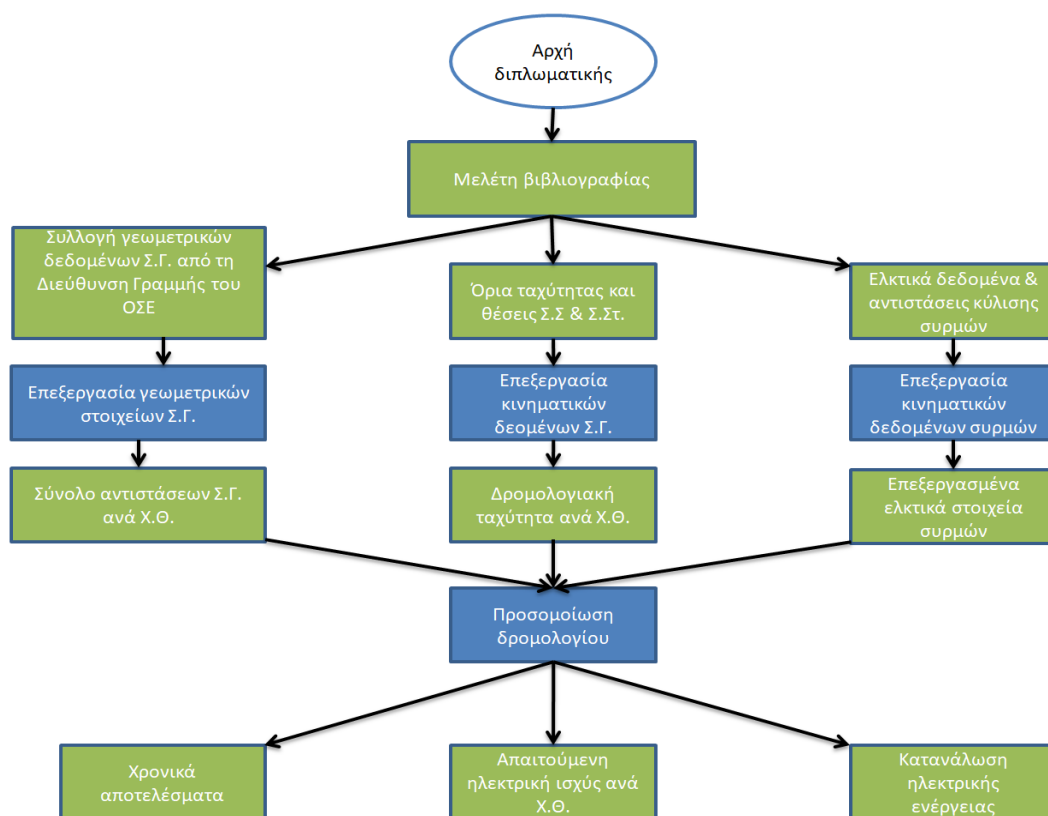
Έτσι, τα παραπάνω δεδομένα αναζητήθηκαν μέσω ανοικτών πηγών του διαδικτύου, δημόσιων δεδομένων από τους κατασκευαστές των συρμών και από το βιβλίο 'Συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών' (Πυργίδης, 2009). Αφορούσαν στη διάταξη των κινητηρίων αξόνων, την συνεχόμενη ισχύς, το βάρος των συρμών και η χωρητικότητα καθημένων επιβατών. Ακολουθήθηκαν, έτσι, τα εξής βήματα:

1. Έγινε ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων έλξης για τους συρμούς που εντοπίστηκαν επαρκή στοιχεία.
2. Τα διαγράμματα αυτά με την χρήση της MATLAB, δημιούργησαν τα τελικά μητρώα Έλξης – Αντίστασης Κίνησης ανά 0,01 km/h.
3. Δημιουργήθηκε κώδικας σε MATLAB όπου λάμβανε το σύνολο των επεξεργασμένων δεδομένων και παρήγαγε τα διαγράμματα πορείας των υπό μελέτη συρμών.
4. Υπολογίστηκε ανά θέση διαδρομής η συνολική αιτούμενη ισχύς κίνησης αλλά και ικανότητα ισχύς πέδησης.
5. Επιπλέον το πρόγραμμα σε MATLAB είχε κατασκευαστεί να παρουσιάσει την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας από τους συρμούς στις εξής περιπτώσεις:
  - Χωρίς ικανότητα ηλεκτρικής υποβοήθησης της πέδης, με το σύνολο της πέδησης να αναλαμβάνεται από τα φρένα τριβής.
  - Με ηλεκτρική υποβοήθηση όπου η πέδηση συνεπικουρείται από του ηλεκτρικούς κινητήρες. Σε αυτή την περίπτωση έγινε η θεώρηση πώς το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας επαναφέρεται στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να μειώνεται το αλγεβρικό άθροισμα της καταναλωμένης ενέργειας.

Τέλος, ο συγκερασμός όλων αυτών των στοιχείων και δεδομένων έγινε με την προαναφερθείσα βιβλιογραφία, γνώσεις κινηματικής, τρόπου λειτουργίας Ηλεκτρικών Κινητήρων και γνώσεις προγραμματισμού. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι γνώσεις

που αποκτήθηκαν κατά τη φοίτηση στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, από τα μαθήματα της Σιδηροδρομικής Τεχνικής και Σχεδιασμού Αστικών Συγκοινωνιών.

Το διάγραμμα ροής της διερεύνησης φαίνεται στην Εικόνα 9. Αρχικά ήταν αναγκαία η μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας για την κατανόηση και εμπάθυνση των γνώσεων της σιδηροδρομικής. Έπειτα, συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα τα οποία ήταν απαραίτητα για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν προγράμματα στη MATLAB για την αρχική επεξεργασία των ανωτέρω δεδομένων, τα οποία παρήγαγαν τα απαραίτητα στοιχεία για το επόμενο στάδιο. Τέλος, κατασκευάστηκε τελικό πρόγραμμα σε MATLAB το οποίο λάμβανε τα επεξεργασμένα δεδομένα και δημιουργούσε τα τελικά αποτελέσματα που και ήταν ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 9. Διάγραμμα ροής διπλωματικής.

## 3.2 Βάση δεδομένων

### 3.2.1 Επιλογή δεδομένων

Το σύνολο των δεδομένων της Σ.Γ. προήλθε από τον ΟΣΕ. Αρχικά τα σχέδια της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής για τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα μελετήθηκαν



για να κατηγοριοποιηθούν δεδομένα τους. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα ενιαίο υπολογιστικό φύλλο στο EXCEL, στο οποίο τοποθετήθηκαν τα δεδομένα, ανά είδος, σε ξεχωριστές καρτέλες (φύλλα του Excel) για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Αυτό αποτέλεσε τη βάση δεδομένων, δηλαδή την ψηφιοποιημένη μορφή των δεδομένων που υπήρχαν στην έντυπη μορφή των σχεδίων της οριζοντογραφίας και μηκοτομής.

1	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΧΘ ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΧΕΤΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΚΛΙΣΕΙΣ	ΜΗΚΗ
2	21+084,81	21+329,39	21+084,81	21+329,39	0	244,58
3	21+329,39	22+105,43	21+329,39	22+105,43	0,0097	776,04
4	22+105,43	22+666,43	22+105,43	22+666,43	0,01139	561
5	22+666,43	22+906,43	22+666,43	22+906,43	0,01113	240
6	22+906,43	23+296,09	22+906,43	23+296,09	0,01129	389,66
7	23+296,09	23+853,63	23+296,09	23+853,63	0,0158	557,54
8	23+853,63	24+893,97	23+853,63	24+893,97	0,016	1040,3
9	24+893,97	25+114,57	24+893,97	25+114,57	0,0025	220,6
10	25+114,57	25+675,35	25+114,57	25+675,35	0,016	560,78
11	25+675,35	25+829,44	25+675,35	25+829,44	0,01382	154,09
12	25+829,44	28+057,70	25+829,44	28+057,70	0,016	2228,3
13	28+057,70	28+218,32	28+057,70	28+218,32	0,01407	160,62
14	28+218,32	28+699,07	28+218,32	28+699,07	0,01541	480,75
15	28+699,07	28+922,37	28+699,07	28+922,37	0,015	223,3
16	28+922,37	29+051,96	28+922,37	29+051,96	0,016	129,59
17	29+051,96	29+404,81	29+051,96	29+404,81	0,0149	352,85
18	29+404,81	29+675,44	29+404,81	29+675,44	0,016	270,63
19	29+675,44	29+944,46	29+675,44	29+944,46	0,01487	269,02
20	29+944,46	30+306,14	29+944,46	30+306,14	0,01526	361,68
21	30+306,14	30+425,42	30+306,14	30+425,42	0,0145	119,28
22	30+425,42	32+300,20	30+425,42	32+300,20	0,016	1874,8
23	32+300,20	32+923,82	32+300,20	32+923,82	0,0149	623,62
24	32+923,82	33+223,31	32+923,82	33+223,31	0,016	299,49
25	33+223,31	33+506,71	33+223,31	33+506,71	0	283,4
26	33+506,71	33+678,37	33+506,71	33+678,37	-0,0148	171,66
27	33+678,37	33+872,37	33+678,37	33+872,37	-0,0152	194
28	33+872,37	34+212,37	33+872,37	34+212,37	-0,0161	340
29	34+212,37	34+612,37	34+212,37	34+612,37	-0,01442	400
30	34+612,37	34+912,37	34+612,37	34+912,37	-0,0136	300
31	34+912,37	35+172,37	34+912,37	35+172,37	-0,0148	260
32	35+172,37	35+272,37	35+172,37	35+272,37	-0,014	100
33	35+272,37	35+522,37	35+272,37	35+522,37	-0,01512	250
34	35+522,37	35+852,37	35+522,37	35+852,37	-0,015	330
35	35+852,37	35+942,37	35+852,37	35+942,37	-0,01138	90
36	35+942,37	36+102,37	35+942,37	36+102,37	-0,01282	160
37	36+102,37	36+302,37	36+102,37	36+302,37	-0,01375	200
38	36+302,37	36+402,37	36+302,37	36+402,37	-0,016	100
39	36+402,37	36+552,37	36+402,37	36+552,37	0,01544	250

Εικόνα 10. Απόσπασμα βασικού πίνακα ψηφιοποιημένων δεδομένων της οριζοντογραφίας, μηκοτομής, στάσεων και ταχυτήτων

Η παραπάνω εικόνα αποτελεί ενδεικτικό απόσπασμα της διάρθρωσης του EXCEL. Η βασική προγραμματιστική αρχή του ήταν ο σεβασμός της χιλιομετρικής αρίθμησης. Τα δεδομένα τοποθετήθηκαν ανά κατηγορία σε ξεχωριστές καρτέλες, με την λογική των ομοειδών τμημάτων. Οι καρτέλες αυτές είναι :

- Καρτέλα "Κλίσεις" στο οποίο περιλαμβάνονται τα διαστήματα σταθερής κλίσης της Σ.Γ. .

- Καρτέλα "R" στο οποίο περιλαμβάνονται τα διαστήματα ευθυγραμμίων, των οριζόντιων κυκλικών τόξων αλλά και των υπερυψώσεων.
- Καρτέλα "Τόξα κατακόρυφα" με το σύνολο των κατακόρυφων τόξων συναρμογής στα σημεία που υπάρχουν.
- Καρτέλα "Στάσεων" στο οποίο περιλαμβάνονται οι Χ.Θ. των στάσεων και των σταθμών.
- Καρτέλες "V ΟΔΗΓ ΠΡΟΣ ΧΑΛΚΙΔΑ" που περιλαμβάνουν τα διαστήματα με ένα συγκεκριμένο όριο ταχύτητας κίνησης ανά Χ.Θ. και ανά κατεύθυνση, στην συγκεκριμένη περίπτωση για το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα.
- Καρτέλες "V ΟΔΗΓ ΠΡΟΣ ΑΘΗΝΑ" που περιλαμβάνουν τα διαστήματα με ένα συγκεκριμένο όριο ταχύτητας κίνησης ανά Χ.Θ. και ανά κατεύθυνση, στην συγκεκριμένη περίπτωση για το δρομολόγιο Χαλκίδα- Αθήνα.

Αναλυτικότερα σε κάθε εγγραφή υπάρχει:

- η χιλιομετρική θέση αρχής,
- η χιλιομετρική θέση τέλους και
- το μέγεθος της αντίστοιχης μεταβλητής (ταχύτητα, κλίση, καμπυλότητα).

Παραδείγματος χάριν στην παραπάνω εικόνα εντοπίζοντας την τρίτη σειρά εγγραφής, είναι φανερό πως από την Χ.Θ. 21+329,39 έως την Χ.Θ. 22+105,43 πως η κλίση είναι σταθερή ανοδική με τιμή 9,7‰. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε με όμοιο τρόπο και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστήκα δεδομένα της Σ.Γ. .

Η Εικόνα 10 αποτελεί τη βάση δεδομένων με όλα τα στοιχεία των έντυπων σχεδίων. Όμως, για την εκτέλεση του προγράμματος σε MATLAB, ο βασικός αυτός πίνακας συμπυκνώθηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα και στοιχεία που είναι απολύτως απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος. Έτσι, λοιπόν, η τελική μορφή του πίνακα περιλαμβάνει τις εξής καρτέλες (Εικόνα 11):

- Καρτέλα «I» Μητρώο κλίσεων και κατακόρυφων συναρμογών
- Καρτέλα «R» Μητρώο οριζοντιογραφικών δεδομένων
- Καρτέλες «ATH-CLH-V» & «& CLH-ATH-V» Μητρώο μέγιστων επιτρεπτών ταχυτήτων δρομολογίων
- Καρτέλες «ATH-CLH-ST» Μητρώο Χ.Θ. στάσεων διαδρομής

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΑΡΧΗ Α	ΑΡΧΗ L	γ	ΚΑΜΠΥΛΕΣ R	ΜΗΚΟΣ L	ΤΕΛΟΣ Α	ΤΕΛΟΣ L
2	10348,45	10918	0	0	0	0	569,55	0	0
3	10918	11222,5	0	64	185,2	1040	176,5	0	64
4	11222,5	11587,5	0	0	0	0	365	0	0
5	11587,5	11662	0	35	-197,9	1000	4,5	0	35
6	11662	11931	0	0	0	0	269	0	0
7	11931	12334	0	100	-175,2	775	203	0	100
8	12334	12397	0	0	0	0	63	0	0
9	12397	12461,92	0	0	199,17	5000	64,92	0	0
10	12461,92	12500	0	0	0	0	38,08	0	0
11	12500	12600	0	0	196,75	0	100	0	0
12	12600	12651	0	0	199,33	5000	51	0	0
13	12651	12775,25	0	0		0	124,25	0	0
14	12775,25	12840	0	0	-199,2	5000	64,75	0	0
15	12840	12929,52	0	0	0	0	89,52	0	0
16	12929,52	13165,5	0	65	178,04	498	105,98	0	65
17	13165,5	13534	0	0	0	0	368,5	0	0
18	13534	13680,5	0	45	191,88	800	56,5	0	45
19	13680,5	14403,66	0	0	0	0	723,16	0	0
20	14403,66	14692,5	0	65	171,36	500	158,84	0	65
21	14692,5	15371,27	0	0	0	0	678,77	0	0
22	15371,27	15624,5	0	55	-176	500	143,23	0	55
23	15624,5	15701,5	0	0	0	0	77	0	0
24	15701,5	15962	0	45	186,34	1000	170,5	0	45
25	15962	16344,47	0	0	0	0	382,47	0	0
26	16344,47	16692,5	0	70	-182,5	1000	208,03	0	70
27	16692,5	18142,04	0	0	0	0	1449,54	0	0
28	18142,04	18456	0	45	178,51	800	223,96	0	45
29	18456	18622,39	0	0	0	0	166,39	0	0
30	18622,39	18817	0	60	-189,3	800	74,61	0	60
31	18817	18915	0	0	0	0	98	0	0
32	18915	19600	0	60	-149	785	565	0	60
33	19600	19691,67	0	0	0	0	91,67	0	0
34	19691,67	19946	0	50	184,91	800	154,33	0	50
35	19946	19986,88	0	0	0	0	40,88	0	0
36	19986,88	20448	0	70	115,84	302	321,12	0	70
37	20448	20657,85	0	0	0	0	209,85	0	0
38	20657,85	20994	0	60	170,92	600	216,15	0	60
39	20994	21421,49	0	0	0	0	427,49	0	0
40	21421,49	21809,4	0	80	-160,8	500	227,91	0	80
41	21809,4	23296,09	0	0	0	0	1486,69	0	0
42	23296,09	23430,21	0	60	-195,2	1000	14,12	0	60
43	23430,21	24717,06	0	0	0	0	1286,85	0	0
44	24717,06	24732,56	0	0	-199,9	1000	15,5	0	0
45	24732,56	25249,32	0	0	0	0	516,76	0	0
46	25249,32	25408,28	0	60	193,7	1000	38,96	0	60

Εικόνα 11. Τελικές καρτέλες μητρώων δεδομένων.

Αντίστοιχα για τους συρμούς, τα δεδομένα τοποθετήθηκαν κατευθείαν σε κώδικα MATLAB, ώστε να κατασκευαστούν τα ψηφιακά μητρώα Έλξης-Αντίστασης Κύλισης (Εικόνα 12).

```

Train_Manual.m x +
1 -   |clc;
2 -   clear all;
3 -   close all;
4 -   tic;
5 -   file_name='test.xlsx';
6 -   start= 10300;
7 -   finish = 91150;
8 -   vima = 0.01;
9 -   tmima = 1000000;      %ΤΜΗΜΑ 10000Μ/0,01 (ΒΗΜΑ)
10 -  viz = 'off';
11 -  margin = 0.001;
12
13   %για tin prosyhiki staseon ston kodika ton dromologivon
14 -  sheet_name = 'ATH-CLH-ST';
15 -  columns = 'A:B ';
16 -  range='A2:B600';
17
18 -  Name = 'Desiro';
19 -  mpass = 0.075;
20 -  n = 0.9;
21 -  Vmax = 160.1;
22 -  mass = 185;
23 -  L = 89.3;
24 -  H = 4.2;
25 -  W = 2.8;
26 -  axletot = 12;
27 -  axlepov = 8;
28 -  maxle = 1;
29 -  powcont = 3840;

```

Εικόνα 12. Τμήμα (απόσπασμα) κώδικα MATLAB για τα δεδομένα της ηλεκτράμαξας Siemens Desiro.

### 3.2.2 Επιλογή μεταβλητών

Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για την περάτωση της προσομοίωσης δρομολογίου ήταν εξής:

- Ξηρή κατάσταση σιδηροτροχιάς
- Επιτάχυνση
- Επιβράδυνση
- Μέσος χρόνος παραμονής σε στάση 30 sec
- Βαθμός απόδοσης συστήματος ηλεκτρικής ισχύος για ηλεκτράμαξες κατασκευής πρότερης του 2000, n=0.85
- Βαθμός απόδοσης συστήματος ηλεκτρικής ισχύος για ηλεκτράμαξες κατασκευής μεταγενέστερης του 2000, n=0.9

## 4. Ανάλυση και Αποτελέσματα

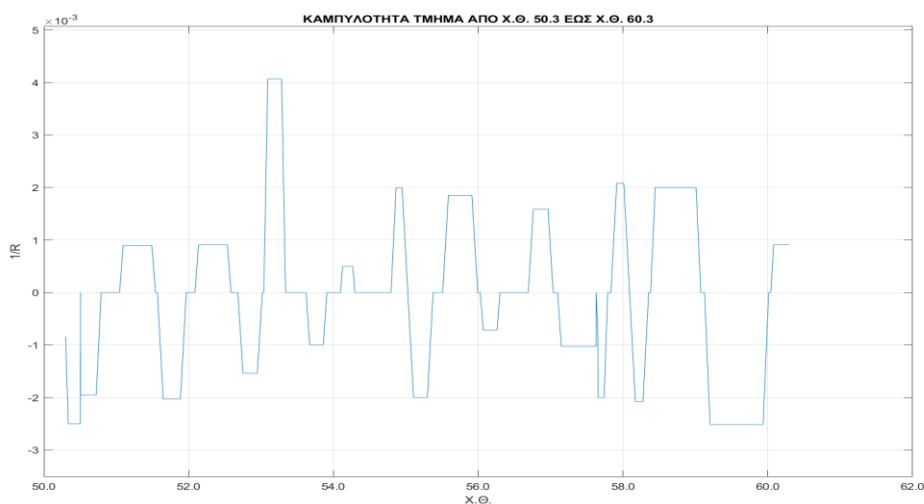
Το Κεφάλαιο αυτό παραθέτει αναλυτικά τη διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου καθώς και τα αποτελέσματα της διερεύνησης. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 4.1 περιγράφεται το μοντέλο για την εύρεση των αντιστάσεων της γραμμής για τις διαδρομές Αθήνα-Χαλκίδα και Χαλκίδα-Αθήνα. Στο κεφάλαιο 4.2. παρατίθενται τα αποτελέσματα από τα διαγράμματα πορείας για τους συρμούς που έχουν επιλεγεί. Στο κεφάλαιο 4.3 γίνεται η παράθεση των χρονικών δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση των δρομολογίων και η σύγκριση αυτών με το εν ενεργεία δρομολόγιο της Hellenic Train. Τέλος στο κεφάλαιο 4.4 πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών CO<sub>2</sub>, του ενεργειακού κόστους μεταξύ των συρμών και του λεωφορείου που εκτελεί το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα-Αθήνα.

### 4.1 Ανάπτυξη μοντέλου και αποτελέσματα για αντιστάσεις γραμμής

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.1, αρχικά έγινε ψηφιοποίηση των σχεδίων της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής της διαδρομής Αθήνα – Χαλκίδας, σε περιβάλλον EXCEL.

Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε σε δύο διακριτές ενότητες, αυτή των δεδομένων και σε αυτή των μεταβλητών. Αρχικά με χρήση κώδικα MATLAB αποθηκεύτηκαν στην μνήμη του υπολογιστή ξεχωριστοί πίνακες, που περιείχαν τα δεδομένα της γραμμής. Έπειτα με χρήση αλγόριθμου, έγινε ανάπτυξη των πινάκων. Αναλυτικότερα, οι πίνακες δεδομένων είχαν μεταξύ τους διαφορετικές διαστάσεις ως προς τις γραμμές τους (κάθε γραμμή αποτελεί μια εγγραφή γεγονότος). Για να καταστεί δυνατή η επεξεργασία τους, έπρεπε να αποκτήσουν τον ίδιο αριθμό στηλών.

Για το λόγο αυτόν, θεωρήθηκε μία κοινή αρχική Χ.Θ., ένα σταθερό βήμα μεγέθους 0,01m και μία κοινή τελική Χ.Θ. Κατά την κατασκευή αυτών, δόθηκε μεγάλη προσοχή στις συννοριακές τιμές στις περιοχές αλλαγής γεγονότων, σεβόμενοι τους περιορισμούς Νέου Γενικού Κανονισμού Επιδομής (Νέος Γενικός Κανονισμός Επιδομής ΝΓΕΚ, 2000) και της βιβλιογραφίας που έχει αναφερθεί. Έτσι έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε τα αποτελέσματα τους να διαθέτουν λογική συνέπεια. Επί παραδείγματι στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η καμπυλότητα  $\frac{1}{R}$  της Σ.Γ. στο τμήμα από Χ.Θ. 50+000,00 έως Χ.Θ. 60+000,00.



Εικόνα 13. Παραγόμενο γράφημα Καμπυλότητας-Χ.Θ. από MATLAB .

Στην εικόνα αυτή, ο οριζόντιος άξονας αφορά την Χ.Θ. και ο κατακόρυφος το μέγεθος της καμπυλότητας  $\frac{1}{R}$  . Η λογική αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία όλων των υπόλοιπων πινάκων.

Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η εκτέλεση της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης της γραμμής.

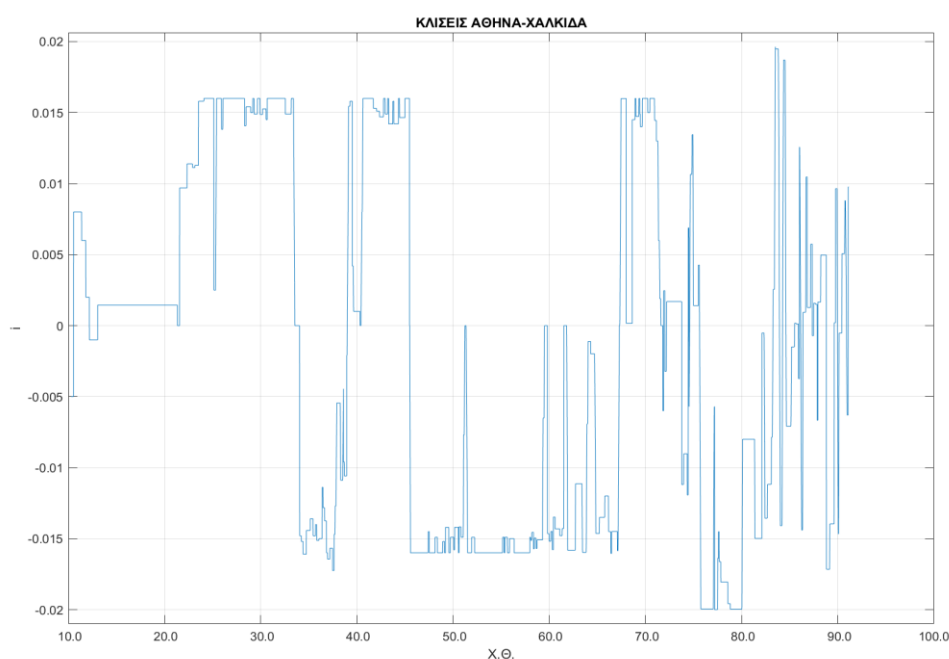
### Μητρώα Κλίσεων ( $W_R$ )

Τα δεδομένα των κλίσεων προήλθαν από τα σχέδια των μηκοτομών της Σ.Γ. Σε αυτά υπήρχε αναλυτική αναγραφή των διαστημάτων με σταθερή κλίση, την αρχή, το μέσον και το πέρας των κατακόρυφων τόξων συναρμογής αλλά και των χαρακτηριστικών στοιχείων αυτών.

ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΚΛΙΣΕΙΣ	ΜΗΚΗ	R	T	FOR A	s2
10200	10540	-0,005	340				
10540	11380	0,008	840				
11380	11820	0,006	440				
11820	12180	0,002	360				
12180	13050	-0,001	870				
13050	21329,39	0,00145	8279,39				
21329,39	21573,97	0	244,58				
21573,97	22350,01	0,0097	776,04				
22350,01	22911,01	0,01139	561				
22911,01	23151,01	0,01113	240				
23151,01	23540,67	0,01129	389,66				
23540,67	24098,21	0,0158	557,54				
24098,21	25138,55	0,016	1040,34				
25138,55	25311,9	0,0025	173,35				
25311,9	25406,4	0,0025	94,5	7000	47,25	1	0,016
25406,4	25909,03	0,016	502,63				
25909,03	25930,83	0,016	21,8	10000	10,9	-1	0,01382
25930,83	26063,12	0,01382	132,29				
26063,12	26084,92	0,01382	21,8	10000	10,9	1	0,016

Εικόνα 14. Απόσπασμα μητρώου κλίσεων EXCEL.

