



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΔΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂ ΑΠΟ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΑ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Δήμαινα Ιωάννη

**Επιβλέπων: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΔΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂ ΑΠΟ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΑ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Δήμainera Ιωάννη

Επιβλέπων: Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: _____

Θ. Μιχαλακόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής: _____

Γ. Παναγιώτου, Καθηγητής: _____

Μ. Μενεγάκη, Επίκουρος Καθηγήτρια: _____

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....

Δήμαινας Ιωάννης

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

Copyright © Δήμαινας Ιωάννης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων	iii
Πρόλογος	vi
Περίληψη	vii
Abstract	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.Εισαγωγή	2
1.1 Μοντελοποίηση κίνησης και κατανάλωσης καυσίμου φορτηγού αυτοκινήτου	2
1.2 Προσδιορισμός του προβλήματος	2
1.3 Στόχοι της παρούσας εργασίας	3
1.4 Δομή της εργασίας	4
1.5 Εμβέλεια και περιορισμοί της εργασίας	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	5
2. Μοντέλο Κίνησης του Φορτηγού	6
2.1 Αναπτυσσόμενες Δυνάμεις κατά την κίνηση	6
2.1.1 Δύναμη Έλξης (Rimpull) και Πρόσφυση	6
2.1.2 Δύναμη λόγω κλίσης (F_G)	7
2.1.3 Αεροδυναμική αντίσταση - Οπισθέλκουσα (F_D)	8
2.1.4 Αντίσταση κύλισης (F_{RR})	9
2.2 Σχηματική Απεικόνιση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων	10
2.3 Συνολική Αντίσταση (F_{resist}) και Ενεργή Κλίση (EG)	13
2.4 Επιτάχυνση	14
2.5 Κινηματική	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	16
3. Μοντέλο Κατανάλωσης Καυσίμου	17
3.1 Το φορτηγό CAT 793D	17
3.1.1 Κινητήρας Cat 3516B EUI Quad Turbocharged	19
3.1.2 Σύστημα μετάδοσης ισχύος	21
3.1.3 Πλαίσιο του CAT 793D	22
3.1.4 Σύστημα πέδησης και επιβράδυνσης του CAT 793D	23
3.1.6 Διαστάσεις του CAT 793D	25
3.1.7 Διαγράμματα Λειτουργίας CAT 793D	27
3.1.8 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του CAT 793D	31
3.2 Μοντελοποίηση της καμπύλης λειτουργίας του CAT 793D	36
3.2.1 Εκτίμηση της Τελικής Σχέσης Μετάδοσης	37
3.2.2 Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου Πέδησης – BSFC	44
3.2.3 Υπολογισμός Κατανάλωσης Καυσίμου	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	49

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂	49
4. Κατανάλωση Καυσίμου και εκπομπές CO ₂	50
4.1 Εκπομπές CO ₂	50
4.2 Μοντέλο εκτίμησης εκπομπών CO ₂	52
4.3 Αποτελέσματα της Παραμετρικής Ανάλυσης	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	63
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ	63
5.Υπολογισμός εκπομπών CO ₂ για δεδομένη διαδρομή	64
5.1 Δεδομένα.....	64
5.2 Αρχικοί υπολογισμοί	65
5.3 Μοντέλο κίνησης και εκτίμησης εκπομπών CO ₂ σε δεδομένη διαδρομή.	67
5.4 Κρίσιμη απόσταση.....	70
5.5 Αποτελέσματα της εφαρμογής	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	94
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
6.Συμπεράσματα	95
Βιβλιογραφία	96

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Καμπύλη λειτουργίας του CAT 793D.....	7
Εικόνα 2. Αεροδυναμική οπισθέλκουσα αντίσταση	8
Εικόνα 3. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε οριζόντια οδό μεταφοράς.	10
Εικόνα 4. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε ανηφορική οδό μεταφοράς	11
Εικόνα 5. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε κατηφορική οδό.	11
Εικόνα 6. Χαρακτηριστικό διάγραμμα επίδοσης επιβραδυντή του CAT 793D	12
Εικόνα 7. Φορτηγό 793D του οίκου Caterpillar – Αριστερή πλάγια όψη	17
Εικόνα 8. Φορτηγό 793D του οίκου Caterpillar – Δεξιά πλάγια όψη.	18
Εικόνα 9. Φορτηγό 793D του οίκου Caterpillar – Πρόσθια όψη.	18
Εικόνα 10. Δηζελοκινητήρας CAT 3516B EUi quad turbocharged υψηλού εκποτίσματος.....	19
Εικόνα 11. Μηχανικό σύστημα κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου CAT 793D	21
Εικόνα 12. Πλαίσιο του CAT 793D.....	22
Εικόνα 13. Καμπίνα χειριστή του Cat 793D	22
Εικόνα 14. Σύστημα Επιβραδυντή - HARC και TCS.....	23
Εικόνα15. Δισκόφρενα του CAT 793D.....	23
Εικόνα 16. Σκαριφήματα διαστάσεων φορτηγού 793D.....	25
Εικόνα 17. Διάγραμμα λειτουργίας CAT 793D για οδό ενεργούς κλίσης μη αρνητική	27
Εικόνα 18. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για οδό μεταφοράς συνεχώς κατηφορική	28
Εικόνα 19. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 450 m	28
Εικόνα 20. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 600 m	29
Εικόνα 21. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 900 m	29
Εικόνα 22. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 1500 m.	30
Εικόνα 23. Τυπικό διάγραμμα ισχύος, ροπής και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κινητήρα. ..	45
Εικόνα 24. Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα του CAT 793D.....	46
Εικόνα 25. Διάγραμμα ροής εκτίμησης εκπομπών CO ₂	52
Εικόνα 26. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – Ενεργούς κλίσης για έμφορτο φορτηγό αυτοκίνητο..	58
Εικόνα 27. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – Ενεργούς κλίσης για κενό φορτηγό αυτοκίνητο.	58
Εικόνα 28. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – στροφών κινητήρα για έμφορτο φορτηγό.	59
Εικόνα 29. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – στροφών κινητήρα για κενό φορτηγό.	59
Εικόνα 30. Μεταβολή ισχύος σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα του CAT 793D.....	61
Εικόνα 31. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – Ει απόδοσης του κινητήρα για έμφορτο φορτηγό αυτοκίνητο.	62
Εικόνα 32. Διάγραμμα εκπομπών CO ₂ – Ει απόδοσης του κινητήρα για κενό φορτηγό αυτοκίνητο.	62
Εικόνα 33. Δεδομένη διαδρομή εφαρμογής πέντε τμημάτων οδού μεταφοράς.....	65
Εικόνας 34. Το διάγραμμα ροής του μοντέλου κίνησης και κατανάλωσης κάθε τμήματος της δεδομένης διαδρομής.....	67
Εικόνα 35. Γραφική απεικόνιση της κρίσιμης απόστασης στο τελευταίο τμήμα δεδομένης διαδρομής.	70
Εικόνα 36. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.	74
Εικόνα 37. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.	74
Εικόνα 38. Διάγραμμα μεταβολής της μετατόπισης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.	75
Εικόνα 39. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.	75
Εικόνα 40. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II	78
Εικόνα 41. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II.	78

Εικόνα 42. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα II.	79
Εικόνα 43. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II.	79
Εικόνα 44. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα III.	82
Εικόνα 45. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα III.	82
Εικόνα 46. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα III.	83
Εικόνα 47. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα III.	83
Εικόνα 48. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα IV.	86
Εικόνα 49. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα IV.	86
Εικόνα 50. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα IV.	87
Εικόνα 51. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα IV.	87
Εικόνα 52. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα V.	90
Εικόνα 53. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης σε σχέση με χρόνο για το τμήμα V.	90
Εικόνα 54. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα V.	91
Εικόνα 55. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα V.	91
Εικόνα 56. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με χρόνο για ολόκληρη την διαδρομή.	93
Εικόνα 57. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για ολόκληρη την διαδρομή.	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εκπομπές CO ₂ στη μεταλλευτική δραστηριότητα των ΗΠΑ κατά DOE.....	3
Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης f_{rr}	9
Πίνακας 3 : Διαστάσεις Φορτηγού CAT 793D	26
Πίνακας 4 :Τεχνικά χαρακτηριστικά του του κινητήρα του φορτηγού CAT 793D.....	31
Πίνακας 5: Βάρη του φορτηγού CAT 793D	31
Πίνακας 6 : Τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του φορτηγού CAT 793D.....	32
Πίνακας7: Μέγιστες ταχύτητες του φορτηγού CAT 793D	32
Πίνακας 8 : Τελική μείωση στο φορτηγό CAT 793D.....	33
Πίνακας 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά αναρτήσεων του φορτηγού CAT 793D.....	33
Πίνακας : 10 Τεχνικά χαρακτηριστικά φρένων του φορτηγού CAT 793D	33
Πίνακας 11 :Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος ανατροπής της σκάφης του φορτηγού CAT 793D	34
Πίνακας 12: Κατανομή του βάρους στο φορτηγό CAT 793D	34
Πίνακας 13 : Χωρητικότητες στο φορτηγό CAT 793D	35
Πίνακας: 14 Γραμμικό μοντέλο καμπύλης λειτουργίας του CAT 793D	36
Πίνακας 15 : Υπολογισμός τελικής σχέσης μετάδοσης και στροφών κινητήρα για το CAT 793D.	39
Πίνακας 16 : Ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC) για το CAT 793D (Parreira, 2013)	46
Πίνακας 17: Εκτίμηση εκπομπών CO ₂ συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού για έμφορτο φορτηγό CAT 793D.....	55
Πίνακας 18:Εκτίμηση εκπομπών CO ₂ συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού για κενό φορτηγό CAT 793D.....	56
Πίνακας 19 : Γραμμικές σχέσεις RPM –Ισχύος.....	61
Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά των τμημάτων της οδού μεταφοράς.....	64
Πίνακας 21: Υπολογισμός μέγιστης ταχύτητας σε κάθε τμήμα.....	66
Πίνακας 22 : Υπολογιστικό φύλλο της για την κίνηση στο τμήμα I της διαδρομής	73
Πίνακας 23: Υπολογιστικό φύλλο της για την κίνηση στο τμήμα II της διαδρομής.	77
Πίνακας 24 : Υπολογιστικό φύλλο για την κίνηση στο τμήμα III της διαδρομής.....	81
Πίνακας 25: Υπολογιστικό φύλλο για την κίνηση στο τμήμα IV της διαδρομής.	85
Πίνακας 26 : Υπολογιστικό φύλλο της για για την κίνηση στο τμήμα V της διαδρομής.	89

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε, σύμφωνα με το πρόγραμμα σπουδών της Σχολής, στο πλαίσιο του μαθήματος «Συστήματα Φόρτωσης-Μεταφοράς σε Τεχνικά Έργα και Μεταλλεία». Η έρευνα και η συγγραφή πραγματοποιήθηκαν σε ξεχωριστές μεταξύ τους περιόδους. Το ερευνητικό κομμάτι της εργασίας υλοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2016, ενώ η ταξινόμηση, η επεξεργασία των δεδομένων της έρευνας και η συγγραφή πραγματοποιήθηκαν από τον Οκτώβριο του 2016 έως τον Φεβρουάριο του 2017.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αν. Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Θ. Μιχαλακόπουλο, για την ανάθεση του θέματος, τις συμβουλές και διορθώσεις του, καθώς και για την γενικότερη καθοδήγηση που μου παρείχε τον τελευταίο χρόνο των σπουδών μου. Η αίσθηση επικοινωνίας και συνεργασίας με τον κ. Θ. Μιχαλακόπουλο ήταν καθοριστική για την πορεία και την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου για την στήριξή της, χωρίς την οποία, τίποτα δεν θα ήταν εφικτό. Ακόμη θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους κοντινούς μου φίλους. Η εργασία αφιερώνεται σε όσους αναφέρθηκαν παραπάνω.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία υπό τον τίτλο «Διερεύνηση της επίδρασης χαρακτηριστικών των οδών μεταφοράς στις εκπομπές CO₂ από χωματοουργικά αυτοκίνητα» αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών CO₂ δεδομένου φορτηγού αυτοκινήτου συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού μεταφοράς και των τεχνικών του χαρακτηριστικών.

Στο πρώτο μέρος της παρουσιάζονται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που αφορούν στο μοντέλο κίνησης του φορτηγού και κατανάλωσης καυσίμου.

Διερευνάται η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμου, των τεχνικών χαρακτηριστικών του φορτηγού (ταχύτητα, βάρος, ισχύς, στροφές κινητήρα κ.α.) και των χαρακτηριστικών της οδού μεταφοράς. Επίσης, πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών της οδού μεταφοράς στις εκπομπές CO₂. Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης προέκυψε ότι οι εκπομπές CO₂ κυμαίνονται σε σχετικά μικρό εύρος τιμών. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι το κιβώτιο ταχυτήτων του φορτηγού κρατάει τις στροφές του κινητήρα σε συγκεκριμένο εύρος μέσω της επιλογής κατάλληλων σχέσεων μετάδοσης. Από τον κανόνα αυτόν εξαιρούνται οι περιπτώσεις όπου το φορτηγό κινείται είτε με χαμηλή ταχύτητα και χρησιμοποιείται ο μετατροπέας ροπής στρέψης, είτε με την εκ κατασκευής μέγιστη ταχύτητά του με χρήση της τελευταίας σχέσης μετάδοσης.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂ σε μια δεδομένη τυπική διαδρομή μεταφοράς εξορυγμένου πετρώματος σε επιφανειακή εκμετάλλευση. Αναπτύσσεται κατάλληλη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της κινηματικής του φορτηγού -συναρτήσει των χαρακτηριστικών της οδού- και την εκτίμηση των στιγμιαίων τιμών κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών CO₂ για δεδομένο τύπο φορτηγού που κινείται σε οδό μη αρνητικής ενεργούς κλίσης.

Abstract

This thesis entitled “Investigation of the correlation between haul road characteristics and CO₂ emissions of mining trucks” aims to develop a mathematical model for estimating truck fuel consumption and CO₂ emissions based on road and truck characteristics.

In the first part of the thesis findings of the literature review are presented. A vehicle motion and fuel consumption model is reviewed and the relationship between fuel consumption, truck characteristics (speed, weight, power, engine speed etc.) and haul road design parameters is established. A parametric analysis of the influence of the road’s effective grade and CO₂ emissions is performed. The results of the analysis showed that CO₂ emissions values fluctuate in a relatively small range. This can be attributed to the fact that the truck's gearbox maintains the engine speed at a certain range with the selection of appropriate gear ratios in most cases. Exceptions are, either when the truck is traveling at low speed and the torque converter is used, or when the truck is travelling with the maximum speed using the highest gear.

In the second part of the thesis a case study is presented, where the model for CO₂ emissions calculation is used for a typical haulage operation in surface mines. A methodology is presented for calculating motion parameters and estimating the instantaneous values for fuel consumption and CO₂ emissions of a given truck type moving uphill.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

1.1 Μοντελοποίηση κίνησης και κατανάλωσης καυσίμου φορτηγού αυτοκινήτου

Η εξορυκτική βιομηχανία είναι πολύ απαιτητική ενεργειακά και για αυτόν τον λόγο την αφορούν οι νομοθεσίες για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (Aziz and Kecojevic, 2008). Είναι γνωστό ότι τα φορτηγά αυτοκίνητα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του εξοπλισμού στις συνήθεις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις, όπου χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση και μεταφορά του εξορυγμένου υλικού. Η ενεργειακή τους κατανάλωση έχει εκτιμηθεί ότι αντιστοιχεί στο 32% της συνολικής σε μια εξορυκτική δραστηριότητα (Kumar Sahoo et al, 2010). Συνεπώς, η κατανάλωση καυσίμου από τα φορτηγά αυτοκίνητα είναι σημαντική παράμετρος της λειτουργίας μιας εκμετάλλευσης. Επιπλέον, συμβάλλει καθοριστικά και στις εκπομπές CO₂ της εκμετάλλευσης. Η μοντελοποίηση της κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου είναι το κύριο διαθέσιμο μέσο για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών CO₂. Σε αυτή τη μοντελοποίηση εξετάζεται η κίνηση του φορτηγού αυτοκινήτου συναρτήσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του καθώς και των σχεδιαστικών παραμέτρων της οδού μεταφοράς.

1.2 Προσδιορισμός του προβλήματος

Σύμφωνα με το Υπουργείου Ενέργειας (DOE) των ΗΠΑ, εκτιμάται ότι η εξορυκτική βιομηχανία καταναλώνει 365,25 δισεκατομμύρια kWh ενέργειας ετησίως, εκ των οποίων 40% αντιστοιχούν σε ορυχεία άνθρακα, 44% σε μεταλλεία και 16% στην εξόρυξη βιομηχανικών ορυκτών (Aziz and Kecojevic, 2008). Η εκτίμηση αυτή αφορά στις τρεις κύριες διεργασίες: (i) την εξόρυξη, (ii) τη φόρτωση και μεταφορά και (iii) τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος. Οι δύο διεργασίες που εξαιρούνται είναι η μεταλλευτική έρευνα και η μεταφορά του προϊόντος στον τελικό καταναλωτή.

Στον **Πίνακα 1** φαίνονται η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές CO₂ για τους διάφορους τύπους καυσίμου που χρησιμοποιούνται από τη μεταλλευτική βιομηχανία στις ΗΠΑ.

Συνολικά στις ΗΠΑ σύμφωνα με τα στοιχεία του DOE υπολογίζεται ότι το 2005 εκπέμφθηκαν 6.032,3 εκατομμύρια τόνοι CO₂. Συνεπώς, η μεταλλευτική βιομηχανία αντιστοιχεί στο 1,61% των εκπομπών αυτών (Aziz and Kecojevic, 2008).

Πίνακας 1: Εκπομπές CO₂ στη μεταλλευτική δραστηριότητα των ΗΠΑ σύμφωνα με το DOE (Aziz and Kecojevic, 2008)

Τύπος Καυσίμου	Μίγμα Καυσίμου	Ενέργεια (δισ kwh)	Εκπομπές CO ₂ (εκ. τόνοι / έτος)
Diesel	34%	124,19	30,99
Ηλεκτρικός	32%	116,89	37,99
Φυσικό αέριο	22%	80,36	14,55
Άνθρακας	10%	36,52	11,87
Βενζίνη	2%	7,30	1,77
Σύνολο	100%	365,261	97,176

Παρατηρείται στον **Πίνακα 1** ότι το diesel και η βενζίνη αντιστοιχούν αθροιστικά στο 36% του μίγματος καυσίμου που καταναλώνεται από τη μεταλλευτική βιομηχανία. Αυτά τα καύσιμα χρησιμοποιούνται κατεξοχήν για την κίνηση του μηχανικού εξοπλισμού εξόρυξης, φόρτωσης και μεταφοράς. Συνεπώς, η μελέτη των εκπομπών CO₂ από αυτόν τον εξοπλισμό αφορά σε ένα σημαντικό τμήμα των συνολικών εκπομπών CO₂ από τη μεταλλευτική βιομηχανία.

1.3 Στόχοι της παρούσας εργασίας

Ο τελικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των εκπομπών CO₂ δεδομένου φορτηγού αυτοκινήτου συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού μεταφοράς. Αρχικά αναζητήθηκε στη βιβλιογραφία κατάλληλο μοντέλο κίνησης του φορτηγού και κατανάλωσης καυσίμου. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμου, των τεχνικών χαρακτηριστικών του φορτηγού (ταχύτητα, βάρος, ισχύς, στροφές κινητήρα κ.α.) και των χαρακτηριστικών της οδού μεταφοράς. Τελικώς, καταστρώθηκε κατάλληλο λογιστικό φύλλο για τον υπολογισμό των αναμενόμενων εκπομπών CO₂ συναρτήσει των χαρακτηριστικών του φορτηγού και της οδού.

1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία είναι οργανωμένη σε 6 κεφάλαια.

Το παρόν *Κεφάλαιο 1* αποτελεί την εισαγωγή στο θέμα της. Περιγράφεται το προς εξέταση πρόβλημα, παρουσιάζονται οι στόχοι και η δομή της εργασίας και καταγράφονται τα όριά της.

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζεται το απαραίτητο για την περαιτέρω ανάλυση θεωρητικό υπόβαθρο, που βρέθηκε στη σχετική βιβλιογραφία, και δίνονται οι ορισμοί των φυσικών μεγεθών και διεργασιών που αναλύονται.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται το μοντέλο για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου από φορτηγό αυτοκίνητο. Για τις ανάγκες της ανάλυσης χρησιμοποιείται ως φορτηγό αναφοράς το CAT 793D του οίκου Caterpillar.

Στο *Κεφάλαιο 4* διερευνάται μέσω παραμετρικής ανάλυσης η σχέση της κατανάλωσης καυσίμου με την ενεργή κλίση της οδού μεταφοράς και αναπτύσσεται το τελικό μοντέλο υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂ σε μια δεδομένη τυπική διαδρομή μεταφοράς εξορυγμένου πετρώματος σε επιφανειακή εκμετάλλευση.

Τέλος, στο *κεφάλαιο 6* παρουσιάζονται τα ευρήματα της εργασίας και αναπτύσσονται τα κύρια συμπεράσματα.

1.5 Εμβέλεια και περιορισμοί της εργασίας

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται αποκλειστικά από τη βιβλιογραφία. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης, όπως προαναφέρεται, αφορούν σε έναν μόνο τύπο φορτηγού, τον CAT 793D του οίκου Caterpillar.

Ωστόσο, στην εργασία αναπτύσσεται η μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατή η εκτίμηση των αναμενόμενων εκπομπών CO₂ από τη χρήση φορτηγών αυτοκινήτων συναρτήσει των τεχνικών χαρακτηριστικών των φορτηγών και της οδού μεταφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΗΓΟΥ

2. Μοντέλο Κίνησης του Φορτηγού

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο της κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι κυρίως τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φορτηγού και της οδού μεταφοράς, όπως η κλίση, η αντίσταση κύλισης και το μήκος της.

2.1 Αναπτυσσόμενες Δυνάμεις κατά την κίνηση

Κατά την κίνηση του φορτηγού σε οριζόντια, ανηφορική ή κατηφορική οδό μεταφοράς, αναπτύσσονται δύο ειδών δυνάμεις παράλληλες στο επίπεδο κίνησής του. Αυτές που έχουν ίδια φορά με την κίνηση του και αυτές που έχουν αντίθετη φορά στην κίνηση. Οι πρώτες χαρακτηρίζονται ως $F_{effective}$ που βοηθούν στην κίνηση του και οι δεύτερες ως F_{resist} που αντιστέκονται στην κίνησή του.

2.1.1 Δύναμη Έλξης (Rimpull) και Πρόσφυση

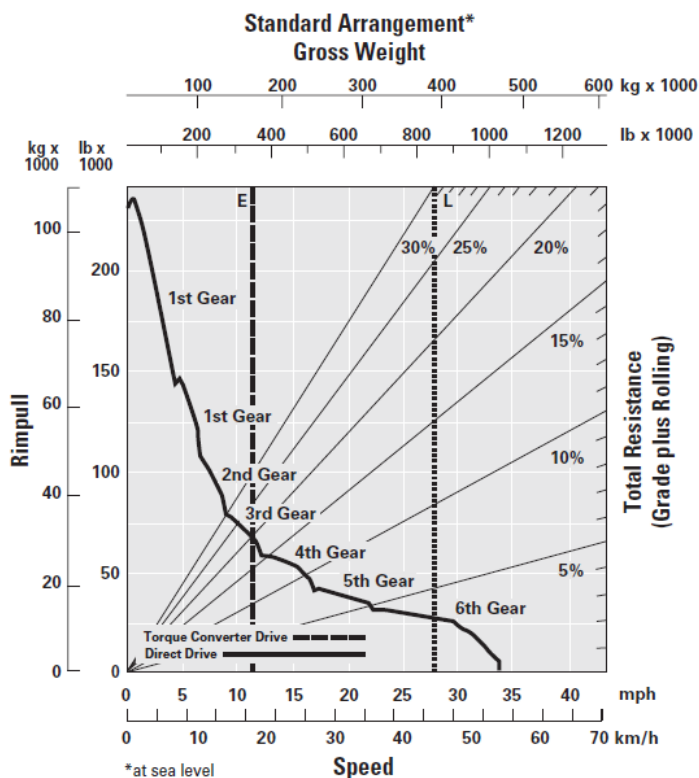
Δύναμη έλξης ονομάζεται η δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στους κινητήριους τροχούς του φορτηγού αυτοκινήτου και το οδόστρωμα, η οποία διατίθεται για την κίνηση του.

Το ωφέλιμο ποσοστό της δύναμης έλξης που πράγματι κινεί το φορτηγό αυτοκίνητο εξαρτάται από την πρόσφυση που αναπτύσσεται μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος. Δηλαδή από την τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσά τους. Αν η πρόσφυση είναι μικρότερη από την δύναμη έλξης τα ελαστικά θα ολισθήσουν (σπινάρισμα) οπότε δεν αξιοποιείται πλήρως η διαθέσιμη ισχύς του κινητήρα του φορτηγού αυτοκινήτου (Μιχαλακόπουλος 2006).

Στη περίπτωση της ολίσθησης των τροχών θεωρείται μια άλλη δύναμη ως ωφέλιμη δύναμη έλξης (R_{usable}) και ορίζεται ως το ποσό της ελκτικής δύναμης που αναπτύσσεται ανάμεσα στα ελαστικά και το οδόστρωμα (Parreira, 2013).

Αφού υπολογιστεί η δύναμη έλξης (Rimpull) και η ωφέλιμη δύναμη έλξης (R_{usable}) λαμβάνεται υπόψιν η μικρότερη τιμή από τις δύο ως ενεργή δύναμη έλξης (effective rimpull). Είναι ουσιαστικά η δύναμη που κινεί το όχημα (Parreira, 2013).

Η ταχύτητα και η δύναμη έλξης που μπορούν να αναπτυχθούν από δεδομένο φορτηγό ακολουθούν τις επονομαζόμενες καμπύλες λειτουργίας. Πρόκειται για τα διαγράμματα ταχυτήτων-δύναμης έλξης που παρέχονται για κάθε τύπο φορτηγού από τους κατασκευαστές όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1**.



Εικόνα 1. Καμπύλη λειτουργίας του CAT 793D (Caterpillar, 2010)

2.1.2 Δύναμη λόγω κλίσης (F_G)

Η επίδραση της κλίσης μιας οδού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της δύναμης έλξης που απαιτείται για να κινηθεί ένα φορτηγό αυτοκίνητο σε ανηφορική οδό ή την αύξηση της δύναμης επιβράδυνσης που απαιτείται για να κινηθεί ασφαλώς σε κατηφορική οδό. Πρόκειται για φυσικό φαινόμενο και δεν εξαρτάται από τον τύπο του φορτηγού αυτοκινήτου ή την κατάσταση και τον τύπο του οδοστρώματος. Ανάλογα λοιπόν αν το φορτηγό αυτοκίνητο κινείται ανηφορικά ή κατηφορικά η δύναμη αυτή δρα ως κινητήρια ή ως αντίσταση στην κίνηση του.

Πιο συγκεκριμένα εμφανίζεται ως αναλυμένη συνιστώσα του βάρους παράλληλη προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου.

Η δύναμη λόγω κλίσης μπορεί να υπολογιστεί ως :

$$F_G = W \cdot f_{GR} \quad (\text{Εξ. 1})$$

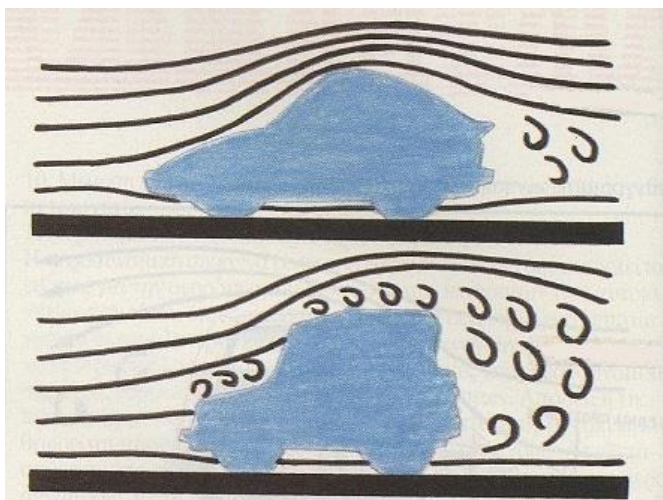
Όπου:

W το βάρος του φορτηγού σε t

f_{GR} συντελεστής αντίστασης λόγω κλίσης που υπολογίζεται από το γινόμενο $10\text{kg/t} \cdot \%$ (εκατοστιαία κλίση της οδού)

2.1.3 Αεροδυναμική αντίσταση - Οπισθέλκουσα (F_D)

Αεροδυναμική αντίσταση ορίζεται η εξωτερική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα λόγω τη σχετικής του κίνησης μέσα σε ένα ρευστό, πάνω στην διεύθυνση της κίνησης. Είναι μια δύναμη τριβής που αντιστέκεται στην κίνηση του σώματος (Καραπάνος et al, 2001). Στην παρούσα έρευνα το σώμα είναι το φορτηγό αυτοκίνητο και το ρευστό ο αέρας που το περιβάλλει όπως φαίνεται στο **Εικόνα 2**.



Εικόνα 2. Αεροδυναμική οπισθέλκουσα αντίσταση (Καραπάνος et al, 2001).

Η αεροδυναμική αντίσταση στην κίνηση του φορτηγού αυτοκινήτου είναι ανάλογη με το εμβαδόν της επιφάνειας πρόσκρουσης, την πυκνότητα του αέρα και την σχετική ταχύτητα μεταξύ τους (Parreira, 2013). Η ακόλουθη εξίσωση επιτρέπει τον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης στην κίνηση του φορτηγού.

$$F_D = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot V_r^2 \quad (\text{Εξ. 2})$$

Όπου :

ρ η πυκνότητα αέρα σε kg/m^3

C_x ο συντελεστής τριβής

A η μπροστινή/οπίσθια επιφάνεια του φορτηγού σε m^2

V_r η ταχύτητα του αέρα σε σχέση με την κίνηση του φορτηγού σε m/s

Ωστόσο, κατά κανόνα η αεροδυναμική αντίσταση έχει μέτρο πολύ μικρότερο από τη διαθέσιμη δύναμη έλξης των τυπικών φορηγών που χρησιμοποιούνται στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις. Είναι δηλαδή αμελητέο μέγεθος και συνήθως παραλείπεται από τους υπολογισμούς για τη δυναμική κατάσταση του φορηγού.

2.1.4 Αντίσταση κύλισης (F_{RR})

Η αντίσταση κύλισης οφείλεται στη τριβή που αναπτύσσεται στα κινούμενα μέρη του φορηγού αυτοκινήτου (internal friction), στη παραμόρφωση των ελαστικών (tire flexing) και στην διείσδυση των ελαστικών στο οδόστρωμα (tire penetration).

Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$F_{RR} = W \cdot f_{RR} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου:

W το βάρος του φορηγού αυτοκινήτου σε t

f_{RR} ο συντελεστής αντίστασης κύλισης σε kg/t

Στον **Πίνακα 2** δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης για διάφορα οδοστρώματα. Ισχύει $f_{RR} = 1,0\% = 10 \text{ kg/t}$.

Πίνακας 2. Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης f_{rr} (Μιχαλακόπουλος 2006)

Οδόστρωμα	$f_{rr} \%$
Άσφαλτος	1,5
Σκυρόδεμα	1,5
Χωματόδρομος ξηρός, σκληρός, καλά συντηρημένος	2,0
Χωματόδρομος ξηρός, όχι πολύ συμπιεσμένος, καλά συντηρημένος	3,0
Χωματόδρομος λιγότερο συντηρημένος	4,0
Χωματόδρομος από μπάζα καλά συμπιεσμένα	4,0
Χωματόδρομος πολύ ανώμαλος	8,0

2.2 Σχηματική Απεικόνιση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων

Στο **Εικόνα 3**, φαίνεται η επίδραση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά την κίνηση του φορτηγού σε οριζόντια οδό μεταφοράς. Φαίνεται ότι ως κινητήρια δύναμη δρα η δύναμη έλξης - Rimpull - $F_{\text{effective}}$ και ως δύναμη αντίστασης - F_{resist} το άθροισμα της αντίστασης κύλισης και της αεροδυναμικής αντίστασης. Δηλαδή σε οριζόντιο επίπεδο οδού μεταφοράς ισχύει :

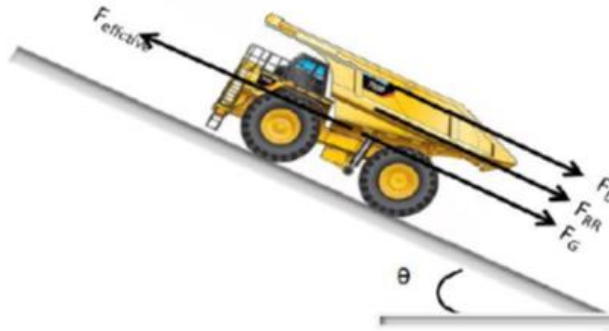
$$F_{\text{resist}} = F_{RR} + F_D \quad (\text{Εξ. 4})$$



Εικόνα 3. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε οριζόντια οδό μεταφοράς (Parreira, 2013).

Στην **Εικόνα 4**, φαίνεται η επίδραση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά την ανηφορική κίνηση του φορτηγού. Φαίνεται ότι ως κινητήρια δύναμη δρα η δύναμη έλξης - Rimpull - $F_{\text{effective}}$ και ως δύναμη αντίστασης - F_{resist} το άθροισμα της αντίστασης κύλισης, της αεροδυναμικής αντίστασης και της οριζόντιας συνιστώσας του βάρους του φορτηγού αυτοκινήτου (F_G) παράλληλη προς το επίπεδο κίνησής του. Δηλαδή σε ανηφορική οδό ισχύει :

$$F_{\text{resist}} = F_G + F_{RR} + F_D \quad (\text{Εξ. 5})$$



Εικόνα 4. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε ανηφορική οδό μεταφοράς (Parreira, 2013).

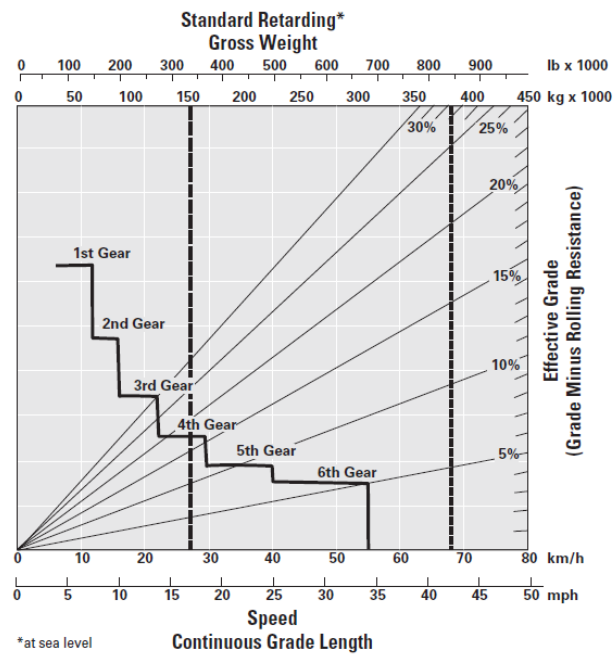
Στην **Εικόνα 5**, φαίνεται η επίδραση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων σε κατηφορική οδό. Φαίνεται ότι η βαρυτική δύναμη (συνιστώσα του βάρους του φορτηγού) F_G δρα υπέρ της κίνησης του φορτηγού και ως δύναμη αντίστασης $-F_{resist}$ το άθροισμα της αντίστασης στην κύλιση F_{RR} η αεροδυναμική αντίσταση και η δύναμη επιβράδυνσης F_r , που προκύπτει από την ανάγκη χρήσης του συστήματος επιβράδυνσης, προκειμένου να μην παρατηρηθεί υπέρβαση της μέγιστης ταχύτητας ασφαλούς κίνησης. Οπότε σε κατηφορική οδό ισχύει:

$$F_{resist} = F_{RR} + F_D + F_r \quad (\text{Εξ. 6})$$



Εικόνα 5. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις παράλληλα προς το επίπεδο κίνησης του φορτηγού σε κατηφορική οδό (Parreira, 2013).

Στην περίπτωση της κατηφορικής οδού μεταφοράς χρησιμοποιείται το διάγραμμα του επιβραδυντή **Εικόνα 6**, που παρέχεται για κάθε τύπο φορτηγού αυτοκινήτου από τους κατασκευαστές.



Εικόνα 6. Χαρακτηριστικό διάγραμμα επίδοσης επιβραδυντή του CAT 793D (Caterpillar, 2010).

Στην περίπτωση που η βαρυτική δύναμη δεν αρκεί για την κίνηση του φορτηγού, απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλης δύναμης έλξης, οπότε και δεν χρησιμοποιείται το σύστημα επιβράδυνσης του φορτηγού.

2.3 Συνολική Αντίσταση (F_{resist}) και Ενεργή Κλίση (EG)

Η συνολική αντίσταση F_{resist} για λόγους οικονομίας των υπολογισμών είναι δυνατό να παρασταθεί ως συνδυασμός της βαρυτικής δύναμης λόγω κλίσης (F_G) και της αντίστασης κύλισης (F_{RR}). Με αυτήν την θεώρηση η συνολική αντίσταση F_{resist} υποκαθίσταται στους υπολογισμούς από την % κλίση.

Ως ενεργή κλίση (EG – effective grade) ορίζεται το αλγεβρικό άθροισμα της % κλίσης και της αντίστασης κύλισης, που είναι εκφρασμένη ως ισοδύναμη % κλίση σε συμφωνία με τις **(Εξ. 1)** και **(Εξ. 3)**. Δηλαδή, είναι:

$$EG \% = GR \% + RR \% \quad (\text{Εξ. 7})$$

Όπου:

GR % η εκατοστιαία κλίση της οδού μεταφοράς.

RR % η ισοδύναμη εκατοστιαία αντίστασης κύλισης

Παρατηρείται ότι τόσο στα διαγράμματα ταχύτητας – δύναμης έλξης, όσο και επίδοσης επιβραδυντή που παρέχονται από τους κατασκευαστές, η συνολική αντίσταση εκφράζεται ως ενεργή κλίση, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 1** και **6**. Η συνολική αντίσταση υπολογίζεται από την ακολουθεί σχέση:

$$F_{resist} = W \cdot EG \quad (\text{Εξ. 8})$$

Όπου:

W το βάρος του φορτηγού σε t

EG η εκατοστιαία ενεργή κλίση

2.4 Επιτάχυνση

Τα διαγράμματα ταχύτητας – δύναμης έλξης χρησιμοποιούνται για την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας, με την οποία μπορεί να κινηθεί ένα φορτηγό για δεδομένη συνολική αντίσταση F_{resist} . Αποτυπώνουν δηλαδή την κατάσταση του φορτηγού σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας, όπου η αναπτυσσόμενη δύναμη έλξης ισούται κατά μέτρο με τη συνολική αντίσταση. Εάν κάποια χρονική στιγμή η αντίσταση στην κίνησή του αυξηθεί, το φορτηγό αναγκαστικά θα επιβραδυνθεί, έως ότου αποκατασταθεί εκ νέου η ισορροπία ανάμεσα στην αντίσταση και την αναπτυσσόμενη δύναμη έλξης, ενδεχομένως με χρήση χαμηλότερης σχέσης μετάδοσης. Αντίστοιχα, εάν η αντίσταση ελαττωθεί το φορτηγό αυτοκίνητο μπορεί να επιταχύνει έως ότου αποκατασταθεί η ισορροπία, ενδεχομένως με τη χρήση υψηλότερης σχέσης μετάδοσης. Σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη ταχύτητα θα καθορίζεται από την καμπύλη λειτουργίας του φορτηγού.

Η επιτάχυνση ή επιβράδυνση του φορτηγού είναι:

$$Accmovement = (F_{effective} - F_{resist}) / M \quad (Εξ. 9)$$

Όπου:

$Accmovement$ η επιτάχυνση ή επιβράδυνση του φορτηγού αυτοκινήτου

$F_{effective}$ η κινητήρια δύναμη

F_{resist} η συνολική αντίσταση

M = η μάζα του φορτηγού αυτοκινήτου

2.5 Κινηματική

Ο υπολογιστικός προσδιορισμός της στιγμιαίας ταχύτητας του φορτηγού στο τέλος κάθε διακριτού χρονικού διαστήματος Δt χρησιμοποιείται η σχέση:

$$V_f = V_i \pm (Accmovement \cdot \Delta t) \quad (\text{Εξ. 11})$$

Όπου:

V_f η τελική στιγμιαία ταχύτητα

V_i η αρχική στιγμιαία ταχύτητα

$Accmovement$ η μέση επιτάχυνση

Δt η διάρκεια του χρονικού διαστήματος

Αντίστοιχα υπολογίζεται η νέα θέση του φορτηγού στο τέλος κάθε διακριτού χρονικού διαστήματος Δt :

$$S_f = V_i \cdot \Delta t \pm (0,5 \cdot Accmovement \cdot \Delta t^2) \quad (\text{Εξ. 12})$$

Όπου:

S_f η απόσταση που διανύθηκε

V_i η αρχική στιγμιαία ταχύτητα

$Accmovement$ η μέση επιτάχυνση

Δt η διάρκεια του χρονικού διαστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3. Μοντέλο Κατανάλωσης Καυσίμου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του φορτηγού αυτοκινήτου και αναπτύσσεται ένα μοντέλο κατανάλωσης καυσίμου φορτηγών αυτοκινήτων. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι κυρίως τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου. Για την ανάλυση αυτήν επιλέχτηκε ως φορτηγό αναφοράς ο τύπος CAT 793D του οίκου Caterpillar.

3.1 Το φορτηγό CAT 793D

Το φορτηγό CAT 793D του οίκου Caterpillar είναι ένα τυπικό εργοταξιακό αυτοκίνητο μεταφοράς εξορυγμένου πετρώματος δυναμικότητας 218 μετρικών τόνων. Στις **Εικόνες 7-9** φαίνονται οι χαρακτηριστικές του όψεις.



Εικόνα 7. Φορτηγό 793D του οίκου Caterpillar – Αριστερή πλάγια όψη (Caterpillar, 2010)



Εικόνα 8. Φορηγό 793D του οίκου Caterpillar – Δεξιά πλάγια όψη (Caterpillar, 2010)

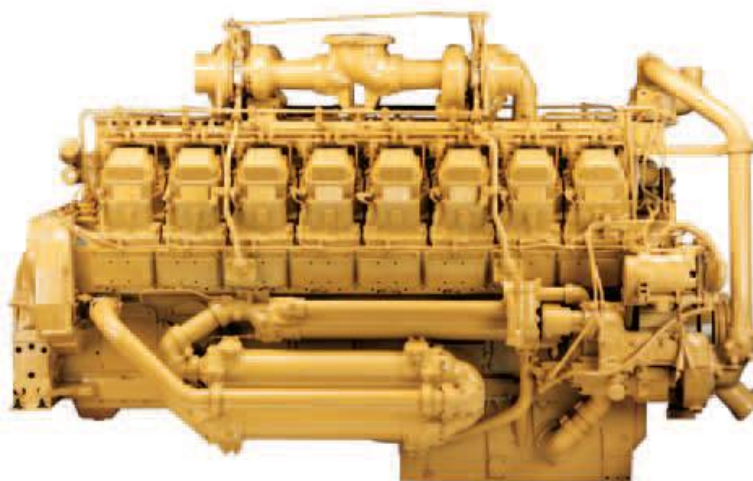


Εικόνα 9. Φορηγό 793D του οίκου Caterpillar – Πρόσθια όψη (Caterpillar, 2010)

3.1.1 Κινητήρας Cat 3516B EUI Quad Turbocharged

Ο συγκεκριμένος τύπος φορτηγού διαθέτει τον υπερτροφοδοτούμενο δηζελοκινητήρα CAT 3516B, ο οποίος φαίνεται στην **Εικόνα 10**. Πρόκειται για κινητήρα με ηλεκτρονική μονάδα έγχυσης καυσίμου (EUI). Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Οι 16 τετράχρονοι κύλινδροι.
- Η ειδική διάταξη ρύθμισης λειτουργίας σε μεγάλα υψόμετρα (HAA), που του επιτρέπει μέγιστη λειτουργική απόδοση σε υψόμετρα μέχρι 2750 m ή και παραπάνω με την ανάλογη ρύθμιση.



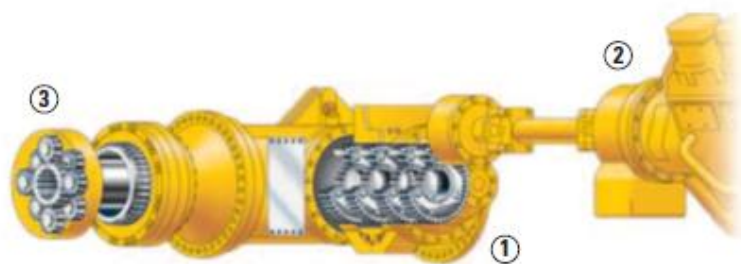
Εικόνα 10. Δηζελοκινητήρας CAT 3516B EUI quad turbocharged υψηλού εκποτίσματος

- Η δυνατότητα αύξησης της ροπής στρέψης έως 23% για ανάπτυξη υψηλής δύναμης έλξης κατά την επιτάχυνση του φορτηγού αυτοκινήτου σε οδούς μεταφοράς απότομης κλίσης ή μεγάλης αντίστασης κύλισης. Η αύξηση της ροπής στρέψης είναι αναγκαία στα σημεία αλλαγής ταχυτήτων (σχέσεων μετάδοσης) προκειμένου η αλλαγή να είναι γρήγορη και αποτελεσματική.

- Τα έμβολα είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα για μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση και την φθορά στις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις κατά την λειτουργία του κινητήρα. Αυτό το χαρακτηριστικό προσδίδει μεγαλύτερη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής.
- Το ηλεκτρονικό σύστημα έγχυσης καυσίμου EUI που ρυθμίζει, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, την παροχή καυσίμου για βέλτιστη απόδοση, χρόνους απόκρισης, αποδοτικότερη κατανάλωση και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων.
- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου ECM που καταγράφει σε πραγματικό χρόνο μέσω αισθητήρων τις κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας του αυτοκινήτου και ρυθμίζει τη λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες (υψόμετρο, θερμοκρασία κ.α.) για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης.
- Το σύστημα ψύξης με υδραυλικό ανεμιστήρα χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου και θορύβου για αποτελεσματική ψύξη, ανθεκτικότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ευκολία συντήρησης.

3.1.2 Σύστημα μετάδοσης ισχύος

Το φορτηγό CAT 793D διαθέτει μηχανικό σύστημα μετάδοσης της ισχύος από τον κινητήρα στους κινητήριους τροχούς. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 11**, το σύστημα μετάδοσης ισχύος αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

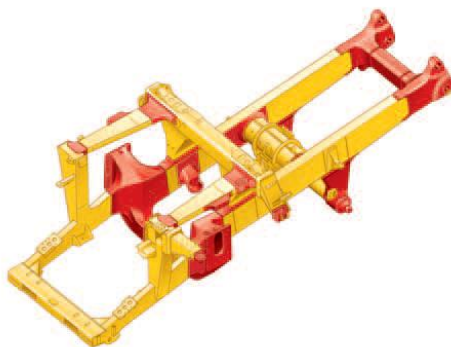


Εικόνα 11. Μηχανικό σύστημα κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου CAT 793D (Caterpillar, 2010)

- 1) **Πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων**. Πρόκειται για ένα κιβώτιο έξι ταχυτήτων, το οποίο αποδίδει σταθερή ισχύ σε μεγάλο εύρος στροφών του κινητήρα 3516B.
 - Είναι στιβαρά κατασκευασμένο για αντοχή στην υψηλή ισχύ του κινητήρα 3516B, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία.
 - Ηλεκτρονικό σύστημα αλλαγής σχέσεων μετάδοσης (TCC), το οποίο αλλάζει σχέσεις σε συγκεκριμένες στροφές του κινητήρα για την βέλτιστη απόδοση του κιβωτίου και την αύξηση της διάρκειας ζωής του συμπλέκτη.
- 2) **Υδροδυναμικός μετατροπέας ροπής (torque converter) με σύστημα άμεσης σύμπλεξης (lock-up)**, ο οποίος συνδυάζει την ομαλή αλλαγή σχέσεων μετάδοσης του μετατροπέα ροπής με την υψηλή απόδοση της άμεσης μηχανικής σύμπλεξης. Η μηχανική σύμπλεξη ενεργοποιείται αυτόματα για ταχύτητες κίνησης του φορτηγού υψηλότερες από 8 km/h.
- 3) **Τελικός πλανητικός μειωτήρας**. Η τελική μείωση των στροφών γίνεται σε πλανητικό μειωτήρα δύο σταδίων εγκατεστημένο εντός των κινητήριων τροχών. Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται το σύστημα μετάδοσης ισχύος από υψηλές ροπές, οι οποίες αναπτύσσονται μόνο στους κινητήριους τροχούς για την επίτευξη υψηλής δύναμης έλξης.

3.1.3 Πλαίσιο του CAT 793D

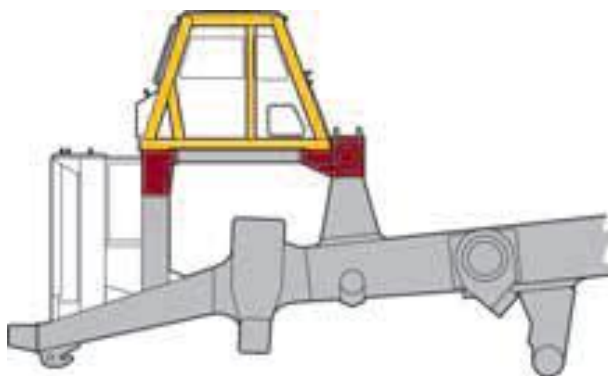
Το πλαίσιο του CAT 793D φαίνεται στο **Εικόνα 12**.



Εικόνα 12. Πλαίσιο του CAT 793D(Caterpillar, 2010)

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα και αποτελείται από κοιλοδοκούς, σφυρήλατα και χυτά στοιχεία συγκολλημένα μεταξύ τους. Αυτή η δομή επιτυγχάνει υψηλή αντοχή και ακαμψία του πλαισίου με το μικρότερο δυνατό βάρος.

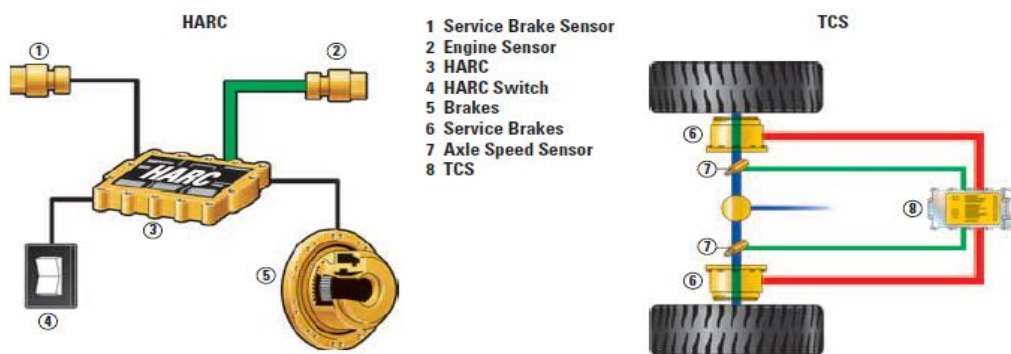
Στο πλαίσιο είναι άμεσα προσαρμοσμένη η καμπίνα του χειριστή, η οποία φαίνεται στο **Εικόνα 13**. Εδράζεται σε τέσσερα σημεία στήριξης και είναι συμβατή με το πρότυπο ROPS, ενώ παρέχει και προστασία έναντι κραδασμών και θορύβου.



Εικόνα 13. Καμπίνα χειριστή του Cat 793D (Caterpillar, 2010)

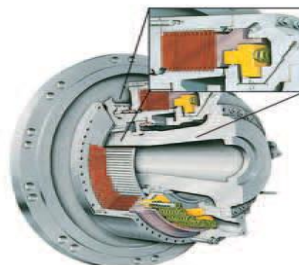
3.1.4 Σύστημα πέδησης και επιβράδυνσης του CAT 793D

Το φορτηγό αυτοκίνητο CAT 793D διαθέτει για τον έλεγχο της κίνησής του ένα ολοκληρωμένο σύστημα πέδησης και επιβράδυνσης, όπως φαίνεται στο **Εικόνα 14**. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο συνδυάζει τις λειτουργίες της τυπικής πέδησης, της πέδης στάθμευσης, του επιβραδυντή και του συστήματος ελέγχου πρόσφυσης των τροχών. Πιο συγκεκριμένα:



Εικόνα 14. Σύστημα Επιβραδυντή - HARC και TCS (Caterpillar, 2010)

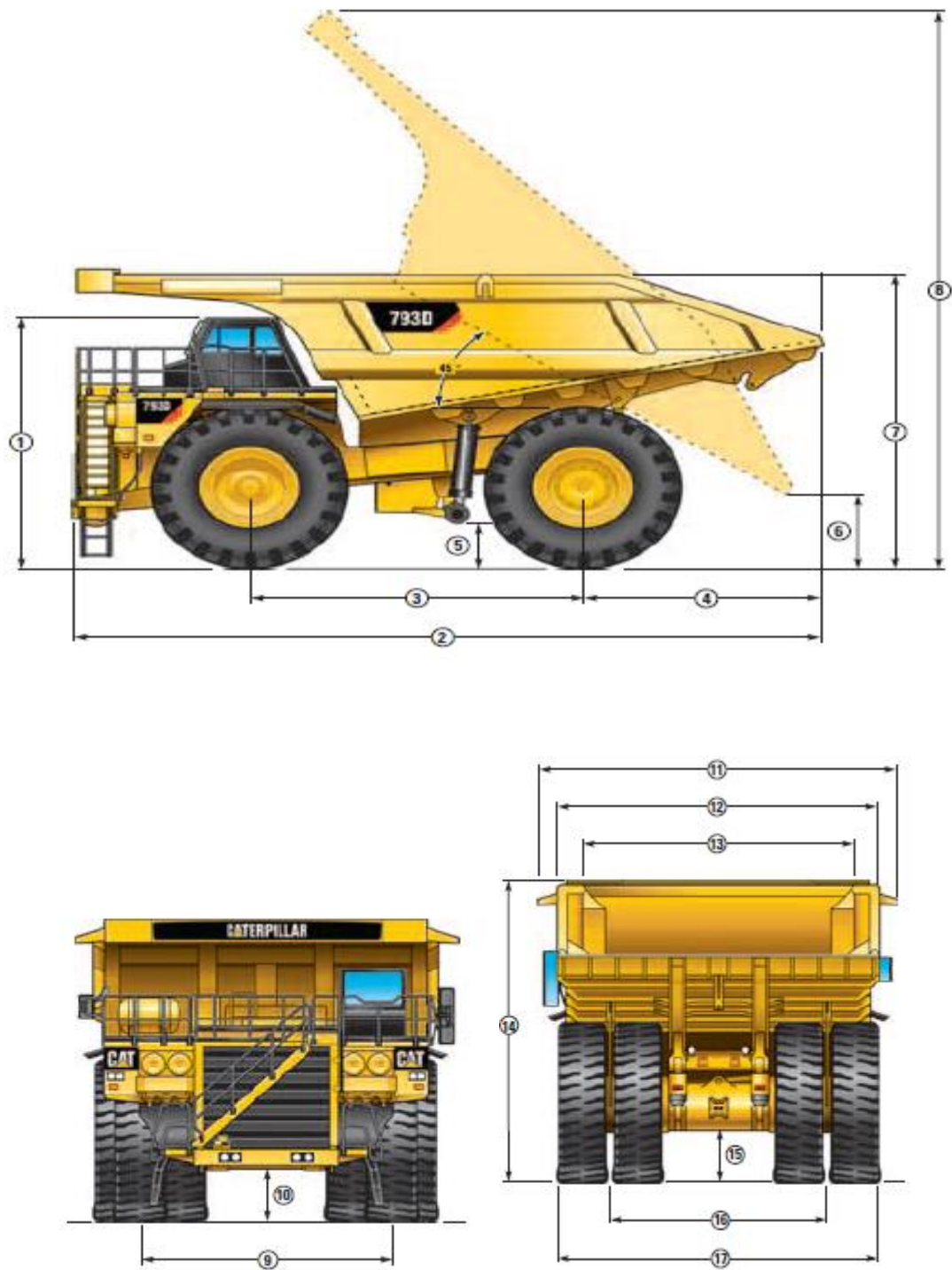
- Στην **Εικόνα 15** φαίνονται τα φρένα του CAT 793D. Είναι ελαιόψυκτα δισκόφρενα κλειστού τύπου με πολλούς δίσκους, εντελώς σφραγισμένα για προστασία από τη σκόνη και το νερό.