Ο αλγόριθμος, κατά την εκτέλεση του, διαχώριζε τα τμήματα σταθερής κλίσης από τις μεταβατικές περιοχές στα σημεία αλλαγής κλίσεων. Για τα σταθερά τμήματα, πραγματοποίησε εγγραφές γεγονότων από την ΧΘ της αρχής του τμήματος σταθερής κλίσης έως στην τελική Χ.Θ. του, με σταθερό βήμα 0,01m και την κλίση αυτού. Επιπλέον για τις περιοχές που υπήρχαν κατακόρυφα τόξα συναρμογής, έγινε η εφαρμογή τους όπως ορίζει η βιβλιογραφία. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάστηκε ο πρώτος πίνακας επεξεργασμένων, ο οποίος σέβεται την αρχική απαίτηση της κατασκευής πινάκων με τον ίδιο αριθμό στηλών. Τα στοιχεία αυτά αποθηκευτήκαν στην μνήμη του υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία τους αλλά και παράχθηκαν γραφήματα απεικόνισης αυτών.



Εικόνα 15. Παραγόμενο γράφημα κλίσεων διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα ανά Χ.Θ.

Η παραπάνω εικόνα είναι η γραφική αναπαράσταση του παραγόμενου πίνακα. Αυτός είναι αποθηκευμένος στη μνήμη του υπολογιστή και για να μπορεί να γίνει εκτίμηση της ορθότητας των αποτελεσμάτων, καθώς αυτός διαθέτει πάνω από 8 εκατομμύρια στήλες, κατασκευάζεται το παραπάνω γράφημα. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε και για τα υπόλοιπα παραγόμενα μητρώα.

### Μητρώα Καμπυλοτήτων ( $W_s$ )

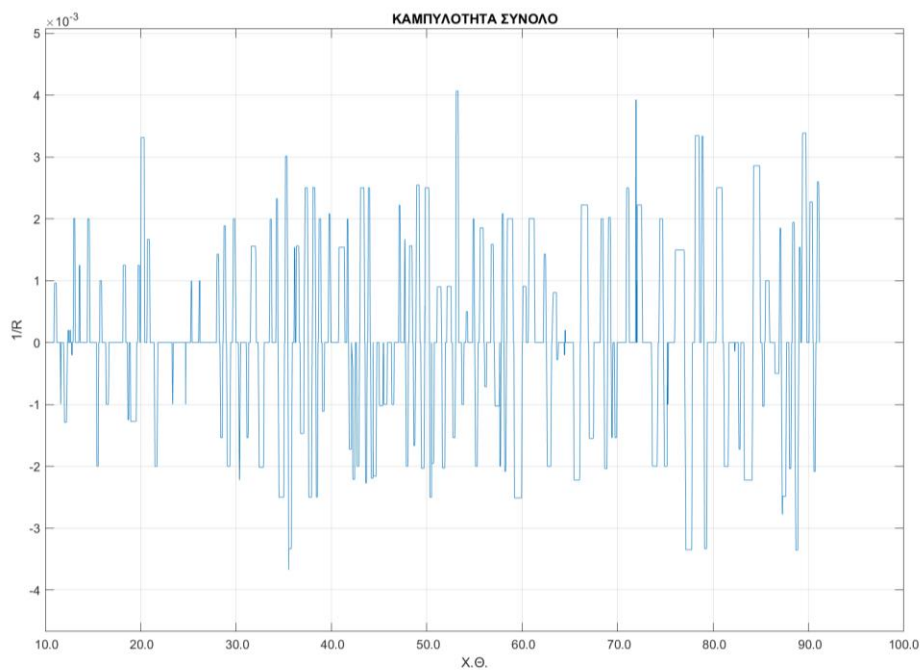
Σε αυτόν καταγράφηκαν τα δεδομένα που αφορούν τις ευθυγραμμίες, κυκλικά τόξα και την συναρμογή αυτών. Ο αλγόριθμος με όμοιο τρόπο όπως και στην κατασκευή του πίνακα των κλίσεων, διαχώρισε τα διακριτά τμήματα. Το πρώτο από αυτά ήταν οι ευθυγραμμίες, στις οποίες  $R = \infty \rightarrow \frac{1}{R} = 0$ . Το δεύτερο σταθερό τμήμα ήταν τα

κυκλικά τόξα όπου υπήρχε σταθερή  $R$  και σταθερή  $\frac{1}{R}$ . Το τελευταίο τμήμα ήταν τα σημεία της συναρμογής των ευθυγραμμίων με τα κυκλικά τόξα. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία αλλά και του ΝΕΓΕΚ, μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικής καμπύλης, η καμπυλότητα  $\frac{1}{R}$  πρέπει να μεταβάλλεται γραμμικά από την αρχική μηδενική τιμή της μέχρι την τελική τιμή της. Όμοια για διαδοχικές καμπύλες υπάρχει γραμμική μεταβολή της καμπυλότητας.

Τέλος τα παραγόμενα δεδομένα των καμπυλοτήτων αποθηκεύτηκαν στη μνήμη του υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

1	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΧΘ ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΡΧΗΣ	ΧΘ ΣΧΕΤΙΚΗ ΤΕΛΟΥΣ	ΑΡΧΗ Α	ΑΡΧΗ Λ	γ	ΚΑΜΠΥΛΕΣ R	ΜΗΚΟΣ L	ΤΕΛΟΣ Α	ΤΕΛΟΣ Λ	ΟΝΟΜΑ	V(km/h)	h(mm)	ΦΟΡΑ(R-L-N)
186	66+936,97	66+968,29	66+936,97	66+968,29	0	0	0	0	31,32	0	0				0
187	66+968,29	67+526,63	66+968,29	67+526,63	0	60	-150,81	645	438,34	0	60	K108	100	125	-1
188	67+526,63	68+195,47	67+526,63	68+195,47	0	0	0	0	668,84	0	0				0
189	68+195,47	68+543,96	68+195,47	68+543,96	0	65	163,9	500	218,49	0	65	K109	90	130	1
190	68+543,96	68+570,85	68+543,96	68+570,85	0	0	0	0	26,89	0	0				0
191	68+570,85	68+951,39	68+570,85	68+951,39	0	70	-159,88	490	240,54	0	70	K110	90	130	-1
192	68+951,39	68+980,18	68+951,39	68+980,18	0	0	0	0	28,79	0	0				0
193	68+980,18	69+299,64	68+980,18	69+299,64	0	65	162,27	495	189,46	0	65	K111	90	130	1
194	69+299,64	69+322,02	69+299,64	69+322,02	0	0	0	0	22,38	0	0				0
195	69+322,02	69+515,92	69+322,02	69+515,92	0	65	-187,37	650	63,90	0	65	K112	96	110	-1
196	69+515,92	69+659,30	69+515,92	69+659,30	0	0	0	0	143,38	0	0				0
197	69+659,30	69+957,97	69+659,30	69+957,97	0	65	-177,11	650	168,67	0	65	K113	100	125	-1
198	69+957,97	70+877,30	69+957,97	70+877,30	0	0	0	0	919,33	0	0				0
199	70+877,30	71+242,90	70+877,30	71+242,90	0	80	154,54	400	205,60	0	80	K114	85	145	1
200	71+242,90	71+892,40	0+000,00	0+649,50	0	0	0	0	649,50	0	0				0
201	71+892,40	71+963,74	0+649,50	0+720,84	71,414	20	15,24	255	51,34	0	0	K1	45	45	1
202	71+963,74	72+003,14	0+720,84	0+760,24	0	0	2,51	1000	39,40	0	0	K1A	65	35	1
203	72+003,14	72+063,14	0+760,24	0+820,24	0	0	0	0	60,00	0	0				0
204	72+063,14	72+621,49	0+820,24	1+378,59	0	0	71,67	450	453,35	217,37	105	K2	80	75	1
205	72+621,49	73+543,30	1+378,59	2+300,40	0	0	0	0	921,81	0	0				0
206	73+543,30	74+248,65	2+300,40	3+005,75	223,72	100	-77,13	500,5	505,35	223,72	100	K3	100	140	-1
207	74+248,65	74+328,65	3+005,75	3+085,75	0	0	0	0	80,00	0	0				0
208	74+328,65	74+810,51	3+085,75	3+567,61	217,94	95	49,37	500	291,86	217,94	95	K4	100	135	1

Εικόνα 16. Υπολογιστικό φύλλο EXCEL για τα οριζοντιογραφικά δεδομένα.



Εικόνα 17. Γράφημα καμπυλότητας στο σύνολο της διαδρομής.



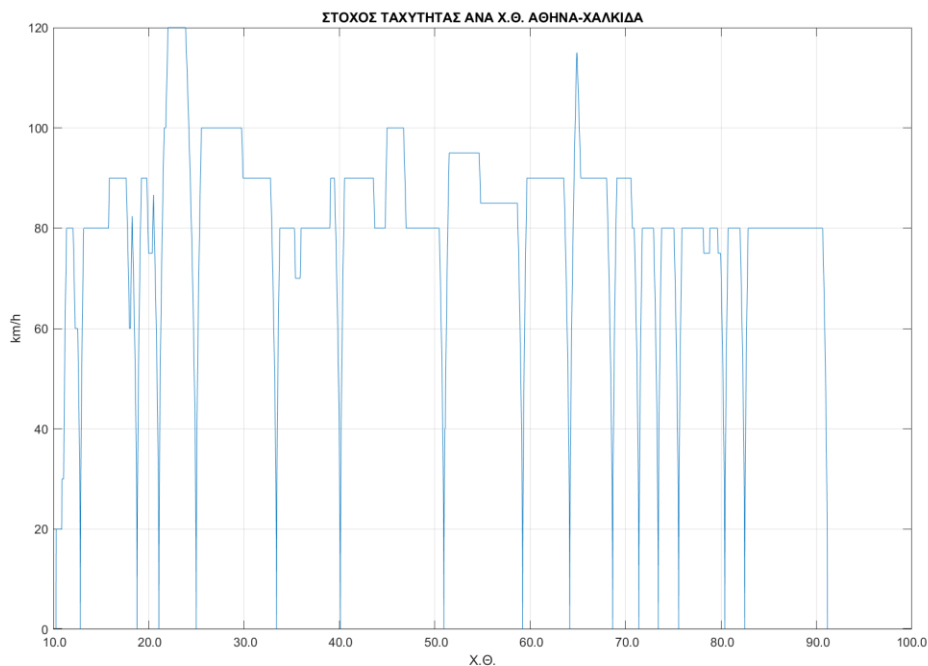
## **Μητρώα Στάσεων**

Σε αυτήν την καρτέλα καταγράφηκαν οι ενεργές σιδηροδρομικές στάσεις, η αρχική ΧΘ και τελική ΧΘ των πλατφορμών.

## **Μητρώα Ταχυτήτων**

Οι τιμές των ταχυτήτων αφορούν τις μέγιστες ταχύτητες που επιτρέπεται να αναπτύξουν οι μηχανοδηγοί. Αυτές καθορίζονται από την γραμμή, τις κυκλοφοριακές και τον χρονοπρογραμματισμό των δρομολογίων. Οι έκτακτες βραδυπορίες που συνέβησαν κατά την περίοδο μελέτης δεν ελήφθησαν υπό όψη λόγω ότι δεν αποτελούν παγιωμένα χαρακτηριστικά του δικτύου.

Ο αλγόριθμος αντλούσε δεδομένα από το Μητρώο μέγιστων επιτρεπτών ταχυτήτων, το Μητρώο στάσεων (έτσι όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.1) αλλά και λάμβανε τις μεταβλητές των επιταχύνσεων-επιβραδύνσεων (Κεφάλαιο 3.2.2). Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν ώστε, να περιγραφεί η κίνηση ενός ιδεατού συρμού ο οποίος θα επιτάχυνε με  $0,7 \left[ \frac{m}{sec^2} \right]$  και θα επιβράδυνε με  $0,5 \left[ \frac{m}{sec^2} \right]$ . Η συνεχής επιτάχυνση με  $0,7 \left[ \frac{m}{sec^2} \right]$  είναι αδύνατη για έναν πραγματικό συρμό, καθώς η δύναμη έλξης συνεχώς μειώνεται ενώ η αντίσταση κύλισης συνεχώς αυξάνεται, οπότε η επιτάχυνση μειώνεται και αυτή έως την τελική ταχύτητα που η έλξη είναι οριακά ίση με την αντίσταση. Σκοπός ήταν η κατασκευή ενός προφίλ ταχύτητας στόχου για την διαδρομή ανά Χ.Θ. ώστε, να λειτουργήσει σαν «παρτιτούρα» ενός μουσικού οργάνου. Αυτό έγινε για λόγους λειτουργίας του προγράμματος σε MATLAB.



Εικόνα 18. Στόχος ταχυτήτων διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα ανά Χ.Θ.

Τα προαναφερθέντα μητρώα ταχυτήτων για τις διαδρομές Αθήνα – Χαλκίδα - Αθήνα αποτελούν το σύνολο των δεδομένων που εξαρτώνται από τα γεωμετρικά και συγκοινωνιακά χαρακτηριστικά της γραμμής και έχουν ως κοινό γνώρισμα την ανελαστική φύση τους.

Με εφαρμογή των απαραίτητων μαθηματικών εξισώσεων στα προαναφερόμενα μητρώα, δημιουργήθηκαν τα μητρώα των αντιστάσεων.

Χρησιμοποιώντας τα ανωτέρω επεξεργασμένα μητρώα δεδομένων, κατασκευάστηκαν τα μητρώα των ειδικών αντιστάσεων. Ο σκοπός αυτής της προπαρασκευαστικής διαδικασίας ήταν η ευκολότερη μετατροπή των μητρώων αυτών, με απλή εφαρμογή των μαθηματικών σχέσεων της βιβλιογραφίας, σε μητρώα ειδικών αντιστάσεων. Τα μητρώα αυτά αθροίστηκαν ώστε να δημιουργηθεί το μητρώο των συνολικών αντιστάσεων ανά ΧΘ μεγέθους 0,01m. Έτσι συνδυαστικά με τα μητρώα ταχυτήτων και στάσεων, παράχθηκαν τα δυναμικά δεδομένα της απαιτούμενης ισχύς, της καταναλισκόμενης ενέργειας αλλά και των διαγραμμάτων πορείας των συρμών.

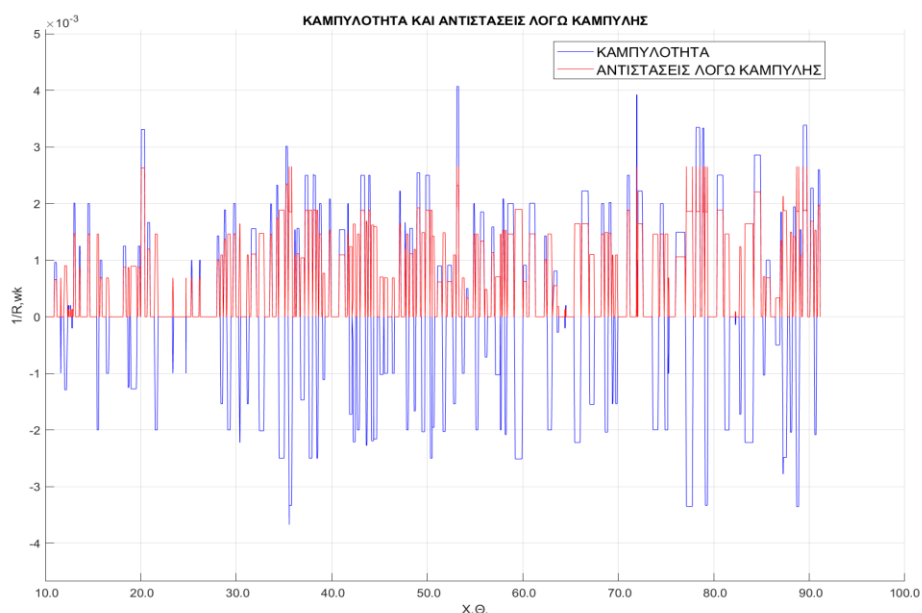
Η προσέγγιση αυτή έγινε με σκοπό την ευκολότερη επεξεργασία των δεδομένων σε δύο διακριτές κατηγορίες, αυτής της ΣΓ και των Συρμών. Αυτό επέτρεψε την ταυτόχρονη προσομοίωση του δρομολογίου από διαφορετικούς συρμούς αλλά και με αλλαγές στην ΣΓ, ώστε να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πιθανών προτάσεων για την βελτιστοποίηση του δρομολογίου.

## Μητρώο Ειδικής Αντίστασης Κλίσης

Προέκυψε με απλή εφαρμογή των μαθηματικών σχέσεων της βιβλιογραφίας. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ένα ποσοστό που είναι κοινό για όλους τους συρμούς καθώς, η τελική δύναμη αντίστασης ή υποβοήθησης, αν ο συρμός βρίσκεται σε κατωφέρεια, προκύπτει με απλό πολλαπλασιασμό του ποσοστού αυτού με το βάρος του συρμού.

## Μητρώο Ειδικής Αντίστασης Καμπύλης

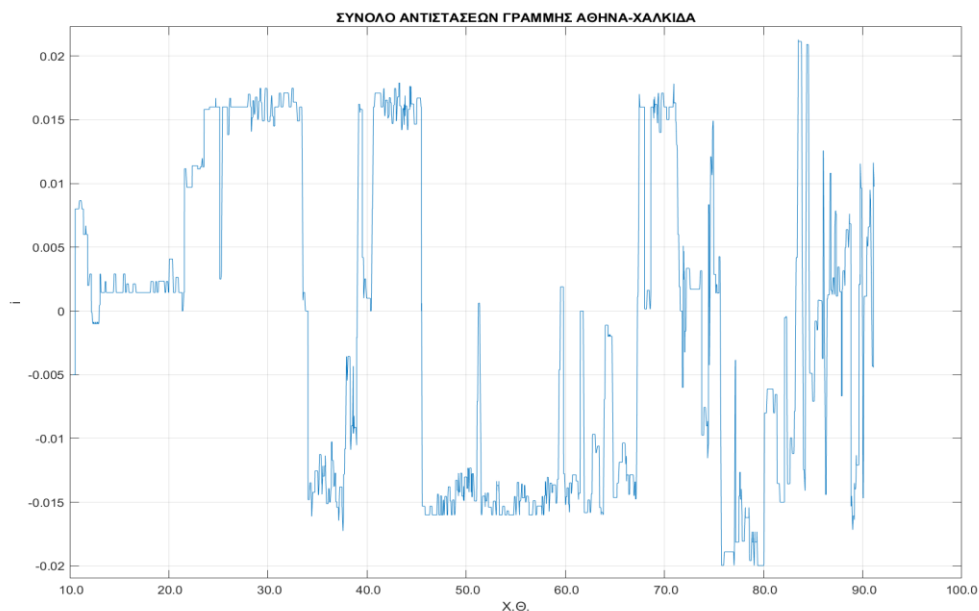
Η βάση κατασκευής του αποτέλεσε το μητρώο των καμπυλοτήτων, εφαρμόζοντας την σχέση του Röckl Εξίσωση 6 & Εξίσωση 7.



Εικόνα 19. Καμπυλότητα και Αντιστάσεις λόγω καμπύλης ανά Χ.Θ.

## Τελικό Μητρώο Αντιστάσεων Γραμμής

Πλέον όλα τα μητρώα αντιστάσεων έχουν ίδιες διαστάσεις αλλά και ίδιες μονάδες αντιστάσεων (‰) οπότε, είναι εύκολο να κατασκευαστεί το τελικό μητρώο αντιστάσεων ανά κατεύθυνση και ανά Χ.Θ. .



Εικόνα 20. Σύνολο Αντιστάσεων Γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 21. Σύνολο Αντιστάσεων Γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα- Αθήνα.

Αντίστοιχα για τους συρμούς ήταν αναγκαίο να κατασκευαστεί μόνο το Μητρώο Έλξης-Αντιστάσεων κύλισης. Αυτό πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της θεωρίας της έλξης, τα δεδομένα που δόθηκαν από τους κατασκευαστές. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση αυτών και υπολογισμός της απόκλισης τους μεταξύ της θεωρίας έλξης και τις πραγματικές μετρήσεις.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε συρμό ξεχωριστά καθώς το τελικό Διάγραμμα Πορείας είναι μοναδικό για τον κάθε συρμό.

## 4.2 Αποτελέσματα για συρμούς

Στην ενότητα αυτή θα παρατεθούν τα δεδομένα των συρμών που έχουν επιλεγεί να πραγματοποιήσουν την ψηφιακή προσομοίωση δρομολογίου αλλά και τα αποτελέσματα αυτής. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.1, οι συρμοί αυτοί είναι οι:

- Z6100, BR-423,
- British Rail Class 450,
- British Rail Class 800,
- Siemens Desiro.

Τα δεδομένα αυτά θα περιέχουν τα, παραγόμενα από το πρόγραμμα, διαγράμματα έλξης των συρμών, την ικανότητα κίνησης με την επιθυμητή ταχύτητα στην διαδρομή, την ισχύς ανά Χ.Θ., την αθροιστική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. και τα διαγράμματα πορείας της διαδρομής.

Οι πρώτοι συρμοί που «έτρεξαν» στην προσομοίωση ήταν σε όσους υπήρχαν αξιόπιστα δεδομένα που έχουν να κάνουν με την αντίσταση κίνησης, καθώς αποτελεί το δυσκολότερο μέγεθος να προσδιοριστεί λόγω της πολυπαραγοντικής φύσης του. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατό να γίνεται συνεχώς σύγκριση μεταξύ της της πραγματικής αντίστασης και της προσεγγιστικής μεθόδου (Εξίσωση 11) του Πυργίδη. Στην εξίσωση αυτή έγιναν τροποποιήσεις κατάλληλες ώστε οι μονάδες από daN και km/h να μετατραπούν σε N και m/sec. Επιπλέον για τους συρμούς που υπήρχαν αναλυτικά δεδομένα αντίστασης κίνησης, έγινε η απαραίτητη αναντιστοιχία με την Εξίσωση 11 για τους συντελεστές  $\lambda$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ .

Τέλος σε κάθε συρμό θα παρατεθούν τα χρονικά δεδομένα μεταξύ της προσομοίωσης και του δρομολογίου της Hellenic Train, η εκτίμηση της καταναλωμένης ενέργειας αλλά και της κατανάλωσης ενέργειας στην περίπτωση που ο συρμός αλλά και η ηλεκτρική υποδομή μπορεί να υποστηρίξει αναγεννητική πέδηση.

#### 4.2.1 Γαλλική ηλεκτράμαξα Z6100 του SNCF

Ο πρώτος συρμός που χρησιμοποιήθηκε από τον αλγόριθμο ήταν η Γαλλική ηλεκτράμαξα Z6100 του SNCF. Τα δεδομένα της αντίστασης κύλισης προέρχονται από το βιβλίο του Χ. Πυργίδη, 2009, 'Συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών'. Παράλληλα επιχειρήθηκε στοχαστική προσέγγιση με την γενική εξίσωση αντίστασης κύλισης του SNCF, με τη άνω οριακές τιμές των συντελεστών.



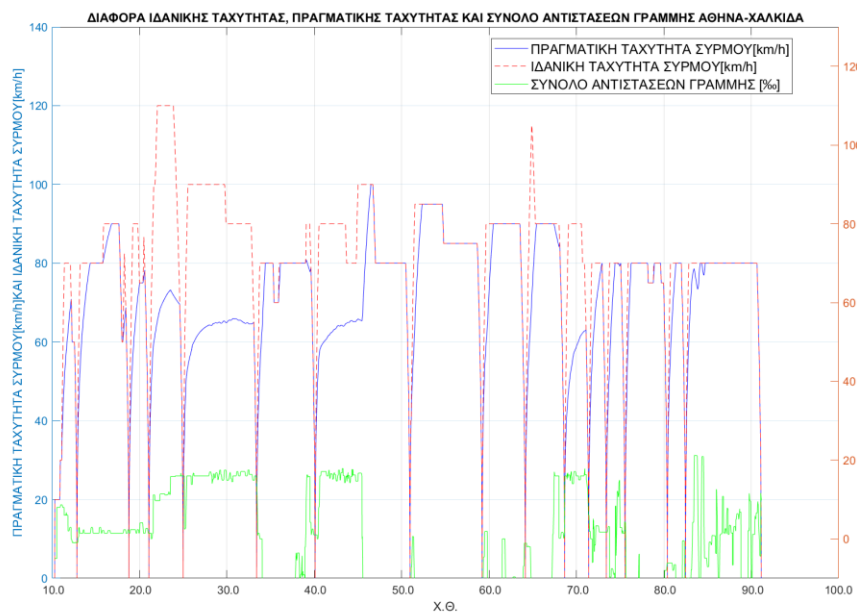
Εικόνα 22. Συρμός κλάσης Z6100 του SNCF (πηγή : Wikipedia).