Εικόνα15. Δισκόφρενα του CAT 793D (Caterpillar, 2010)

- Το χειρόφρενο εφαρμόζει και στους τέσσερις τροχούς για ασφαλή στάθμευση σε οδούς κλίσης έως και 15%.
- Το αυτόματο σύστημα υδραυλικής επιβράδυνσης (HARC) ενεργοποιείται μέσω ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος για τη διατήρηση σταθερών στροφών του κινητήρα όταν το φορτηγό κινείται σε κατηφορικές οδούς. Ο χειριστής έχει τη δυνατότητα πρόσθετης πέδησης όταν αυτό απαιτείται.
- Το σύστημα ελέγχου πρόσφυσης (TCS) ανιχνεύει την ολίσθηση των τροχών και ρυθμίζει την παρεχόμενη ροπή για την ασφαλή κίνηση του φορτηγού σε ολισθηρές οδούς.

3.1.6 Διαστάσεις του CAT 793D



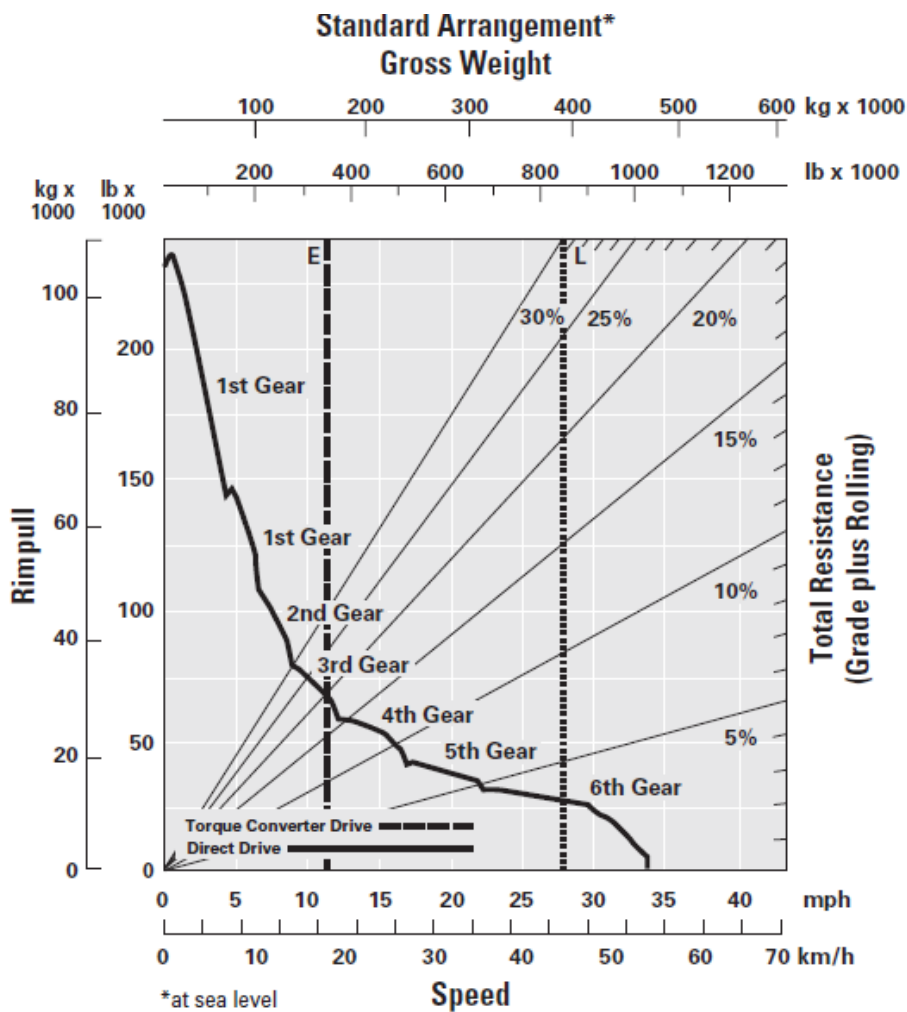
Εικόνα 16. Σκαριφήματα διαστάσεων φορτηγού 793D (Caterpillar, 2010)

Πίνακας 3 : Διαστάσεις Φορητού CAT 793D

1	Ύψος της κορυφής της καμπίνας	5584 mm
2	Μέγιστο μήκος	12682 mm
3	Μεταξόνιο	5905 mm
4	Πίσω άξονας έως άκρο σκάφης	3772 mm
5	Απόσταση από το έδαφος	1005 mm
6	Απόσταση από το έδαφος του άκρου της σκάφης σε ανατροπή	1364 mm
7	Ύψος φόρτωσης	5817 mm
8	Μέγιστο ύψος με τη σκάφη σε ανατροπή	13113 mm
9	Μετατρόχιο εμπρόσθιων τροχών	5610 mm
10	Απόσταση μάσκας κινητήρα από το έδαφος	1294mm
11	Πλάτος canopy	7680 mm
12	Εξωτερικό πλάτος σκάφης	6940 mm
13	Εσωτερικό πλάτος σκάφης	6500 mm
14	Ύψος canopy	6494 mm
15	Απόσταση οπίσθιου άξονα από το έδαφος	1128 mm
16	Μετατρόχιο οπίσθιων τροχών	4963 mm
17	Μέγιστο πλάτος	7605 mm

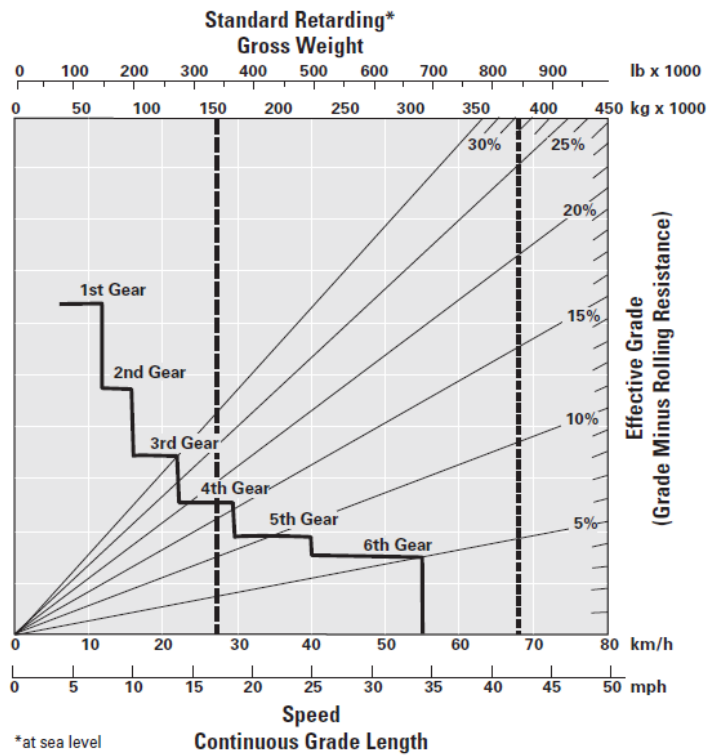
3.1.7 Διαγράμματα Λειτουργίας CAT 793D

Για να προσδιοριστεί η επίδοση του φορτηγού αυτοκινήτου κατά την κίνησή του σε οριζόντια ή ανηφορική οδό μεταφοράς είναι αναγκαίο το διάγραμμα λειτουργίας του που φαίνεται στην **Εικόνα 17**. Σε αυτό η έννοια Total Resistance αναφέρεται στην ενεργή κλίση της οδού, η οποία είναι $EG \geq 0\%$.

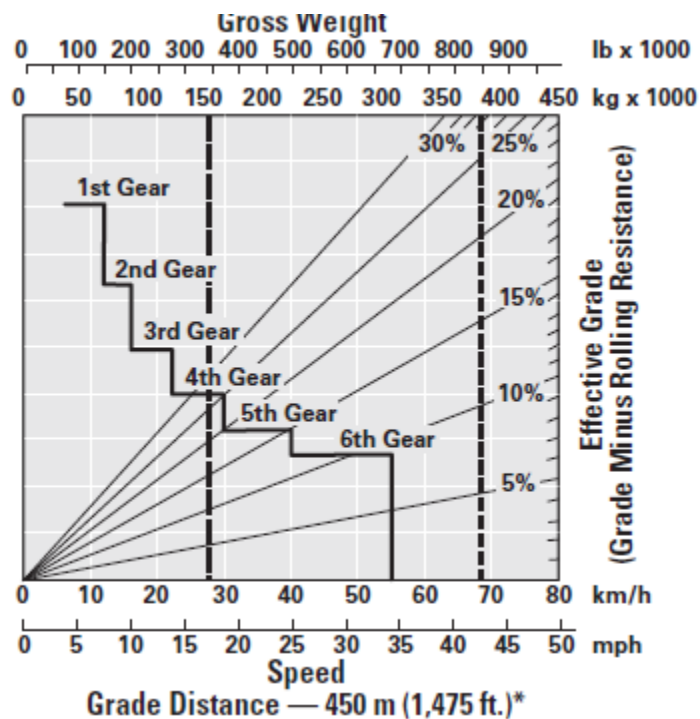


Εικόνα 17. Διάγραμμα λειτουργίας CAT 793D για οδό ενεργούς κλίσης μη αρνητική (Caterpillar, 2010)

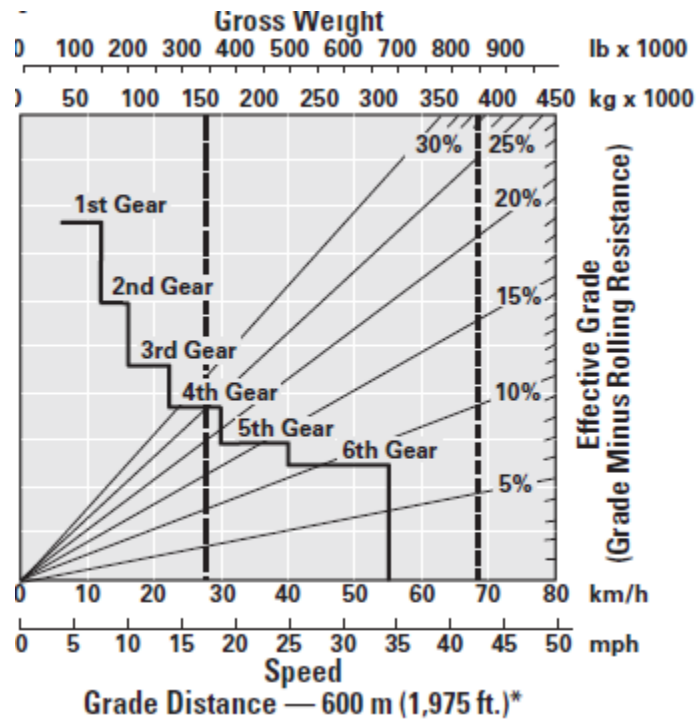
Στην περίπτωση που το φορτηγό αυτοκίνητο κινείται σε κατηφορική οδό, δηλαδή ενεργούς κλίσης $EG < 0\%$, για τον προσδιορισμό της της ασφαλούς ταχύτητας κίνησής του χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα του επιβραδυντή. Είναι απαραίτητο να είναι γνωστά το βάρος του φορτηγού και η ενεργή κλίση και ανάλογα με το μήκος της διαδρομής επιλέγεται το αντίστοιχο διάγραμμα.



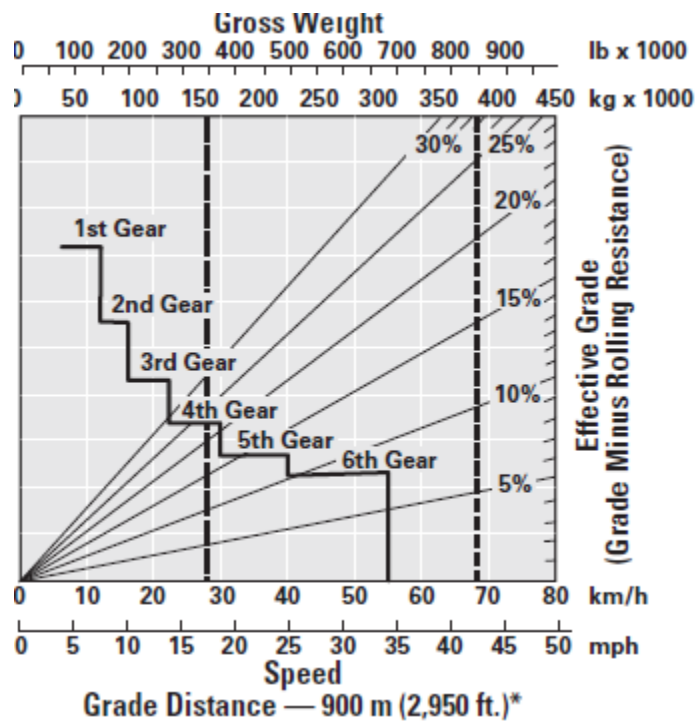
Εικόνα 18. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για οδό μεταφοράς συνεχώς κατηφορική (Caterpillar, 2010)



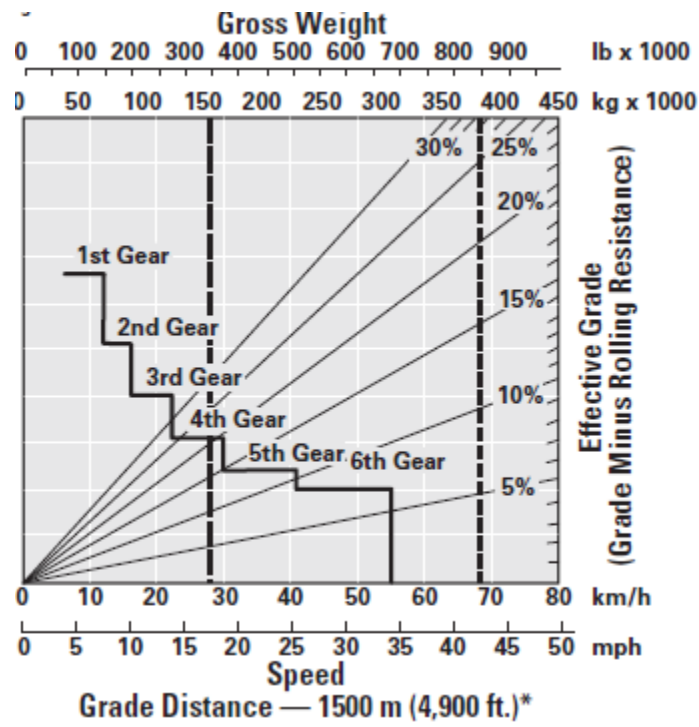
Εικόνα 19. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 450 m (Caterpillar, 2010)



Εικόνα 20. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 600 m (Caterpillar, 2010)



Εικόνα 21. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 900 m (Caterpillar, 2010)



Εικόνα 22. Διάγραμμα επιβραδυντή CAT 793D για κατηφορική οδό μήκους 1500 m (Caterpillar, 2010)

3.1.8 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του CAT 793D

Στον **Πίνακα 4**. Φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα του φορτηγού CAT 793D. Η ονομαστική ισχύς μετράται στις 1750 rpm στροφές κινητήρα.

Πίνακας 4 :Τεχνικά χαρακτηριστικά του του κινητήρα του φορτηγού CAT 793D

Μοντέλο κινητήρα	CAT 3516B HD EUI
Ονομαστικές στροφές κινητήρα	1750 rpm
Ισχύς κατά SAE J1995	1801 kW
Ισχύς κατά SAE J1349	1743 kW
Ισχύς κατά ISO 9249	1743 kW
Ισχύς κατά 80/1269/EEC	1743 kW
Αύξηση ροπής	23%
Διάμετρος εμβόλου	170 mm
Διαδρομή εμβόλου	215 mm
Κυλινδρισμός	78 λίτρα

Στον **Πίνακα 5**. φαίνονται τα βάρη του φορτηγού όπου στο βάρος πλαισίου περιλαμβάνονται η πλήρης δεξαμενή καυσίμου, το σύστημα ανατροπής και στήριξης της σκάφης, τα επίσωτρα και τα ελαστικά. Το βάρος της σκάφης εξαρτάται από τον εξοπλισμό της.

Πίνακας 5: Βάρη του φορτηγού CAT 793D

Μικτό Βάρος Φορτηγού	383749 kg
Βάρος πλαισίου	116707 kg
Βάρος σκάφης	Από 21795 έως 54431 kg

Στον **Πίνακα 6**. Φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του φορτηγού CAT 793D.

Πίνακας 6 : Τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του φορτηγού CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Ονομαστικό ωφέλιμο φορτίο	218 tn
Χωρητικότητα σκάφης κατά SAE 2:1	129 m ³
Μέγιστη Χωρητικότητα	Ανάλογη της σκάφης
Μέγιστη ταχύτητα - Έμφορτο	54,3 km/h
Μέγιστη γωνία συστήματος διεύθυνσης	36°
Κύκλος στροφής κινητήριων τροχών	28,8 m
Κύκλος στροφής οπίσθιου άκρου	32,66 m

Στον **Πίνακα 7**. Φαίνονται οι σχέσεις μετάδοσης ταχύτητας που διαθέτει το φορτηγό αυτοκίνητο CAT 793D και οι μέγιστες ταχύτητες αυτών. Μέγιστη ταχύτητα κίνησης αφορά τα ελαστικά πρότυπων διαστάσεων 40.00R57.

Πίνακας 7: Μέγιστες ταχύτητες του φορτηγού CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Σχέση Μετάδοσης	Μέγιστες Ταχύτητες
1 ^η σχέση μετάδοσης	11,8 km/h
2 ^η σχέση μετάδοσης	15,9 km/h
3 ^η σχέση μετάδοσης	21,5 km/h
4 ^η σχέση μετάδοσης	29,0 km/h
5 ^η σχέση μετάδοσης	39,4 km/h
6 ^η σχέση μετάδοσης	54,3 km/h
Όπισθεν	10,9 km/h

Στον **Πίνακα 8**. Φαίνεται η Τελική μείωση στο φορτηγό CAT 793D.

Πίνακας 8 : Τελική μείωση στο φορτηγό CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Διαφορικό	1 : 8 : 1
Πλανητικός μειωτήρας	16 : 1
Τελική σχέση μετάδοσης	28,8 : 1

Στον **Πίνακα 9**. φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναρτήσεων του φορτηγού CAT 793D.

Πίνακας 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά αναρτήσεων του φορτηγού CAT 793D(Caterpillar, 2010)

Μέγιστη διαδρομή πρόσθιας ανάρτησης	130,5 mm
Μέγιστη διαδρομή οπίσθιας ανάρτησης	105,5 mm
Μέγιστη ταλάντωση οπίσθιου άξονα	± 4,9°

Στον **Πίνακα 10**. φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά φρένων του φορτηγού CAT793D.

Πίνακας : 10 Τεχνικά χαρακτηριστικά φρένων του φορτηγού CAT 793D

Εξωτερική διάμετρος	875,5 mm
Επιφάνεια πέδησης πρόσθιων φρένων	89817 cm ²
Επιφάνεια πέδησης οπίσθιων φρένων	134500 cm ²

Στον **Πίνακα 11**, φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος ανατροπής της σκάφης του φορτηγού CAT 793D.

Πίνακας 11 :Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος ανατροπής της σκάφης του φορτηγού CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Παροχή αντλίας	846 L / Min
Μέγιστη πίεση υδραυλικού συστήματος	20370 kPa
Ελάχιστος χρόνος ανύψωσης	20,25 sec
Ελάχιστος χρόνος καταβίβασης	17,51 sec

Στον **Πίνακα 12**, φαίνεται η Κατανομή του βάρους στο φορτηγό CAT 793D.

Πίνακας 12: Κατανομή του βάρους στο φορτηγό CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Εμπρόσθιος άξονας – Κενό	46%
Οπίσθιος άξονας – Κενό	54%
Εμπρόσθιος άξονας – Έμφορτο	33%
Οπίσθιος άξονας - Έμφορτο	67%

Στον **Πίνακα 13**, φαίνονται οι χωρητικότητες στο φορτηγό CAT 793D.

Πίνακας 13 : Χωρητικότητες στο φορτηγό CAT 793D (Caterpillar, 2010)

Δεξαμενή καυσίμων	4354 L
Σύστημα ψύξης	973 L
Λιπαντικά κινητήρα	265 L
Λιπαντικά οπίσθιου άξονα	1022 L
Δεξαμενή συστήματος διεύθυνσης	227 L
Σύστημα διεύθυνσης (συμπεριλαμβανομένης της δεξαμενής)	341 L
Δεξαμενή συστήματος ανατροπής	769 L
Σύστημα ανατροπής (συμπεριλαμβανομένης της δεξαμενής)	1375 L
Μετατροπέας ροπής	102 L

3.2 Μοντελοποίηση της καμπύλης λειτουργίας του CAT 793D

Για τις ανάγκες ανάλυσης στην παρούσα διπλωματική εργασία απαιτείται η καμπύλη λειτουργίας να μοντελοποιηθεί προσεγγιστικά μέσω κατάλληλων μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στους περαιτέρω υπολογισμούς.

Για το λόγο αυτό, η καμπύλη λειτουργίας του CAT 793D, η οποία φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 17**, χωρίστηκε σε επιμέρους τμήματα που αντιστοιχούν στις σχέσεις μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων και του μετατροπέα ροπής. Στη συνέχεια, κάθε τμήμα προσεγγίστηκε με μία γραμμική σχέση, της οποίας οι σταθερές υπολογίστηκαν με βάση το αρχικό και τελικό ζεύγος τιμών της ταχύτητας και της δύναμης έλξης σε αυτό. Για την εφαρμογή της διαδικασίας ακολουθήθηκε η μέθοδος που παρουσιάζει η Parreira (2013). Οι γραμμικές σχέσεις που προέκυψαν, καθώς και το εύρος ταχύτητας και δύναμης έλξης όπου ισχύει κάθε μία από αυτές, δίνονται στον **Πίνακα 14**.

Πίνακας: 14 Γραμμικό μοντέλο καμπύλης λειτουργίας του CAT 793D

Γραμμική σχέση (tn – km/h)	Σχέση Μετάδοσης	Ταχύτητα (km/h)	Rimpull (tn)
$R(v)=103.43+1.4V$	1A	0-1.6	103.4-105.1
$R(v)=117.027-7.5V$	1A'	1.6-6.8	65.7-104.9
$R(v)=56.24+1.13V$	1A'/1B	6.8-8	63.9-65.3
$R(v)=115.66-6.05V$	1B	8-10.4	49.8-66.9
$R(v)=85.72-3.20V$	2	10.4-14.08	40.6-50.9
$R(v)=55.79-1.39V$	3	14.08-19.31	28.9-36.2
$R(v)=121.109-4.92V$	3/4	19.31-19.95	22.8-26
$R(v)=44.45-0.95V$	4	19.95-28	17.8-25.4
$R(v)=33.56-0.55V$	5	28-35.40	14-18.1
$R(v)=85.72-2.23V$	5	35.40-36.21	4.9-6.7
$R(v)=18.14-0.12V$	6	36.21-47.47	12.4-13.7
$R(v)=67.13-1.19V$	6	47.47-54.31	2.4-10.6

3.2.1 Εκτίμηση της Τελικής Σχέσης Μετάδοσης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η κατανάλωση καυσίμου του φορτηγού, απαιτείται -όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω- εκτίμηση των στροφών του κινητήρα. Αυτές εξαρτώνται από την ταχύτητα κίνησης του φορτηγού και τη σχέση μετάδοσης που χρησιμοποιείται, δηλαδή τη σχέση ανάμεσα στη γωνιακή ταχύτητα των κινητήριων τροχών και των στροφών του κινητήρα.

Η καμπύλη λειτουργίας παρέχει τους συνδυασμούς ταχύτητας και δύναμης έλξης για το δεδομένο φορτηγό. Από αυτούς τους συνδυασμούς είναι δυνατό να υπολογιστεί η στιγμιαία κινητήρια ισχύς και στη συνέχεια ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ως προς τη μέγιστη ονομαστική ισχύ του κινητήρα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$P = V \cdot R \quad (\text{Εξ. 13})$$

$$E = P/P_{MAX} \quad (\text{Εξ. 14})$$

Όπου:

P η στιγμιαία κινητήρια ισχύς

V η ταχύτητα κίνησης του φορτηγού

R η δύναμη έλξης

P_{max} η μέγιστη ονομαστική ισχύς του κινητήρα

E ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης

Η σχέση της γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών και της ταχύτητας του φορτηγού είναι:

$$\omega_d = v/r \quad (\text{Εξ. 15})$$

Όπου:

V η ταχύτητα κίνησης του φορτηγού

R η ακτίνα των κινητήριων τροχών

ω_d η γωνιακή ταχύτητα των κινητήριων τροχών

Οι διαστάσεις των πρότυπων ελαστικών του φορτηγού CAT 793D, για τις οποίες ισχύει η καμπύλη λειτουργίας που παρέχει ο κατασκευαστής, είναι 40.00R57 που αντιστοιχεί σε ακτίνα ελαστικού ίση με 1,778 m.

Η τελική σχέση μετάδοσης R_r που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες του κινητήρα και των κινητήριων τροχών είναι:

$$R_r = \text{RPM} / \omega_d \quad (\text{Εξ. 16})$$

Από την **Εξίσωση 15** προκύπτει:

$$R_r = (\text{RPM} \cdot r) / v \quad (\text{Εξ. 17})$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ταχύτητα δίνεται στις καμπύλες λειτουργίας σε km/h, οι στροφές του κινητήρα σε RPM και η ακτίνα των ελαστικών σε m, η τελική σχέση μετάδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$R_r = (\text{RPM} \cdot 2\pi \cdot r) / (60 \cdot v/3,6) \quad (\text{Εξ. 18})$$

Υποθέτοντας ότι η τελική σχέση μετάδοσης αντιστοιχεί στο μέγιστο βαθμό απόδοσης του κινητήρα, τελικά προκύπτει ότι αυτή μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$R_r = (\text{RPM}_{\text{rated}} \cdot 2\pi \cdot r) / (60 \cdot v/3,6) \quad (\text{Εξ. 19})$$

Όπου για το CAT 793D είναι $\text{RPM}_{\text{rated}}$ 1750 στροφές, στις οποίες αντιστοιχεί η μέγιστη ονομαστική ισχύς των 1743 kW.

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκε για κάθε σχέση μετάδοσης ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης για διάφορους συνδυασμούς ταχύτητας – δύναμης έλξης του φορτηγού. Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε η τελική σχέση μετάδοσης με χρήση της **εξίσωσης 19** για την ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μέγιστο βαθμό απόδοσης.

Γνωρίζοντας τις τελικές σχέσεις μετάδοσης είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι στροφές του κινητήρα που αντιστοιχούν σε κάθε ταχύτητα κίνησης του φορτηγού με χρήση της σχέσης:

$$\text{RPM} = (R_r \cdot V) / (2 \pi r) \quad (\text{Εξ. 20})$$

Στον **Πίνακα 15** δίνονται τα αποτελέσματα των σχετικών υπολογισμών για όλη την καμπύλη λειτουργίας του φορτηγού CAT 793D.

Πίνακας 15 : Υπολογισμός τελικής σχέσης μετάδοσης και στροφών κινητήρα για το CAT 793D.

#	Γραμμικές εξισώσεις	Σχέση μετάδοσης	Ταχύτητα (km/h)	Δύναμη Έλξης (kg x 1000)	Ισχύς (kW)	Απόδοση	Τελική σχέση Rr	RPM
1	$R(v)=103.43+1.4*v$	1A	0.03	103.49	9	0.50%	145.68	7
			0.40	104.05	114	6.33%		88
			0.81	104.65	229	12.74%		175
			1.21	105.26	346	19.22%		263
2	$R(v)=117.027-7.5*v$	1A'	1.61	104.98	460	25.55%	145.68	350
			2.42	98.93	650	36.12%		525
			2.98	94.69	768	42.64%		647
			3.22	92.87	814	45.21%		700
			3.62	89.85	886	49.20%		787
			4.03	86.82	951	52.83%		875
			4.43	83.79	1010	56.08%		962
			4.83	80.76	1062	58.97%		1050
			5.23	77.73	1107	61.49%		1137
			5.64	74.71	1146	63.64%		1225
			6.04	71.68	1178	65.42%		1312
			6.44	68.65	1204	66.84%		1400
			6.84	65.62	1223	67.88%		1487
3	$R(v)=56.24+1.13*v$	1A'/1 B	6.84	65.61	1222	67.87%	145.68	1488
			7.25	66.15	1305	72.45%		1575
			7.65	66.69	1389	77.10%		1663
			8.05	67.23	1473	81.81%		1750
4	$R(v)=115.66-6.05*v$	1B	8.05	67.23	1473	81.81%	121.4	1458

			8.45	64.80	1491	82.80%		1531
			8.86	62.37	1504	83.49%		1604
			9.26	59.94	1511	83.88%		1677
			9.66	57.51	1513	83.98%		1750
			10.06	55.08	1509	83.78%		1823
			10.47	52.65	1500	83.29%		1896
			10.87	50.22	1486	82.50%		1969
5	$R(v)=85.72-3.20*V$	2	10.87	50.23	1486	82.53%	88.29	1432
			11.27	48.92	1501	83.34%		1485
			11.59	47.86	1511	83.88%		1527
			12.08	46.28	1522	84.49%		1591
			12.56	44.71	1529	84.87%		1655
			12.88	43.65	1531	85.00%		1697
			13.29	42.34	1531	85.02%		1750
			13.69	41.02	1529	84.87%		1803
			14.09	39.71	1523	84.57%		1856
6	$R(v)=55.79-1.39*V$	3	14.09	36.43	1397	77.58%	60.7	1276
			14.49	35.87	1415	78.57%		1313
			14.90	35.30	1432	79.49%		1349
			15.30	34.74	1447	80.34%		1385
			15.70	34.18	1461	81.12%		1422
			16.10	33.62	1474	81.83%		1458
			16.51	33.06	1485	82.48%		1495
			16.91	32.50	1496	83.05%		1531
			17.31	31.94	1505	83.56%		1568
			17.71	31.37	1513	84.00%		1604
			18.12	30.81	1520	84.38%		1641
			18.52	30.25	1525	84.68%		1677
			18.92	29.69	1529	84.91%		1714
			19.32	29.13	1532	85.08%		1750

7	$R(v)=121.109-4.92*v$	3 / 4	19.32	29.13	1533	85.09%		1750
			19.97	26.05	1416	78.63%		1808
8	$R(v)=44.45-0.95*v$	4	19.97	25.92	1409	78.24%	49.38	1471
			20.53	25.39	1419	78.81%		1513
			20.93	25.02	1426	79.15%		1542
			21.34	24.64	1431	79.45%		1572
			21.74	24.26	1436	79.71%		1602
			22.14	23.88	1439	79.92%		1631
			22.54	23.50	1442	80.08%		1661
			22.95	23.12	1444	80.20%		1691
			23.75	22.36	1446	80.29%		1750
			24.15	21.99	1446	80.27%		1780
			24.96	21.23	1442	80.09%		1839
			25.36	20.85	1439	79.93%		1869
			25.76	20.47	1436	79.72%		1898
			26.17	20.09	1431	79.47%		1928
			26.57	19.71	1426	79.17%		1958
			26.97	19.33	1420	78.82%		1987
			27.38	18.96	1412	78.43%		2017
			28.02	18.35	1399	77.71%		2064
9	$R(v)=33.56-0.55*v$	5	28.02	18.64	1422	78.96%	37.84	1582
			28.58	18.34	1427	79.22%		1614
			28.99	18.12	1429	79.37%		1636
			29.39	17.90	1432	79.50%		1659
			29.79	17.68	1434	79.60%		1682
			30.19	17.46	1435	79.67%		1705
			30.60	17.24	1436	79.71%		1727
			31.00	17.02	1436	79.73%		1750
			31.40	16.80	1435	79.72%		1773

			31.80	16.58	1435	79.69%		1795
			32.21	16.36	1434	79.62%		1818
			32.61	16.14	1432	79.53%		1841
			33.01	15.92	1430	79.42%		1864
			33.41	15.70	1428	79.28%		1886
			33.82	15.48	1425	79.11%		1909
			34.22	15.26	1421	78.91%		1932
			34.62	15.04	1417	78.69%		1955
			35.02	14.82	1413	78.44%		1977
			35.43	14.60	1408	78.16%		2000
10	$R(v)=85.72-2.23*V$		35.43	14.58	1406	78.09%		2000
			35.83	13.77	1343	74.59%		2023
			36.23	12.96	1279	71.00%		2045
11	$R(v)=18.14-0.12*V$	6	36.23	12.97	1279	71.03%	24.69	1335
			36.63	12.91	1288	71.49%		1350
			37.04	12.85	1296	71.96%		1364
			36.23	12.97	1279	71.03%		1335
			39.29	12.53	1340	74.41%		1447
			40.26	12.39	1358	75.39%		1483
			41.06	12.27	1372	76.18%		1513
			41.87	12.16	1386	76.94%		1542
			42.67	12.04	1399	77.67%		1572
			43.48	11.93	1412	78.38%		1602
			44.28	11.81	1424	79.05%		1631
			45.09	11.69	1435	79.70%		1661
			45.89	11.58	1447	80.32%		1691
			46.70	11.46	1457	80.91%		1720
			47.50	11.35	1467	81.47%		1750
12	$R(v)=67.13-1.19*V$		47.50	11.34	1466	81.42%		1750
			48.31	10.39	1366	75.85%		1780

			49.11	9.43	1261	70.04%		1809
			49.92	8.48	1153	64.00%		1839
			50.72	7.53	1040	57.73%		1869
			51.53	6.58	923	51.23%		1898
			52.33	5.62	801	44.49%		1928
			53.14	4.67	676	37.53%		1958
			54.35	3.24	480	26.64%		2002

3.2.2 Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου Πέδης – BSFC

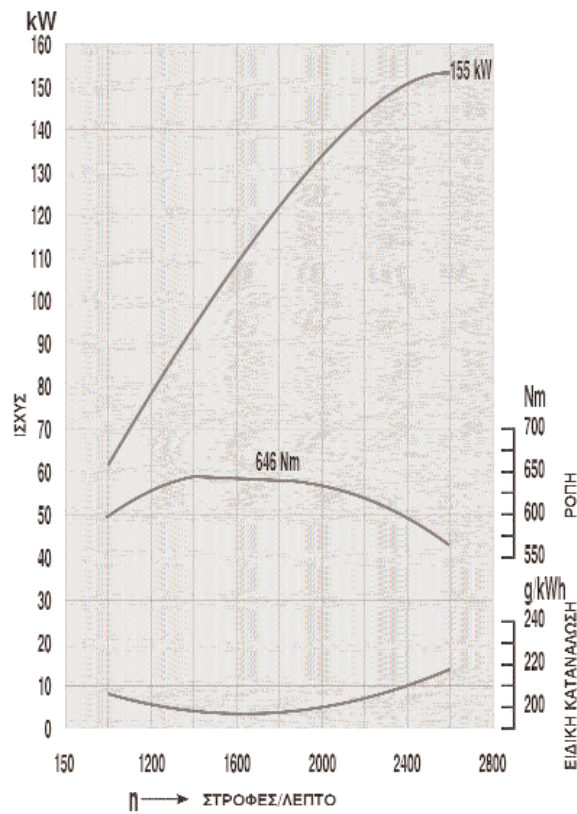
Στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, με την καύση του μείγματος παράγονται καυσαέρια με υψηλή πίεση. Η πίεση αυτή εφαρμόζεται στα έμβολα με αποτέλεσμα την κίνηση τους. Η παλινδρομική κίνηση των εμβόλων μετατρέπεται σε περιστροφική από τον στροφαλοφόρο άξονα του οποίου η περιστροφική κίνηση μεταδίδεται στην συνέχεια μέσα από τον συμπλέκτη στο κιβώτιο ταχυτήτων, στο διαφορικό, στους άξονες μετάδοσης της κίνησης και τέλος εφαρμόζεται υπό την μορφή ροπής στους κινητήριους τροχούς.

Κάθε κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορεί να λειτουργεί από ένα ελάχιστο όριο στροφών και πάνω (στροφές ρελαντί). Η ισχύς που παράγει ο κινητήρας μέχρι τις στροφές αυτές καταναλώνεται από τις εσωτερικές τριβές του κινητήρα και την κίνηση διαφόρων βοηθητικών εξαρτημάτων (αντλία λαδιού, νερού, υδραυλικό τιμόνι κ.α).

Καθώς αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα πάνω από τις στροφές ρελαντί, υπάρχει μια περιοχή όπου ο κινητήρας αναπτύσσει μέγιστη ροπή και ισχύ όπως φαίνεται στην **Εικόνα 23**.

Η λειτουργία του κινητήρα πέρα από αυτό το όριο στροφών χαρακτηρίζεται από την απόδοση μηδενικής σχεδόν ισχύος, την υπερβολική κατανάλωση καυσίμου ή ακόμα και από την πρόκληση ζημιάς στον κινητήρα.

Η κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με την ισχύ που αποδίδει ο κινητήρας είναι ένας σημαντικός συντελεστής λειτουργίας του. Το χαρακτηριστικό αυτό εκφράζεται με την ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδης (Brake Specific Fuel Consumption), η οποία είναι ο λόγος της ποσότητας καυσίμου που καταναλώνεται από τον κινητήρα σε σχέση με την ενέργεια που αποδίδεται και μετριέται σε gr/kWh. Όσο μικρότερη είναι η ειδική κατανάλωση ενός κινητήρα τόσο καλύτερη η απόδοση ισχύος σε σχέση με το καύσιμο που καταναλώνει όπως φαίνεται στην **Εικόνα 23**.

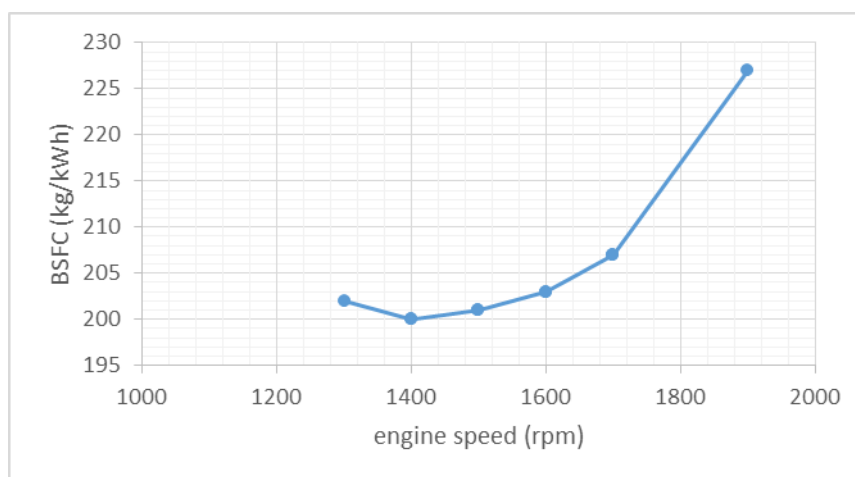


Εικόνα 23. Τυπικό διάγραμμα ισχύος, ροπής και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κινητήρα. Φατσής Α (2013)

Τα **διαγράμματα** ισχύος, ροπής και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κινητήρα παρέχονται από τους κατασκευαστές. Για το φορτηγό CAT 793D βρέθηκαν τα σχετικά δεδομένα στη διατριβή της Parreira (2013). Στον **Πίνακα 16** δίνονται τα δεδομένα και στην **Εικόνα 24** απεικονίζονται με τη μορφή διαγράμματος.

Πίνακας 16 : Ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC) για το CAT 793D (Parreira, 2013)

#	Γραμμικές εξισώσεις	RPM	BSFC
1	BSFC = 228 – 0,02 RPM	1300	202
		1400	200
2	BSFC = 186 + 0,01 RPM	1400	200
		1500	201
3	BSFC = 171 + 0,02 RPM	1500	201
		1600	203
4	BSFC = 139 + 0,04 RPM	1600	203
		1700	207
5	BSFC = 37 + 0,1 RPM	1700	207
		1900	227



Εικόνα 24. Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα του CAT 793D.

Παρατηρείται ότι η χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου εμφανίζεται στην περιοχή από 1400 έως 1500 rpm. Σε αυτήν την περιοχή είναι πιο αποδοτική η λειτουργία του κινητήρα. Ένας χειριστής επιδιώκει την λειτουργία του κινητήρα σε αυτό το εύρος στροφών με την επιλογή της κατάλληλης σχέσης μετάδοσης για την απαιτούμενη δύναμη έλξης και ταχύτητα κίνησης του φορτηγού.

3.2.3 Υπολογισμός Κατανάλωσης Καυσίμου

Τελικά, για κάθε δεδομένη στιγμιαία ταχύτητα κίνησης του φορτηγού υπολογίζονται οι στροφές και η στιγμιαία ισχύς του κινητήρα και γνωρίζοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι δυνατό να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου από τη σχέση:

$$FC = BSFC_i \cdot P_i / F_D \quad (\text{Εξ. 21})$$

Όπου :

FC η ωριαία κατανάλωση καυσίμου σε l/h

BSFC η στιγμιαία ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδης σε g/kWh

P_i η στιγμιαία ισχύς σε kW

F_D η πυκνότητα του καυσίμου. Για το diesel είναι 850 g/l.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂

4. Κατανάλωση Καυσίμου και εκπομπές CO₂

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται μέσω παραμετρικής ανάλυσης η σχέση της κατανάλωσης καυσίμου με την ενεργή κλίση της οδού μεταφοράς και αναπτύσσεται το τελικό μοντέλο υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂.

4.1 Εκπομπές CO₂

Ο τελικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των εκπομπών CO₂ δεδομένου φορτηγού αυτοκινήτου συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού μεταφοράς και των τεχνικών του χαρακτηριστικών.

Οι εκπομπές CO₂ εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται. Για την εκτίμηση τους χρησιμοποιούνται, σε αυτή την εργασία, οι οδηγίες που παρέχει η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ. Συγκεκριμένα η EPA (2005) ορίζει ότι πρωταρχικός και καθοριστικός παράγοντας των εκπομπών CO₂ είναι η περιεκτικότητα του άνθρακα στο καύσιμο που καταναλώνεται. Η περιεκτικότητα του άνθρακα σε κάθε τύπο καυσίμου ποικίλλει, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς η μέση τιμή της.

Σύμφωνα με την αμερικάνικη νομοθεσία παρέχονται εκτιμήσεις για την περιεκτικότητα του άνθρακα ανά γαλόνι βενζίνης και diesel, οι οποίες χρησιμοποιούνται από την EPA για υπολογισμούς κατανάλωσης καυσίμου σε οχήματα. Εκτιμάται ότι η περιεκτικότητα άνθρακα ανά γαλόνι diesel είναι 2,778 gr. Για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ θεωρείται ότι το 99% αυτής της ποσότητας άνθρακα οξειδώνεται σε CO₂. Τελικά, οι εκπομπές άνθρακα πολλαπλασιάζονται με το λόγο του μοριακού βάρους του διοξειδίου του άνθρακα (44) προς αυτό του άνθρακα (12) και προκύπτει ότι :

- CO_2 εκπομπές ανά γαλόνι diesel = $2,778 \text{ g/gallon} \cdot 0,99 \cdot (44/12) = 10,084 \text{ g/gallon} = 10,1 \text{ kg/ gallon}$

Δεδομένου ότι ένα γαλόνι ισούται με 3,78541 λίτρα, οι εκπομπές CO₂ είναι κατά την EPA 2,668 kg/l diesel.

Συνεπώς, ο υπολογισμός των ωριαίων εκπομπών CO₂ γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$CO_{2em} = 2,668 \text{ kg/l} \cdot FC \quad (\text{Εξ. 22})$$

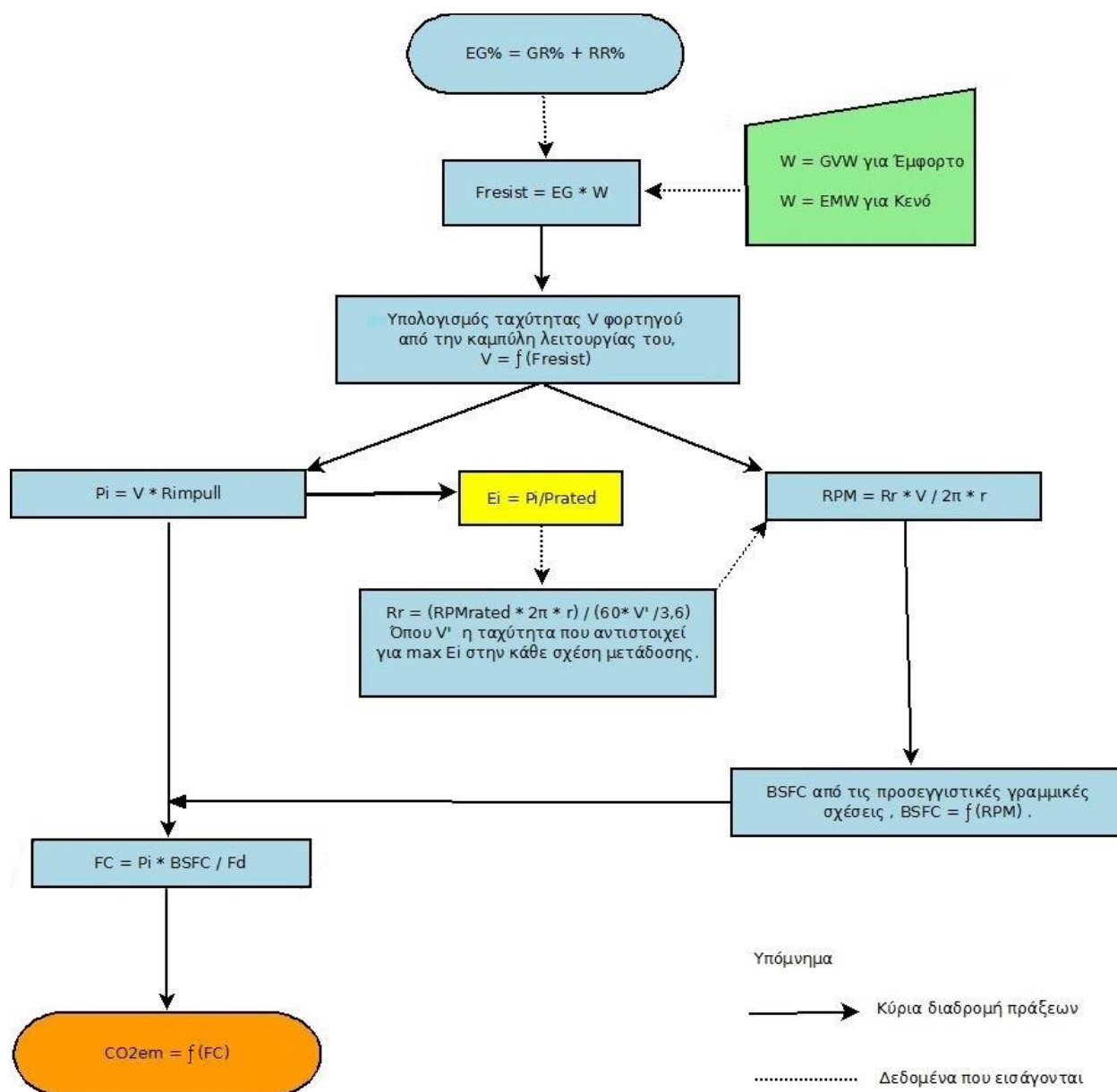
Όπου:

CO_{2em} οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kg/h

FC η κατανάλωση καυσίμου σε l/h

4.2 Μοντέλο εκτίμησης εκπομπών CO2

Το μοντέλο εκτίμησης εκπομπών CO2 που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται συνοπτικά στο διάγραμμα ροής της **Εικόνας 25**.



Εικόνα 25. Διάγραμμα ροής εκτίμησης εκπομπών CO2.

Αναλυτικά, η αλληλουχία των πράξεων του διαγράμματος ροής εκτελείται δύο φορές, μία για έμφορτο φορτηγό και μία για κενό. Για το CAT 793D, το ονομαστικό μικτό βάρος είναι $W = GVW = 383749$ kg και το απόβαρο $W = EMW = 154729$ kg. Οι υπολογισμοί αφορούν στην κίνηση του φορτηγού σε οδό θετικής ενεργούς κλίσης, δηλαδή ανηφορικής. Η επιλογή αυτή έγινε διότι σε αυτές τις οδούς καταγράφεται κυρίως η κατανάλωση καυσίμου. Και στις δύο περιπτώσεις ο υπολογισμός ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Εισαγωγή τιμών για την ενεργή κλίση EG από 0,01 έως 0,30. Είναι το εύρος τιμών της ενεργούς κλίσης που αναφέρεται στο διάγραμμα λειτουργίας του CAT 793D.
2. Υπολογισμός της συνολικής αντίστασης σε tn που ισούται με $F_{resist} = W \cdot EG$. Η συνολική αντίσταση στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας της κίνησης του φορτηγού ισούται με τη δύναμη έλξης Rimpull (Μιχαλακόπουλος 2006). Η παραμετρική ανάλυση σταματάει όταν η συνολική αντίσταση ξεπεράσει την μέγιστη δύναμη έλξης, δηλαδή 100 tn για το CAT 793D. Κατά συνέπεια, οι υπολογισμοί γίνονται μέχρι η ενεργή κλίση να φτάσει EG = 0,26 για έμφορτο φορτηγό και EG = 0,30 για κενό.
3. Υπολογισμός της μέγιστης ταχύτητας του φορτηγού V σε km/h για την αντίστοιχη δύναμη έλξης Rimpull σε tn, χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές γραμμικές σχέσεις που δίνονται στον **Πίνακα 14**.
4. Υπολογισμός της στιγμιαίας ισχύος $P_i = V \cdot Rimpull/1000$ και της στιγμιαίας απόδοσης $E_i = P_i/P_{rated}$ όπου :
 - P_i σε kW
 - V σε m/s
 - Rimpull σε N
 - $P_{rated} = 1743$ kW για το CAT 793D

5. Υπολογισμός $Rr = (RPM_{rated} \cdot 2\pi \cdot r) / (60 \cdot V'/3,6)$ όπου:
- $RPM_{rated} = 1743$ kW για το CAT 793D.
 - r η ακτίνα των ελαστικών, δηλαδή 1,778 m για το CAT 793D.
 - V' η ταχύτητα του φορτηγού αυτοκινήτου που αντιστοιχεί στην $max E_i$ για κάθε σχέση μετάδοσης
6. Υπολογισμός των στροφών του κινητήρα $RPM = Rr \cdot V / 2\pi \cdot r$ όπου :
- Rr η τελική σχέση μετάδοσης από τον Πίνακα 17.
 - V η ταχύτητα κίνησης του φορτηγού σε m/min
 - r η ακτίνα των ελαστικών, δηλαδή 1,778 m για το CAT 793D.
7. Υπολογισμός ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πέδης BSFC σε g/kWh, σύμφωνα με τις προσεγγιστικές σχέσεις του **Πίνακα 16**.
8. Υπολογισμός ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου $FC = P_i \cdot BSFC_i / F_D$ σε l/h όπου:
- P_i σε kW
 - $BSFC_i$ σε g/kWh η αντίστοιχη ειδική κατανάλωση καυσίμου που υπολογίστηκε στο βήμα 6.
 - F_D η πυκνότητα του καυσίμου που είναι 850 g/l για diesel.
9. Υπολογισμός εκπομπών ρύπων $CO_2 = FC \cdot 2,668$ σε kg/h όπου:
- FC η ωριαία κατανάλωση καυσίμου σε l/h που υπολογίστηκε στο βήμα 7.

Για την εκτέλεση της παραμετρικής ανάλυσης αναπτύχθηκε κατάλληλο υπολογιστικό φύλλο. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στον Πίνακα 17 για έμφορτο και στον Πίνακα 18 για κενό. Οι υπολογισμοί εκτελούνται για ενεργές κλίσεις έως 0,21 για το έμφορτο φορτηγό, διότι για μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν στροφές του κινητήρα για τις οποίες δεν δίνονται δεδομένα για την ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Πίνακας 17: Εκτίμηση εκπομπών CO₂ συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού για έμφορτο φορτηγό CAT 793D

EG	Total resistance (tn) (kg x 1000)	Speed (km/h)	Pi (kW)	Ei	Gear ratio	RPM	BSFC (g/kWh)	Hourly fuel consumption (l/h)	Hourly CO ₂ emissions (kg/h)
0.01	3.837	53.19	556.0	0.32	24.68	1958	233	152.3	406.4
0.02	7.675	49.96	1044.6	0.60	24.68	1840	221	271.5	724.5
0.03	11.512	55.23	1732.0	0.99	24.68	2034	240	489.8	1306.8
0.04	15.350	33.11	1384.4	0.79	37.84	1869	224	364.7	973.1
0.05	19.187	26.59	1389.9	0.80	49.38	1959	233	380.8	1016.1
0.06	23.025	22.55	1414.5	0.81	49.38	1661	205	341.9	912.3
0.07	26.862	18.51	1354.7	0.78	49.38	1364	201	319.9	853.6
0.08	30.700	18.05	1509.5	0.87	60.70	1635	204	363.0	968.5
0.09	34.537	15.29	1438.5	0.83	60.70	1385	200	339.0	904.5
0.10	38.375	12.53	1309.7	0.75	60.70	1135	205	316.3	844.1
0.11	42.212	13.60	1563.4	0.90	88.29	1791	216	397.5	1060.5
0.12	46.050	12.40	1555.1	0.89	88.29	1633	204	373.8	997.4
0.13	49.887	11.20	1521.7	0.87	88.29	1475	201	359.4	958.9
0.14	53.725	10.24	1498.2	0.86	121.40	1854	222	392.0	1046.0
0.15	57.562	9.60	1505.8	0.86	121.40	1739	211	373.7	997.0
0.16	61.400	8.97	1500.1	0.86	121.40	1624	204	360.0	960.5
0.17	65.237	8.33	1481.1	0.85	121.40	1509	201	350.6	935.4
0.18	69.075	6.39	1202.4	0.69	145.68	1389	200	283.2	755.7
0.19	72.912	5.88	1167.5	0.67	145.68	1278	202	278.1	742.0
0.20	76.750	5.37	1122.0	0.64	145.68	1166	205	270.2	720.9
0.21	80.587	4.86	1065.8	0.61	145.68	1055	207	259.4	692.2

Πίνακας 18:Εκτίμηση εκπομπών CO2 συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού για κενό φορτηγό CAT 793D.