Βασικά στοιχεία συρμού:

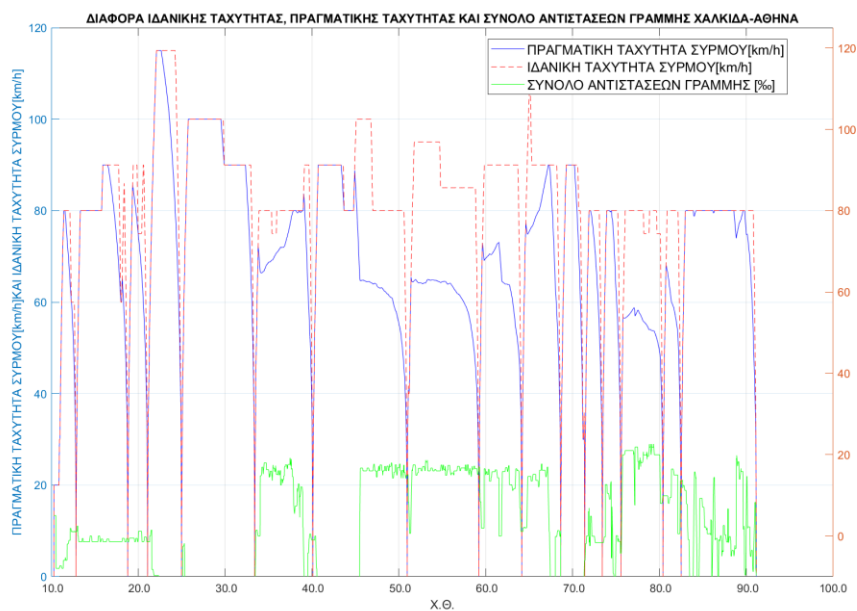
Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Z6100 (πηγή: Wikipedia)

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Z6100	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	3	
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΞΟΝΩΝ	B'2+2'2'+2'B'	
ΜΑΖΑ ΚΕΝΟ	107,5	tn
ΜΗΚΟΣ	74,45	m
ΥΨΟΣ	4,28	m
ΠΛΑΤΟΣ	2,,85	m
ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ	615	kW
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	273	
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	120	km/h
ΕΤΗ ΚΑΤΣΚΕΥΗΣ	1965-1971	
ΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	1965-2013	

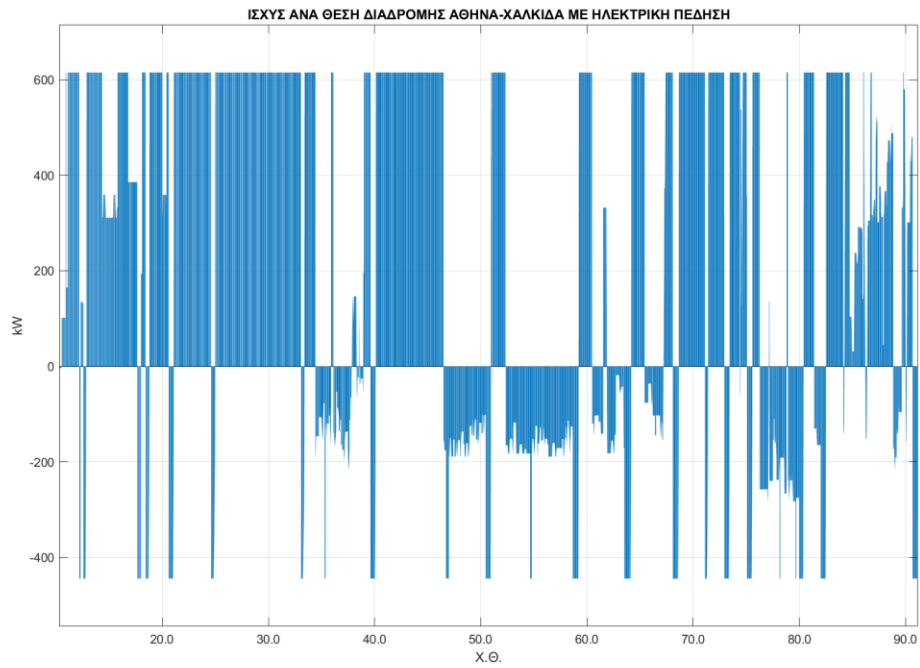
Τα δεδομένα αντίστασης του συρμού αυτού περιγράφονται άμεσα από την Εξίσωση 11 με:  $\lambda = 1.2$  ,  $k_1 = 20 * 10^{-4}$  ,  $k_2 = 32.5 * 10^{-6}$



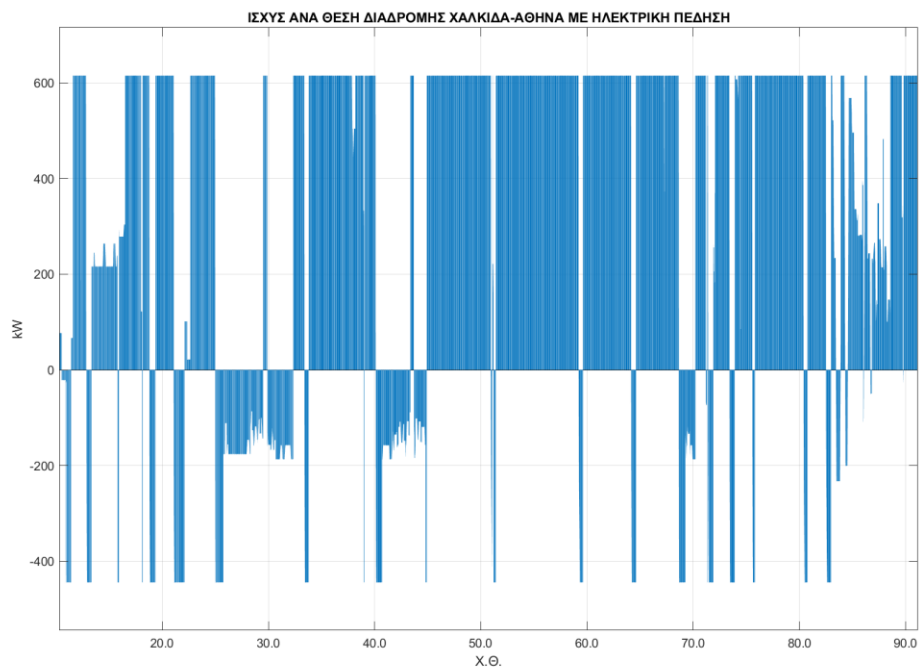
Εικόνα 23. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 24. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα.

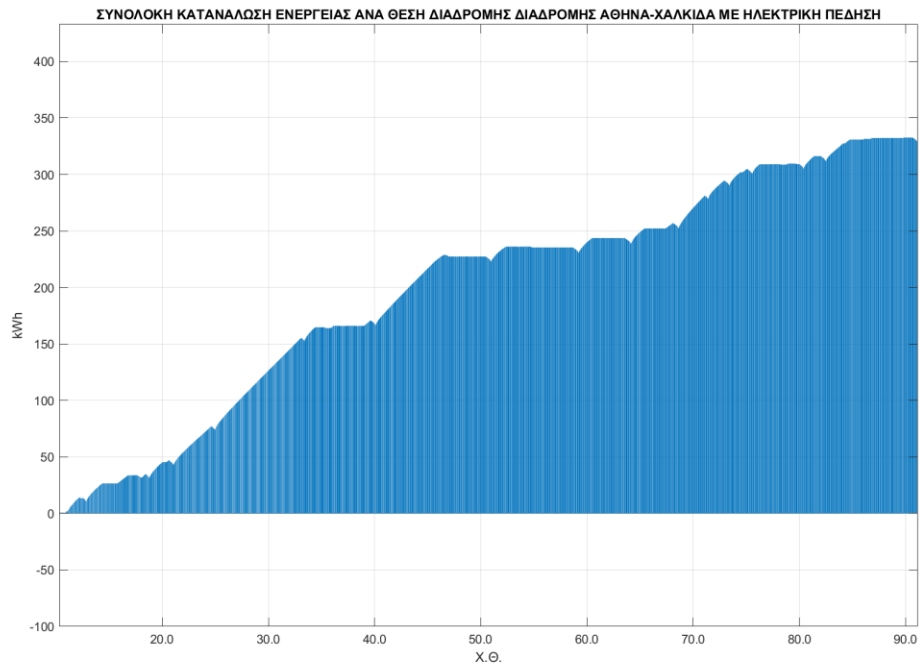


Εικόνα 25. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.

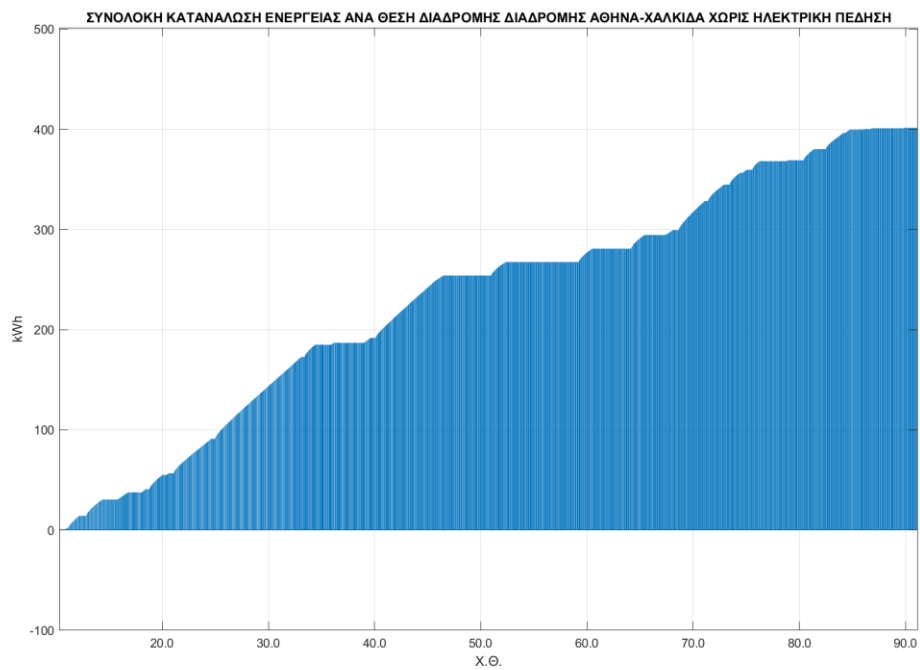


Εικόνα 26. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.

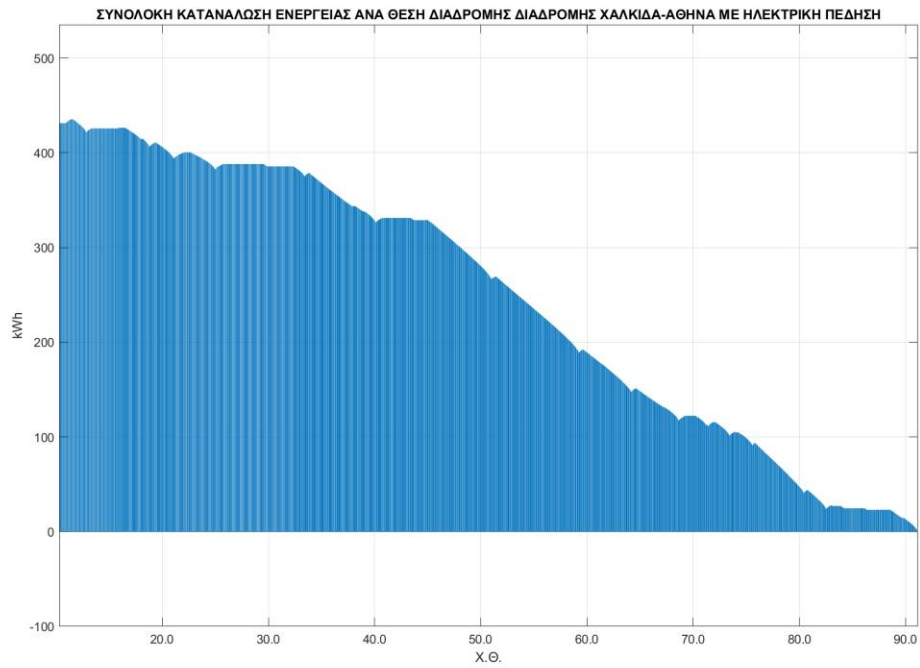




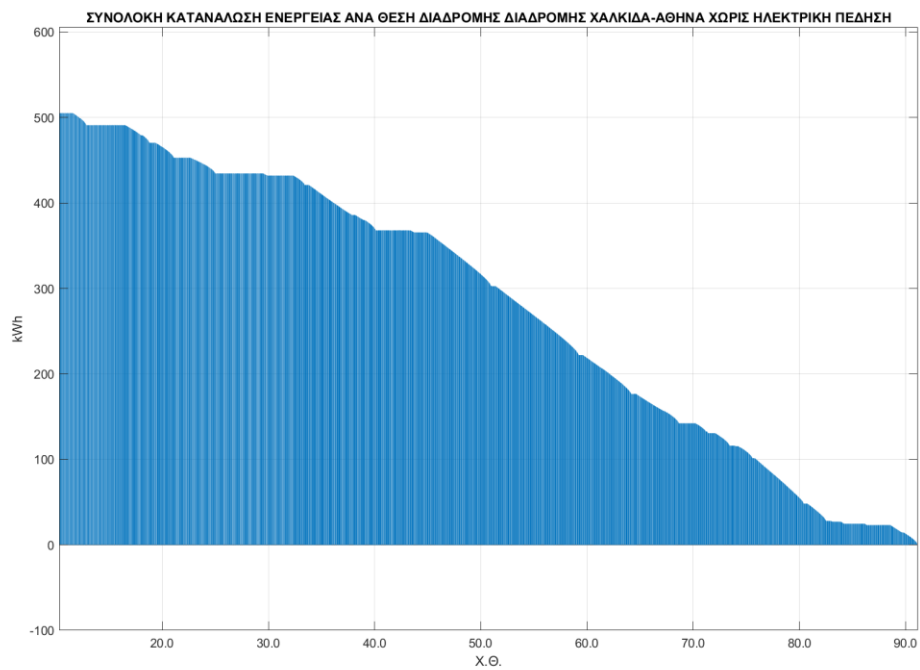
Εικόνα 27. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



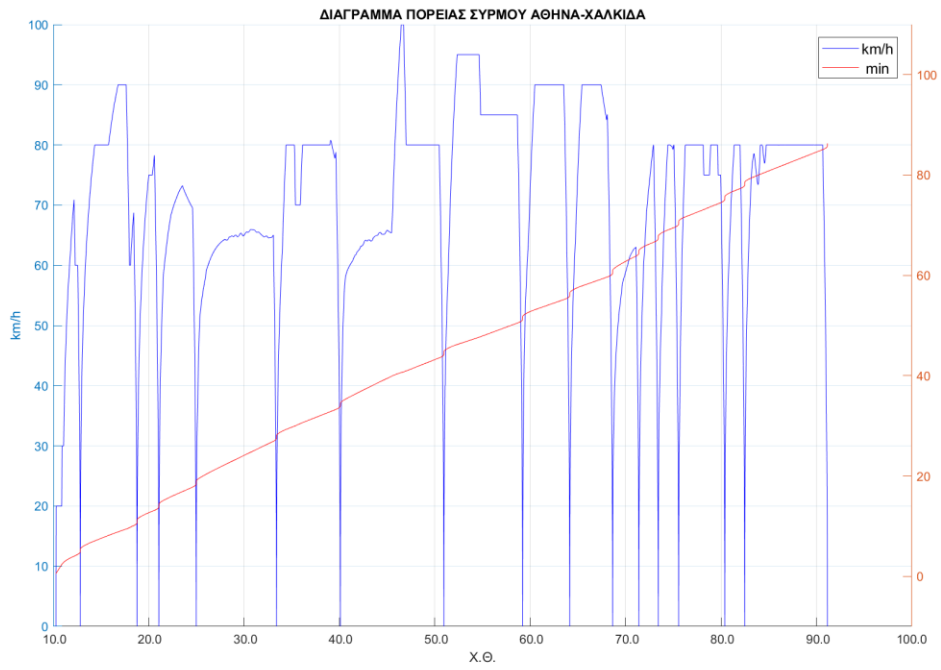
Εικόνα 28. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



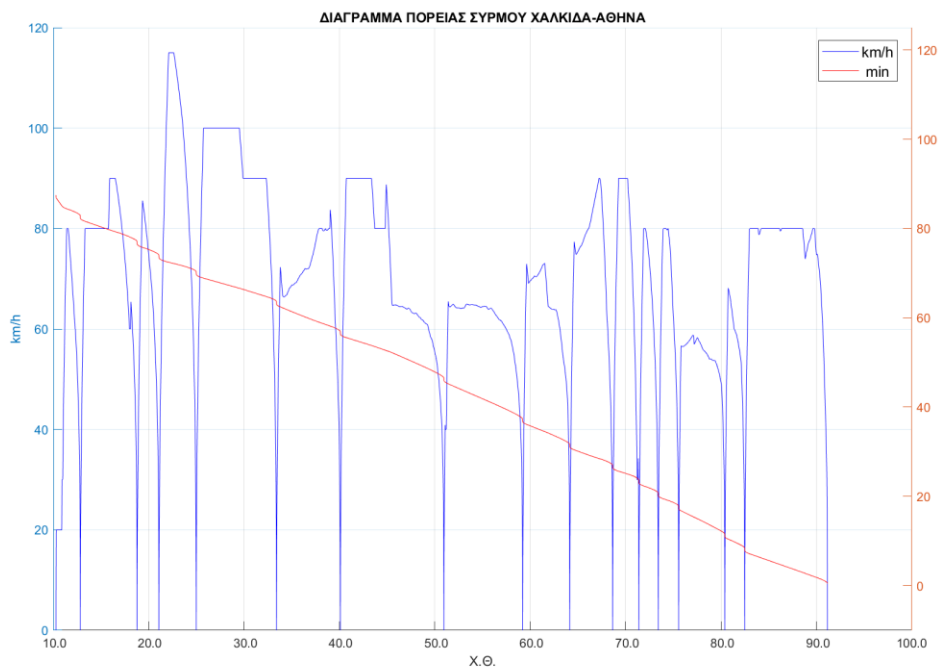
Εικόνα 29. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά X.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 30. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά X.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 31. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 32. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.

Ο Πίνακας 2 και Πίνακας 3 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων πορείας σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον γίνεται αναλυτική αναγραφή των χρόνων που χρειάζεται ο συρμός να καταφθάσει στους Σ.Σ και στις Σ.ΣΤ .

Πίνακας 2. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Ζ6100.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Ζ6100		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(η)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	14,24	10,37
Σ.Κ.Α.	0:11	40,86	31,26
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:14	56,65	42,72
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:18	91,12	73,9
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:27	172,65	152,45
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:34	191,7	166,43
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:44	254,01	222,66
ΑΥΛΩΝ	0:51	267,47	230,39
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:56	280,79	238,53
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	1:00	299,31	252,25
ΟΙΝΟΗ	1:04	328,44	278,26
ΔΗΛΕΣΙ	1:07	344,74	290,11
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:10	359,46	300,43
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:15	369	305,02
ΑΥΛΙΔΑ	1:18	380,2	311,53
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:25	401,34	328,38
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			72,96

Πίνακας 3. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Ζ6100.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Ζ6100		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(η)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:08	27,94	23,83
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:11	48,21	40,69
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:17	101,37	90,9
ΔΗΛΕΣΙ	0:20	116,05	101,07
ΟΙΝΟΗ	0:23	130,67	111,1
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:26	142,19	116,96
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:31	176,64	147,13
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:37	221,99	188,95
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:46	302,83	266,66
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:56	367,97	326,02
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	1:03	421,1	374,71
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:10	434,55	382,06
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:13	452,92	393,52
Σ.Κ.Α.	1:16	470,39	406,1
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:22	491,07	421,27
ΑΘΗΝΑ	1:26	505,15	430,85
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			74,3

#### 4.2.2 BR-423 (DB)



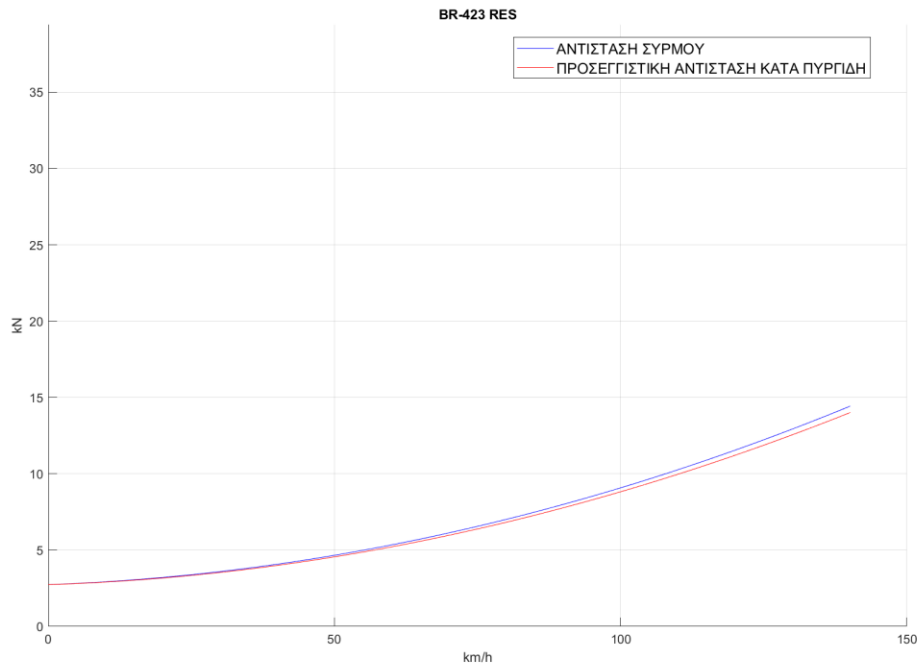
Εικόνα 33. Συρμός BR-423 Γερμανικών Σιδηροδρόμων ( πηγή : Wikipedia).

Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού BR-423.

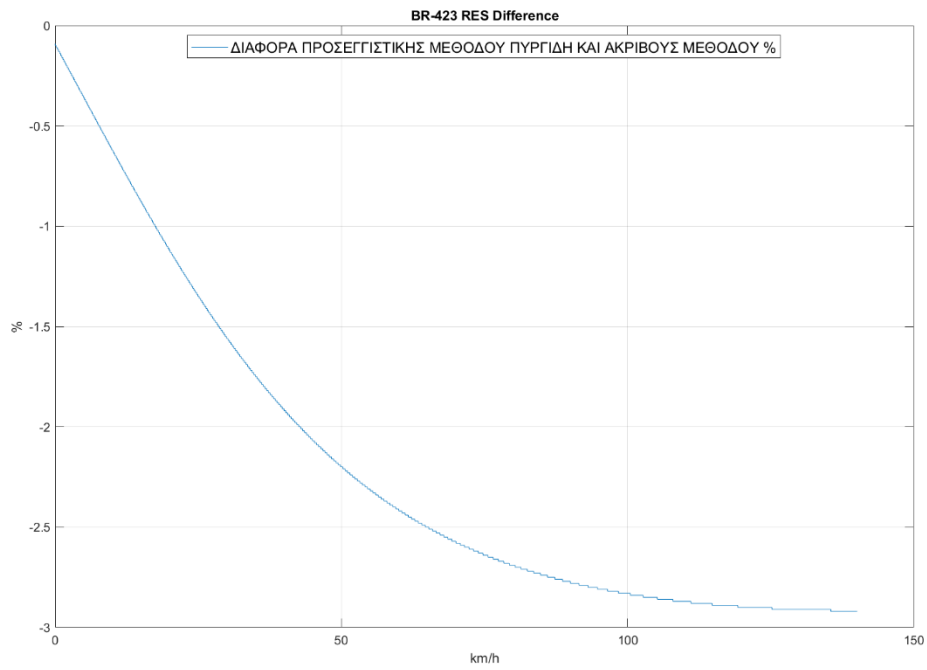
ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	BR-423	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	4	
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΞΟΝΩΝ	Bo'Bo'2'Bo'Bo'	
ΜΑΖΑ ΚΕΝΟ	105	tn
ΜΗΚΟΣ	67,4	m
ΥΨΟΣ	4,295	m
ΠΛΑΤΟΣ	3,02	m
ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ	2350	kW
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	192	
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	140	km/h
ΕΤΗ ΚΑΤΣΚΕΥΗΣ	1998-2007	
ΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	1998-	

Έπειτα από δοκιμές οι συντελεστές των αντιστάσεων έλαβαν τις τιμές :

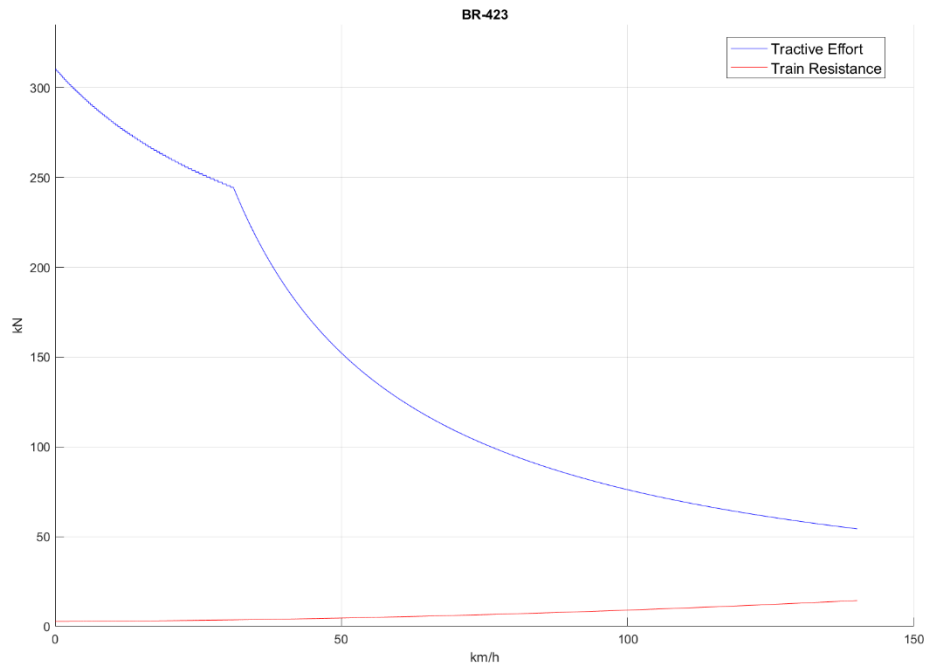
$$\lambda = 0.725 \quad , \quad k_1 = 15.5 * 10^{-4}, \quad k_2 = 25.5 * 10^{-6}$$



Εικόνα 34. Αποτίπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.

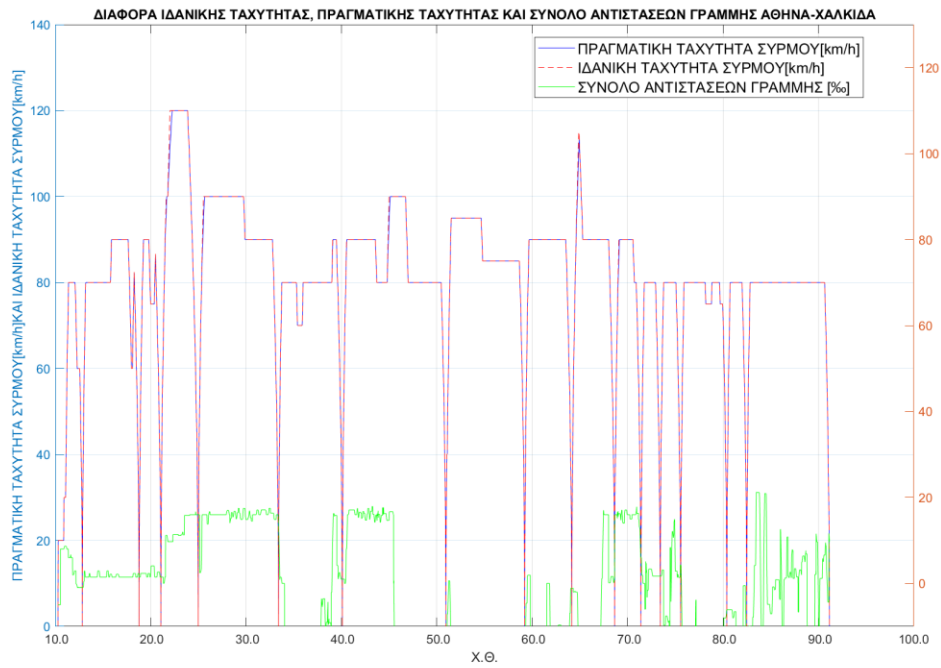


Εικόνα 35. Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων.