EG	Total resistance (tn), (kg x 1000)	Speed (km/h)	Pinst (W)	Ei	Gear ratio	RPM	BSFC (g/kWh)	Hourly fuel consumption (l/h)	Hourly CO2 emissions (kg/h)
0.01	1.5473	55.1115	232291	0.13327	24.68	2029.2	239.92	65.6	174.9
0.02	3.0946	53.8113	453621	0.26025	24.68	1981.32	235.132	125.5	334.8
0.03	4.6419	52.511	663990.3	0.38095	24.68	1933.45	230.345	179.9	480.1
0.04	6.1892	51.2108	863398.6	0.49535	24.68	1885.57	225.557	229.1	611.3
0.05	7.7365	49.9105	1051846	0.60347	24.68	1837.7	220.77	273.2	728.9
0.06	9.2837	48.6103	1229333	0.7053	24.68	1789.83	215.983	312.4	833.4
0.07	10.8310	47.3101	1395859	0.80084	24.68	1741.95	211.195	346.8	925.4
0.08	12.3783	48.014	1619003	0.92886	24.68	1767.87	213.787	407.2	1086.5
0.09	13.9256	35.1199	1332250	0.76434	24.68	1293.11	202.138	316.8	845.3
0.10	15.4729	32.8856	1386105	0.79524	37.84	1856.5	222.65	363.1	968.7
0.11	17.0202	30.0724	1394281	0.79993	37.84	1697.68	206.907	339.4	905.6
0.12	18.5675	27.2591	1378742	0.79102	37.84	1538.86	201.777	327.3	873.3
0.13	20.1148	25.616	1403606	0.80528	49.38	1887.12	225.712	372.7	994.5
0.14	21.6621	23.9873	1415466	0.81209	49.38	1767.13	213.713	355.9	949.6
0.15	23.2094	22.3586	1413596	0.81101	49.38	1647.15	204.886	340.7	909.1
0.16	24.7566	20.7299	1397997	0.80206	49.38	1527.16	201.543	331.5	884.4
0.17	26.3039	19.1011	1368667	0.78524	49.38	1407.17	200.072	322.2	859.6
0.18	27.8512	20.0998	1524948	0.8749	60.7	1820.2	219.02	392.9	1048.4
0.19	29.3985	18.9867	1520522	0.87236	60.7	1719.39	208.939	373.8	997.2
0.2	30.9458	17.8735	1506712	0.86444	60.7	1618.59	203.743	361.2	963.6
0.21	32.4931	16.7604	1483518	0.85113	60.7	1517.78	201.356	351.4	937.7
0.22	34.0404	15.6472	1450940	0.83244	60.7	1416.98	200.17	341.7	911.7
0.23	35.5877	14.5341	1408979	0.80836	60.7	1316.17	201.677	334.3	892.0
0.24	37.1350	13.4209	1357633	0.77891	60.7	1215.37	203.693	325.3	868.1
0.25	38.6823	12.3077	1296904	0.74406	60.7	1114.56	205.709	313.9	837.4
0.26	40.2295	14.2158	1557879	0.89379	88.29	1872.49	224.249	411.0	1096.6
0.27	41.7768	13.7322	1562770	0.8966	88.29	1808.8	217.88	400.6	1068.8
0.28	43.3241	13.2487	1563585	0.89707	88.29	1745.11	211.511	389.1	1038.1
0.29	44.8714	12.7652	1560325	0.89519	88.29	1681.42	206.257	378.6	1010.2
0.3	46.4187	12.2817	1552988	0.89099	88.29	1617.73	203.709	372.2	993.0

4.3 Αποτελέσματα της Παραμετρικής Ανάλυσης

Στις **Εικόνες 26** και **27** δίνονται τα διαγράμματα εκπομπών CO₂ συναρτήσει της ενεργούς κλίσης (EG) της οδού για έμφορτο και κενό φορτηγό αντίστοιχα. Στα διαγράμματα σημειώνονται και οι σχέσεις μετάδοσης (ταχύτητες του κιβωτίου) που χρησιμοποιούνται.

Παρατηρείται ότι για το μεγαλύτερο εύρος τιμών της EG, τόσο για το έμφορτο όσο και για το κενό φορτηγό, οι τιμές των εκπομπών CO₂ κυμαίνονται σε σχετικά περιορισμένο εύρος.

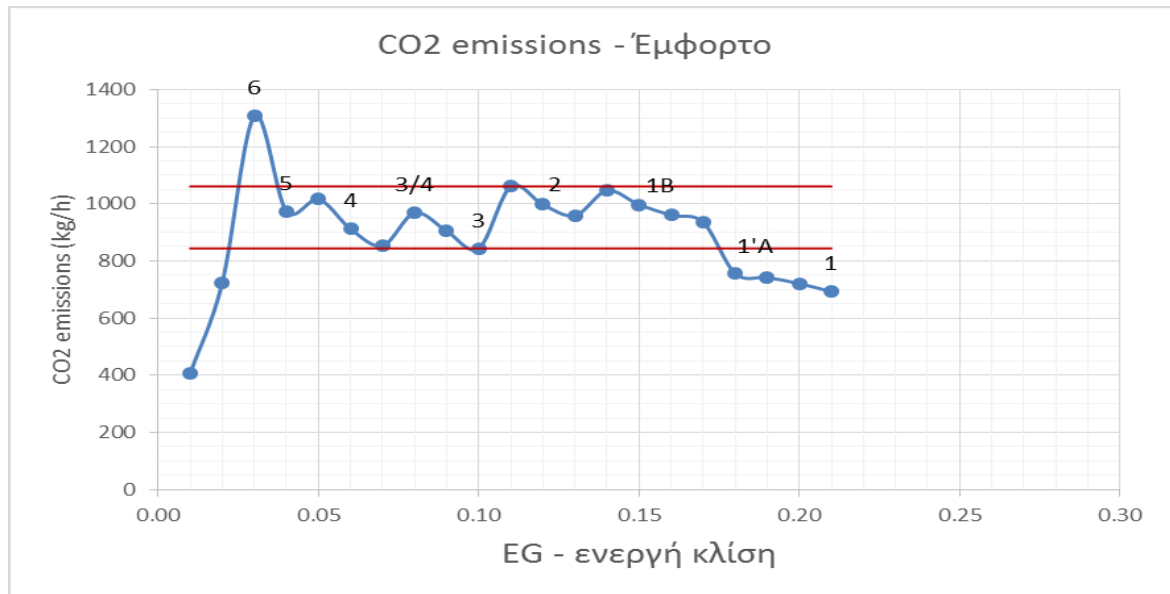
Συγκεκριμένα για την περίπτωση του έμφορτου φορτηγού, κυμαίνονται από 843 έως 1063 kg/h για τις ενεργές κλίσεις από 0,04 έως 0,17. Αντίστοιχα, για το κενό φορτηγό κυμαίνονται από 837 έως 1096 kg/h για τις ενεργές κλίσεις από 0,06 έως 0,30.

Η αυξομείωση των τιμών χαρακτηρίζεται από περιοδικότητα που εξαρτάται από τη σχέση μετάδοσης που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι εκπομπές για δεδομένη σχέση μετάδοσης είναι αντιστρόφως ανάλογες της ενεργούς κλίσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι με αύξηση της ενεργούς κλίσης αυξάνεται η συνολική αντίσταση με αποτέλεσμα το φορτηγό να κινείται με μικρότερη ταχύτητα και, συνεπώς, μειώνονται και οι στροφές του κινητήρα μέχρι την αλλαγή της σχέσης μετάδοσης.

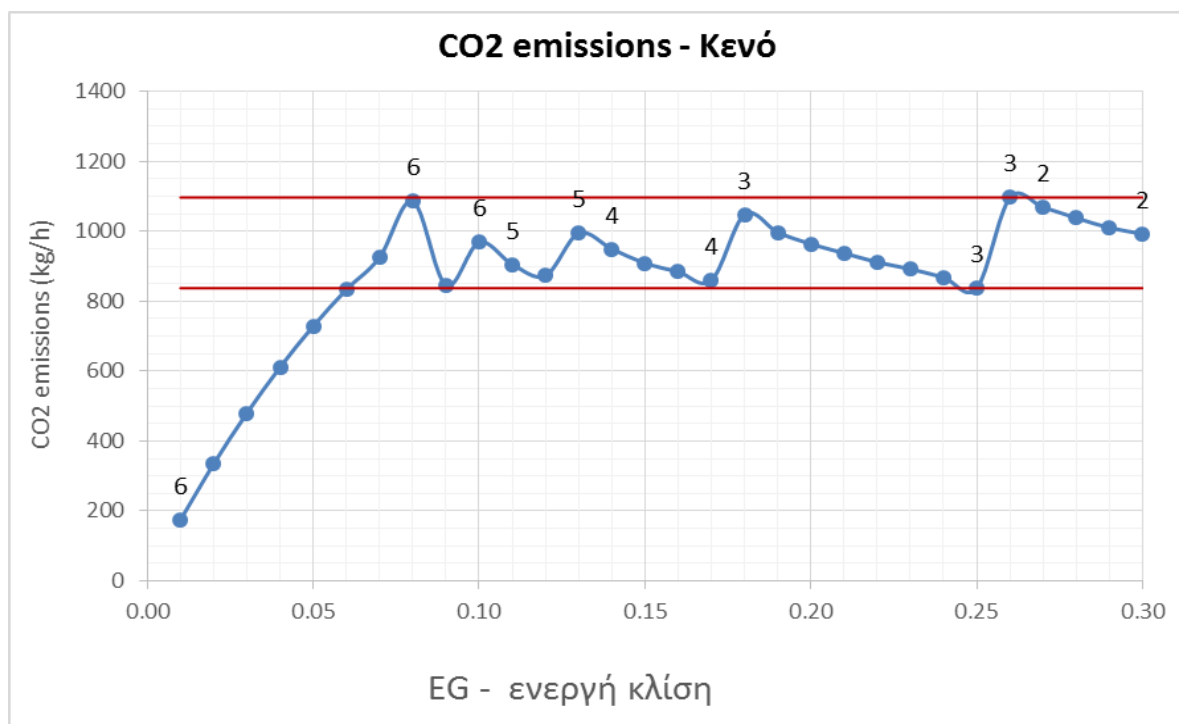
Οι τιμές που αντιστοιχούν σε μικρές ενεργές κλίσεις, τόσο για το έμφορτο όσο και για το κενό φορτηγό, είναι χαρακτηριστικά χαμηλές. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή συνολική αντίσταση στην κίνηση του φορτηγού που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλή κατανάλωση καυσίμου. Η χαρακτηριστικά υψηλή τιμή για ενεργή κλίση 0,03 στο διάγραμμα του έμφορτου φορτηγού μπορεί να αποδοθεί στο ότι αντιστοιχεί στην κίνηση του φορτηγού υπό πλήρες φορτίο με τη μέγιστη ταχύτητα.

Τέλος, στην περίπτωση του έμφορτου φορτηγού παρατηρούνται τιμές εκτός του κύριου εύρους και για ενεργές κλίσεις μεγαλύτερες από 0,17. Αυτό -κατ' αναλογία- αποδίδεται στην πολύ υψηλή συνολική αντίσταση, η οποία απαιτεί την ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων έλξης που επιτυγχάνονται σε χαμηλές ταχύτητες με ενεργοποίηση του μετατροπέα ροπής.

Το γενικό συμπέρασμα από τα διαγράμματα των Εικόνων είναι ότι το κιβώτιο ταχυτήτων του φορτηγού ανταποκρίνεται στις συνήθεις συνθήκες που επικρατούν στα εργοτάξια διατηρώντας τις στροφές του κινητήρα στη βέλτιστη για αυτόν περιοχή. Συγκεκριμένα, για το φορτηγό CAT 793D είναι δυνατό να υποστηριχθεί ότι οι ωριαίες εκπομπές CO₂ θα κυμαίνονται μεταξύ 800 και 1100 kg/h στις συνήθεις καταστάσεις λειτουργίας του φορτηγού.

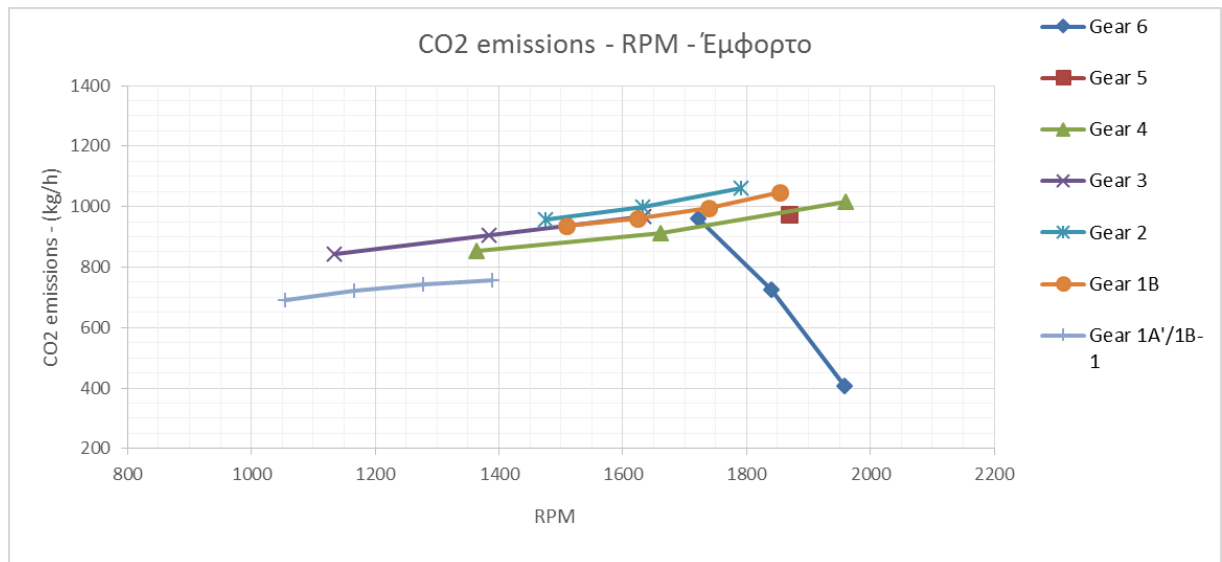


Εικόνα 26. Διάγραμμα εκπομπών CO₂ – Ενεργούς κλίσης για έμφορτο φορτηγό αυτοκίνητο.

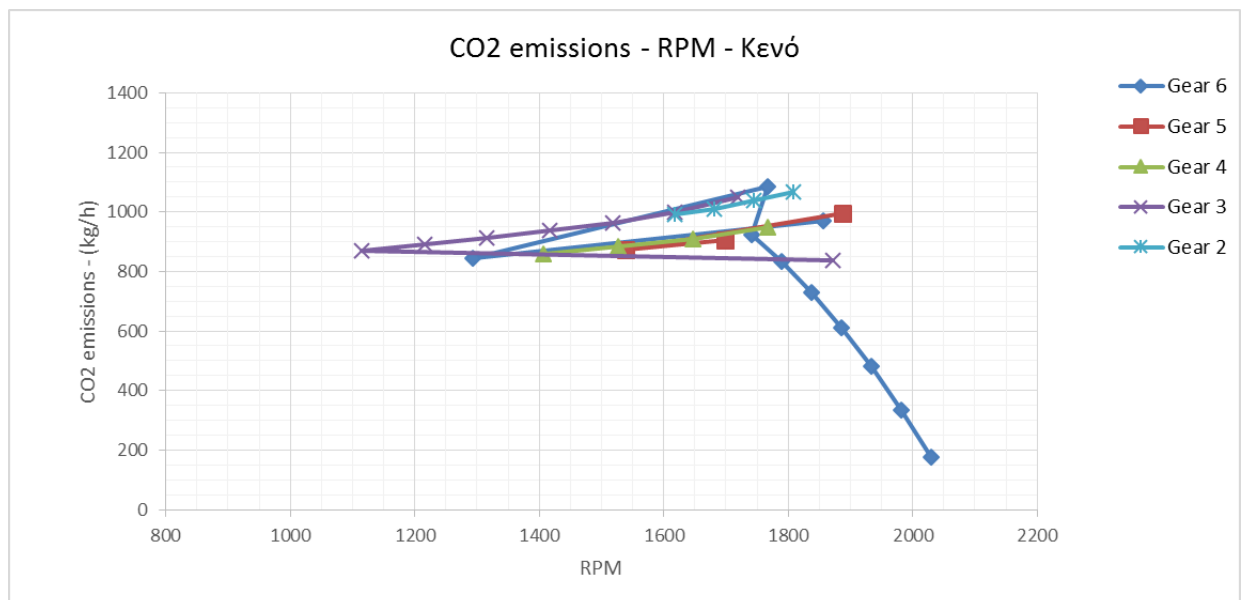


Εικόνα 27. Διάγραμμα εκπομπών CO₂ – Ενεργούς κλίσης για κενό φορτηγό αυτοκίνητο.

Η ερμηνεία που προηγήθηκε υποστηρίζεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν στις **Εικόνες 28** και **29**, όπου φαίνονται οι εκπομπές CO₂ συναρτήσει των στροφών του κινητήρα RPM για κάθε σχέση μετάδοσης.



Εικόνα 28. Διάγραμμα εκπομπών CO₂ – στροφών κινητήρα για έμφορτο φορτηγό.



Εικόνα 29. Διάγραμμα εκπομπών CO₂ – στροφών κινητήρα για κενό φορτηγό.

Η γενική τάση σε όλες τις ενδιαμέσες σχέσεις μετάδοσης βρίσκεται στην περιοχή εκπομπών CO₂ 800 έως 1100 kg/h για το τυπικό εύρος στοφών από περίπου 1100 έως 1900 RPM. Παρατηρείται ότι με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε σχέση μετάδοσης αυξάνονται οι εκπομπές CO₂ τόσο για το έμφορτο φορτηγό όσο και για το κενό φορτηγό.

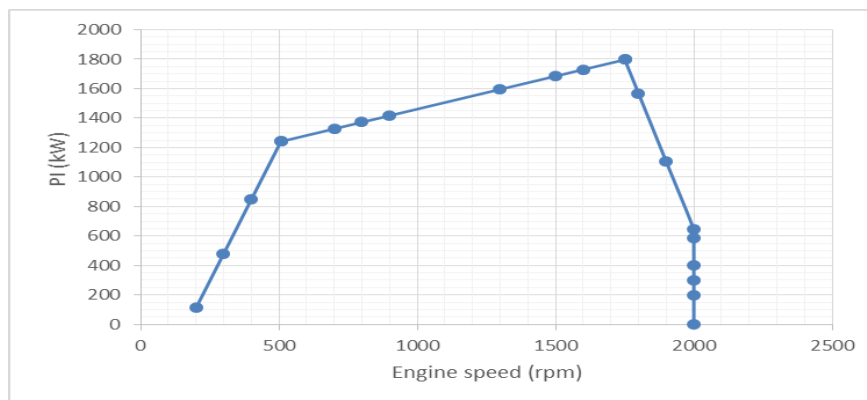
Στην περίπτωση του έμφορτου φορτηγού για την σχέση μετάδοσης 1A-1B, φαίνεται να βρίσκονται οι τιμές τόσο για τις εκπομπές CO₂, όσο και για τις στροφές του κινητήρα, εκτός του τυπικού εύρους που προαναφέρθηκε. Οι χαμηλές στροφές του κινητήρα αποδίδονται στην πολύ υψηλή συνολική αντίσταση, όπου και χρησιμοποιούνται αυτές οι σχέσεις όπως φαίνεται στην **Εικόνα 26**. Η υψηλή συνολική αντίσταση απαιτεί την ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων έλξης που επιτυγχάνονται σε χαμηλές ταχύτητες με

ενεργοποίηση του μετατροπέα ροπής. Συνεπώς, η διαφοροποίηση των τιμών για αυτή τη σχέση μετάδοσης οφείλεται σε τελική ανάλυση στη χρήση διαφορετικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος.

Αντίστοιχα, η καμπύλη για τη σχέση μετάδοσης 6, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση του φορτηγού με τη μέγιστη ταχύτητα, δεν ακολουθεί τη γενική τάση που επιδεικνύουν οι ενδιάμεσες σχέσεις μετάδοσης. Αυτή η σχέση αντιστοιχεί στην κίνηση του φορτηγού με ελάχιστη συνολική αντίσταση. Συνεπώς, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες που, όμως, βρίσκονται εκτός των συνήθων καταστάσεων λειτουργίας του έμφορτου φορτηγού.

Σε ότι αφορά στα διαγράμματα για το κενό φορτηγό, παρατηρείται ότι οι γενικά χαμηλότερες συνολικές αντιστάσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση λιγότερων σχέσεων μετάδοσης. Συγκεκριμένα, δεν απαιτείται η χρήση σχέσεων του μετατροπέα ροπής. Όλες οι σχέσεις με εξαίρεση την τελευταία (Gear 6) παρουσιάζουν την ίδια τάση με εκπομπές CO₂ από 837 έως 1060 kg/h για στροφές που κυμαίνονται από περίπου 1100 έως 1900 rpm.

Η τελευταία σχέση μετάδοσης ακολουθεί τη γενική τάση μέχρι τις 1750 rpm, που είναι οι ονομαστικές στροφές του κινητήρα, και στη συνέχεια παρουσιάζει μια απότομη μείωση μέχρι τις 2000 rpm. Στον **Πίνακα 19** και στην **Εικόνα 30** δίνεται η ισχύς του κινητήρα του CAT 793D συναρτήσει των στροφών του. Όπως σε όλους τους κινητήρες, παρατηρείται απότομη πτώση της αναπτυσσόμενης ισχύος μετά τις ονομαστικές στροφές όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ονομαστική ισχύς. Συνεπώς, η συμπεριφορά της καμπύλης για την τελευταία σχέση μετάδοσης μπορεί να αποδοθεί στη λειτουργία του κινητήρα στην περιοχή μετά τις 1750 rpm.

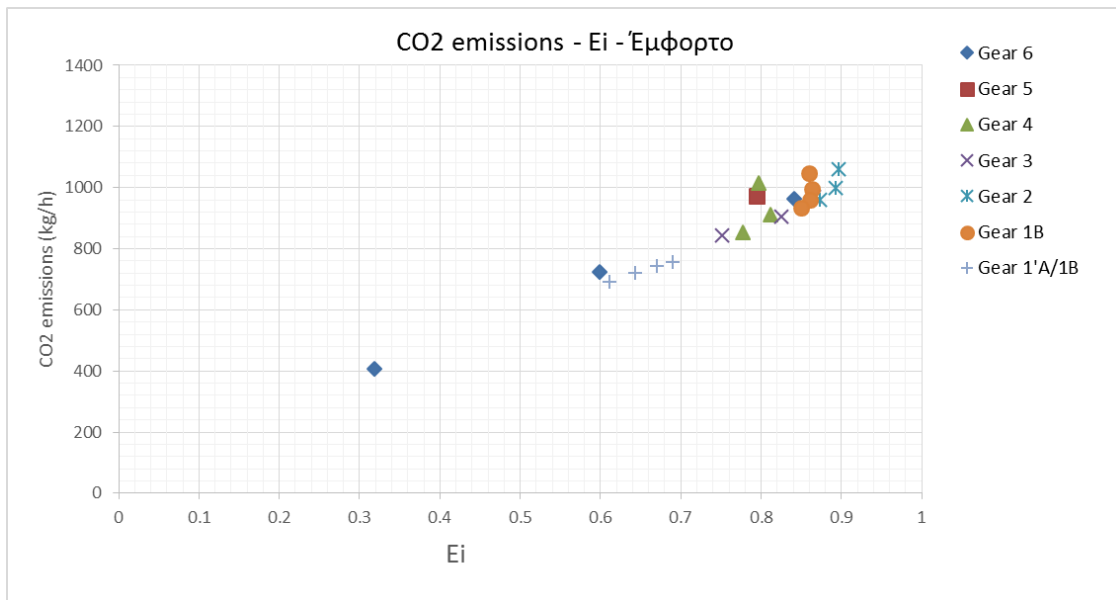


Εικόνα 30. Μεταβολή ισχύος σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα του CAT 793D.

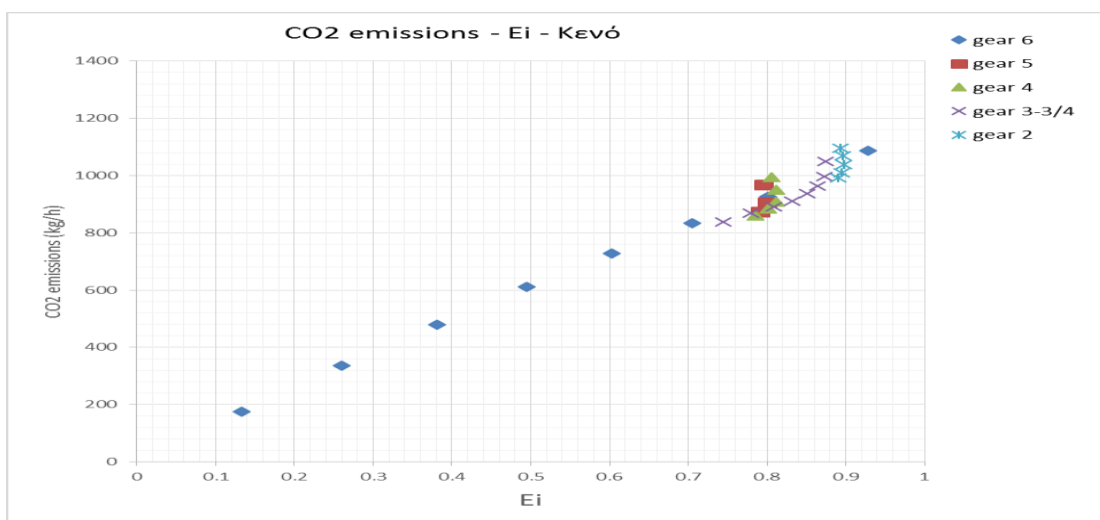
Πίνακας 19 : Γραμμικές σχέσεις RPM –Ισχύος

Γραμμικές εξισώσεις	RPM	Pi(Kw)
$P_i = 3,68 \text{ RPM} - 624$	200	112
	300	480
	400	848
	507	1242
	507	1242
$P_i = 0,447 \text{ RPM} + 1015$	700	1328
	800	1373
	900	1417
	1301	1597
	1500	1686
	1600	1730
	1750	1797
$P_i = 9884 - 4,62 \text{ RPM}$	1750	1799
	1800	1568
	1900	1106
	2000	644
RPM= 2000	2000	584
	2000	400
	2000	300
	2000	200
	2000	0

Στα διαγράμματα που ακολουθούν στις **Εικόνα 31.** και **Εικόνα 32** φαίνονται οι εκπομπές CO₂ συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης E_i του κινητήρα για κάθε σχέση μετάδοσης. Όπως παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα διαγράμματα οι εκπομπές CO₂ κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών από 800 έως 1100 kg/h για το τυπικό εύρος τιμών του συντελεστή απόδοσης του κινητήρα που κυμαίνεται από 0,73 έως 0,90. Και σε αυτά τα διαγράμματα παρατηρείται ιδιαίτερη συμπεριφορά των σχέσεων μετάδοσης με μετατροπέα ροπής και της τελευταίας σχέσης (Gear 6), που ερμηνεύεται όπως και παραπάνω.



Εικόνα 31. Διάγραμμα εκπομπών CO2 – Ei απόδοσης του κινητήρα για έμφορτο φορτηγό αυτοκίνητο.



Εικόνα 32. Διάγραμμα εκπομπών CO2 – Ei απόδοσης του κινητήρα για κενό φορτηγό αυτοκίνητο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ
ΔΙΑΔΡΟΜΗ

5.Υπολογισμός εκπομπών CO₂ για δεδομένη διαδρομή

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται η κίνηση, η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO₂ του φορτηγού αυτοκινήτου CAT 793D σε μια τυπική διαδρομή, με χρήση του μοντέλου κίνησης που αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 2** και του μοντέλου κατανάλωσης καυσίμου από το **Κεφάλαιο 3**. Η διερεύνηση αφορά στις φάσεις όπου το φορτηγό είτε επιταχύνεται είτε βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Η διερεύνηση των φάσεων επιβράδυνσης του φορτηγού είναι εκτός αντικειμένου της παρούσας εργασίας, διότι απαιτείται η χρήση των διαγραμμάτων επιβράδυνσης, τα οποία δεν έχουν μοντελοποιηθεί.

5.1 Δεδομένα

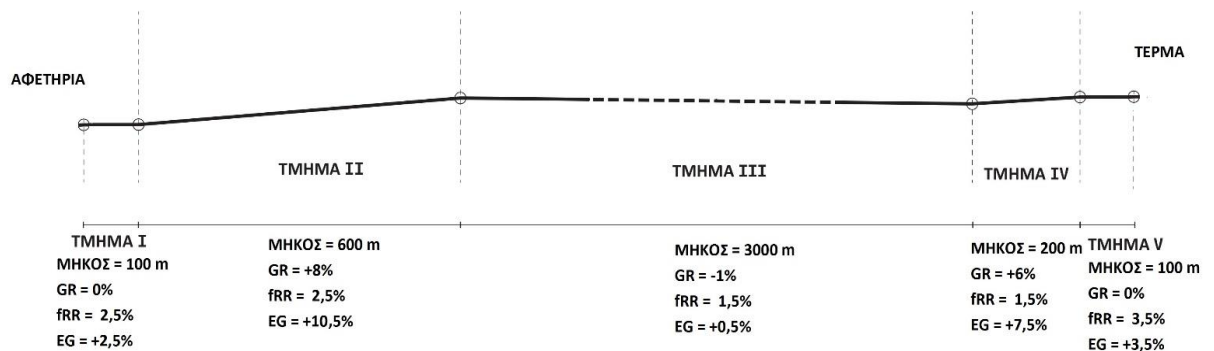
Η εφαρμογή θα γίνει για διαδρομή που εκτελεί το έμφορτο φορτηγό CAT 793D. Τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά του φορτηγού είναι :

- Το μεικτό Βάρος GVW = 383749 kg
- Η ονομαστική ισχύς στον σφόνδυλο = 1743 kW
- Το όριο ταχύτητας στο εργοτάξιο, που ορίζεται 50 km/h
- Οι διαστάσεις των ελαστικών πρότυπων διαστάσεων 40.00R57 που αντιστοιχούν σε ακτίνα τροχών $r = 1,778$ m

Η μελετώμενη διαδρομή χωρίζεται σε πέντε τμήματα όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32**. Τα χαρακτηριστικά του κάθε τμήματος δίνονται στον **Πίνακα 20**.

Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά των τμημάτων της οδού μεταφοράς.

Τμήμα	Μήκος (m)	Κλίση - GR %	Αντίσταση κύλισης Frr%	Ενεργή κλίση EG%
1	100	0	2.5	2.5
2	600	8	2.5	10.5
3	3000	-1	1.5	0.5
4	200	6	1.5	7.5
5	100	0	3.5	3.5



Εικόνα 33. Δεδομένη διαδρομή εφαρμογής πέντε τμημάτων οδού μεταφοράς.

5.2 Αρχικοί υπολογισμοί

Για τις ανάγκες της εφαρμογής απαιτείται σε πρώτη φάση ο προσδιορισμός της μέγιστης ταχύτητας που μπορεί να αναπτύξει το φορτηγό σε κάθε τμήμα. Η ταχύτητα αυτή βρίσκεται με χρήση του διαγράμματος ταχύτητας – δύναμης έλξης και αντιστοιχεί στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας όπου το φορτηγό αναπτύσσει δύναμη έλξης ίση κατά μέτρο με τη συνολική αντίσταση στην κίνησή του. Σε αυτή τη φάση προσδιορίζεται και η σχέση μετάδοσης (gear) που χρησιμοποιεί το φορτηγό στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Τα αποτελέσματα για την περίπτωση που διερευνάται δίνονται στον **Πίνακα 21**. Με βάση αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια οι προσεγγιστικές σχέσεις για τη μοντελοποίηση του διαγράμματος ταχύτητας – δύναμης έλξης που δίνονται στον **Πίνακα 14**.

Πίνακας 21: Υπολογισμός μέγιστης ταχύτητας σε κάθε τμήμα

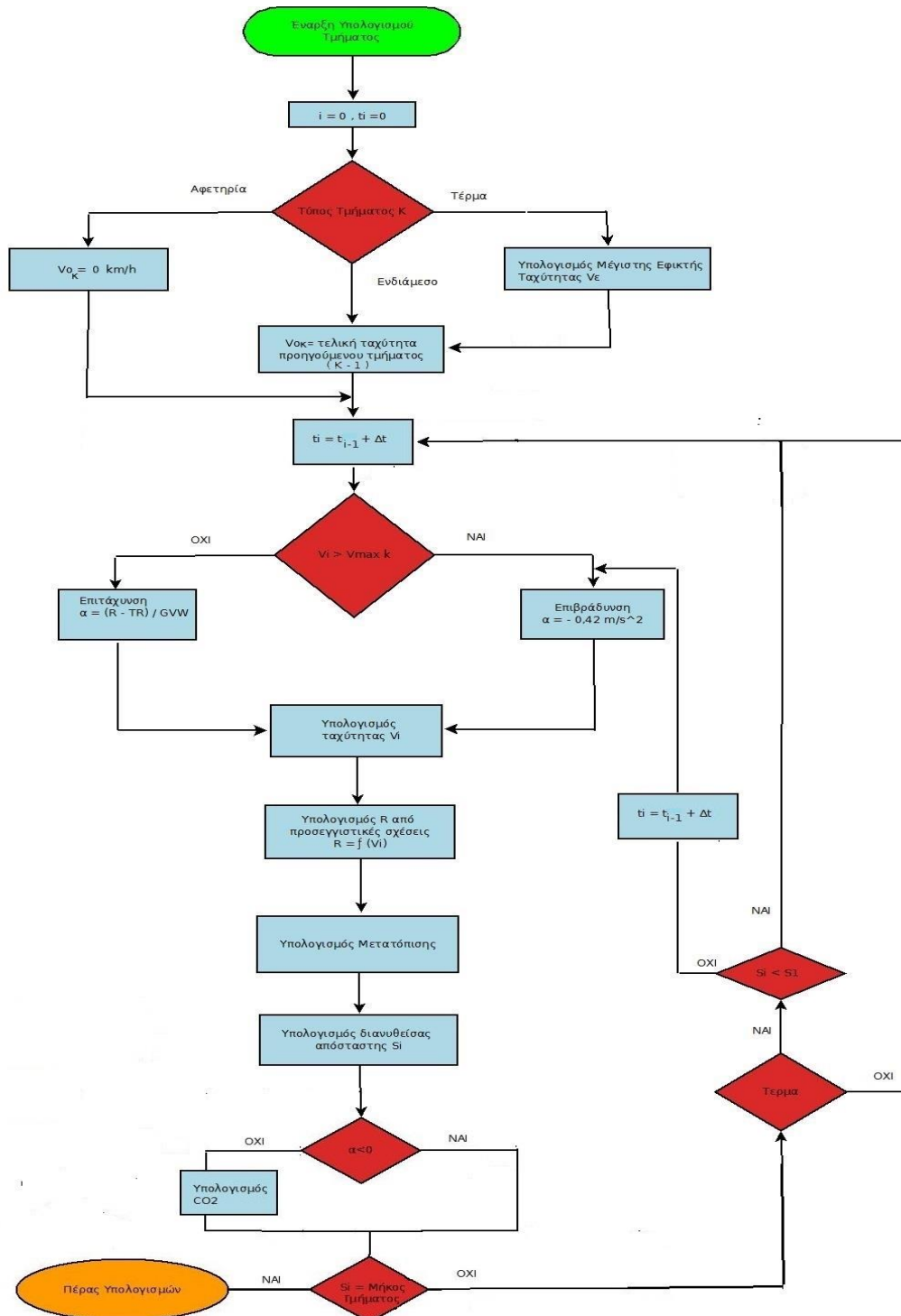
Τμήμα	Ενεργή κλίση EG%	TR = EG×GVW (kg)	Μέγιστη Ταχύτητα V (km/h)	Gear
1	2.5	9594	49	6
2	10.5	40294	13	2
3	0.5	1919	54	6
4	7.5	28781	19	3
5	3.5	13431	36	5

Κατά τη διάρκεια κίνησής του το φορτηγό βρίσκεται σε μία από τις εξής τρεις καταστάσεις: α) επιταχύνει, β) κινείται με σταθερή ταχύτητα (δηλαδή, βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας), ή γ) επιβραδύνει. Η κατάσταση του εξαρτάται από το συνδυασμό της στιγμιαίας ταχύτητάς του με τη διαθέσιμη δύναμη έλξης. Εάν η συνολική αντίσταση είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη δύναμη έλξης, τότε το φορτηγό επιταχύνει μέχρι να βρεθεί σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, όπου κινείται με σταθερή ταχύτητα. Εάν η ταχύτητά του αντιστοιχεί σε δύναμη έλξης μικρότερη της συνολικής αντίστασης, τότε επιβραδύνει μέχρι την κατάσταση δυναμικής ισορροπίας.

Επίσης, η κίνηση του φορτηγού χαρακτηρίζεται από δύο οριακές καταστάσεις: α) Στην αφετηρία το φορτηγό εκκινεί από στάση και β) επιβραδύνει μέχρι στάσης στο τέρμα της διαδρομής.

5.3 Μοντέλο κίνησης και εκτίμησης εκπομπών CO₂ σε δεδομένη διαδρομή.

Το μοντέλο κίνησης και εκτίμησης εκπομπών CO₂ σε δεδομένη διαδρομή παρουσιάζεται συνοπτικά στο διάγραμμα ροής της **Εικόνας 34**.



Εικόνας 34. Το διάγραμμα ροής του μοντέλου κίνησης και κατανάλωσης κάθε τμήματος της δεδομένης διαδρομής

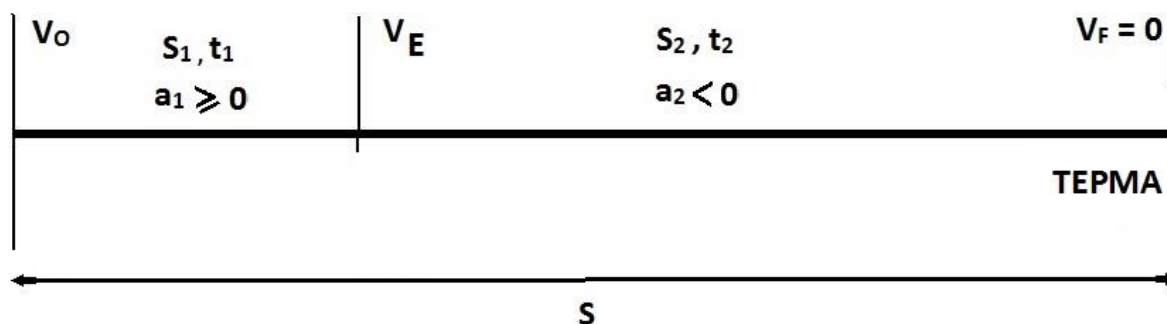
Αναλυτικά, στην παρούσα διερεύνηση η αλληλουχία των πράξεων του διαγράμματος ροής εκτελείται μόνο για έμφορτο φορτηγό, για κάθε τμήμα της διαδρομής. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Αρχικοποίηση δείκτη $i = 0$, χρόνου στο τμήμα $t_i = 0$, και χρονικού βήματος Δt . Στην παρούσα εργασία ορίστηκε $\Delta t = 0,50$ s.
2. Αναγνώριση τύπου του τμήματος k και ορισμός αρχικής ταχύτητας.
 - εάν πρόκειται για την αφετηρία, τότε ορίζεται αρχική ταχύτητα $V_0 = 0$ km/h
 - εάν πρόκειται για ενδιάμεσο τμήμα, τότε εισέρχεται σε αυτό με την τελική ταχύτητα του προηγούμενου τμήματος ($k-1$).
 - εάν πρόκειται για το τέρμα της διαδρομής, εισέρχεται στο τμήμα με την τελική ταχύτητα του προηγούμενου τμήματος ($k-1$) και υπολογίζεται αρχικώς η μέγιστη εφικτή ταχύτητα V_E και στη συνέχεια η κρίσιμη απόσταση, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.
3. Ορισμός νέας τιμής χρόνου $t_i = t_{i-1} + \Delta t$.
4. Έλεγχος υπέρβασης της μέγιστης ταχύτητας που προσδιορίστηκε για κάθε τμήμα από το διάγραμμα ταχύτητας – δύναμης έλξης.
 - Εάν $V_i < V_{max}$, τότε το φορτηγό επιταχύνεται με στιγμιαία επιτάχυνση $\alpha = \frac{R-TR}{GVW}$, όπου R η δύναμη έλξης, TR η συνολική αντίσταση και GVW το μεικτό βάρος του φορτηγού αυτοκινήτου.
 - Εάν $V_i > V_{max}$ τότε το φορτηγό επιβραδύνεται με σταθερή επιβράδυνση $\alpha = -0,42$ m/s².
5. Υπολογισμός της στιγμιαίας ταχύτητας V_i του φορτηγού σύμφωνα με την σχέση $V_i = V_{i-1} + a_{i-1} \cdot \Delta t$, όπου V_i η νέα στιγμιαία ταχύτητα, V_{i-1} η στιγμιαία ταχύτητα του προηγούμενου χρονικού βήματος και a_{i-1} η στιγμιαία επιτάχυνση.
6. Υπολογισμός της διαθέσιμης δύναμης έλξης του φορτηγού αυτοκινήτου με χρήση των προσεγγιστικών γραμμικών σχέσεων της καμπύλης λειτουργίας του από τον **Πίνακα 14**.

- 7.** Υπολογισμός της μετατόπισης του φορτηγού αυτοκινήτου $S_j = V_{j-1} \cdot \Delta t + 0.5 \cdot \Delta t^2$
όπου S_j η στιγμιαία μετατόπιση του φορτηγού αυτοκινήτου, V_{j-1} η στιγμιαία ταχύτητα της προηγούμενης χρονικής στιγμής t_j και Δt το χρονικό βήμα.
- 8.** Υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε $\sum S_i$.
- 9.** Υπολογισμός CO₂ εάν το φορτηγό δεν επιβραδύνεται.
- 10.** Έλεγχος διανυθείσας απόστασης:
- Εάν καλύφθηκε όλο το μήκος τμήματος ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί.
 - Εάν όχι συνεχίζονται οι υπολογισμοί με τα ακόλουθα βήματα.
- 11.** Έλεγχος τύπου τμήματος:
- Εάν είναι αρχικό ή ενδιάμεσο τμήμα, τότε γίνεται επιστροφή στο βήμα 3.
 - Εάν είναι το τελικό τμήμα, συνεχίζονται οι υπολογισμοί με σταθερή επιβράδυνση $\alpha = -0,42 \text{ m/s}^2$ μέχρι στάσης του φορτηγού στο τέρμα της διαδρομής.

5.4 Κρίσιμη απόσταση

Το τελευταίο τμήμα της διαδρομής, το οποίο καταλήγει στο τέρμα της, χαρακτηρίζεται από την απαίτηση η τελική ταχύτητα του φορτηγού V_F να ισούται με 0 km/h . Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού της θέσης όπου πρέπει να αρχίσει η επιβράδυνση του φορτηγού προκειμένου να καταλήξει σε στάση στο τέρμα της διαδρομής. Η απόσταση που καλύπτει το φορτηγό επιβραδυνόμενο μέχρι στάσης ορίζεται ως η κρίσιμη απόσταση, η οποία αντιστοιχεί στην **Εικόνα 35** με το διάστημα S_2 .



Εικόνα 35. Γραφική απεικόνιση της κρίσιμης απόστασης στο τελευταίο τμήμα δεδομένης διαδρομής.

Ο υπολογισμός της κρίσιμης απόστασης γίνεται με χρήση των σχέσεων της κινηματικής:

$$V_\epsilon = V_0 + a_1 \cdot t_1 \quad (\text{Εξ. 23})$$

Όπου V_ϵ η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το φορτηγό στο τελευταίο τμήμα της διαδρομής προκειμένου να καλύπτονται οι περιορισμοί που προαναφέρθηκαν.

$$S_1 = V_0 \cdot t_1 + 0,5 \cdot a_1 \cdot t_1^2 \quad (\text{Εξ. 24})$$

Όπου S_1 η απόσταση που μπορεί να καλύψει στο τελευταίο τμήμα με μη αρνητική επιτάχυνση.

$$V_F = V_\epsilon + a_2 \cdot t_2 \quad (\text{Εξ. 25})$$

Όπου V_F η τελική ταχύτητα στο τέλος του τμήματος, δηλαδή $V_F = 0 \text{ m/s}$. Από βιβλιογραφικά δεδομένα (Parreira, 2013) προκύπτει ότι η τυπική επιβράδυνση a_2 είναι της τάξης των $0,42 \text{ m/s}^2$.

$$S_2 = V_\varepsilon \cdot t_2 + 0,5 \cdot a_2 \cdot t_2^2 \quad (\text{Εξ. 26})$$

Όπου S_2 η απόσταση που διανύεται από το φορτηγό σε επιβράδυνση μέχρι στάσης στο τέρμα της διαδρομής.

$$S = S_1 + S_2 \quad (\text{Εξ. 27})$$

Όπου S το συνολικό μήκος του τμήματος.

Στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων άγνωστοι είναι οι V_ε , t_1 , t_2 , S_1 και S_2 . Επιλύοντας αρχικά προκύπτει από τις **σχέσεις 23** και **25**:

$$t_1 = \frac{V_\varepsilon - V_0}{a_1} \quad (\text{Εξ. 28})$$

Και

$$t_2 = \frac{V_F - V_{\max}}{a_2} \quad (\text{Εξ. 29})$$

Στην συνέχεια από τις **σχέσεις 24** και **26** προκύπτει για S_1 και S_2 :

$$S_1 = \frac{V_\varepsilon^2 - V_0^2}{2 \cdot a_1} \quad (\text{Εξ. 30})$$

Και

$$S_2 = \frac{V_F^2 - V_\varepsilon^2}{2 \cdot a_2} \quad (\text{Εξ. 31})$$

Με δεδομένη τη **σχέση 27** υπολογίζεται η μέγιστη εφικτή ταχύτητα:

$$V_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2\alpha_1\alpha_2 S + \alpha_2 V_0^2 - \alpha_1 V_F^2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \quad (\text{Εξ. 32})$$

Τέλος, είναι δυνατός ο προσδιορισμός τόσο της κρίσιμης απόστασης S_2 με χρήση της σχέσης 31, όσο και του S_1 από τη σχέση 27.

Κατά συνέπεια, γνωρίζοντας την ταχύτητα εισόδου στο τελευταίο τμήμα εκτελούνται οι υπολογισμοί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της **Εικόνας 34** μέχρι να διανυθεί η απόσταση S_1 και ακολούθως το φορτηγό επιβραδύνει μέχρι στάσης καλύπτοντας την υπολειπόμενη απόσταση S_2 .

5.5 Αποτελέσματα της εφαρμογής

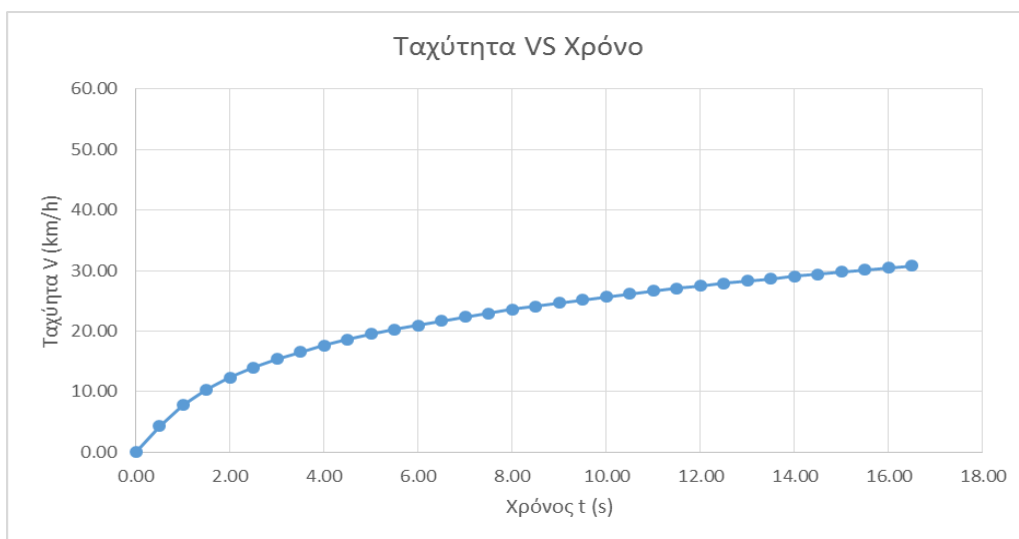
Όπως αναφέρθηκε σε κάθε ένα από τα τμήματα της διαδρομής αναλύθηκε η κίνηση του φορτηγού και εκτιμήθηκαν η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO₂. Σε κάθε ένα από τα τμήματα της διαδρομής έγινε χρήση του παραπάνω μοντέλου και προέκυψαν οι Πίνακες 22 έως 26 και τα αντίστοιχα διαγράμματα ταχύτητας και επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο και την μετατόπιση.

Συγκεκριμένα για το τμήμα Ι της διαδρομής προέκυψε ο πίνακας 22.

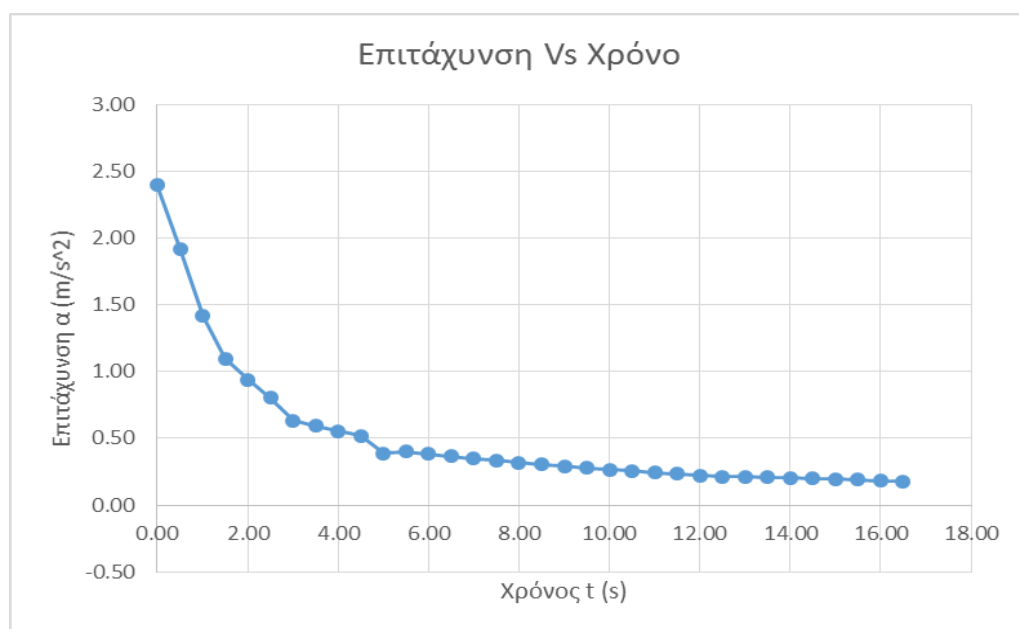
Πίνακας 22 : Υπολογιστικό φύλλο της για την κίνηση στο τμήμα Ι της διαδρομής