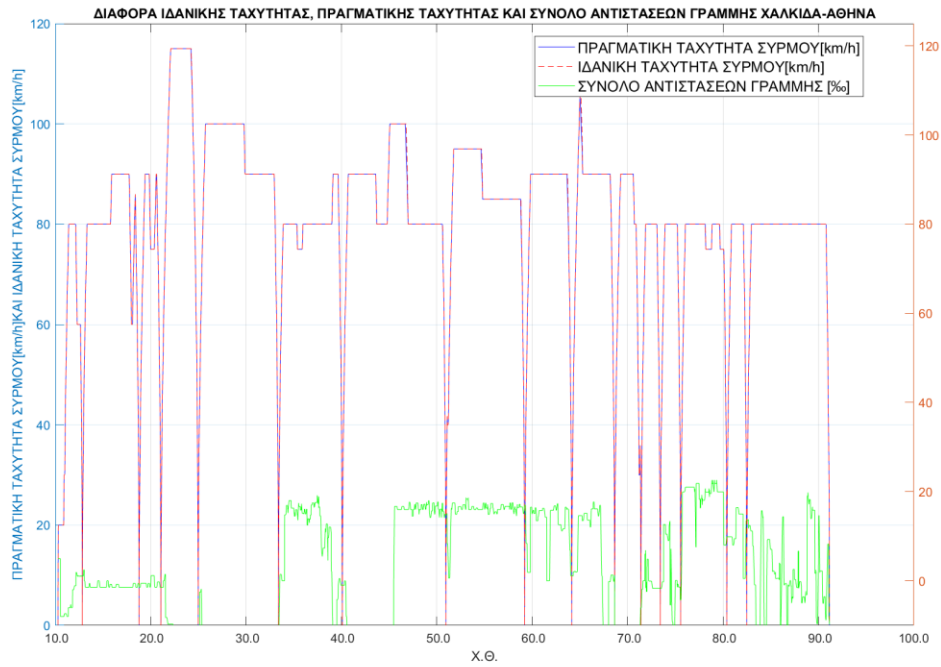


Εικόνα 36. Διάγραμμα Έλεγχος σφυμίου.

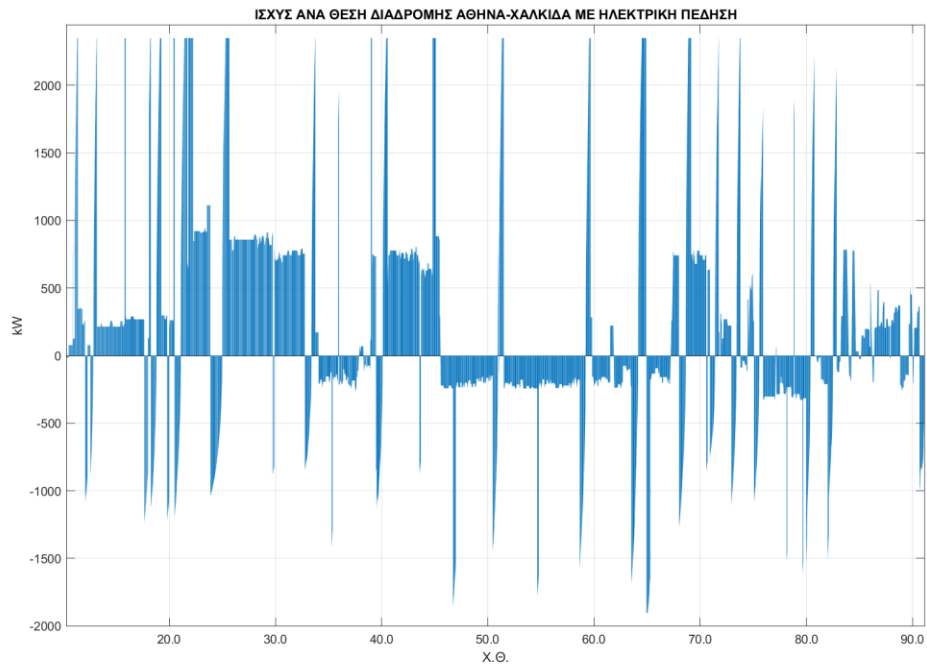




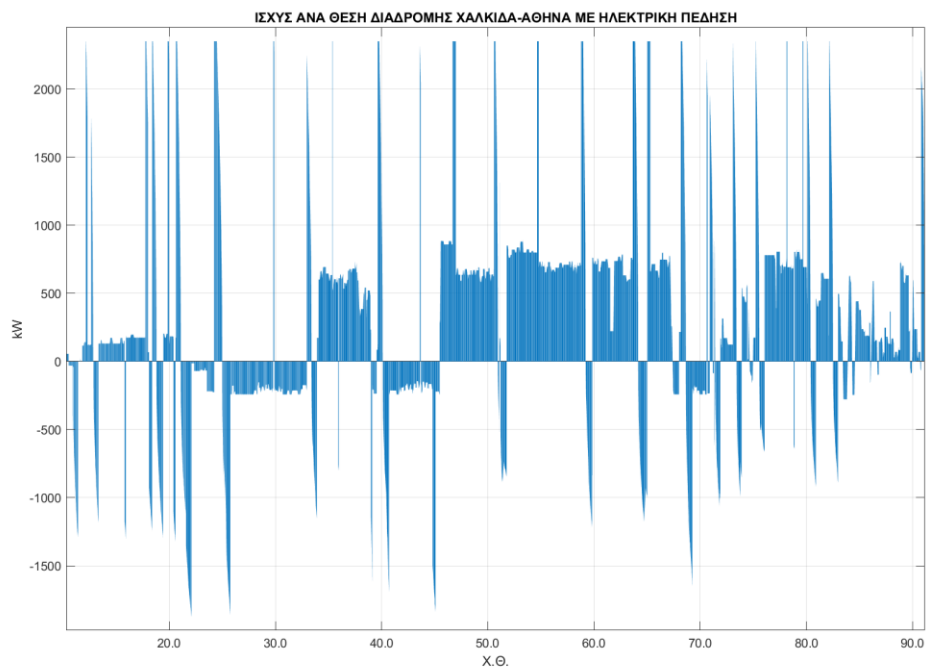
Εικόνα 37. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



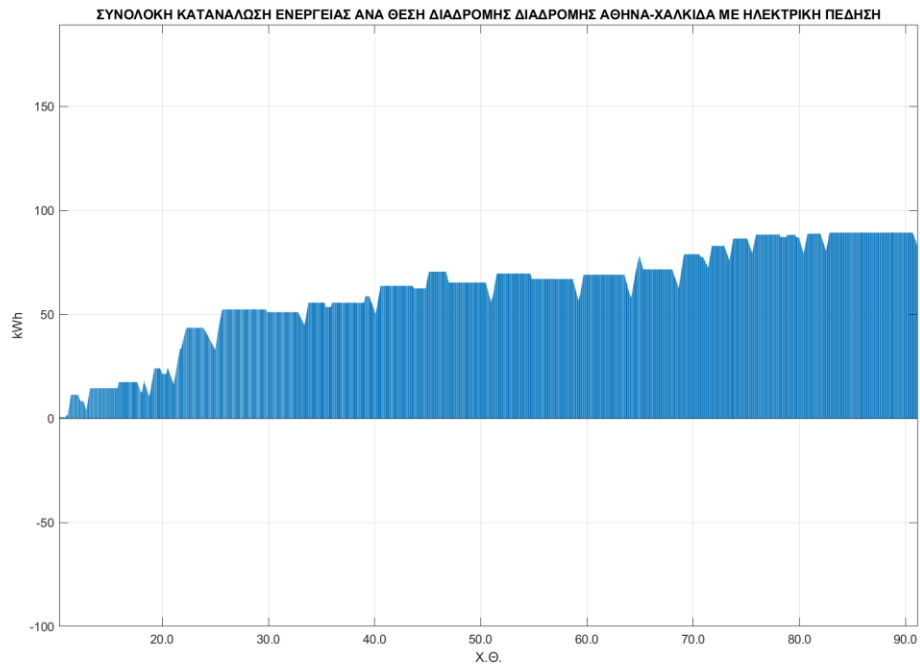
Εικόνα 38. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα.



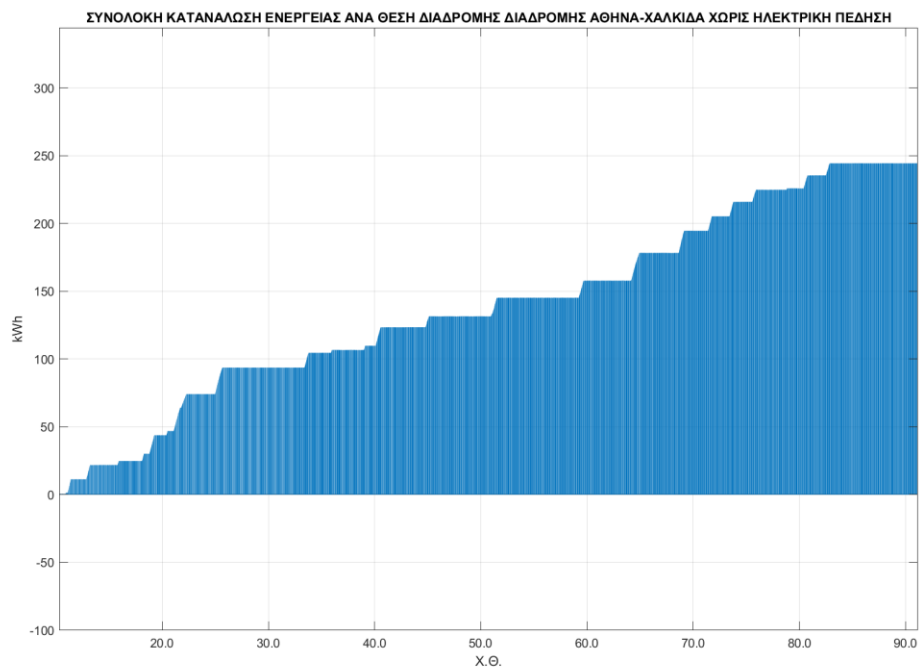
Εικόνα 39. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



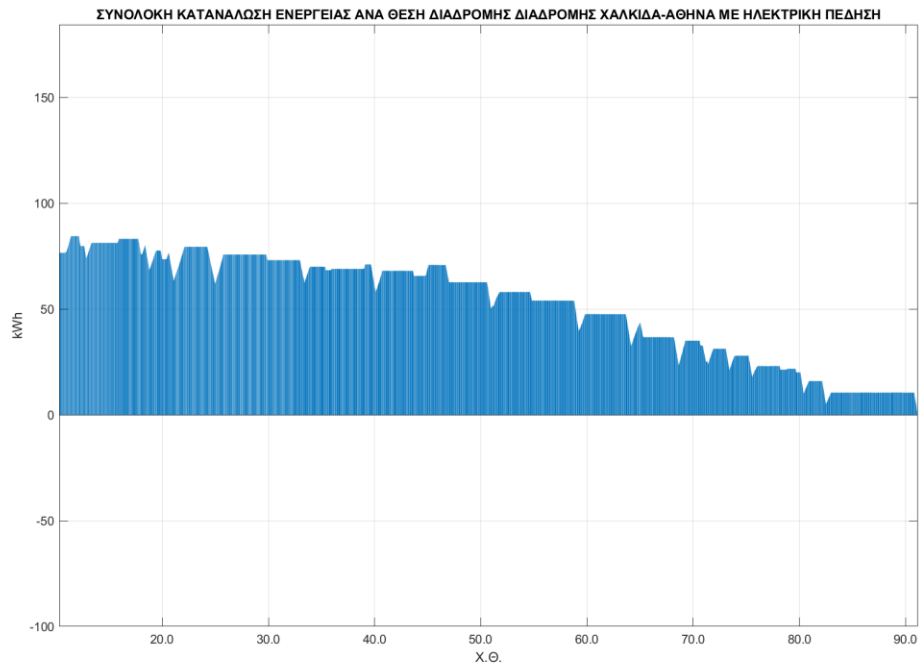
Εικόνα 40. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



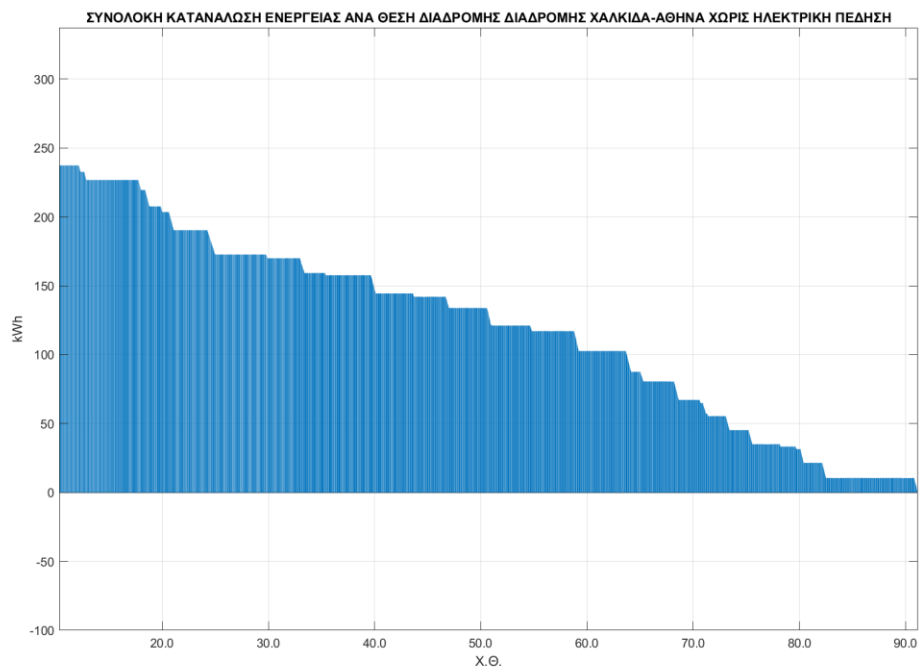
Εικόνα 41. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



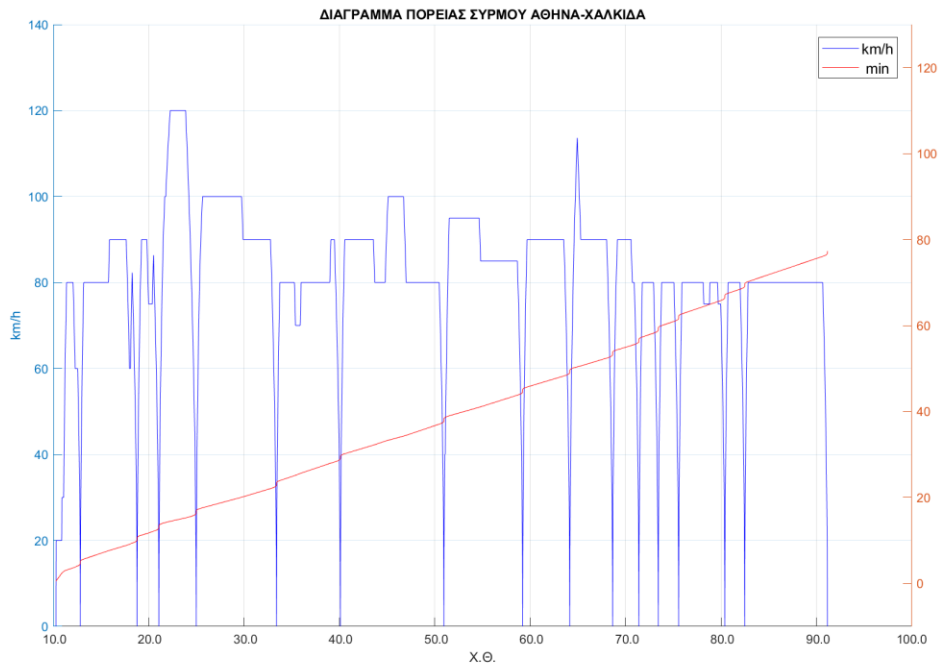
Εικόνα 42. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



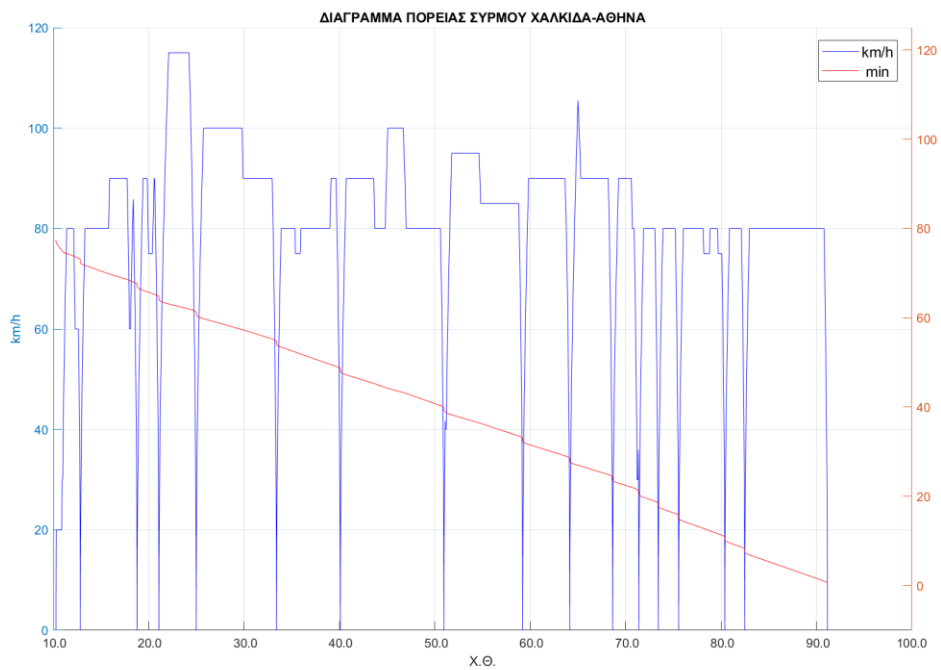
Εικόνα 43. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 44. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 45. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 46. Διάγραμμα πορείας συρμού για την διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.

Πίνακας 5. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό BR-423.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	BR-423		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	11,35	3,98
Σ.Κ.Α.	0:11	30,18	10,43
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:13	46,93	16,36
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:17	74,14	32,85
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:23	93,69	44,71
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:30	109,79	50,09
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:38	131,5	55,94
ΑΥΛΩΝ	0:45	145,21	56,46
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:50	157,81	57,85
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:54	178,27	62,61
ΟΙΝΟΗ	0:57	194,58	72,29
ΔΗΛΕΣΙ	0:59	205,22	75,81
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:02	215,91	79,45
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:07	225,82	79,16
ΑΥΛΙΔΑ	1:10	235,45	80,43
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:17	244,35	82,45
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			161,9

Πίνακας 6. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό BR-423.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	BR-423		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:08	10,52	4,97
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:11	21,51	10,02
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:16	35,04	17,75
ΔΗΛΕΣΙ	0:18	45,23	21,04
ΟΙΝΟΗ	0:21	55,43	23,83
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:24	67,18	23,3
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:28	87,55	32,47
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:33	102,68	39,59
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:40	121,4	50,18
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:49	144,46	57,9
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:55	159,27	62,37
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:01	172,66	61,74
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:05	190,35	63,24
Σ.Κ.Α.	1:07	207,58	68,28
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:13	226,78	73,92
ΑΘΗΝΑ	1:17	237,33	76,13
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			161,2

### 4.2.3 British Rail Class 450

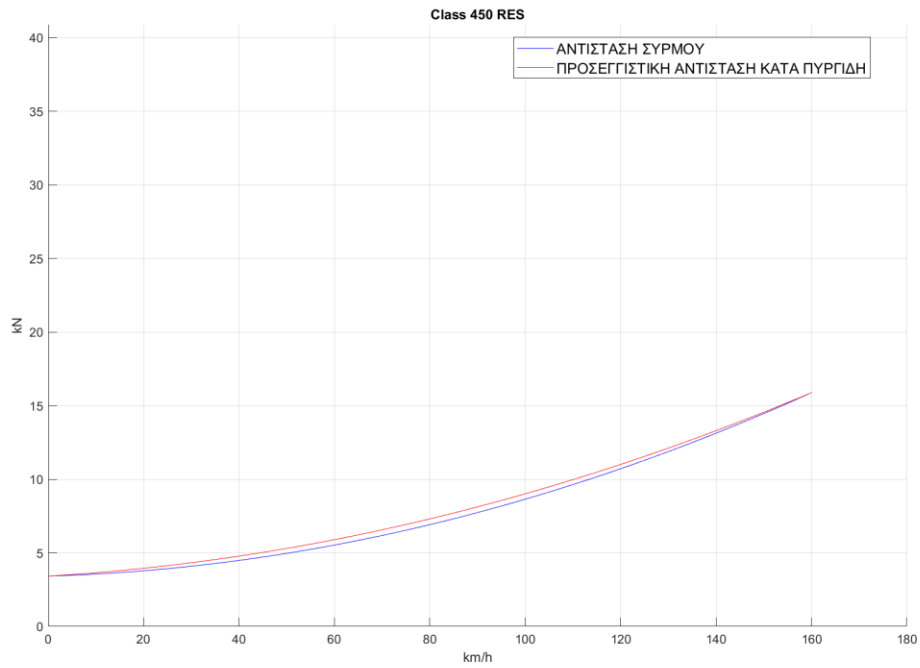


Εικόνα 47. British Rail Class 450 (πηγή: Wikipedia).

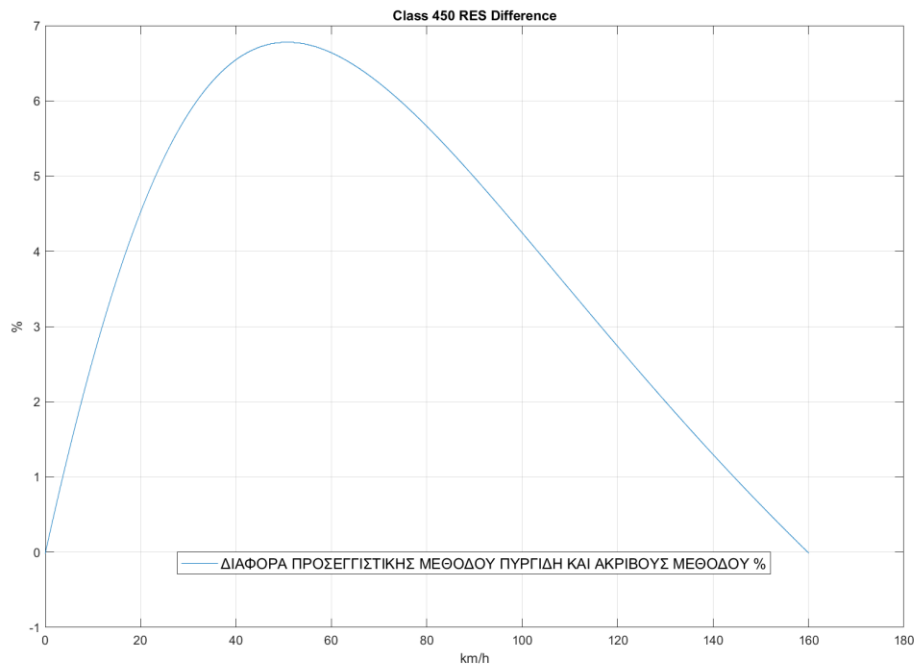
Πίνακας 7. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Class 450.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	British Rail Class 450	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	4	
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΞΟΝΩΝ	Bo'Bo'+2'2'+2'2'+Bo'Bo'	
ΜΑΖΑ ΚΕΝΟ	171,71	tn
ΜΗΚΟΣ	81,6	m
ΥΨΟΣ	3,8	m
ΠΛΑΤΟΣ	2,79	m
ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ	1500	kW
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	285	
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	160	km/h
ΕΤΗ ΚΑΤΣΚΕΥΗΣ	2002-2006	
ΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	2002-	

$$\lambda = 0.56 , \quad k_1 = 11.5 * 10^{-4}, \quad k_2 = 20 * 10^{-6}$$

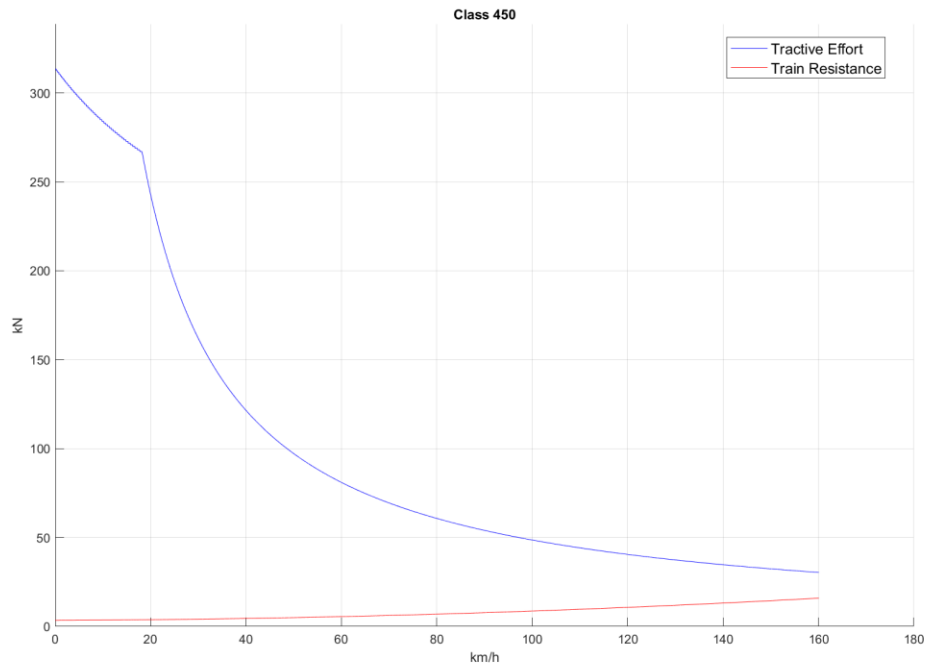


Εικόνα 48. Αποτύπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.