Time (s)	Instantaneous speed (m/s)	Speed (km/h)	R(V) tn x 1000 (kg)	Available trimpull (N)	Gear	Instantaneous acceleration (m/s ²)	Advance (m)	Cumulative distance (m)	Pi (kW)	Gear ratio	rpm	bstc (g/kWh)	Fuel consumption (l/h)	CO ₂ (kg/h)	Fuel consumption (l)	CO ₂ (kg)
0.00	0.00	0.00	103430	920220 1A		2.40	0.00	0.00	0.00	145.68	0	0	0	0	0.000	0.000
0.50	1.20	4.32	84654	736094 1A		1.92	0.30	0.30	882.57	145.68	939	209	217.24	579.61	0.030	0.081
1.00	2.16	7.77	65019	543536 1A/1B		1.42	0.84	1.14	1172.99	145.68	1689	207	285.07	760.57	0.040	0.106
1.50	2.87	10.32	52573	421481 1B		1.10	1.26	2.40	1208.07	121.40	1870	224	318.33	849.32	0.044	0.118
2.00	3.42	12.30	46374	360694	2	0.94	1.57	3.97	1231.92	88.29	1620	204	295.39	788.11	0.041	0.109
2.50	3.89	13.99	40960	307602	2	0.80	1.83	5.79	1195.15	88.29	1843	221	311.21	830.31	0.043	0.115
3.00	4.29	15.43	34342	242698	3	0.63	2.04	7.83	1040.24	60.70	1398	200	244.81	653.16	0.034	0.091
3.50	4.60	16.57	32760	227180	3	0.59	2.22	10.06	1045.57	60.70	1501	201	247.28	659.73	0.034	0.092
4.00	4.90	17.63	31278	212655	3	0.55	2.38	12.43	1041.67	60.70	1598	203	248.72	663.58	0.035	0.092
4.50	5.18	18.63	29892	199058	3	0.52	2.52	14.95	1030.22	60.70	1688	207	250.31	667.88	0.035	0.093
5.00	5.43	19.57	24847	149587 3/4		0.39	2.65	17.60	812.98	60.70	1773	214	204.94	546.77	0.028	0.076
5.50	5.63	20.27	25196	153009	4	0.40	2.77	20.37	861.40	49.38	1494	201	203.63	543.29	0.028	0.075
6.00	5.83	20.98	24515	146323	4	0.38	2.86	23.23	852.93	49.38	1547	202	202.63	540.62	0.028	0.075
6.50	6.02	21.67	23862	139929	4	0.36	2.96	26.20	842.34	49.38	1597	203	201.12	536.58	0.028	0.075
7.00	6.20	22.33	23239	133814	4	0.35	3.06	29.25	829.92	49.38	1646	205	199.99	533.57	0.028	0.074
7.50	6.38	22.96	22643	127967	4	0.33	3.14	32.40	815.97	49.38	1692	207	198.40	529.34	0.028	0.074
8.00	6.54	23.56	22072	122375	4	0.32	3.23	35.62	800.71	49.38	1736	211	198.41	529.35	0.028	0.074
8.50	6.70	24.13	21527	117027	4	0.30	3.31	38.94	784.38	49.38	1778	215	198.26	528.97	0.028	0.073
9.00	6.86	24.68	21006	111913	4	0.29	3.39	42.33	767.17	49.38	1819	219	197.57	527.10	0.027	0.073
9.50	7.00	25.20	20507	107023	4	0.28	3.46	45.79	749.25	49.38	1858	223	196.36	523.89	0.027	0.073
10.00	7.14	25.71	20080	102346	4	0.27	3.54	49.33	730.78	49.38	1895	226	194.70	519.46	0.027	0.072
10.50	7.27	26.19	19574	97873	4	0.26	3.60	52.93	711.90	49.38	1930	230	192.63	513.95	0.027	0.071
11.00	7.40	26.64	19138	93596	4	0.24	3.67	56.60	692.73	49.38	1964	233	190.20	507.46	0.026	0.070
11.50	7.52	27.08	18721	89506	4	0.23	3.73	60.33	673.37	49.38	1996	237	187.45	500.12	0.026	0.069
12.00	7.64	27.50	18322	85595	4	0.22	3.79	64.12	653.93	49.38	2027	240	184.42	492.03	0.026	0.068
12.50	7.75	27.90	17941	81855	4	0.21	3.85	67.97	634.48	49.38	2057	243	181.15	483.30	0.025	0.067
13.00	7.86	28.29	18001	82450	5	0.21	3.90	71.87	647.89	37.84	1598	203	154.70	412.73	0.021	0.057
13.50	7.97	28.68	17789	80364	5	0.21	3.96	75.83	640.13	37.84	1620	204	153.47	409.46	0.021	0.057
14.00	8.07	29.05	17581	78331	5	0.20	4.01	79.83	632.14	37.84	1641	205	152.19	406.03	0.021	0.056
14.50	8.17	29.42	17379	76349	5	0.20	4.06	83.89	623.94	37.84	1662	205	150.82	402.39	0.021	0.056
15.00	8.27	29.78	17182	74418	5	0.19	4.11	88.01	615.55	37.84	1682	206	149.38	398.55	0.021	0.055
15.50	8.37	30.13	16990	72535	5	0.19	4.16	92.17	607.01	37.84	1702	207	147.94	394.71	0.021	0.055
16.00	8.46	30.47	16803	70700	5	0.18	4.21	96.37	598.34	37.84	1721	209	147.18	392.68	0.020	0.055
16.50	8.56	30.80	16621	68911	5	0.18	4.25	100.63	589.55	37.84	1740	211	146.32	390.37	0.020	0.054
														TOTAL	0.938	2.502

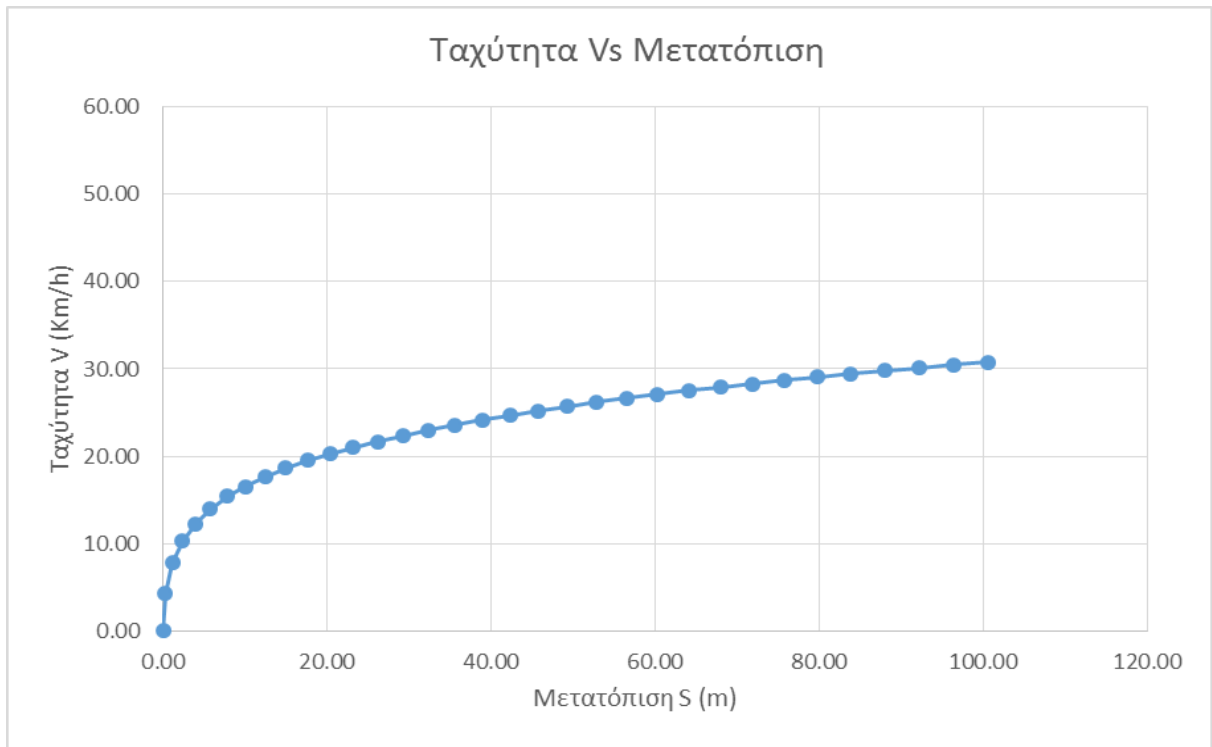
Το φορτηγό αυτοκίνητο ξεκινάει στην αφετηρία από στάση, δηλαδή η αρχική ταχύτητά του $V_0 = 0 \text{ m/s}^2$ και έχει διαθέσιμη τη μέγιστη δύναμη έλξης που μπορεί να αναπτύξει. Κατά συνέπεια επιταχύνεται μέχρι είτε να φτάσει τη μέγιστη ταχύτητα που αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση στην κίνησή του είτε να καλύψει όλο το μήκος της διαδρομής. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 22** το φορτηγό καλύπτει ολόκληρο το τμήμα χωρίς να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα, δηλαδή πριν επιτευχθεί δυναμική ισορροπία. Η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας και της στιγμιαίας επιτάχυνσης στο τμήμα I φαίνεται στις **εικόνες 36** έως **39**.



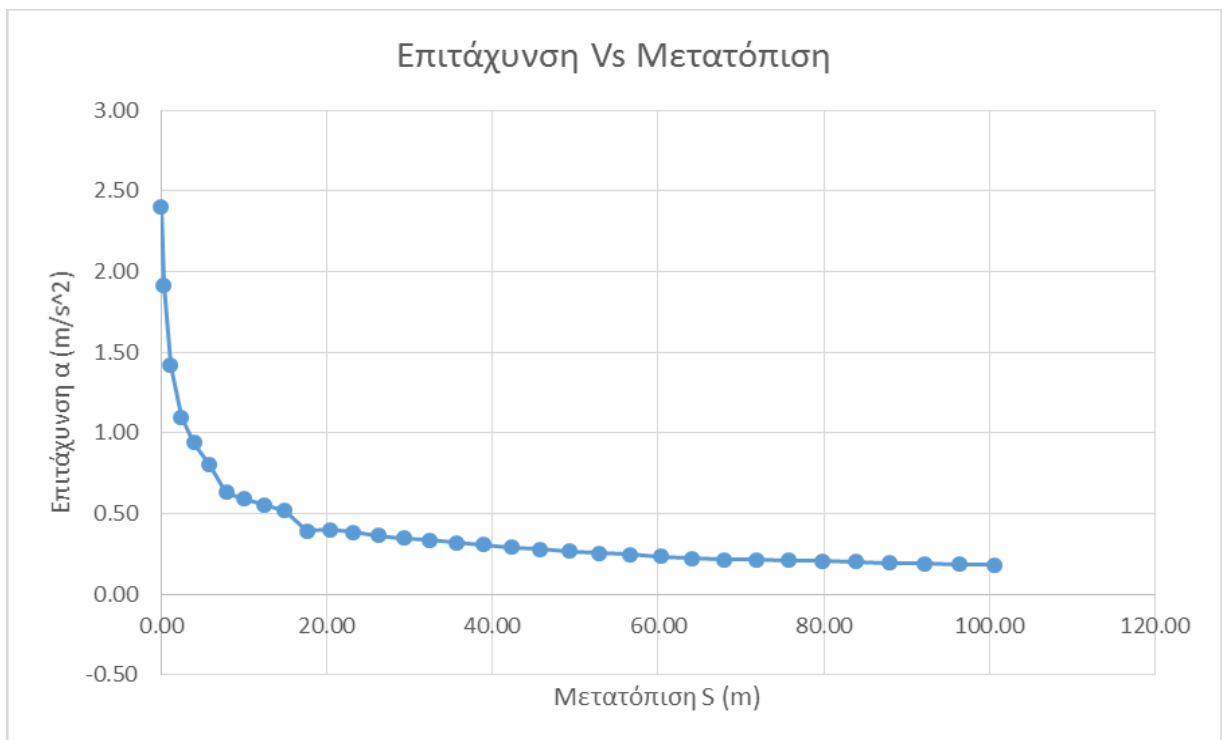
Εικόνα 36. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.



Εικόνα 37. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα I.



Εικόνα 38. Διάγραμμα μεταβολής της μετατόπισης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα Ι.



Εικόνα 39. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα Ι.

Από τα τα διαγράμματα των **εικόνων 36** έως **39** παρατηρείται ότι :

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό αυτοκίνητο 100 m από ακινησία με φθίνουσα επιτάχυνση ήταν $T_1 = 16,50$ s
- Η μέση τιμή της επιτάχυνσης που ανέπτυξε ήταν $a_m = 0,51$ m/s²
- Η μέση ταχύτητά του ήταν $V_m = 21,82$ km/h
- Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ήταν $FC = 0,938$ λίτρα
- Οι συνολικές εκπομπές CO₂ = 2.50 kg

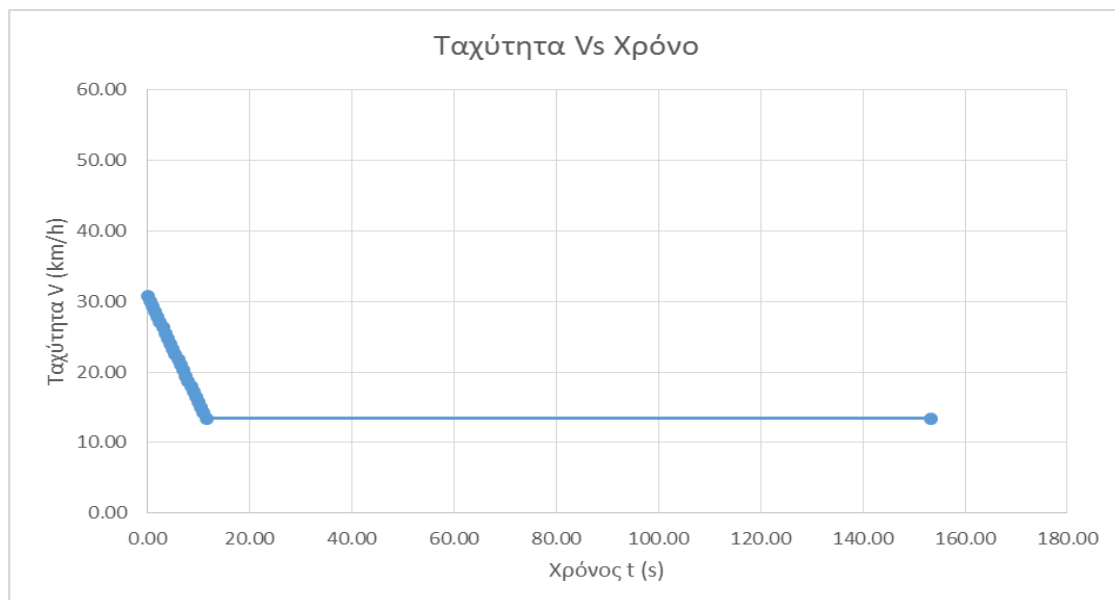
Για το τμήμα II της διαδρομής προέκυψε ο **πίνακας 23**

Πίνακας 23: Υπολογιστικό φύλλο της για την κίνηση στο τμήμα II της διαδρομής.

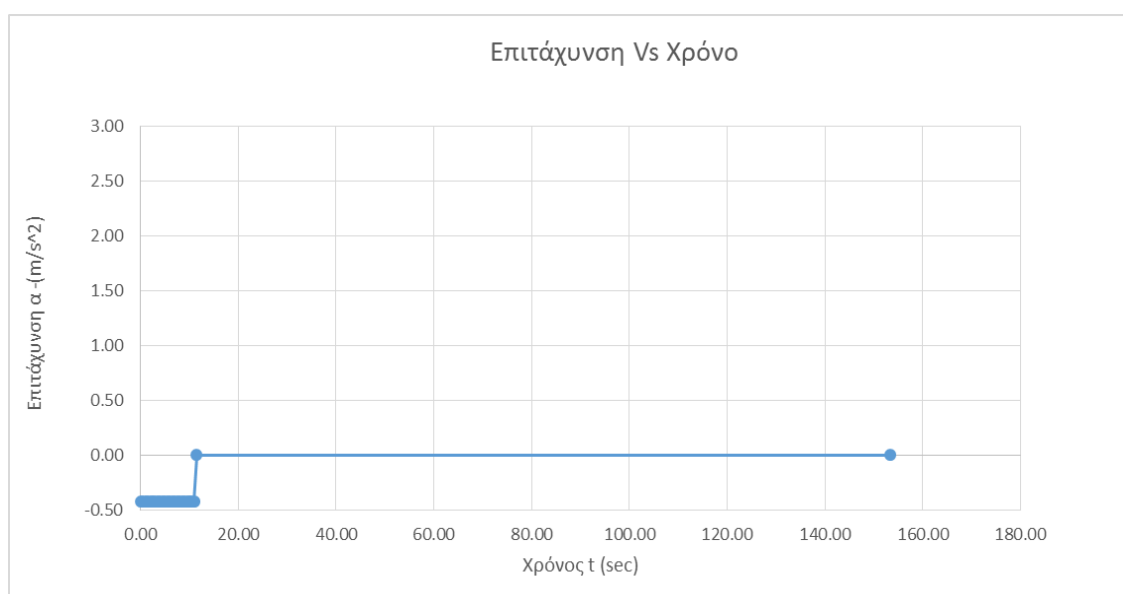
Time (s)	Instantaneous speed (m/s)	speed (km/h)	R(v) tn x 1000 (kg)	Available rimpull (N)	Gear	Instantaneous acceleration (m/s ²)	Advance (m)	Cumulative distance (m)	Pi (kW)	Gear ratio	rpm	bstc (g/kWh)	Fuel consumption (l/h)	CO ₂ (kg/h)	Fuel consumption (l)	CO ₂ (kg)
0.00	8.56	30.82				-0.42	0.00	0.00	0.00	88.29	4061	443	0.00	0.00		
0.50	8.35	30.06				-0.42	4.23	4.23	0.00	88.29	3961	433	0.00	0.00		
1.00	8.14	29.30				-0.42	4.12	8.35	0.00	88.29	3862	423	0.00	0.00		
1.50	7.93	28.55				-0.42	4.02	12.37	0.00	88.29	3762	413	0.00	0.00		
2.00	7.72	27.79				-0.42	3.91	16.28	0.00	88.29	3663	403	0.00	0.00		
2.50	7.51	27.04				-0.42	3.81	20.09	0.00	88.29	3563	393	0.00	0.00		
3.00	7.30	26.28				-0.42	3.70	23.79	0.00	88.29	3463	383	0.00	0.00		
3.50	7.09	25.52				-0.42	3.60	27.39	0.00	88.29	3364	373	0.00	0.00		
4.00	6.88	24.77				-0.42	3.49	30.88	0.00	88.29	3264	363	0.00	0.00		
4.50	6.67	24.01				-0.42	3.39	34.27	0.00	88.29	3164	353	0.00	0.00		
5.00	6.46	23.26				-0.42	3.28	37.55	0.00	88.29	3065	343	0.00	0.00		
5.50	6.25	22.50				-0.42	3.18	40.73	0.00	88.29	2965	334	0.00	0.00		
6.00	6.04	21.74				-0.42	3.07	43.80	0.00	88.29	2866	324	0.00	0.00		
6.50	5.83	20.99				-0.42	2.97	46.77	0.00	88.29	2766	314	0.00	0.00		
7.00	5.62	20.23				-0.42	2.86	49.63	0.00	88.29	2666	304	0.00	0.00		
7.50	5.41	19.48				-0.42	2.76	52.39	0.00	88.29	2567	294	0.00	0.00		
8.00	5.20	18.72				-0.42	2.65	55.04	0.00	88.29	2467	284	0.00	0.00		
8.50	4.99	17.96				-0.42	2.55	57.59	0.00	88.29	2367	274	0.00	0.00		
9.00	4.78	17.21				-0.42	2.44	60.03	0.00	88.29	2268	264	0.00	0.00		
9.50	4.57	16.45				-0.42	2.34	62.37	0.00	88.29	2168	254	0.00	0.00		
10.00	4.36	15.70				-0.42	2.23	64.60	0.00	88.29	2069	244	0.00	0.00		
10.50	4.15	14.94				-0.42	2.13	66.73	0.00	88.29	1969	234	0.00	0.00		
11.00	3.94	14.18				-0.42	2.02	68.75	0.00	88.29	1869	224	0.00	0.00		
11.50	3.73	13.43	42750	419238.21	2	0	1.92	70.67	1563.76	88.29	1770	214	393.63	1050.20	0.055	0.146
153.41	3.73	13.43	42744	419175.45		0		600.00	1563.52	88.29	1770	214	393.62	1050.18	0.055	0.146
								TOTAL							16	41

Το φορτηγό αυτοκίνητο εισέρχεται στο τμήμα II με ταχύτητα $V_0 = 8.52$ m/s που αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα που ανέπτυξε στο τμήμα I. Η διαθέσιμη δύναμη έλξης που έχει είναι πολύ μικρότερη της συνολική αντίστασης του τμήματος. Κατά συνέπεια επιβραδύνεται με σταθερή επιβράδυνση $a = -0.42$ m/s² μέχρι είτε να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα $V_{max} = 3.73$ m/s, που αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση του τμήματος, και στην συνέχεια συνεχίζει την κίνηση του με

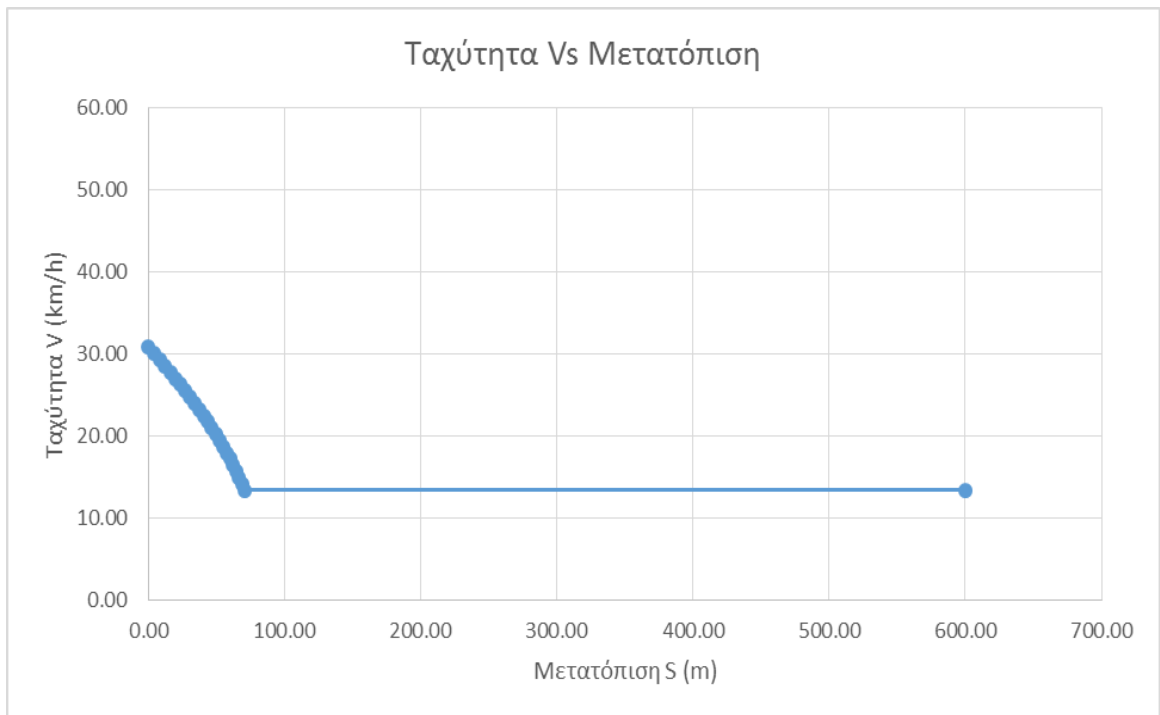
σταθερή ταχύτητα έως ότου καλύψει το υπολειπόμενο μήκος της διαδρομής, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 23**. Στο τμήμα II υπολογίζονται η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO₂ μόνο για την κίνηση με σταθερή ταχύτητα και όχι για τη φάση της επιβράδυνσης. Η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας και της στιγμιαίας επιτάχυνσης στο τμήμα I φαίνεται στις **εικόνες 40** έως **44**.



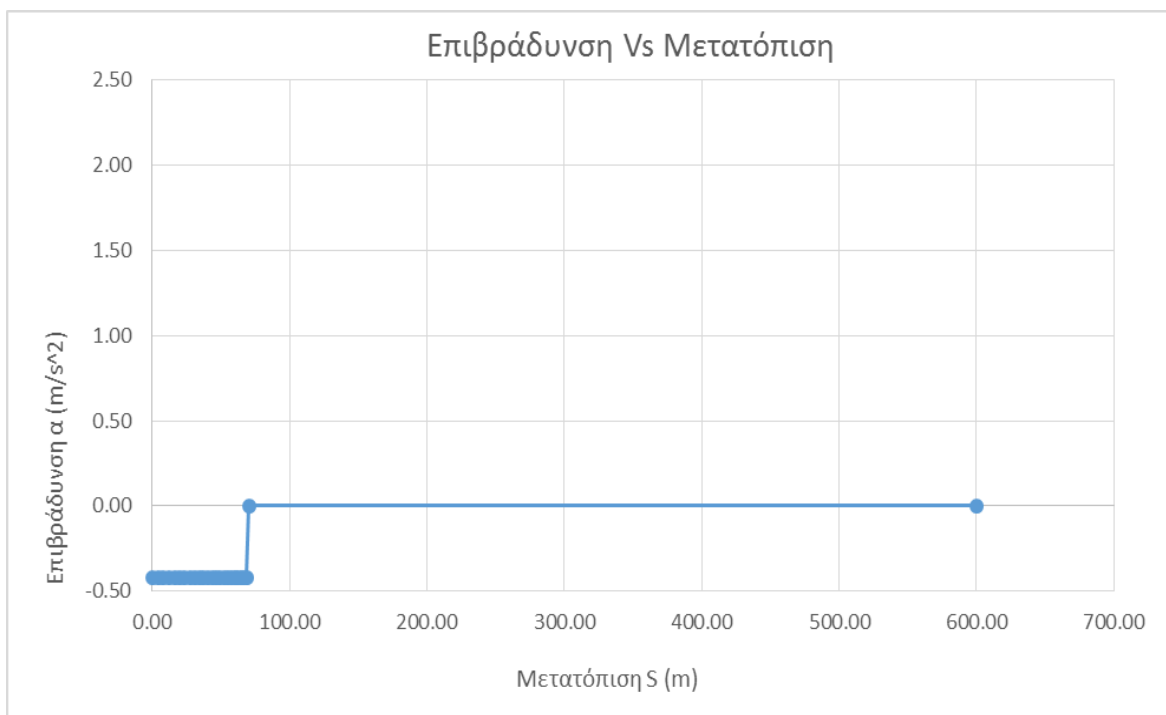
Εικόνα 40. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II



Εικόνα 41. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II.



Εικόνα 42. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα II.



Εικόνα 43. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα II.

Από τα διαγράμματα των **εικόνων 40** έως **43** παρατηρείται ότι :

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό τμήμα II είναι $T_{II} = 153,41 \text{ s}$
- Η επιβράδυνση του διήρκεσε $11,50 \text{ s}$
- Ο χρόνος δυναμικής ισορροπίας μέχρι να καλύψει το τμήμα διήρκεσε για $141,91 \text{ s}$
- Η μέση ταχύτητά του ήταν $V_{\mu} = 14,08 \text{ km/h}$
- Η συνολική κατανάλωση καυσίμου για το χρονικό διάστημα δυναμικής ισορροπίας είναι $FC = 16 \text{ λίτρα για } (141,91 \text{ s δυναμικής ισορροπίας})$
- Οι εκπομπές CO_2 για το ίδιο χρονικό διάστημα είναι 41 kg

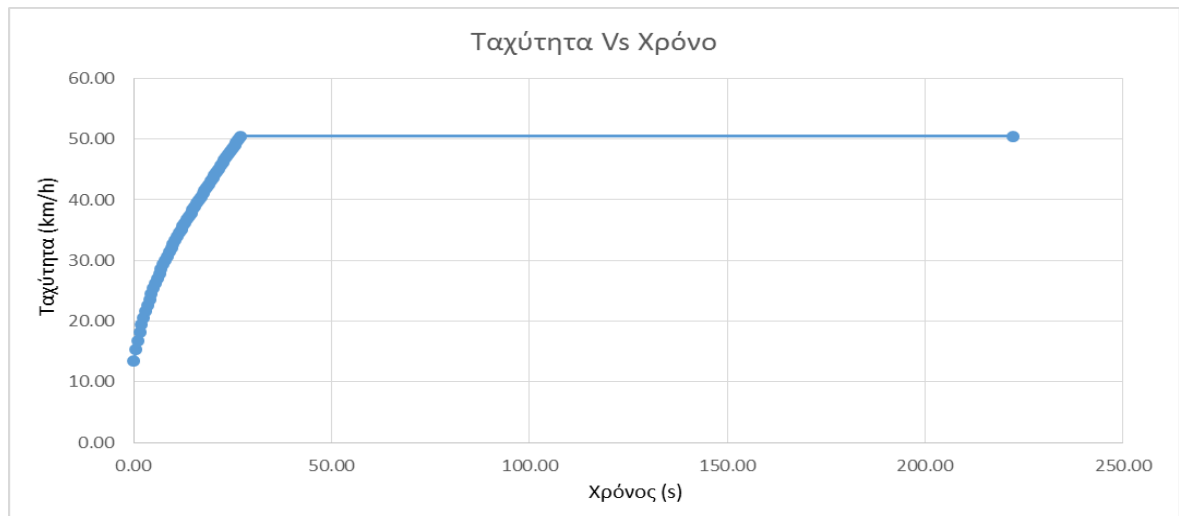
Για το τμήμα III της διαδρομής προέκυψε ο πίνακας 24.