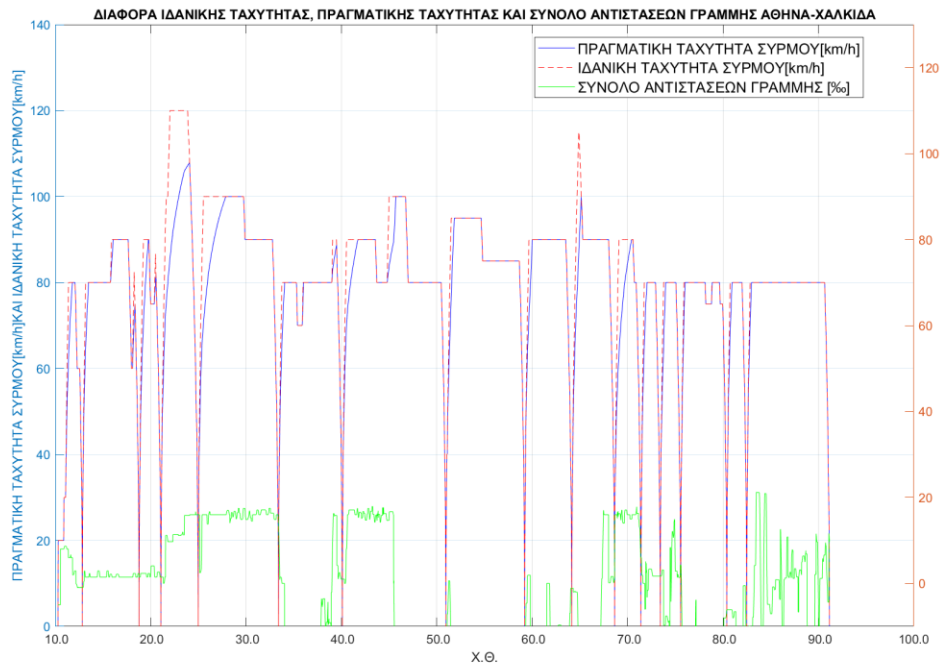


Εικόνα 49. Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων.

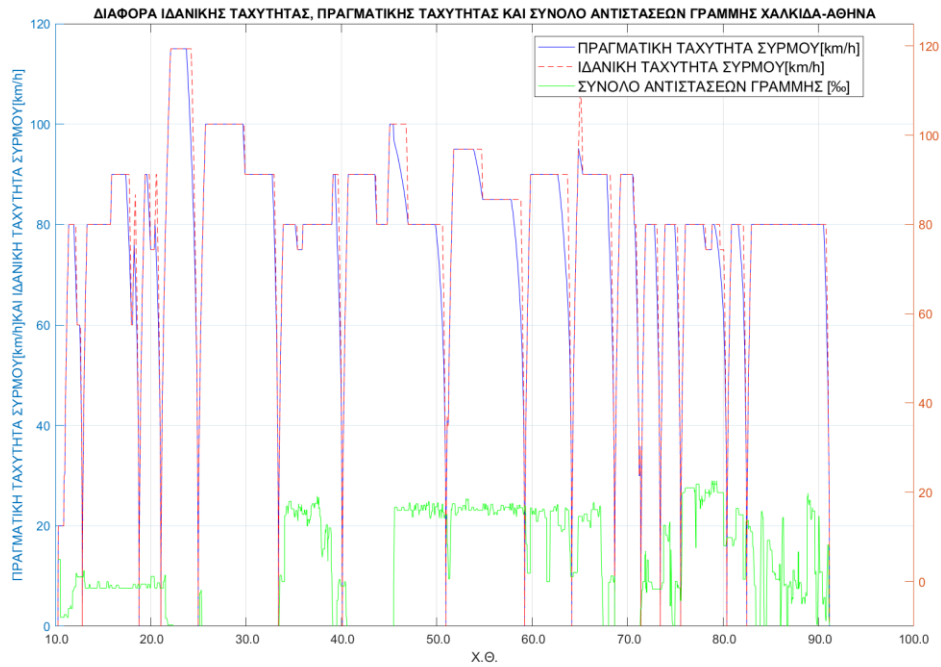




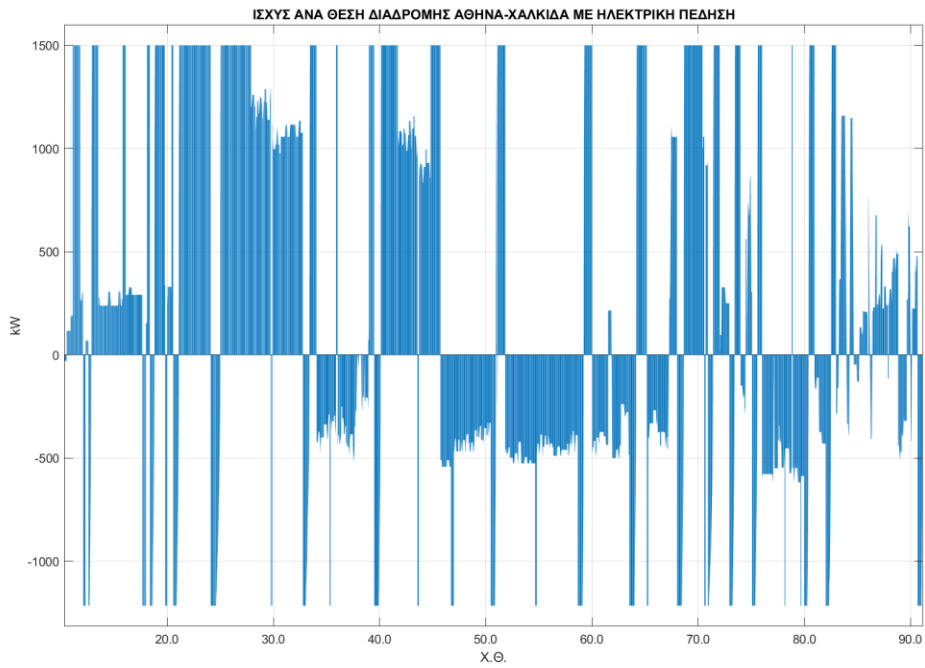
Εικόνα 50. Διάγραμμα Έλεξης σφυμού.



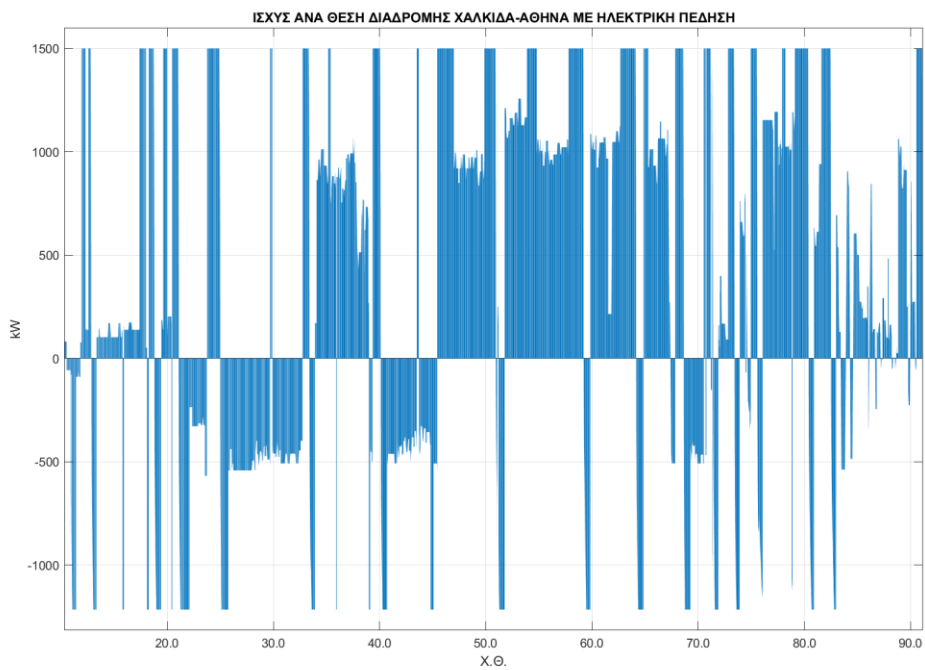
Εικόνα 51. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



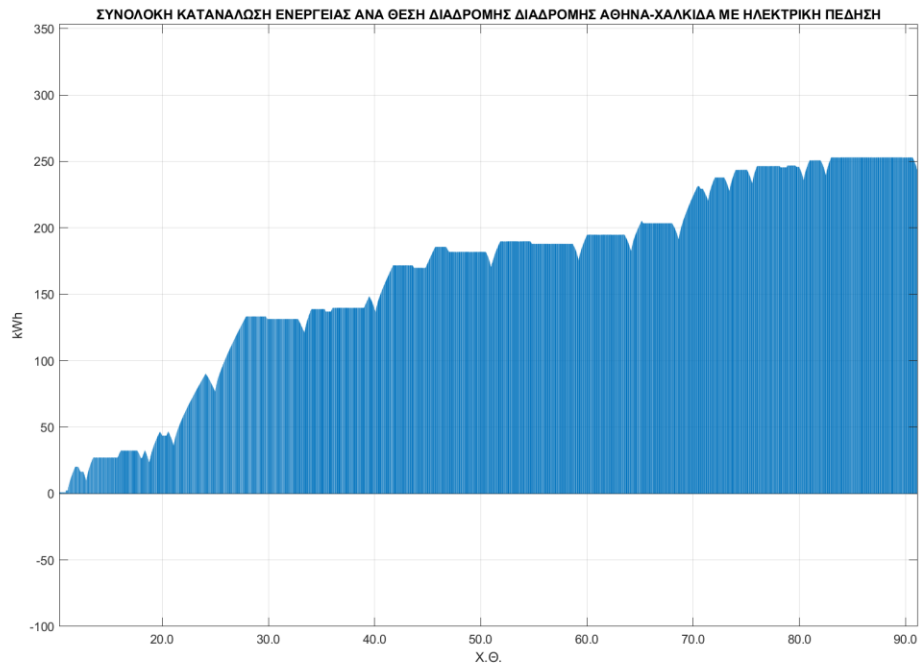
Εικόνα 52. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα.



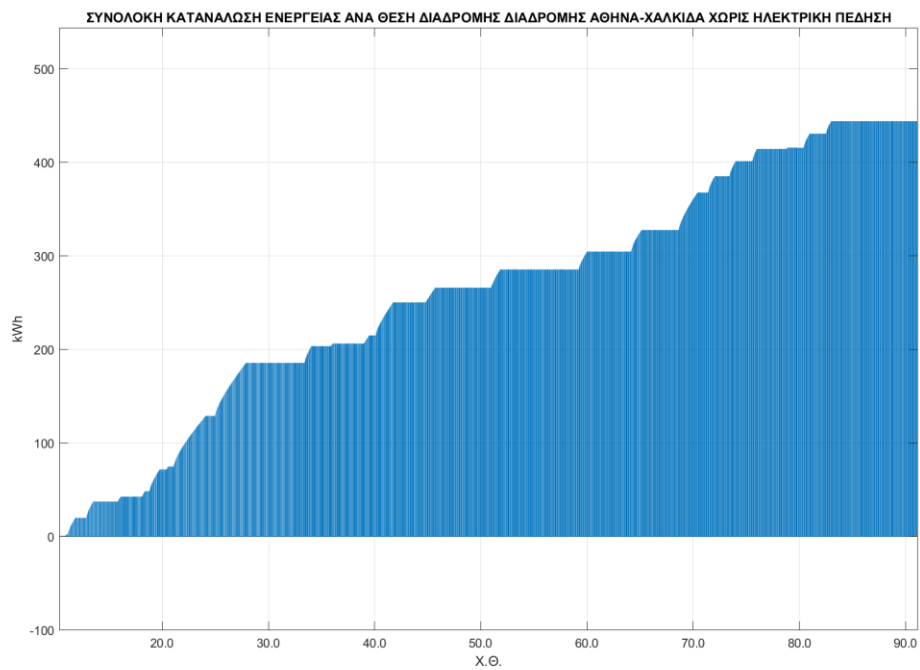
Εικόνα 53. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



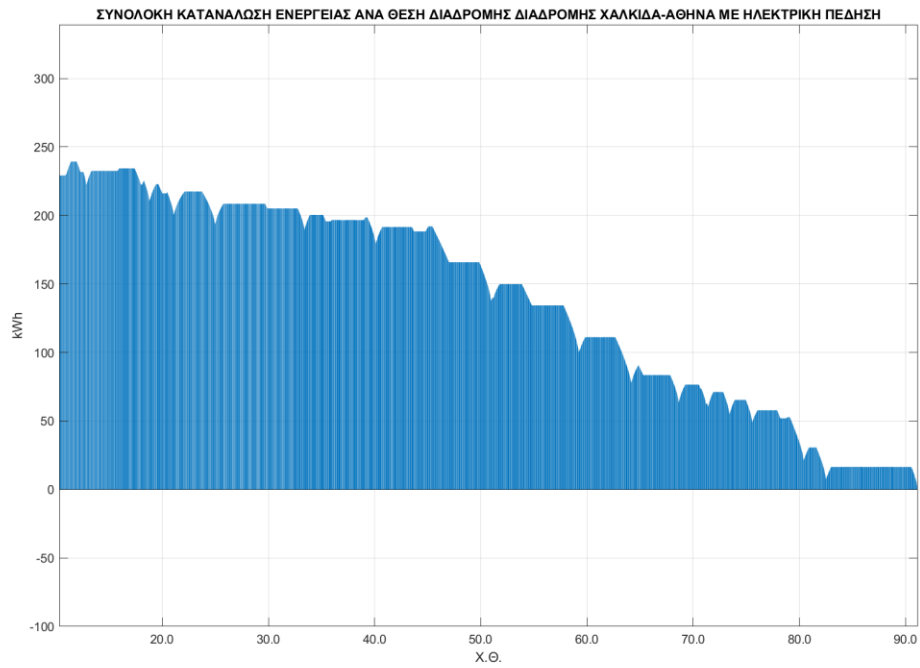
Εικόνα 54. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



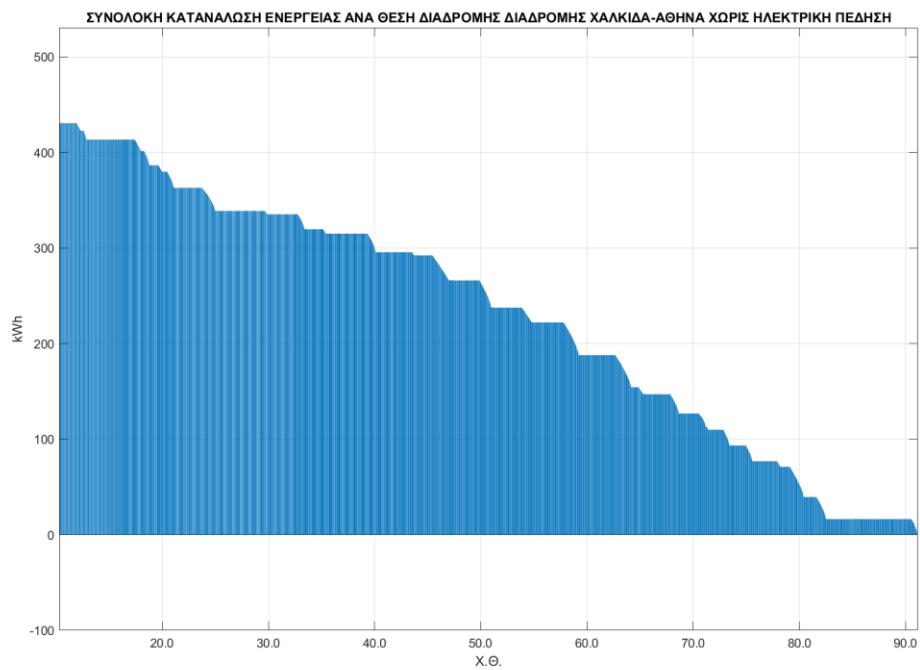
Εικόνα 55. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



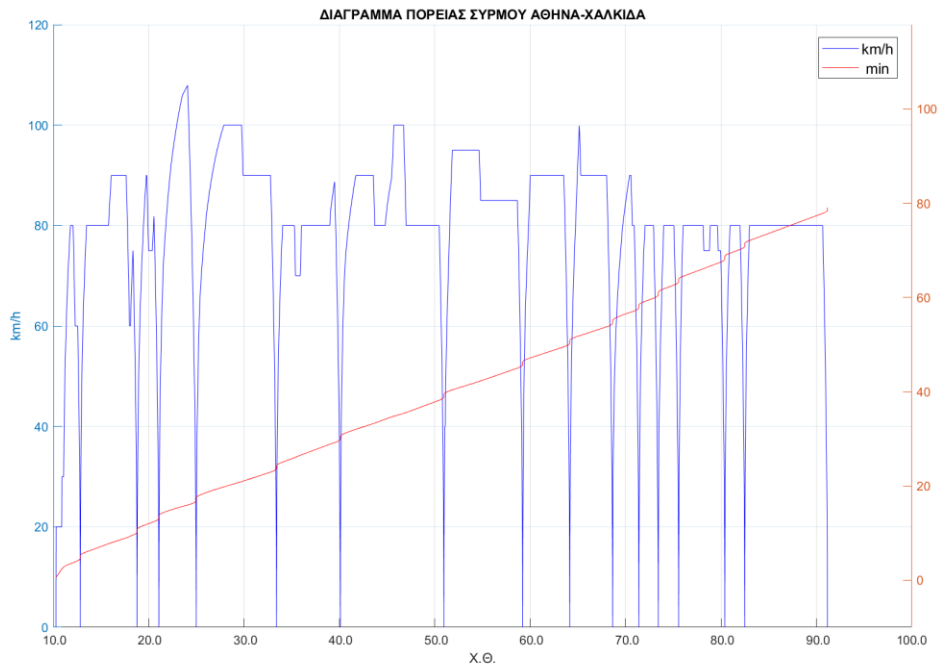
Εικόνα 56. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



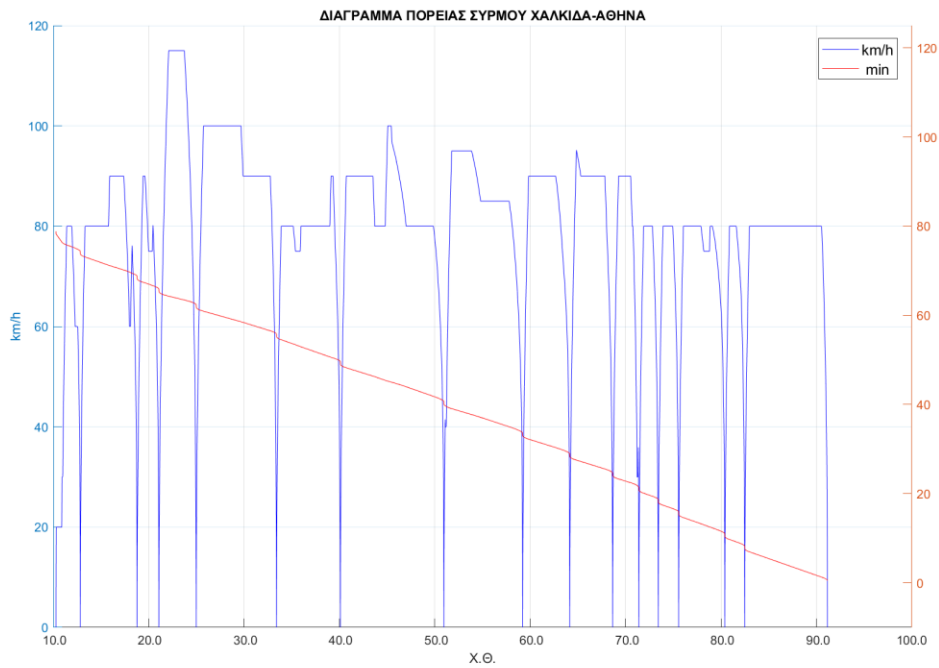
Εικόνα 57. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 58. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα -Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 59. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 60. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.

Πίνακας 8. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα- Χαλκίδα για τον συρμό Class-450.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	Class-450		
	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:08	16,4	7,47
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:11	39,51	21,18
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:16	76,93	48,82
ΔΗΛΕΣΙ	0:19	93,43	54,72
ΟΙΝΟΗ	0:21	109,8	60,35
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:25	126,85	63,25
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:29	154,33	77,55
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:34	187,92	100,14
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:41	237,97	137,64
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:50	295,62	179,11
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:56	319,64	189,35
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:02	338,76	193,21
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:06	362,98	200,29
Σ.Κ.Α.	1:09	386,5	210,39
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:14	413,45	222,13
ΑΘΗΝΑ	1:18	430,59	228,42
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			202,17

Πίνακας 9. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Class-450

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	Class-800		
	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	27,53	12,83
Σ.Κ.Α.	0:10	66,78	31,13
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:13	102,94	48,52
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:17	178,41	105,05
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:24	256,88	166,47
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:30	297,33	187,53
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:39	367,26	233,56
ΑΥΛΩΝ	0:46	393,94	240,34
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:50	420,37	249,3
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:55	452,26	261,45
ΟΙΝΟΗ	0:58	506,96	301,1
ΔΗΛΕΣΙ	1:01	530,71	310,48
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:03	552,77	318,24
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:08	572,61	321,38
ΑΥΛΙΔΑ	1:11	593,02	326,21
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:19	611,36	330,09
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			281,27

#### 4.2.4 British Rail Class 800 (Hybrid)



Εικόνα 61. British Rail Class 800 (πηγή: Wikipedia).

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συρμού αυτού είναι πως διαθέτει γεννήτριες Diesel αλλά και παντογράφο. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη χρήση σε όλο το σιδηροδρομικό δίκτυο της χώρας, ηλεκτροδοτούμενο ή μη. Επιπλέον θα μπορούσε να συμβάλει στην ομογενοποίηση του στόλου του τροχαίου υλικού.

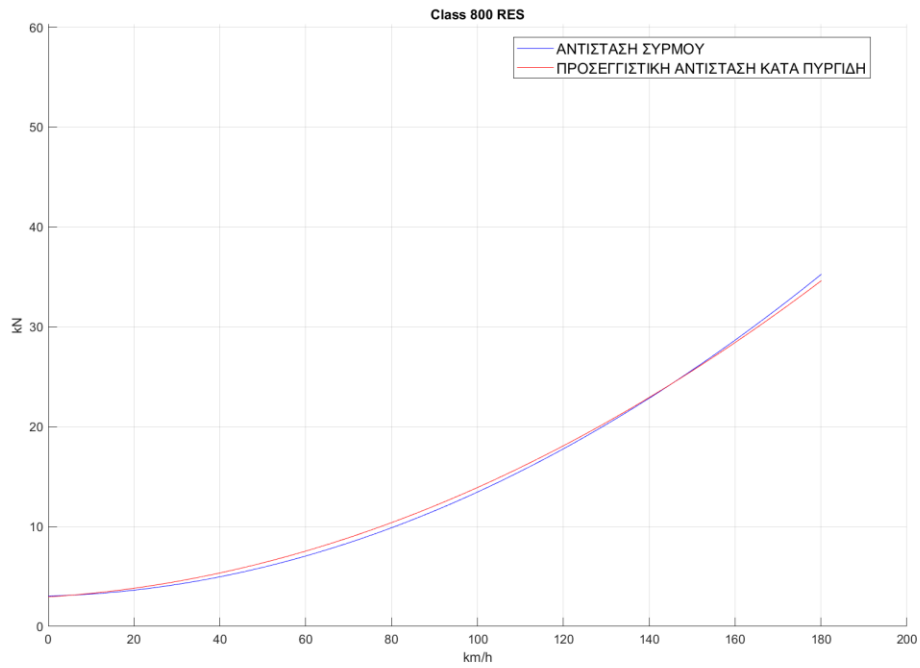
Πίνακας 10. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού British Rail Class 800.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	British Rail Class 800	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	5	
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΞΟΝΩΝ	2'2'+Bo'Bo'+Bo'Bo'+Bo'Bo'+2'2'	
ΜΑΖΑ ΚΕΝΟ	243	tn
ΜΗΚΟΣ	129,7	m
ΥΨΟΣ	3,8	m
ΠΛΑΤΟΣ	2,7	m
ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ	2100	kW
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	326	
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	180	km/h
ΕΤΗ ΚΑΤΣΚΕΥΗΣ	2017-	
ΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	2017-	

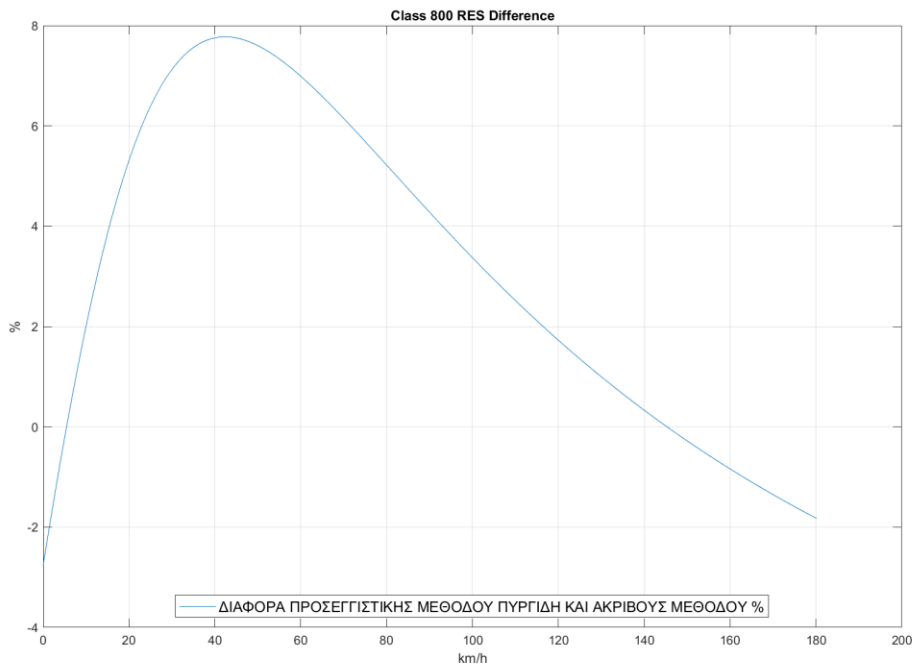
Έπειτα από δοκιμές οι συντελεστές των αντιστάσεων έλαβαν τις τιμές :

$$\lambda = 0.35 , \quad k_1 = 25 * 10^{-4}, \quad k_2 = 30 * 10^{-6}$$

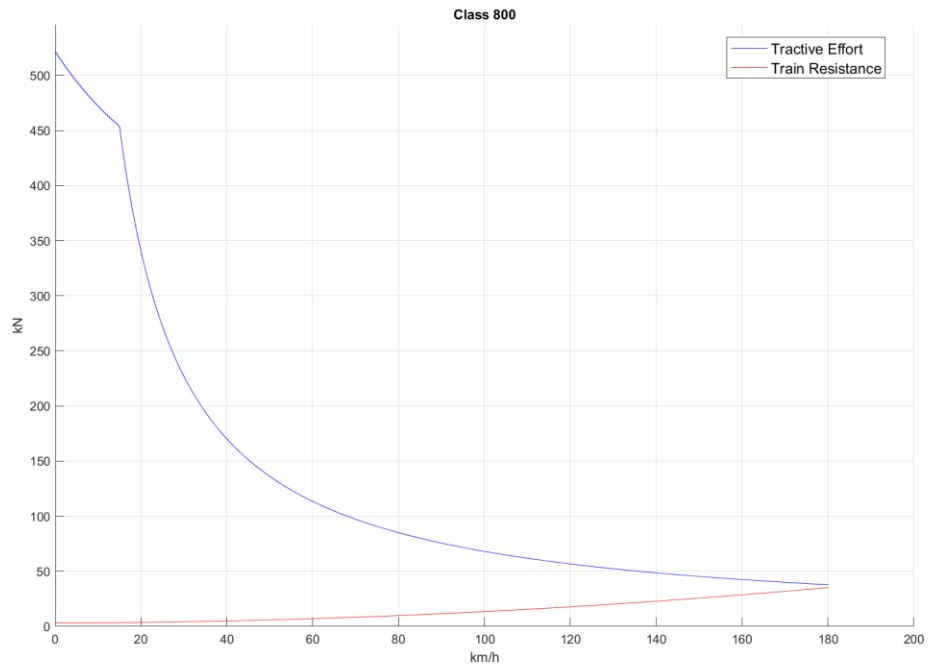




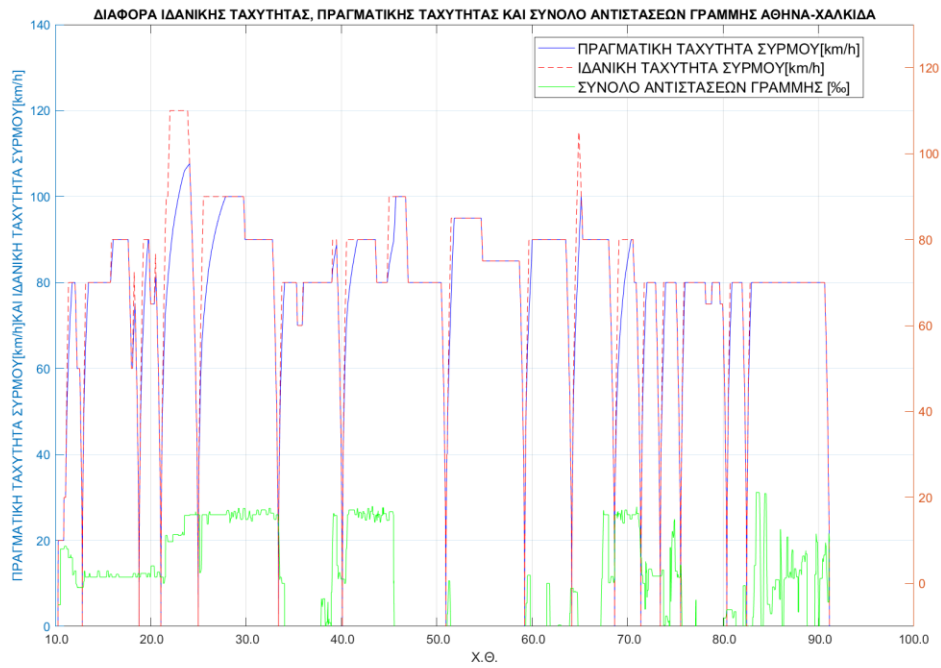
Εικόνα 62. Αποτύπωση πραγματικής αντίστασης και προσεγγιστικής εξίσωσης.



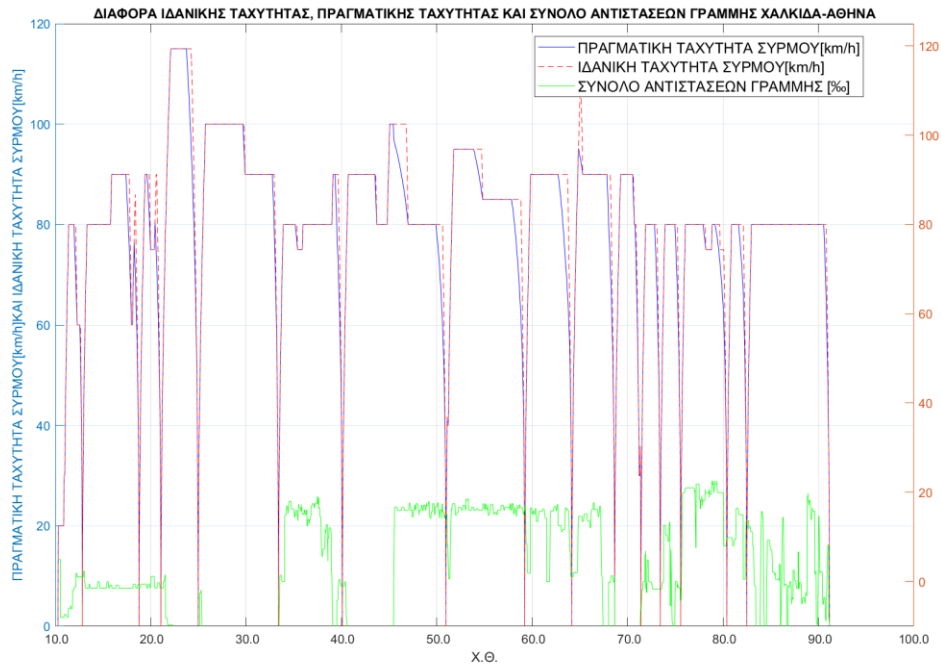
Εικόνα 63. Ποσοστιαία απόκλιση προσεγγίσεων.



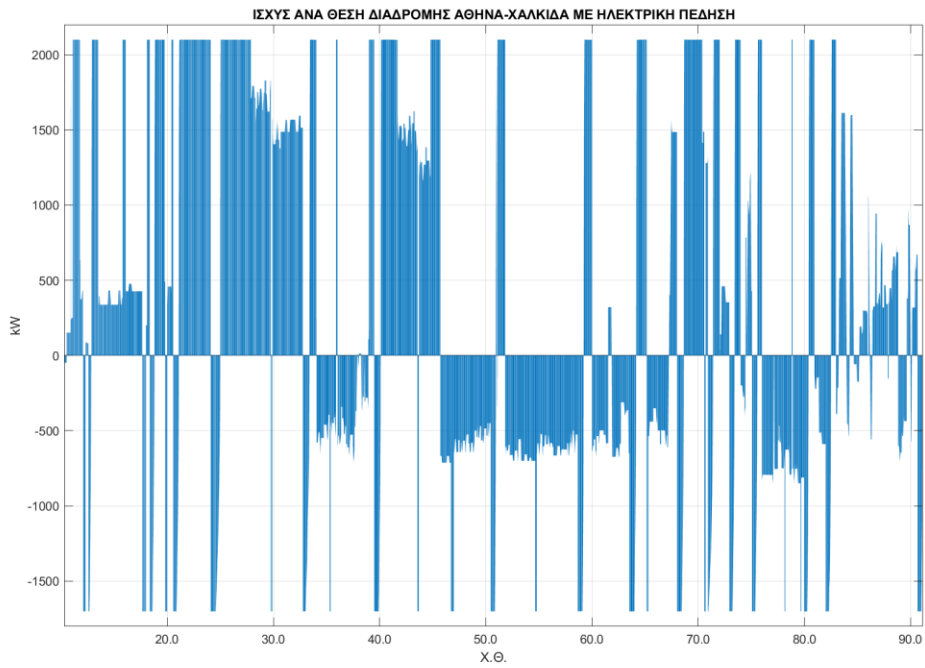
Εικόνα 64. Διάγραμμα Έλεξης συρμού.



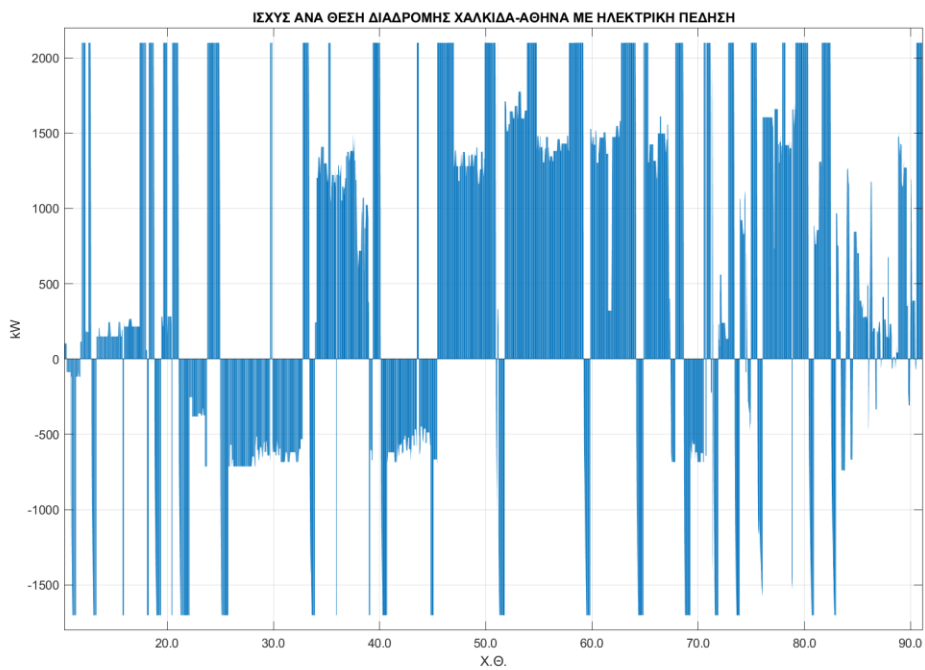
Εικόνα 65. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



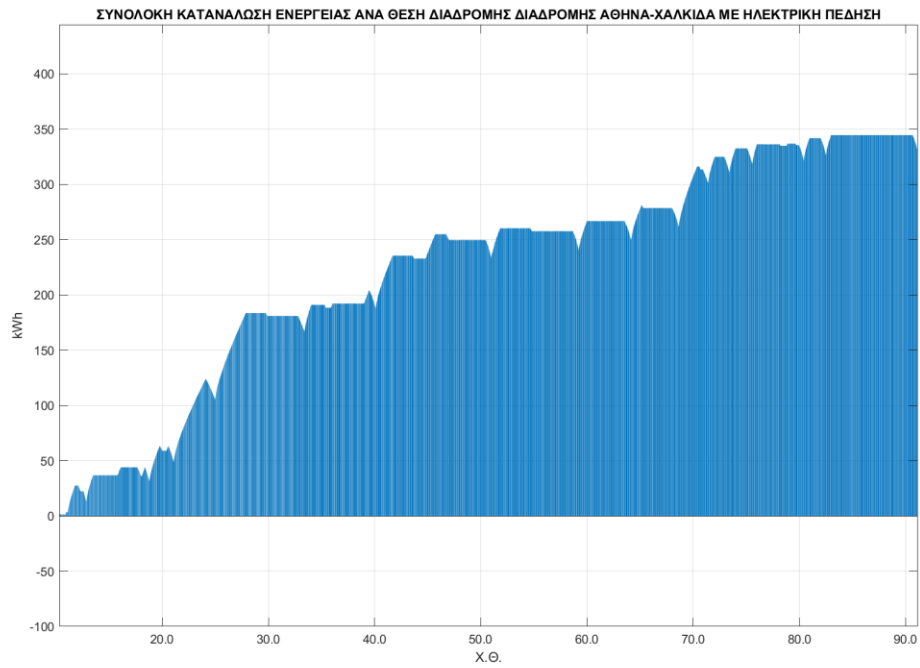
Εικόνα 66. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα.



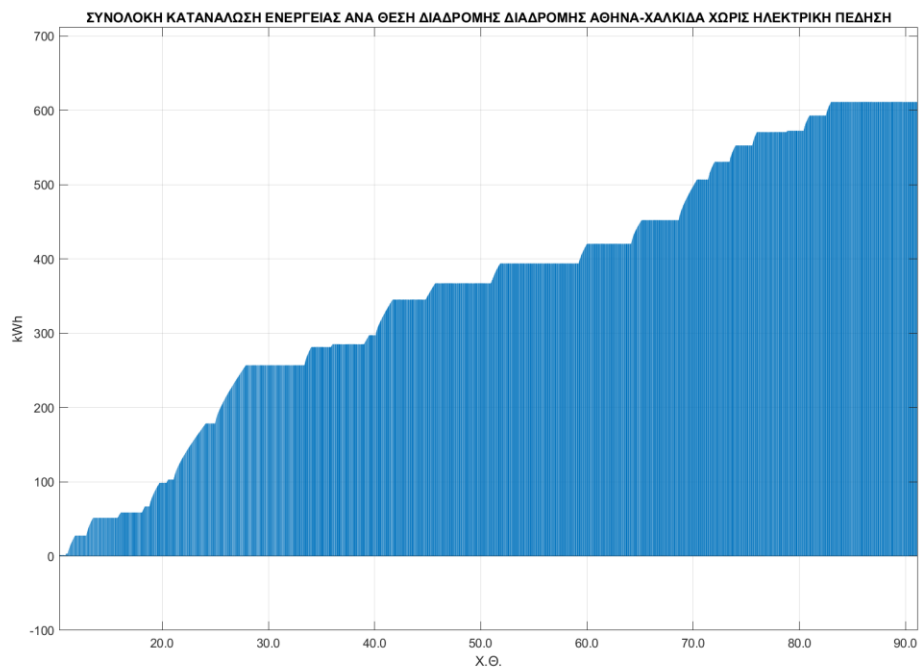
Εικόνα 67. Ισχύς ανά X.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



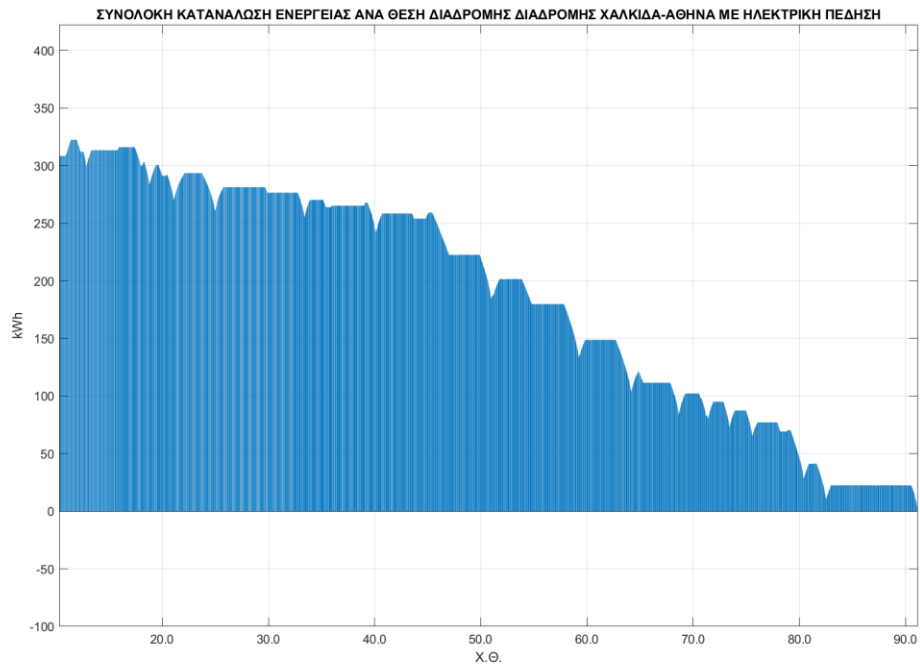
Εικόνα 68. Ισχύς ανά X.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



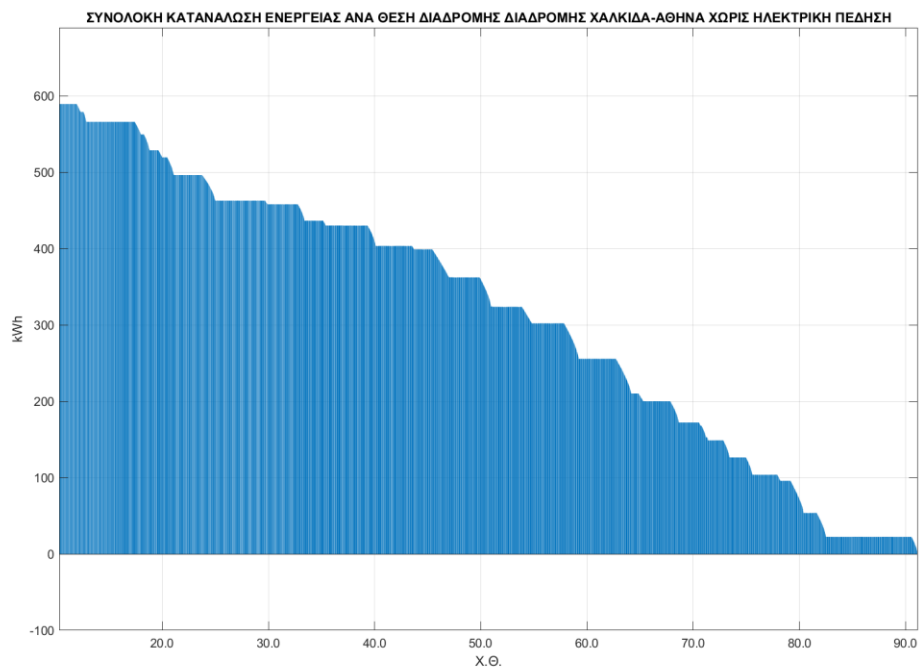
Εικόνα 69. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



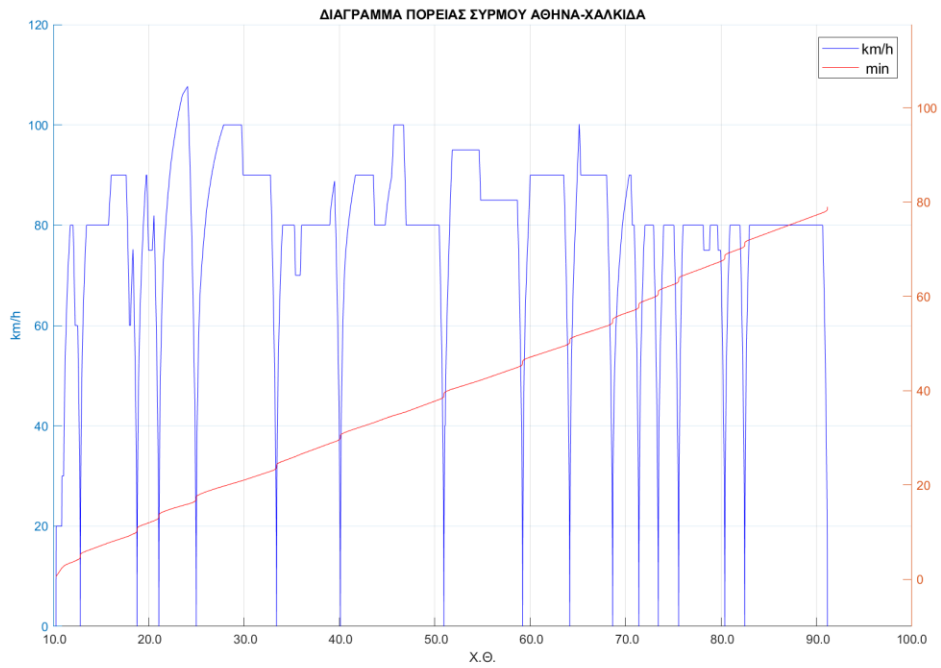
Εικόνα 70. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



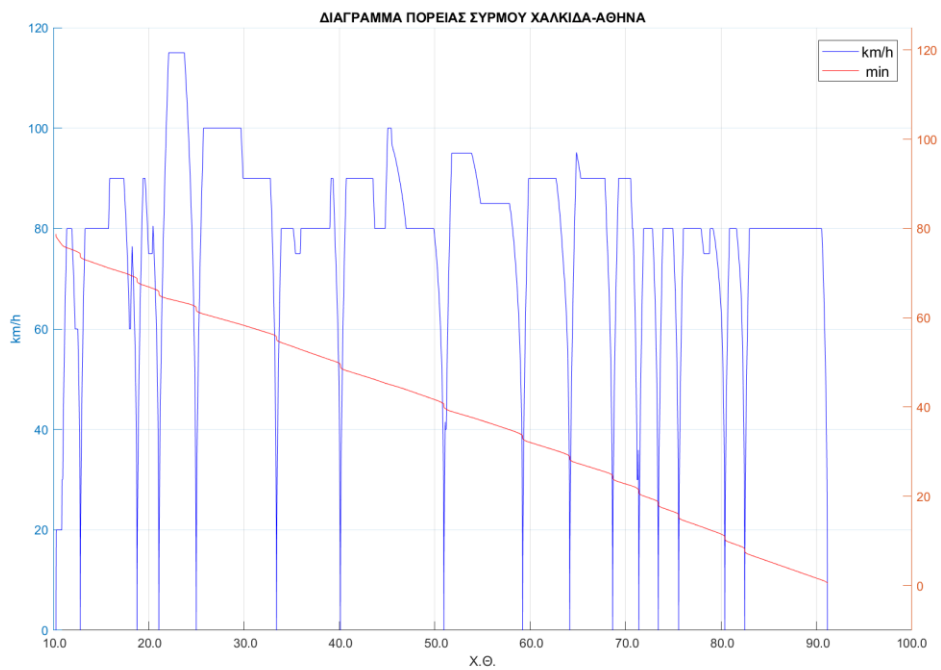
Εικόνα 71. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 72. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 73. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 74. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.

Πίνακας 11. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Class-800.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Class-800		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	27,53	12,83
Σ.Κ.Α.	0:11	66,78	31,13
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:14	102,94	48,52
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:17	178,41	105,05
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:24	256,88	166,47
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:30	297,33	187,53
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:39	367,26	233,56
ΑΥΛΩΝ	0:46	393,94	240,34
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:51	420,37	249,3
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:55	452,26	261,45
ΟΙΝΟΗ	0:58	506,96	301,1
ΔΗΛΕΣΙ	1:01	530,71	310,48
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:04	552,77	318,24
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:09	572,61	321,38
ΑΥΛΙΔΑ	1:11	593,02	326,21
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:18	611,36	330,09
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)		281,27	

Πίνακας 12. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Class-800.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Class-800		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:08	22,46	10,04
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:11	53,7	28,21
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:16	103,79	64,82
ΔΗΛΕΣΙ	0:19	126,42	72,67
ΟΙΝΟΗ	0:21	148,83	80,09
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:25	172,24	83,75
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:29	210,24	103,36
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:34	255,65	133,43
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:41	324,24	184,49
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:50	403,55	241,22
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:56	436,54	254,99
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:02	462,88	260
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:06	496,43	269,59
Σ.Κ.Α.	1:09	528,9	283,25
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:14	566,05	299,08
ΑΘΗΝΑ	1:18	589,5	307,38
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)		282,12	



#### 4.2.5 Siemens Desiro

Η σειρά Siemens Desiro αποτελεί την ραχοκοκαλιά του τροχαίου υλικού των Ελληνικών Σιδηροδρόμων. Οι συρμοί κατασκευάστηκαν την περίοδο 2004-2006 στα ναυπηγία Σκαραμαγκά. Αυτοί είναι μια παραλλαγή της σειράς Desiro προσαρμοσμένοι στις ελληνικές απαιτήσεις. Ο στόλος αριθμεί 20 πεντάδυμες ηλεκτράμαξες και εκτελεί πλήθος περιαστικών δρομολογίων από την Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Λάρισα.



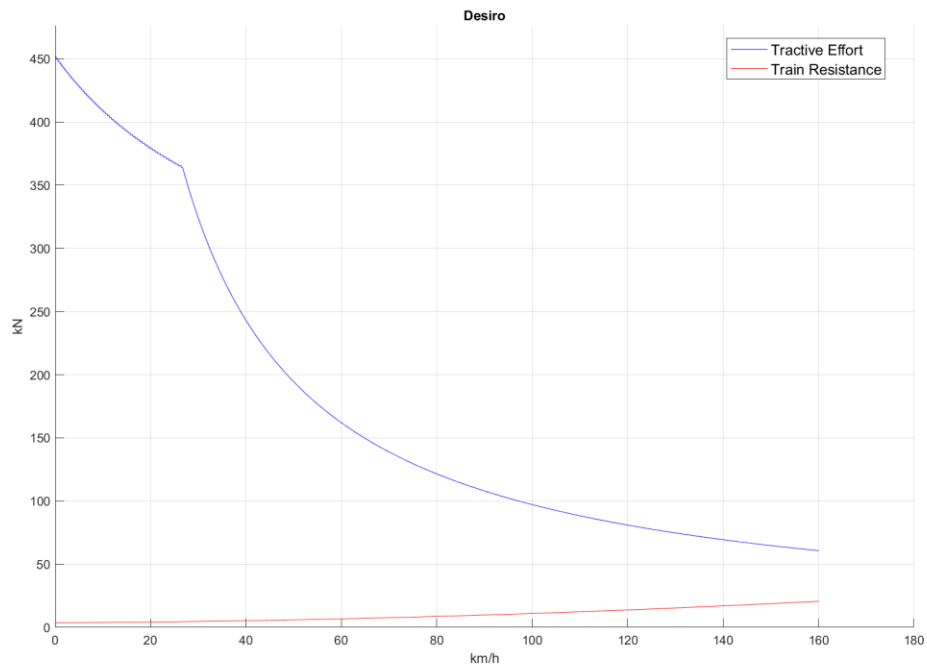
Εικόνα 75. Siemens Desiro (πηγή: Wikipedia).

Πίνακας 13. Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Siemens Desiro.

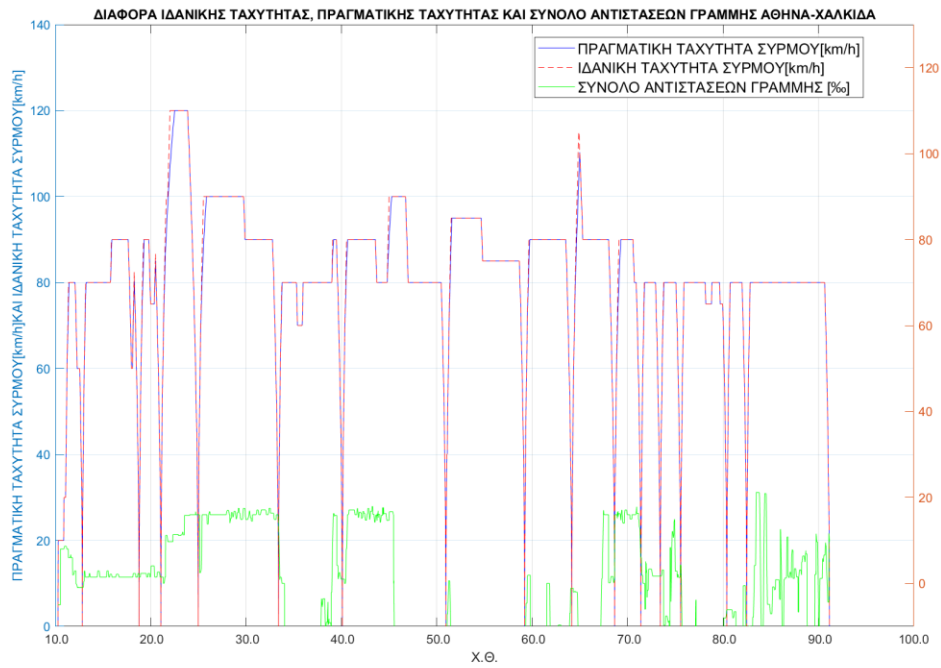
ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Siemens Desiro	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	5	
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΞΟΝΩΝ	Bo'(2')(Bo')(Bo')(2')(Bo')	
ΜΑΖΑ ΚΕΝΟ	185	tn
ΜΗΚΟΣ	89,3	m
ΥΨΟΣ	4,2	m
ΠΛΑΤΟΣ	2,8	m
ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΗ	3840	kW
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	313	
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	160	km/h
ΕΤΗ ΚΑΤΣΚΕΥΗΣ	2004-2006	
ΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	2004-	

$$\lambda = 0.55, \quad k_1 = 13 * 10^{-4}, \quad k_2 = 27.5 * 10^{-6}$$

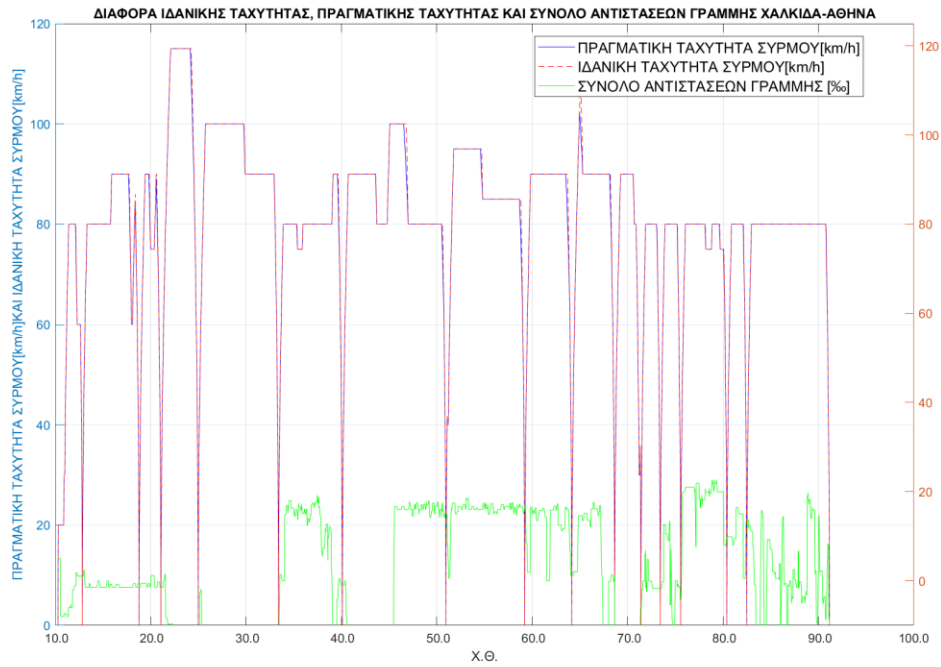
Οι παραπάνω συντελεστές επιλέχθηκαν με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τους προηγούμενους συρμούς.



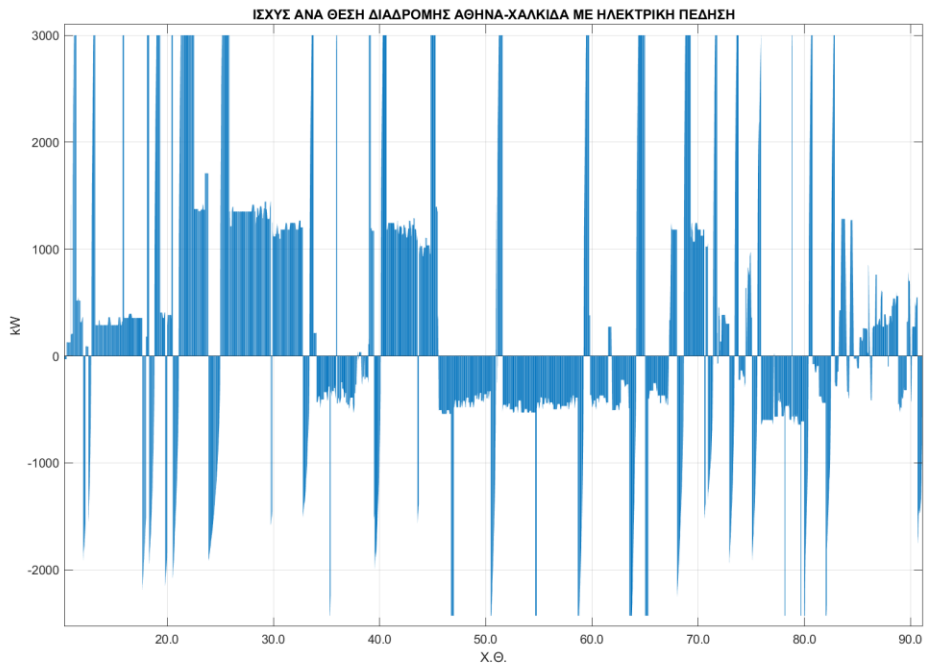
Εικόνα 76. Διάγραμμα Έλξης συρμού.



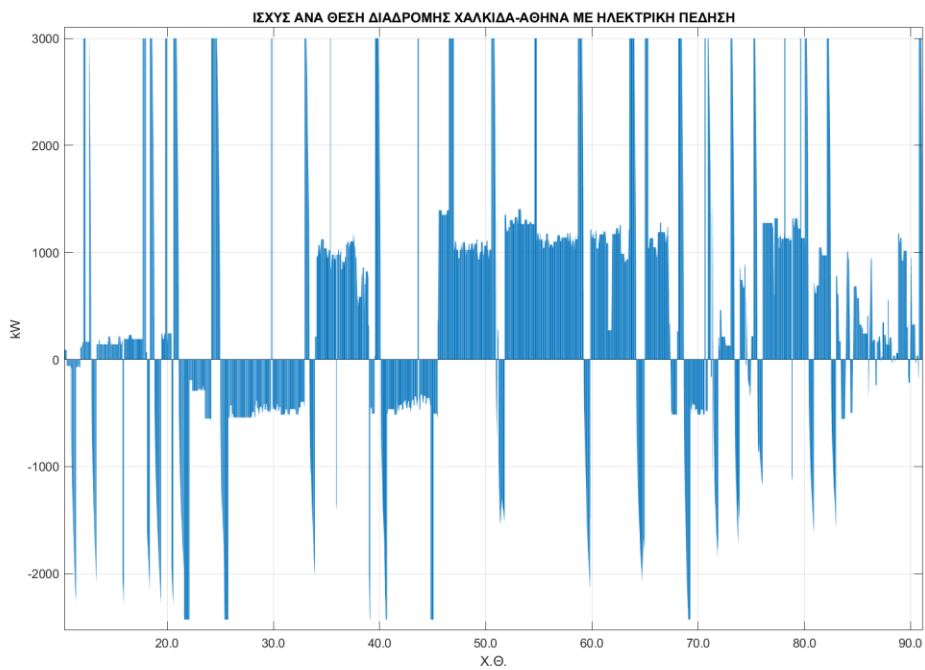
Εικόνα 77. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα.



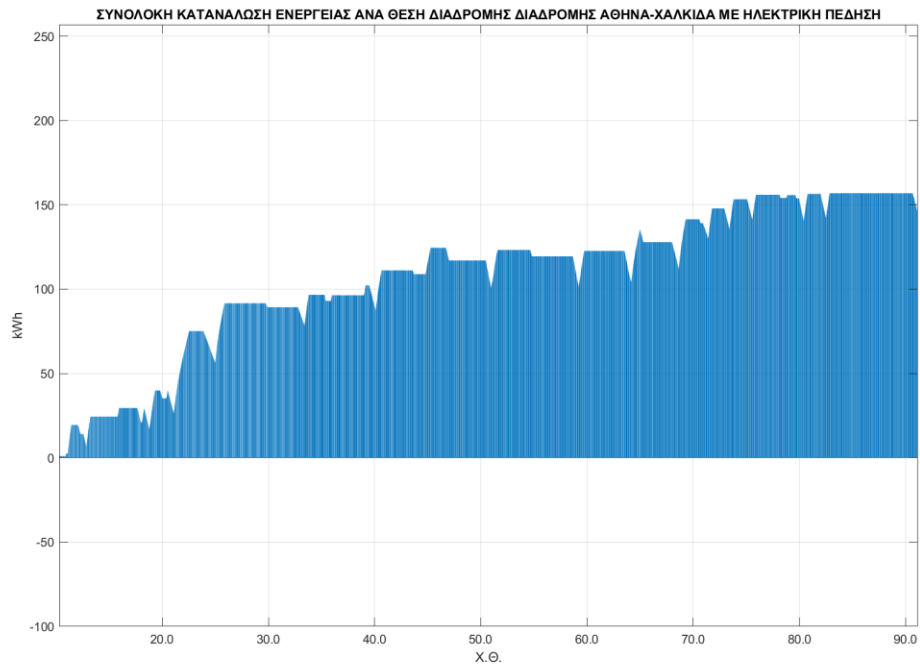
Εικόνα 78. Διαφορά ιδανικής ταχύτητας, πραγματικής ταχύτητας και σύνολο αντιστάσεων γραμμής ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα.



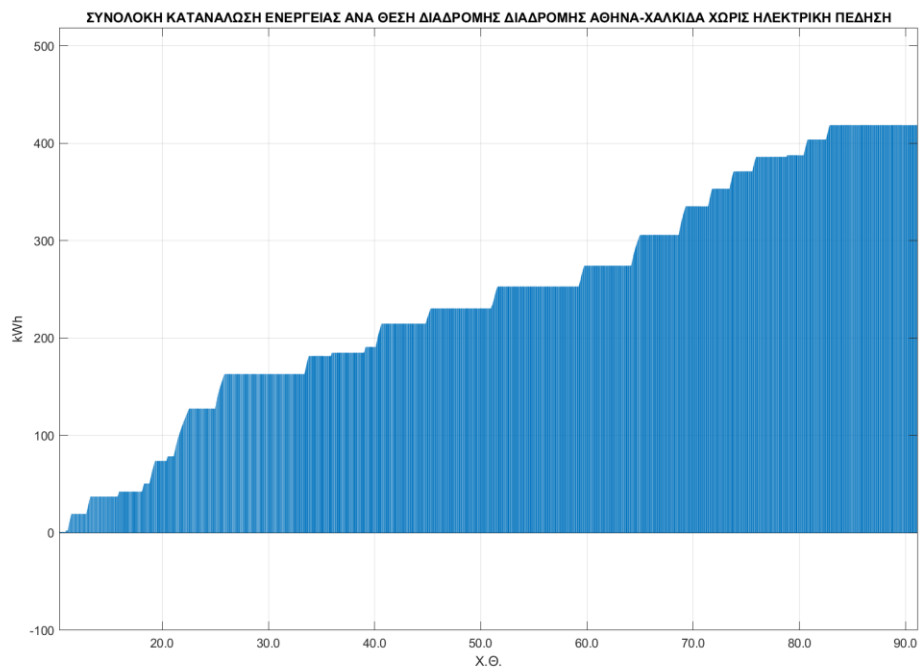
Εικόνα 79. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



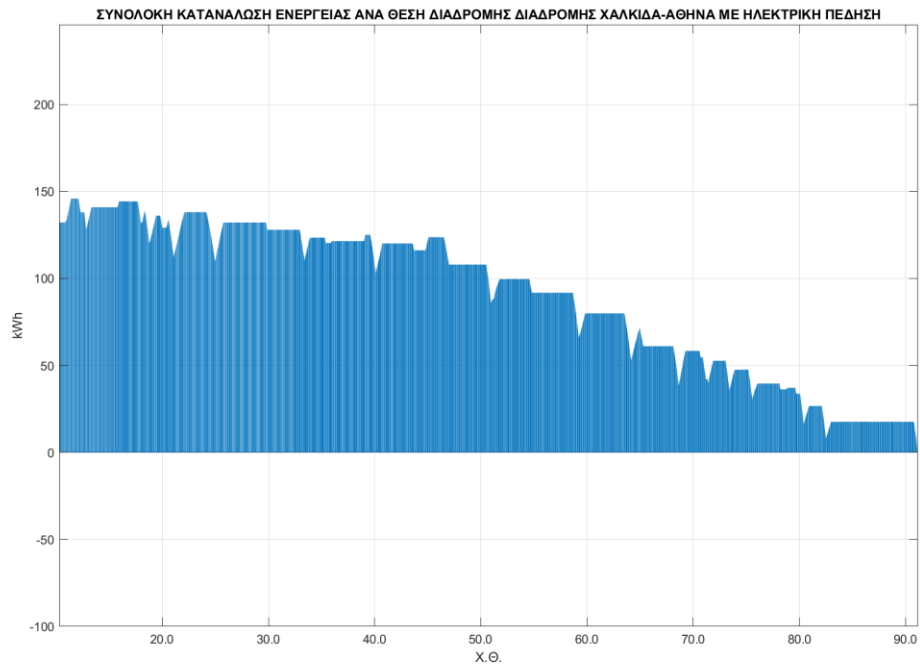
Εικόνα 80. Ισχύς ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



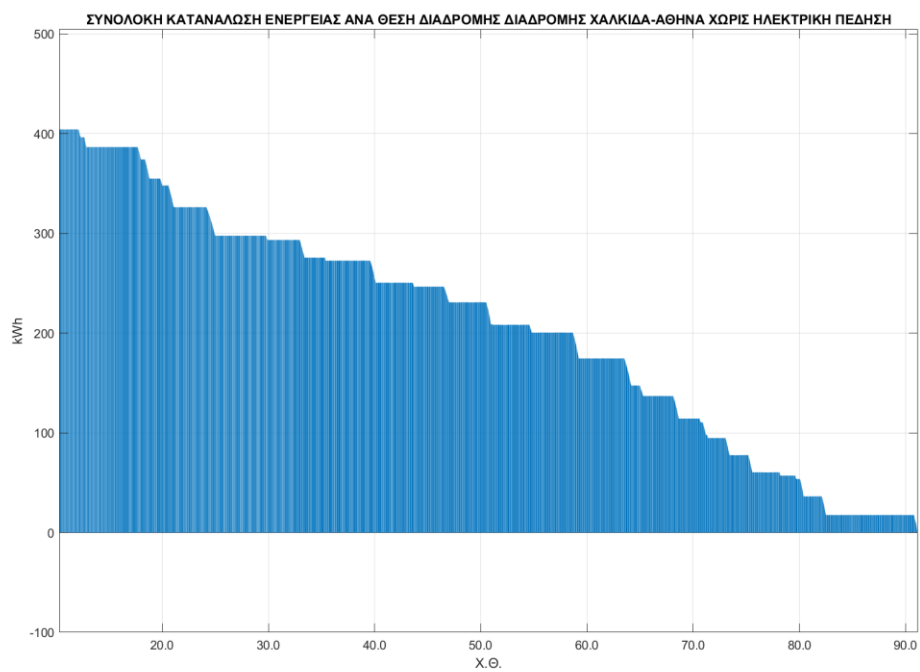
Εικόνα 81. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά X.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα με ηλεκτρική πέδηση.



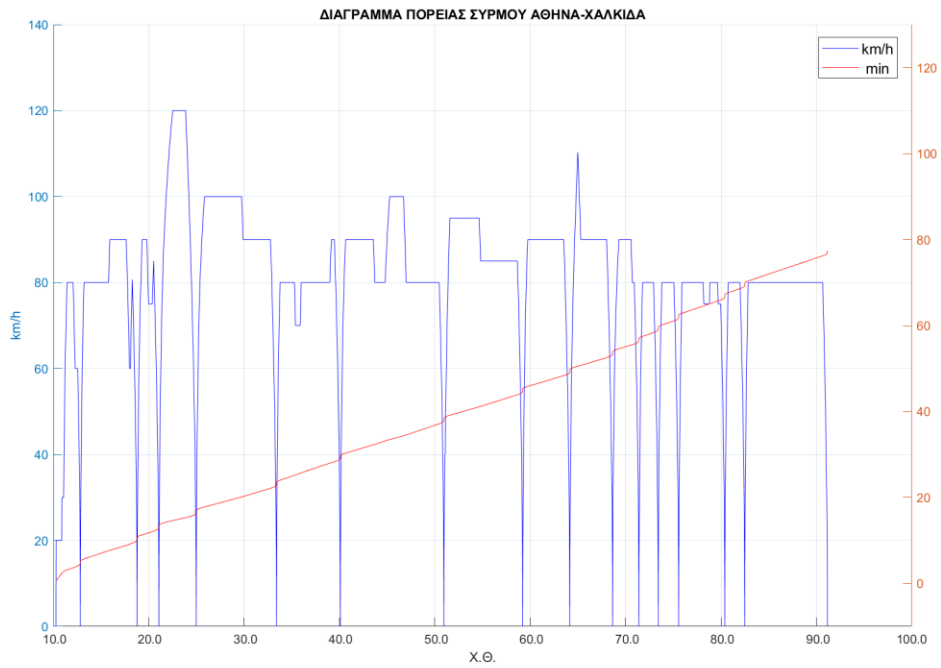
Εικόνα 82. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά X.Θ. διαδρομής Αθήνα-Χαλκίδα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



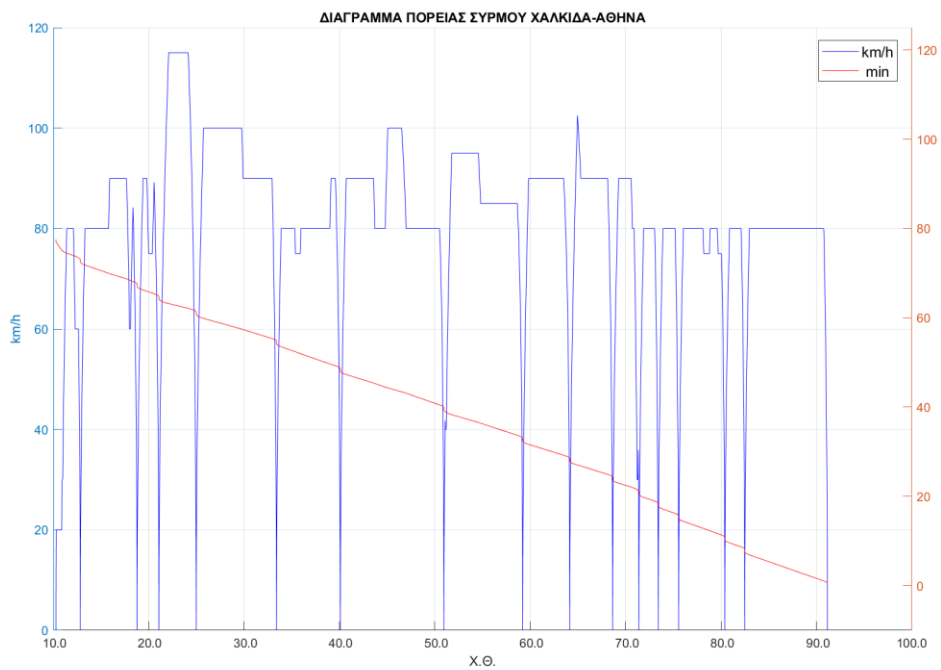
Εικόνα 83. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα με ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 84. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά Χ.Θ. διαδρομής Χαλκίδα-Αθήνα χωρίς ηλεκτρική πέδηση.



Εικόνα 85. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα.



Εικόνα 86. Διάγραμμα πορείας συρμού για τη διαδρομή Χαλκίδα-Αθήνα.

Πίνακας 14. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Αθήνα-Χαλκίδα για τον συρμό Siemens Desiro.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Siemens Desiro		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	19,45	6,63
Σ.Κ.Α.	0:11	50,68	16,73
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:13	78,54	26,1
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:17	127,55	56,1
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:23	163,07	78,14
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:30	190,84	87,18
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:38	230,4	100,74
ΑΥΛΩΝ	0:45	252,88	101,3
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:50	274,21	103,83
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:54	305,86	112,04
ΟΙΝΟΗ	0:57	335,25	129,86
ΔΗΛΕΣΙ	1:00	353,23	135,45
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:02	371,09	141,06
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:07	387,63	140,34
ΑΥΛΙΔΑ	1:10	403,75	142,03
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:17	418,58	144,91
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			273,67

Πίνακας 15. Χρονικά αποτελέσματα και αποτελέσματα για κατανάλωση ενέργειας με και χωρίς ηλεκτρική πέδηση δρομολογίου Χαλκίδα-Αθήνα για τον συρμό Siemens Desiro.

ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Siemens Desiro		
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ		
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ(h)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ (kWh)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:08	17,62	7,97
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:11	36,33	16,36
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:16	60,45	30,4
ΔΗΛΕΣΙ	0:18	77,63	35,55
ΟΙΝΟΗ	0:21	94,78	39,83
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:24	114,28	38,41
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:28	147,45	52,72
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:33	174,66	65,96
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:40	208,76	85,85
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:49	250,54	102,91
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:55	275,7	110,18
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:01	297,67	109,51
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:05	326,3	112,09
Σ.Κ.Α.	1:08	354,97	119,72
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:13	386,55	128,15
ΑΘΗΝΑ	1:17	404,35	131,42
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)			272,93



### 4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεταξύ συρμών

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για όλους τους συρμούς.

#### 4.3.1 Χρονικά αποτελέσματα

Οι πίνακες Πίνακας 16 και Πίνακας 17 παρουσιάζουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα και Χαλκίδα – Αθήνα αντίστοιχα. Οι στήλες «Διαφορά (min)» δείχνουν την χρονική απόκλιση των συρμών που προσομοιάστηκαν στο πρόγραμμα σε σχέση με το πραγματικό δρομολόγιο της Hellenic Train.

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας χρονικών αποτελεσμάτων δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ		ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ									
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΟΣΕ	ΣΥΡΜΟΙ									
		Z6100		BR-423		CLASS 450		CLASS 800		DESIRO	
		ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)
ΑΘΗΝΑ	0:00	0:00	0	0:00	0	0:00	0	0:00	0	0:00	0
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	0:05	0:05	0	0:05	0	0:05	0	0:05	0	0:05	0
Σ.Κ.Α.	0:10	0:11	1	0:11	1	0:11	1	0:11	1	0:11	1
ΑΧΑΡΝΑΙ	0:13	0:14	1	0:13	0	0:14	1	0:14	1	0:13	0
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	0:16	0:19	3	0:17	1	0:17	1	0:17	1	0:17	1
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:23	0:28	5	0:23	0	0:24	1	0:24	1	0:23	0
ΑΦΙΔΝΑΙ	0:29	0:34	5	0:30	1	0:31	2	0:30	1	0:30	1
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:38	0:45	7	0:38	0	0:39	1	0:39	1	0:38	0
ΑΥΛΩΝ	0:45	0:52	7	0:45	0	0:46	1	0:46	1	0:45	0
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:49	0:56	7	0:50	1	0:51	2	0:51	2	0:50	1
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:53	1:01	7	0:54	1	0:55	2	0:55	2	0:54	1
ΟΙΝΟΗ	0:56	1:05	9	0:57	1	0:58	2	0:58	2	0:57	1
ΔΗΛΕΣΙ	0:59	1:08	9	0:59	0	1:01	2	1:01	2	1:00	1
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	1:02	1:11	9	1:02	0	1:04	2	1:04	2	1:02	0
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	1:06	1:16	10	1:07	1	1:09	3	1:09	3	1:07	1
ΑΥΛΙΔΑ	1:09	1:19	10	1:10	1	1:11	2	1:11	2	1:10	1
ΧΑΛΚΙΔΑ	1:18	1:26	8	1:17	-1	1:19	1	1:18	0	1:17	-1

Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας χρονικών αποτελεσμάτων δρομολόγιο Χαλκίδα-Αθήνα.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ		ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
ΣΤΑΣΕΙΣ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΟΣΕ	ΣΥΡΜΟΙ									
		Z6100		BR-423		CLASS 450		CLASS 800		DESIRO	
		ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ(min)
ΧΑΛΚΙΔΑ	0:00	0:00	0	0:00	0	0:00	0	0:00	0	0:00	0
ΑΥΛΙΔΑ	0:10	0:08	-2	0:08	-2	0:08	-2	0:08	-2	0:08	-2
ΚΑΛΟΧΩΡΙ-ΠΑΝΤΕΙΧΙ	0:12	0:12	0	0:11	-1	0:11	-1	0:11	-1	0:11	-1
ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ	0:17	0:18	1	0:16	-1	0:16	-1	0:16	-1	0:16	-1
ΔΗΛΕΣΙ	0:19	0:24	5	0:18	-1	0:19	0	0:19	0	0:18	-1
ΟΙΝΟΗ	0:23	0:24	1	0:21	-2	0:21	-2	0:21	-2	0:21	-2
ΟΙΝΟΦΥΤΑ	0:26	0:27	1	0:24	-2	0:25	-1	0:25	-1	0:24	-2
ΑΓ. ΘΩΜΑΣ	0:30	0:32	2	0:28	-2	0:29	-1	0:29	-1	0:28	-2
ΑΥΛΩΝΑΣ	0:34	0:37	3	0:33	-1	0:34	0	0:34	0	0:33	-1
ΣΦΕΝΔΑΛΗ	0:41	0:46	5	0:40	-1	0:41	0	0:41	0	0:40	-1
ΑΦΙΔΝΕΣ	0:50	0:57	7	0:49	-1	0:50	0	0:50	0	0:49	-1
ΑΓ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ	0:56	1:04	8	0:55	-1	0:56	0	0:56	0	0:55	-1
ΔΕΚΕΛΕΙΑ	1:02	1:10	8	1:01	-1	1:02	0	1:02	0	1:01	-1
ΑΧΑΡΝΕΣ	1:06	1:14	8	1:05	-1	1:06	0	1:06	0	1:05	-1
Σ.Κ.Α.	1:08	1:17	9	1:07	-1	1:09	1	1:09	1	1:08	-1
ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	1:13	1:23	10	1:13	-1	1:14	1	1:14	1	1:13	0
ΑΘΗΝΑ	1:19	1:27	8	1:17	-2	1:18	-1	1:18	-1	1:17	-2

### 4.3.2 Αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας συρμών

Ο Πίνακας 18 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής κατανάλωσης για τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα και Χαλκίδα – Αθήνα αλλά και τον μέσο όρο αυτών για το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα-Αθήνα. Παρουσιάζει αναλυτικά για κάθε δρομολόγιο την κατανάλωση ενέργειας χωρίς ηλεκτρική-αναγεννητική πέδηση, με αναγεννητική πέδηση και την μεταξύ τους διαφορά με το αντίστοιχο ποσό.

Πίνακας 18. Κατανάλωση ενέργειας δρομολογίων.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ									
ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	Z6100		BR-423		Class-450		Class-800		Siemens Desiro	
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
		401,34	328,38	244,35	82,45	444,19	242,59	611,36	330,09	418,58
ΔΙΑΦΟΡΑ (kWh)	72,96		161,9		201,6		281,27		273,67	
ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	-18,18		-66,26		-45,39		-46,01		-65,38	
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
		505,15	430,85	237,33	76,13	430,59	228,42	589,5	307,38	404,35
ΔΙΑΦΟΡΑ (kWh)	74,3		161,2		202,17		282,12		272,93	
ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	-14,71		-67,92		-46,95		-47,86		-67,5	
ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
		453,25	379,62	240,84	79,29	437,39	235,51	600,43	318,74	411,47
ΔΙΑΦΟΡΑ (kWh)	73,63		161,55		201,88		281,69		273,3	
ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	-16,24		-67,08		-46,16		-46,91		-66,42	
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ km (kWh/km)	5,6	4,69	2,97	0,98	5,4	2,91	7,41	3,94	5,08	1,71

Στην κατανάλωση ενέργειας δεν έχει συμπεριληφθεί η λειτουργία συστημάτων κλιματισμού και λοιπών ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων.

## 4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεταξύ συρμών και λεωφορείου

### 4.4.1 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης

Οι παρακάτω πίνακες αποτελούν προϊόν σύγκρισης του οικολογικού και ενεργειακού αποτυπώματος για κάθε επιβατοχιλιόμετρο ανάλογα με το ποσοστό πλήρωσης των μέσων. Έγινε σύγκριση μεταξύ σιδηρόδρομου και ενός λεωφορείου που εκτελεί τη διαδρομή Αθήνα-Χαλκίδα. Θεωρήθηκε λεωφορείο Mercedes-Benz Travego 55 θέσεων. Για τον σκοπό αυτόν, έγιναν κάποιες θεωρήσεις δεδομένων. Αναλυτικά, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Συρμοί
  - Μέσος όρος εκπομπών για κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου είναι στα 285 gr CO<sub>2</sub>/kWh
  - Δεν λαμβάνονται υπόψη δευτερογενείς εκπομπές που έχουν να κάνουν πέραν της πρόωσης του συρμού
  - Κόστος MWh 300 €
- Λεωφορεία
  - Μέσος όρος κατανάλωσης ενός τουριστικού λεωφορείου 55 θέσεων είναι τα 25 l/100km
  - Θερμογόνος δύναμη πετρελαίου κίνησης 10,96 kWh/l
  - Εκπομπές κατά την καύση του πετρελαίου 2640 gr/kWh
  - Μήκος οδικής διαδρομής 71,4 km
  - Κόστος 1l πετρελαίου 1,6 €

Υπολογίστηκε η Wh/επιβατοχιλιόμετρο για κάθε συρμό, με και χωρίς ηλεκτρική πέδη, με θεώρηση ανά 10 % πληρότητα. Ομοίως και για το λεωφορείο. Οι Πίνακας 19 και Πίνακας 20 δείχνουν τα αποτελέσματα από τους παραπάνω υπολογισμούς.

Πίνακας 19. Μέσος όρος κατανάλωσης ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
	Z6100		BR-423		Class-450		Class-800		Siemens Desiro	
ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	453,25	379,62	240,84	79,29	437,39	235,51	600,43	318,74	411,47	138,17
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΘΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	273		192		285		326		313	
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ (%)	Wh/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ									
10	205	172	155	51	189	102	227	121	162	54
20	102	86	77	25	95	51	114	60	81	27
30	68	57	52	17	63	34	76	40	54	18
40	51	43	39	13	47	26	57	30	41	14
50	41	34	31	10	38	20	45	24	32	11
60	34	29	26	8	32	17	38	20	27	9
70	29	25	22	7	27	15	32	17	23	8
80	26	21	19	6	24	13	28	15	20	7
90	23	19	17	6	21	11	25	13	18	6
100	20	17	15	5	19	10	23	12	16	5

Πίνακας 20. Μέσος όρος κατανάλωσης ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο.

ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ	
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ	Wh/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ
10	499
20	250
30	166
40	125
50	100
60	83
70	71
80	62
90	55
100	50

Από τους πίνακες αυτούς είναι άμεσα εμφανές πως ο σιδηρόδρομος είναι το πιο οικολογικό μέσο χερσαίων μεταφορών. Πχ ο συρμός Siemens Desiro με πληρότητα

10% και χωρίς αναγεννητική πέδηση, που ισοδυναμεί με 31 επιβαίνοντες, έχει παρεμφερή κατανάλωση με το τουριστικό λεωφορείο με πληρότητα 30% που ισοδυναμεί με 15 επιβαίνοντες.

#### 4.4.2 Αποτελέσματα εκπομπών CO<sub>2</sub>

Αντίστοιχα και με το Κεφάλαιο 4.4.1, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία, για τον υπολογισμό και την σύγκριση των αποτελεσμάτων των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακας 21 & Πίνακας 22.

Πίνακας 21. Μέσος όρος εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
	Z6100		BR-423		Class-450		Class-800		Siemens Desiro	
ΟΝΟΜΑ ΣΥΡΜΟΥ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	453,25	379,62	240,84	79,29	437,39	235,51	600,43	318,74	411,47	138,17
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ (%)	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (gr/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ)									
10	58	49	44	15	54	29	65	34	46	16
20	29	24	22	7	27	15	32	17	23	8
30	19	16	15	5	18	10	22	11	15	5
40	15	12	11	4	13	7	16	9	12	4
50	12	10	9	3	11	6	13	7	9	3
60	10	8	7	2	9	5	11	6	8	3
70	8	7	6	2	8	4	9	5	7	2
80	7	6	6	2	7	4	8	4	6	2
90	6	5	5	2	6	3	7	4	5	2
100	6	5	4	1	5	3	6	3	5	2

Πίνακας 22. Μέσος όρος εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο.

ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ	
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> (gr/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ)
10	1318
20	659
30	439
40	329
50	264
60	220
70	188
80	165
90	146
100	132

Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι ακόμα πιο αποκαλυπτικά. Στην δυσμενέστερη περίπτωση για τον συρμό Siemens Desiro με πληρότητα 10%, οι εκπομπές είναι κατά 186% μικρότερες, σε σχέση με το πλήρες τουριστικό λεωφορείο.

### 4.4.3 Συγκριτικά κόστη καυσίμου

Τέλος στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται αναλυτικά τα κόστη ανά περίπτωση, βασιζόμενοι στην ίδια συλλογιστική με τα Κεφάλαια 4.4.1 & 4.4.2.

Και σε αυτό, ο σιδηρόδρομος έχει σημαντικό πλεονέκτημα ειδικά στην περίπτωση της αναγεννητικής πέδησης.

Πίνακας 23. Μέσος όρος κόστος καυσίμου ανά επιβατοχιλιόμετρο για συρμούς.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΟ	ΑΘΗΝΑ-ΧΑΛΚΙΔΑ-ΑΘΗΝΑ									
	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ	ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗ
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	453,25	379,62	240,84	79,29	437,39	235,51	600,43	318,74	411,47	138,17
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ (%)	ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (€cents/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ)									
10	6,2	5,2	4,7	1,5	5,7	3,1	6,8	3,6	4,9	1,6
20	3,1	2,6	2,3	0,8	2,9	1,5	3,4	1,8	2,4	0,8
30	2	1,7	1,6	0,5	1,9	1	2,3	1,2	1,6	0,5
40	1,5	1,3	1,2	0,4	1,4	0,8	1,7	0,9	1,2	0,4
50	1,2	1	0,9	0,3	1,1	0,6	1,4	0,7	1	0,3
60	1	0,9	0,8	0,2	1	0,5	1,1	0,6	0,8	0,3
70	0,9	0,8	0,7	0,2	0,8	0,5	1	0,5	0,7	0,2
80	0,8	0,6	0,6	0,2	0,7	0,4	0,8	0,5	0,6	0,2
90	0,7	0,6	0,5	0,2	0,6	0,3	0,8	0,4	0,5	0,2
100	0,6	0,5	0,5	0,2	0,6	0,3	0,7	0,4	0,5	0,2

Πίνακας 24. Μέσος όρος κόστος καυσίμου ανά επιβατοχιλιόμετρο για λεωφορείο.

ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ	
ΠΛΗΡΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (€cents/ΕΠΙΒΑΤΟΧΙΛΙΟΜΕΤΡΟ)
10	7,5
20	3,8
30	2,5
40	1,9
50	1,5
60	1,2
70	1,1
80	0,9
90	0,8
100	0,8

## 5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 5.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη ψηφιοποίηση, τον προγραμματισμό και τη σύνταξη διαγραμμάτων πορείας Προαστιακού Σιδηροδρόμου και συγκεκριμένα για τους συρμούς που εκτελούν τη διαδρομή Αθήνα – Χαλκίδα. Για τον σκοπό αυτό συλλέχθηκαν τα γεωμετρικά στοιχεία της Σιδηροδρομικής Γραμμής (Σ.Γ.) και συγκεκριμένα η μηκοτομή και η οριζοντιογραφία, από τον ΟΣΕ ώστε να υπολογιστεί ανά χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) η συνολική αντίσταση της Σ.Γ. Έγινε καταγραφή των ελκτικών δεδομένων των συρμών που εκτελούν το δρομολόγιο Αθήνα-Χαλκίδα-Αθήνα και των μεγεθών των μηχανικών-αεροδυναμικών τους αντιστάσεων. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των χρονικών, ενεργειακών αποτελεσμάτων, των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub> και του κόστους καυσίμου του σιδηροδρόμου σε σχέση με την ανταγωνιστική μορφή χερσαίων μεταφορών που είναι τα τουριστικά λεωφορεία (ΚΤΕΛ) έγινε σύγκριση της προσομοίωσης δρομολογίου σε σχέση με το πραγματικό δρομολόγιο.

Η προσομοίωση του δρομολογίου παρήγαγε χρονικά αποτελέσματα πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Η κατανάλωση ενέργειας είναι αντιπροσωπευτική του οικολογικού χαρακτήρα του σιδηροδρόμου σε σχέση με τις αντίστοιχες οδικές μεταφορές. Επιπλέον, ανέδειξε το πρόβλημα των σιδηροδρομικών υποδομών, που λόγω παλαιότητας αυξάνουν κατά πολύ τη χρονοαπόσταση μεταξύ της Αθήνας και Χαλκίδας, καθιστώντας τον σιδηρόδρομο όχι απόλυτα ανταγωνιστικό σε σχέση με το υπεραστικό λεωφορείο.

### 5.2 Βασικά συμπεράσματα

Κατά την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της Σ.Γ. , έγινε εμφανές πως η γραμμή από τον Σ.Σ. Αθήνας έως τον Σ.Σ. Οινόης βασίζεται στη μεγάλη ανακατασκευή που έγινε το 1964, που η οποία βελτίωνε την ήδη υπάρχουσα Σ.Γ. που είχε κατασκευαστεί χρόνια πριν. Παρόλα αυτά έχει περιορισμένη ταχύτητα κίνησης λόγω των μικρών κυκλικών τόξων που υπάρχουν στην οριζοντιογραφία. Αυτό περιορίζει σήμερα την ταχύτητα κίνησης στην μέση τιμή των 88 km/h. Επιπλέον, ένας επιπρόσθετος περιοριστικός παράγοντας είναι η γραμμολογία των σταθμών. Με εξαίρεση τον Σ.Σ. Αθήνας, Σ.Σ. Αγ. Αναργύρων και Σ.Σ. Οινόης όλοι οι υπόλοιποι Σ.Σ. έχουν μία γραμμή ανά κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό περιορίζει αισθητά τη συνολική χωρητικότητα της γραμμής καθώς τα δρομολόγια που έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα αναγκάζονται σε μεγάλης διάρκειας στάσεις ώστε να παραχωρήσουν χώρο στα δρομολόγια Intercity. Πέραν αυτού, περιορίζεται σημαντικά η κυκλοφορία των εμπορικών συρμών εντός της ημέρας, με άμεση επίπτωση στις δυνατότητες συνδυασμένων μεταφορών στον Ελλαδικό χώρο. Αντίστοιχα η Σ.Γ. από τον Σ.Σ. Οινόης έως τον τερματικό Σ.Σ. Χαλκίδας, έχει ανακατασκευαστεί σε μεγάλο βαθμό τη

δεκαετία του 2000. Παρά ταύτα, το δύσκολο ανάγλυφο και οι πολλοί οικισμοί που έπρεπε η Σ.Γ. να εξυπηρετήσει, η μέση ταχύτητα περιορίστηκε στα 78 km/h. Βέβαια σε αυτό το τμήμα δεν τίθενται περιορισμοί χωρητικότητας του δικτύου, καθώς ένας μόνο συρμός κινείται εντός Σ.Γ. κάθε στιγμή λόγω της χαμηλής πυκνότητας των δρομολογίων.

Οι συρμοί οι οποίοι ήταν ικανοί να κινηθούν με τη δρομολογιακή ταχύτητα εμφάνισαν σημαντική χρονική ακρίβεια, με αποκλίσεις  $\pm 2$  λεπτά. Αυτές θεωρούνται αποδεκτές γιατί το πρόγραμμα MATLAB δεν λαμβάνει υπόψη:

- Τη συμπεριφορά των οδηγών κοντά σε επικίνδυνα σημεία που κινούνται με χαμηλότερη ταχύτητα από την δρομολογιακή για λόγους μεγαλύτερης ασφάλειας.
- Τις κυκλοφορικές συνθήκες.

Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα ανέδειξε το οικολογικό πλεονέκτημα του σιδηροδρόμου σε σχέση με τις οδικές μεταφορές. Ένα τυπικό τουριστικό λεωφορείο 55 θέσεων για να πραγματοποιήσει το δρομολόγιο από τον Σταθμό ΚΤΕΛ Λιοσίων έως τον Σταθμό ΚΤΕΛ Ευβοίας, θα καταναλώσει 196 kWh ή 2,74 kWh/km. Αντίστοιχα, ο Siemens Desiro χωρίς αναγεννητική πέδηση 411,47 kWh ενώ με αναγεννητική πέδηση 138,17 kWh όπως υποδηλώνει ο Πίνακας 18. Πρακτικά ο συρμός έχει μια μέση κατανάλωση 5,08 kWh/km χωρίς αναγεννητική πέδηση και 1,7 kWh/km με αναγεννητική πέδηση, ενώ το λεωφορείο 2,74 kWh/km. Ακόμα και στην περίπτωση της μη αναγεννητικής πέδησης, ο συρμός μεταφέρει πάνω από 5,6 φορές περισσότερους επιβάτες σε σχέση με το τουριστικό λεωφορείο. Έτσι η κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο και ανά επιβάτη διαμορφώνεται στον παρακάτω πίνακα:

*Πίνακας 25. Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας ανά χιλιόμετρο και ανά επιβάτη μεταξύ του συρμού Siemens Desiro και τουριστικού λεωφορείου.*

Κατανάλωση χωρίς αναγεννητική πέδηση ανά επιβάτη (kWh/km/pass)	Κατανάλωση με αναγεννητική πέδηση ανά επιβάτη (kWh/km/pass)	Κατανάλωση τουριστικού λεωφορείου (kWh/km/pass)
0,016	0,005	0,049

Επιπλέον, ο Πίνακας 19 & Πίνακας 20 αναλύουν εκτενέστερα την κατανάλωση ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο σε διαφορές περιπτώσεις πληρότητας. Στον πίνακα 20 εντοπίζεται πως το τουριστικό λεωφορείο με πληρότητα 50%, που ισοδυναμεί με 27 επιβαίνοντες, έχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τον συρμό Siemens Desiro με πληρότητα 10% που ισοδυναμεί με 31 επιβάτες. Όμως στην περίπτωση που το ηλεκτρικό δίκτυο επιτρέπει την αναγεννητική πέδηση, η κατανάλωση ενέργειας γίνεται αισθητά μικρότερη. Όσο αυξάνεται η πληρότητα στον συρμό, τόσο βελτιώνεται η ενεργειακή του απόδοση. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως ο

σιδηρόδρομος ακόμα και με μικρή πληρότητα και αναγεννητική πέδηση, είναι σημαντικά πιο αποδοτικός ενεργειακά από τις οδικές μεταφορές.

Το συμπέρασμα αυτό επεκτείνεται και στον Πίνακα 21 & Πίνακα 22 αλλά και στους Πίνακα 23 & Πίνακα 24 (πίνακες κόστους καυσίμου). Στο κομμάτι των εκπομπών, λόγω της συνεχής διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα της χώρας, είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές του τουριστικού λεωφορείου. Χαρακτηριστικό αυτού είναι το γεγονός πως ακόμα και ένας σχεδόν κενός συρμός έχει πολύ μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα από ένα πλήρες λεωφορείο ανά επιβατοχιλιόμετρο. Επιπλέον, στο κόστος καυσίμου ανά επιβατοχιλιόμετρο, οι ΑΠΕ έχουν μειώσει σημαντικά το κόστος της ενέργειας και όπως προβλέπεται αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Με το κόστος καυσίμου να μειώνεται συνεχώς, ο σιδηρόδρομος γίνεται πιο ελκυστικός ως προς τις επενδύσεις, διότι μπορεί να μεταφέρει μεγάλους όγκους εμπορευμάτων και προσώπων φθηνά και με τους ελάχιστους δυνατούς ρύπους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της αναγέννησης του σιδηροδρόμου αποτελεί στις ΗΠΑ η εταιρία Brightline, που έχει αναπτύξει το δίκτυο της στην πολιτεία της Florida. Πέραν του σιδηροδρομικού έργου που παρέχει μεταξύ των μεγάλων πόλεων της πολιτείας και του θεματικού πάρκου της Disney, έχει εκμεταλλευτεί τα τεμάχια γης γύρω από τους σταθμούς. Αυτά αποκτούν μεγάλη αξία λόγω της συνδεσιμότητας που παρέχει ο Σ.Σ. και τα κάνει περιζήτητα ακίνητα προς ενοικίαση. Με αυτόν τον τρόπο η εταιρία ενισχύει τις ταμιακές ροές της από διαφορετικές πηγές κάτι που καθιστά δυνατή την επανεπένδυση των κεφαλαίων στην ανάπτυξη του δικτύου, χωρίς να στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε κρατικές ενισχύσεις.

Τέλος, κατά την εκτέλεση του προγράμματος, παρατηρήθηκε πως συρμοί με μεγάλη αναλογία κινητήριων αξόνων προς σύνολο αξόνων και μεγάλη συνεχόμενη ισχύς, επιτυγχάνουν σημαντική παραγωγή ενέργειας από την πέδηση. Αυτή η τάση είναι εντονότερη στους συρμούς που σχεδιαστήκαν από Γερμανικές εταιρίες, διότι οι απαιτήσεις πρόσφυσης είναι αυξημένες στις βόρειες χώρες λόγω της συχνής βροχής και πάγου.

### **5.3 Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Με την ολοκλήρωση της μελέτης, ήταν εμφανές πως η επιδομή χρίζει ριζικής ανανέωσης. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι πλέον είναι μεγαλύτεροι καθώς έχουν πυκνώσει τα επιβατικά αλλά και τα εμπορικά δρομολόγια. Απόρροια αυτού είναι οι συχνές καθυστερήσεις που συμβαίνουν στα δρομολόγια, διότι οι συρμοί αναγκάζονται συχνά να παραμείνουν σε κάποιες στάσεις αρκετά λεπτά για λόγους κυκλοφορίας. Επιπλέον, περιορίζεται σημαντικά η κίνηση των εμπορικών συρμών κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να γίνουν οι εξής παρεμβάσεις στην Σ.Γ.:



- Αλλαγή της οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, στο μέτρο του δυνατού, που θα οδηγήσει στην αύξηση της μέσης ταχύτητας στον κλάδο μεταξύ Σ.Σ. Αθήνας και Σ.Σ. Οινόης στα 120 km/h κατ' ελάχιστον.
- Αλλαγή γραμμολογίας στους ενδιαμέσους Σ.Σ. ώστε να υπάρχουν παρακαμπτήριες γραμμές για τους διερχόμενους εμπορικούς και Intercity συρμούς.

Αυτές οι τροποποιήσεις κρίνονται απαραίτητες για την αναβάθμιση του κεντρικού σιδηροδρομικού δικτύου της χώρας, αλλά η έκταση αυτών και ο συνδυασμός τους θα πρέπει να αποτελεί προϊόν εντατικής έρευνας. Οι παρεμβάσεις αυτού του τύπου είναι δαπανηρές, απαιτούν συντονισμό διαφόρων ειδικοτήτων μηχανικών (Πολιτικών Μηχανικών, Συγκοινωνιολόγων, Σιδηροδρομικών, κ.ά.) αλλά και μη μηχανικών (Οικονομολόγοι, Νομικοί, Διοικητικοί, κ.ά.).

Επιπλέον αυτών θα πρέπει η οικονομοτεχνική μελέτη και η ανάλυση κόστος οφέλους (Cost Benefit Analysis), να είναι ικανές να πείσουν για την αναγκαιότητα των παρεμβάσεων τις Εθνικές Αρχές αλλά και τον διαχειριστή του δικτύου, καθώς οι οικονομικοί πόροι δεν είναι απεριόριστοι. Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί η οικονομική ωφέλεια της τροποποίησης των συρμών με συστήματα μπαταριών για να επωφελούνται άμεσα από την αναγεννητική πέδηση. Με τη χρήση μπαταριών θα μειωθεί η πίεση στο σύστημα έλξης του δικτύου, καθώς θα αναλαμβάνουν αυτές τα υψηλά φορτία εκκίνησης και πέδησης. Έτσι, θα δημιουργηθεί ένα πιο έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής έλξης που θα είναι σε θέση να διεκδικήσει την αλλαγή του προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύς, ώστε να συμπίεσει το κόστος προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος.

## 6. Βιβλιογραφία

- 1) Albrecht, T., Goverde, R.M.P., Weeda, V.A., van Luipen, J., (2006) «Reconstruction of train trajectories from track occupation data to determine the effects of a driver information system». In: Allan, J., Brebbia, C.A., Rumsey, A.F., Sciutto, G., Sone, S. (Eds.), *Computers in Railways X*, WIT Transactions on the Built Environment, 88. WIT Press, Southampton, pp. 207–216.
- 2) Baker C., Quinn A., Hemida H., Sterling M., Gallagher M., Morden J., Jordan S. (2014), *Measurement of train aerodynamic phenomena in operational conditions*, *Civil-Comp Proceedings*, 104
- 3) Bešinovic N., Quaglietta E. and Goverde R. M.P. (2013) "A simulation-based optimization approach for the calibration of dynamic train speed profiles", *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3 126–136
- 4) Coals to Newcastle: <https://www.coalstonewcastle.com.au/>
- 5) Davis, W. J., Jr., "The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars," *General Electric Review*, October 1926, page 3.
- 6) Esveld C. (2001), 'MODERN RAILWAY TRACK', Εκδόσεις «Delft University of Technology»
- 7) Havaei P., Sandidzadeh M. A., (2023) "Multi-objective train speed profile determination for automatic train operation with conscious search: A new optimization algorithm, a comprehensive study", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, V. 119, 105756
- 8) Jong J.C. and Chang S., (2005) Algorithms for generating train speed profiles, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, 356-371
- 9) Kecman, P., Goverde, R.M.P. (2013). «Process mining approach for recovery of realized train paths and route conflict identification». The 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, DC
- 10) Medeossi, G., Longo, G., de Fabris, S. (2011) «A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning» *Journal of Rail Transport Planning & Management*, V.1, Issue 1, 1-13.
- 11) Profillidis V.A. (2014), "Railway Management and Engineering", Εκδόσεις Ashgate-Publishing Group»
- 12) Radosavljevic A. (1999) "Determination of traction characteristics of diesel locomotives by least square method applied to experimental data", *Transactions on Modelling and Simulation* vol 21, WIT Press

- 13) Razmjou S. (2021) "A Comprehensive DC Railway Traction System Simulator Based on MATLAB: Tabriz Line 2 Metro Project Case Study", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 9, No. 2, 144-159
- 14) Schmidt C. Edward & Harold H. Dunn 1918, "Passenger Train Resistance", Έκδοση «University of Illinois Urbana»
- 15) Technical Report 7664, "Resistance of a Freight Train to Forward Motion", Federal Railroad Administration, 1977
- 16) Wang Y., B. De Schutter, T.J.J. van den Boom, and B. Ning (2013) "Optimal trajectory planning for trains – A pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach," Transportation Research Part C, vol. 29, pp. 97–114
- 17) Wikipedia, Γραφικό δρομολόγιο ελβετικών σιδηροδρόμων: [https://en.wikipedia.org/wiki/Public\\_transport\\_timetable](https://en.wikipedia.org/wiki/Public_transport_timetable)
- 18) Wikipedia, Δεδομένα συρμού Z6100 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Z\\_6100](https://fr.wikipedia.org/wiki/Z_6100)
- 19) Wikipedia, Δεδομένα συρμού Class-450: [https://en.wikipedia.org/wiki/British\\_Rail\\_Class\\_450](https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_450)
- 20) Wikipedia, Δεδομένα συρμού Class-800: [https://en.wikipedia.org/wiki/British\\_Rail\\_Class\\_800](https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_800)
- 21) Wikipedia, Δεδομένα συρμού Siemens Desiro: [https://en.wikipedia.org/wiki/OSE\\_class\\_460](https://en.wikipedia.org/wiki/OSE_class_460)
- 22) Wikipedia, 2023, Public transport timetable, [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_rail\\_transport](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_rail_transport)
- 23) Zheng X., Chen D., Lin Z., Zhuang L. and Zhao W. (2024) "Method on generating massive virtual driving curves for high-speed trains of the Cross-Taiwan Strait Railway and its statistical analysis", The Journal of Supercomputing, 80: 4202-4225
- 24) Καρλαύτης Μ.Γ. & Λυμπέρης Κ. 2008, 'Λειτουργία δικτύων μέσων μαζικής μεταφοράς' Εκδόσεις «ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ»
- 25) Καρλαύτης Μ.Γ. & Λυμπέρης Κ. 2009, 'Συστήματα αστικών συγκοινωνιών' Εκδόσεις «ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ»
- 26) Κόφφας Κ. 2020, 'Θέμα εξαμήνου Γεωμετρικού Σχεδιασμού Οδών', Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
- 27) Λυμπέρης Κ. 2011, 'Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές' Εκδόσεις «ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ»
- 28) Νέος Γενικός Κανονισμός Επιδομής 2000, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως αρ. Φύλλου 1156

29) Πυργίδης Χ. 2009, 'Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών', Εκδόσεις «ΖΗΤΗ»

30) Πρωτοπαπαδάκης Δ. 1925, Σημειώσεις Σιδηροδρομικής, ΕΜΠ