Πίνακας 24 : Υπολογιστικό φύλλο για την κίνηση στο τμήμα III της διαδρομής

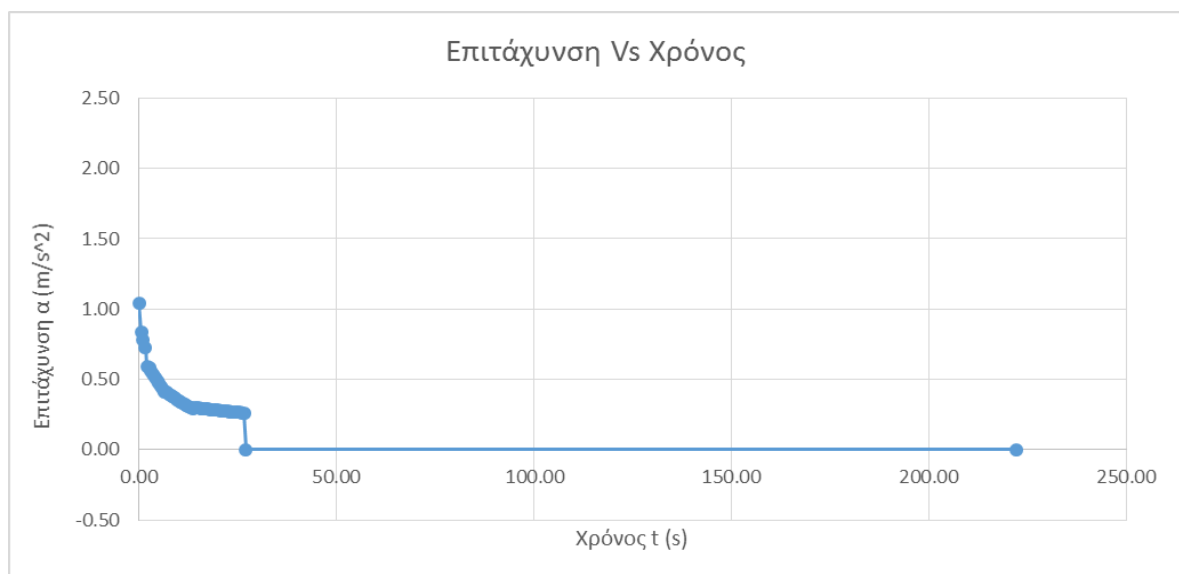
Time (s)	Instantaneous speed (m/s)	speed (km/h)	Rv) t m x 1000 (kg)	Available rpm	Gear	Instantaneous acceleration (m/s ²)	Advance (m)	Cumulative distance (m)	Pi (kW)	gear ratio	rpm	bsfc (g/kWh)	Fuel consumption (l/h)	CO2 (kg/h)	Fuel consumption (l)	CO2 (kg)	
0.00	3.73	13.43	42750	400422	2	1.04	0.00	0	1493.57	88.29	1770	214	375.96	1003.07	0.052	0.139	
0.50	4.25	15.31	34514	319654	3	0.83	2.00	2.00	1359.08	60.70	1387	200	320.21	854.31	0.044	0.119	
1.00	4.67	16.81	32430	299216	3	0.78	2.23	4.23	1396.80	60.70	1523	201	331.05	883.23	0.046	0.123	
1.50	5.06	18.21	30479	280084	3	0.73	2.43	6.66	1416.69	60.70	1650	205	341.66	911.55	0.047	0.127	
2.00	5.42	19.52	25057	226907	3/4	0.59	2.62	9.28	1230.52	60.70	1769	214	309.63	826.10	0.043	0.115	
2.50	5.72	20.59	24892	225293	4	0.59	2.79	12.06	1288.37	49.38	1517	201	305.19	814.25	0.042	0.113	
3.00	6.01	21.64	23888	215448	4	0.56	2.93	15.00	1295.31	49.38	1595	203	309.21	824.97	0.043	0.115	
3.50	6.29	22.65	22928	206033	4	0.54	3.08	18.07	1296.55	49.38	1670	206	313.90	837.50	0.044	0.116	
4.00	6.56	23.62	22010	197030	4	0.51	3.21	21.29	1292.78	49.38	1741	211	321.07	856.61	0.045	0.119	
4.50	6.82	24.55	21132	188420	4	0.49	3.34	24.63	1284.66	49.38	1809	218	329.35	878.70	0.046	0.122	
5.00	7.06	25.43	20293	180186	4	0.47	3.47	28.10	1272.76	49.38	1874	224	336.05	896.58	0.047	0.125	
5.50	7.30	26.27	19490	172312	4	0.45	3.59	31.69	1257.59	49.38	1937	231	341.26	910.49	0.047	0.126	
6.00	7.52	27.08	18722	164782	4	0.43	3.71	35.40	1239.63	49.38	1996	237	345.08	920.67	0.048	0.128	
6.50	7.74	27.86	17988	157581	4	0.41	3.82	39.21	1219.29	49.38	2053	242	347.59	927.36	0.048	0.129	
7.00	7.94	28.59	17833	156067	5	0.41	3.92	43.13	1239.62	37.84	1615	204	296.93	792.20	0.041	0.110	
7.50	8.15	29.33	17430	152118	5	0.40	4.02	47.15	1259.19	37.84	1656	205	299.24	798.36	0.042	0.111	
8.00	8.34	30.04	17038	148270	5	0.39	4.12	51.28	1237.22	37.84	1697	207	301.11	803.36	0.042	0.112	
8.50	8.50	30.74	16656	144519	5	0.38	4.22	55.50	1233.84	37.84	1736	211	305.70	815.61	0.042	0.113	
9.00	8.73	31.41	16283	140863	5	0.37	4.32	59.81	1229.15	37.84	1774	214	310.08	827.28	0.043	0.115	
9.50	8.91	32.07	15919	137299	5	0.36	4.41	64.22	1223.25	37.84	1812	218	313.96	837.64	0.044	0.116	
10.00	9.09	32.72	15565	133825	5	0.35	4.50	68.72	1216.25	37.84	1848	222	317.36	846.73	0.044	0.118	
10.50	9.26	33.35	15220	130440	5	0.34	4.59	73.31	1208.22	37.84	1883	225	320.31	854.59	0.044	0.119	
11.00	9.43	33.96	14883	127140	5	0.33	4.67	77.98	1199.26	37.84	1918	229	322.81	861.26	0.045	0.120	
11.50	9.60	34.55	14555	123923	5	0.32	4.76	82.74	1189.45	37.84	1952	232	324.88	866.79	0.045	0.120	
12.00	9.76	35.14	14236	120788	5	0.31	4.84	87.58	1178.86	37.84	1984	235	326.54	871.22	0.045	0.121	
12.50	9.92	35.70	13924	117732	5	0.30	4.92	92.50	1167.56	37.84	2016	239	327.81	874.60	0.046	0.121	
13.00	10.07	36.25	13620	114753	5	0.30	5.00	97.50	1155.63	37.84	2048	242	328.70	876.97	0.046	0.122	
13.50	10.22	36.79	13324	111850	5	0.29	5.07	102.57	1143.12	37.84	2078	245	329.23	878.38	0.046	0.122	
14.00	10.37	37.32	13662	115162	6	0.30	5.15	107.72	1193.74	24.68	1375	201	281.59	751.29	0.039	0.104	
14.50	10.52	37.86	13597	114526	6	0.30	5.22	112.94	1204.34	24.68	1395	200	283.53	756.45	0.039	0.105	
15.00	10.67	38.39	13533	113894	6	0.30	5.30	118.23	1214.69	24.68	1414	200	286.01	763.09	0.040	0.106	
15.50	10.81	38.93	13469	113265	6	0.30	5.37	123.60	1224.79	24.68	1434	200	288.68	770.19	0.040	0.107	
16.00	10.96	39.46	13405	112640	6	0.29	5.44	129.04	1234.65	24.68	1454	201	291.29	777.15	0.040	0.108	
16.50	11.11	39.99	13341	112018	6	0.29	5.52	134.56	1244.28	24.68	1473	201	293.84	783.97	0.041	0.109	
17.00	11.25	40.51	13278	111400	6	0.29	5.59	140.15	1253.67	24.68	1492	201	296.34	790.65	0.041	0.110	
17.50	11.40	41.04	13216	110785	6	0.29	5.66	145.81	1262.83	24.68	1512	201	298.97	797.65	0.042	0.111	
18.00	11.54	41.56	13153	110174	6	0.29	5.74	151.55	1271.76	24.68	1531	202	301.66	804.82	0.042	0.112	
18.50	11.69	42.07	13091	109565	6	0.29	5.81	157.36	1280.47	24.68	1550	202	304.30	811.86	0.042	0.113	
19.00	11.83	42.59	13030	108961	6	0.28	5.88	163.24	1288.95	24.68	1569	202	306.89	818.77	0.043	0.114	
19.50	11.97	43.10	12968	108359	6	0.28	5.95	169.19	1297.22	24.68	1588	203	309.43	825.56	0.043	0.115	
20.00	12.11	43.61	12907	107761	6	0.28	6.02	175.21	1305.28	24.68	1606	203	312.12	832.74	0.043	0.116	
20.50	12.25	44.11	12847	107166	6	0.28	6.09	181.30	1313.12	24.68	1625	204	315.15	840.81	0.044	0.117	
21.00	12.39	44.61	12786	106575	6	0.28	6.16	187.46	1320.75	24.68	1644	205	318.13	848.77	0.044	0.118	
21.50	12.53	45.11	12726	105986	6	0.28	6.23	193.69	1328.18	24.68	1662	205	321.07	856.62	0.045	0.119	
22.00	12.67	45.61	12667	105401	6	0.27	6.30	199.99	1335.40	24.68	1680	206	323.97	864.35	0.045	0.120	
22.50	12.81	46.11	12607	104820	6	0.27	6.37	206.36	1342.43	24.68	1698	207	326.82	871.96	0.045	0.121	
23.00	12.94	46.60	12548	104241	6	0.27	6.44	212.80	1349.25	24.68	1717	209	331.21	883.67	0.046	0.123	
23.50	13.08	47.09	12490	103666	6	0.27	6.51	219.31	1355.88	24.68	1735	210	335.71	895.68	0.047	0.124	
24.00	13.21	47.57	12431	103093	6	0.27	6.57	225.88	1362.33	24.68	1752	212	340.18	907.60	0.047	0.126	
24.50	13.35	48.06	12373	102524	6	0.27	6.64	232.52	1368.58	24.68	1770	214	344.61	919.41	0.048	0.128	
25.00	13.48	48.54	12316	101958	6	0.27	6.71	239.23	1374.64	24.68	1788	216	349.00	931.13	0.048	0.129	
25.50	13.62	49.01	12258	101396	6	0.26	6.77	246.00	1380.52	24.68	1806	218	353.36	942.75	0.049	0.131	
26.00	13.75	49.49	12201	100836	6	0.26	6.84	252.84	1386.23	24.68	1823	219	357.67	954.27	0.050	0.133	
26.50	13.88	49.96	12144	100279	6	0.26	6.91	259.75	1391.75	24.68	1841	221	361.95	965.68	0.050	0.134	
27.00	14.01	50.43	12088	118542	6	0.00	6.97	266.72	1660.70	24.68	1858	223	365.27	976.93	0.050	0.134	
272.10	14.01	50.43	12088	118542	6	0.00	6.97	266.72	1660.77	24.68	1858	223	365.27	976.93	0.050	0.134	
TOTAL(ΣF=0)																2.461	6.566
TOTAL(ΣF=0)																11.795	31.469
TOTAL																14.256	38.035

Το φορτηγό αυτοκίνητο εισέρχεται στο τμήμα III με ταχύτητα $V_0 = 3.73$ m/s που αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα που ανέπτυξε στο τμήμα II. Η διαθέσιμη δύναμη έλξης είναι μεγαλύτερη της συνολικής αντίστασης του τμήματος. Κατά συνέπεια επιταχύνεται μέχρι είτε να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα $V_{max} = 14.01$ m/s, που αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση στην κίνησή του στο τμήμα αυτό, είτε να καλύψει όλο το μήκος της διαδρομής. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 24 το φορτηγό επιταχύνεται έως μια χρονική στιγμή t και στην συνέχεια καλύπτει το

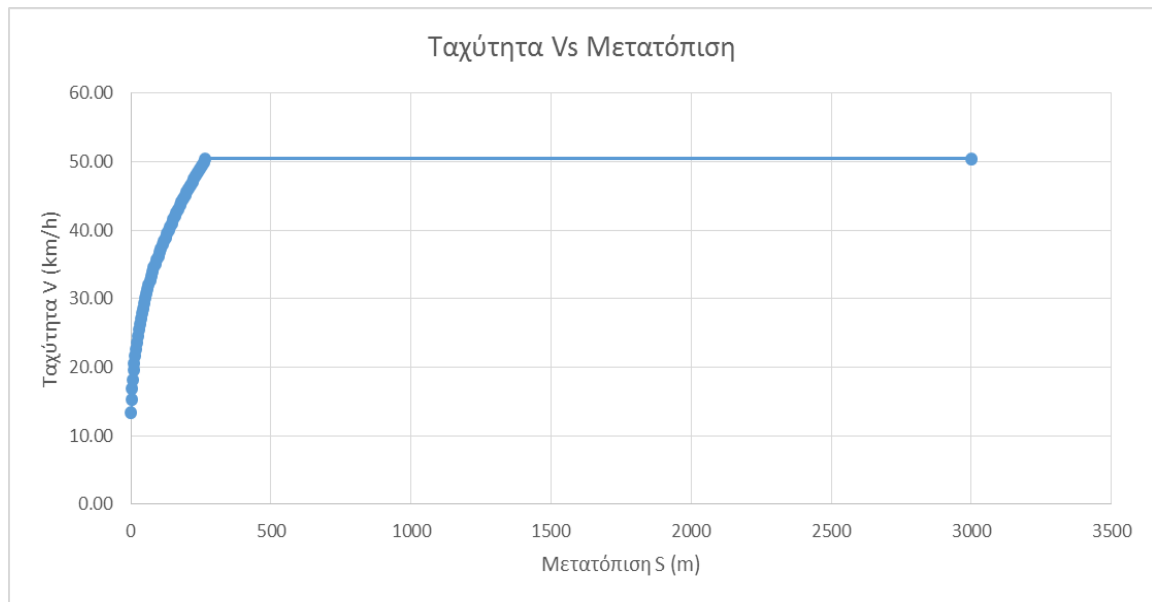
υπολειπόμενο τμήμα της διαδρομής με σταθερή ταχύτητα V_{max} , σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας και της στιγμιαίας επιτάχυνσης στο τμήμα III φαίνεται στις **εικόνες 44** έως **47**.



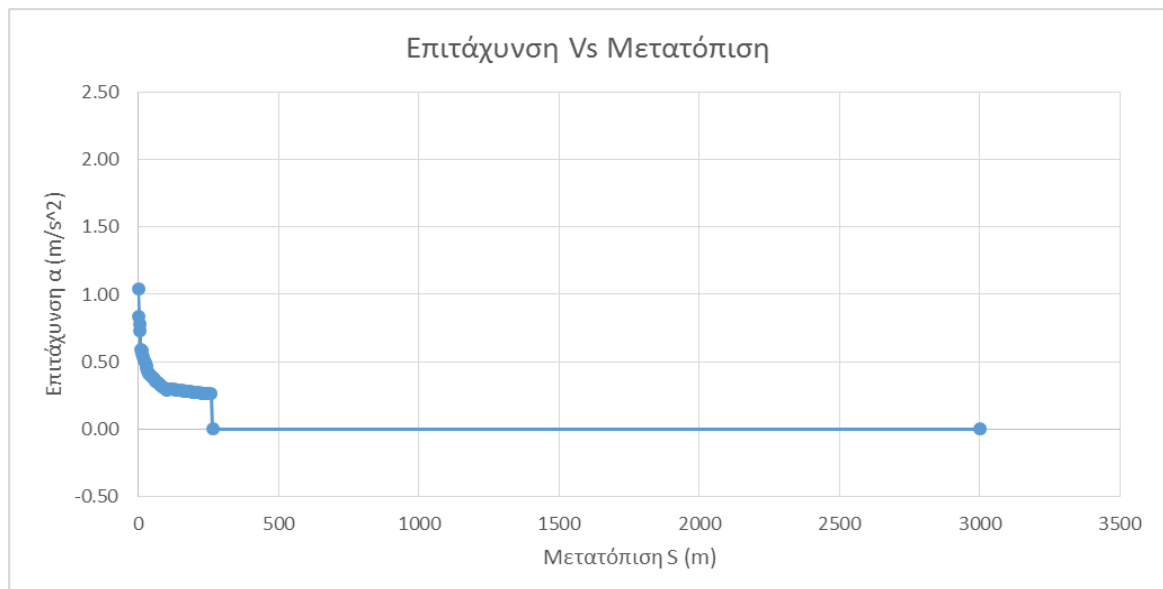
Εικόνα 44. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα III.



Εικόνα 45. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα III



Εικόνα 46. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα III.



Εικόνα 47. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα III.

Από τα τα διαγράμματα των **εικόνων 44** έως **47** παρατηρήθηκε ότι :

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό αυτοκίνητο 3000 m $T_{III} = 222,10$ s
- Η μέση τιμή της επιτάχυνσης που ανέπτυξε ήταν $a_{\mu} = 0,38$ m/s²
- Η μέση ταχύτητά του ήταν $V_{\mu} = 48,62$ km/h
- Ο χρόνος της επιτάχυνσής του διήρκεσε για $t = 26$ s
- Ο χρόνος δυναμικής ισορροπίας μέχρι να καλύψει το τμήμα διήρκεσε για $t = 195$ s
- Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ήταν $FC = 14,25$ λίτρα
- Οι συνολικές εκπομπές $CO_2 = 38$ kg

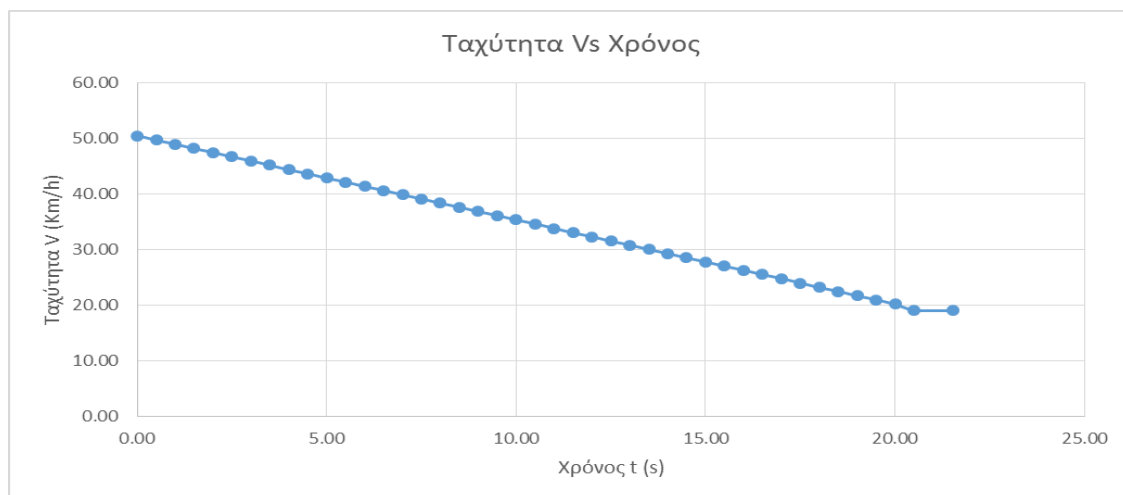
Για το τμήμα IV της διαδρομής προέκυψε ο **πίνακας 25**.

Πίνακας 25: Υπολογιστικό φύλλο για την κίνηση στο τμήμα IV της διαδρομής.

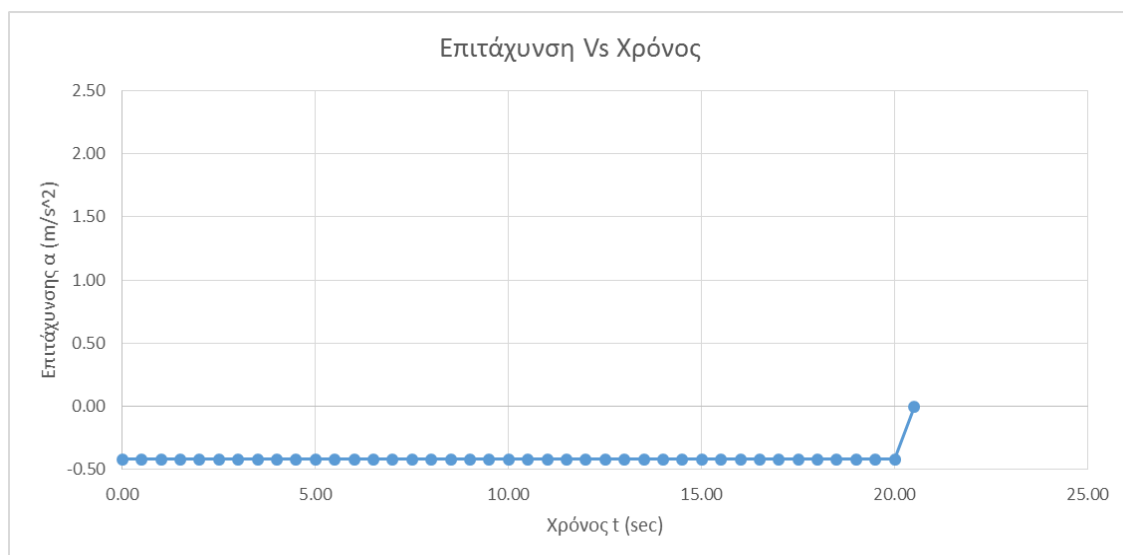
Time (s)	Instantaneous speed (m/s)	speed (km/h)	R(v) tn x 1000 (kg)	Available trimpull (N)	Gear	Instantaneous deceleration (m/s ²)	Advance (m)	Cumulative distance (m)	Pi (kW)	Gear ratio	rpm	bstc (g/kWh)	Fuel consumption (l/h)	CO2 (kg/h)	Fuel consumption (l)	CO2 (kg)	
0.00	14.01	50.44				-0.42	0.00	0									
0.50	13.80	49.68				-0.42	6.85	6.85									
1.00	13.59	48.92				-0.42	6.74	13.59									
1.50	13.38	48.17				-0.42	6.64	20.23									
2.00	13.17	47.41				-0.42	6.53	26.76									
2.50	12.96	46.66				-0.42	6.43	33.19									
3.00	12.75	45.90				-0.42	6.32	39.51									
3.50	12.54	45.14				-0.42	6.22	45.73									
4.00	12.33	44.39				-0.42	6.11	51.84									
4.50	12.12	43.63				-0.42	6.01	57.85									
5.00	11.91	42.88				-0.42	5.90	63.75									
5.50	11.70	42.12				-0.42	5.80	69.55									
6.00	11.49	41.36				-0.42	5.69	75.24									
6.50	11.28	40.61				-0.42	5.59	80.83									
7.00	11.07	39.85				-0.42	5.48	86.31									
7.50	10.86	39.10				-0.42	5.38	91.69									
8.00	10.65	38.34				-0.42	5.27	96.96									
8.50	10.44	37.58				-0.42	5.17	102.13									
9.00	10.23	36.83				-0.42	5.06	107.19									
9.50	10.02	36.07				-0.42	4.96	112.15									
10.00	9.81	35.32				-0.42	4.85	117.00									
10.50	9.60	34.56				-0.42	4.75	121.75									
11.00	9.39	33.80				-0.42	4.64	126.39									
11.50	9.18	33.05				-0.42	4.54	130.93									
12.00	8.97	32.29				-0.42	4.43	135.36									
12.50	8.76	31.54				-0.42	4.33	139.69									
13.00	8.55	30.78				-0.42	4.22	143.91									
13.50	8.34	30.02				-0.42	4.12	148.03									
14.00	8.13	29.27				-0.42	4.01	152.04									
14.50	7.92	28.51				-0.42	3.91	155.95									
15.00	7.71	27.76				-0.42	3.80	159.75									
15.50	7.50	27.00				-0.42	3.70	163.45									
16.00	7.29	26.24				-0.42	3.59	167.04									
16.50	7.08	25.49				-0.42	3.49	170.53									
17.00	6.87	24.73				-0.42	3.38	173.91									
17.50	6.66	23.98				-0.42	3.28	177.19									
18.00	6.45	23.22				-0.42	3.17	180.36									
18.50	6.24	22.46				-0.42	3.07	183.43									
19.00	6.03	21.71				-0.42	2.96	186.39									
19.50	5.82	20.95				-0.42	2.86	189.25									
20.00	5.61	20.20				-0.42	2.75	192.00									
20.50	5.28	19.01	28781	282245.19		0.00	2.59	194.59									
21.53	5.28	19.01	28781	282245.19		0.00	5.41	200.00	1490.25	60.7	1722	209	366.81	978.66	0.204	0.544	
															TOTAL	0.21	0.550

Το φορτηγό αυτοκίνητο εισέρχεται στο τμήμα IV με ταχύτητα $V_0 = 50$ m/s που αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα (και όριο μέγιστης ταχύτητας σε όλη την διαδρομή) που ανέπτυξε στο τμήμα III, η διαθέσιμη δύναμη έλξης είναι πολύ μικρότερη της συνολικής αντίστασης του τμήματος. Κατά συνέπεια επιβραδύνεται με σταθερή επιβράδυνση $a = - 0,42$ m/s² μέχρι είτε να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα $V_{max} = 5,28$ m/s, που αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση του τμήματος, και στην συνέχεια κινείται με σταθερή ταχύτητα V_{max} έως ότου καλύψει το υπολειπόμενο μήκος της διαδρομής, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 25**. Στο τμήμα IV υπολογίζονται η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO2 μόνο για την κίνηση με σταθερή ταχύτητα και όχι για τη φάση της επιβράδυνσης. Το φορτηγό εισέρχεται στην κατάσταση δυναμικής ισορροπίας στο τέλος του τμήματος και παραμένει σε αυτή

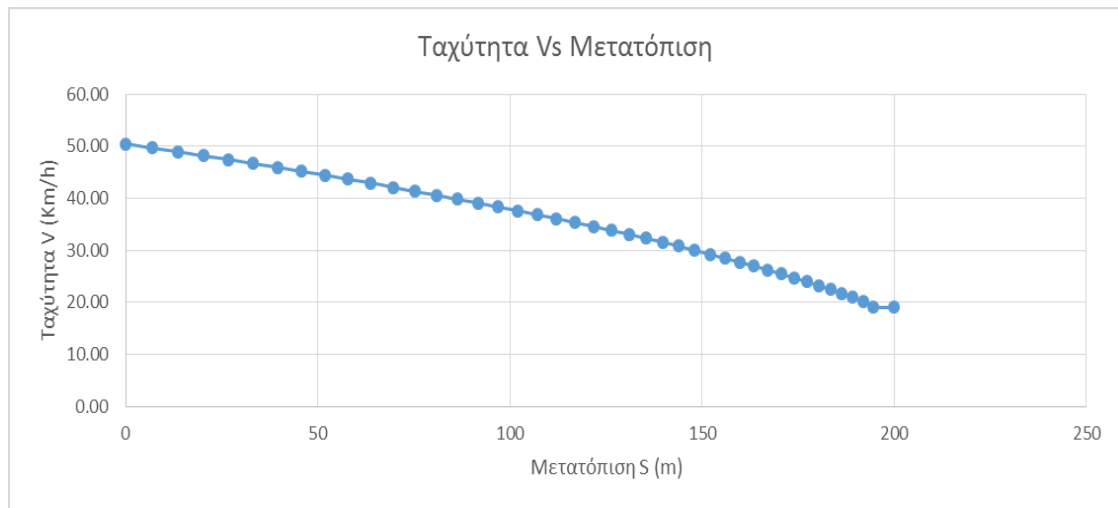
μόνο για 1,03 s. Η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας και της στιγμιαίας επιτάχυνσης στο τμήμα IV φαίνεται στις **εικόνες 48** έως **51**.



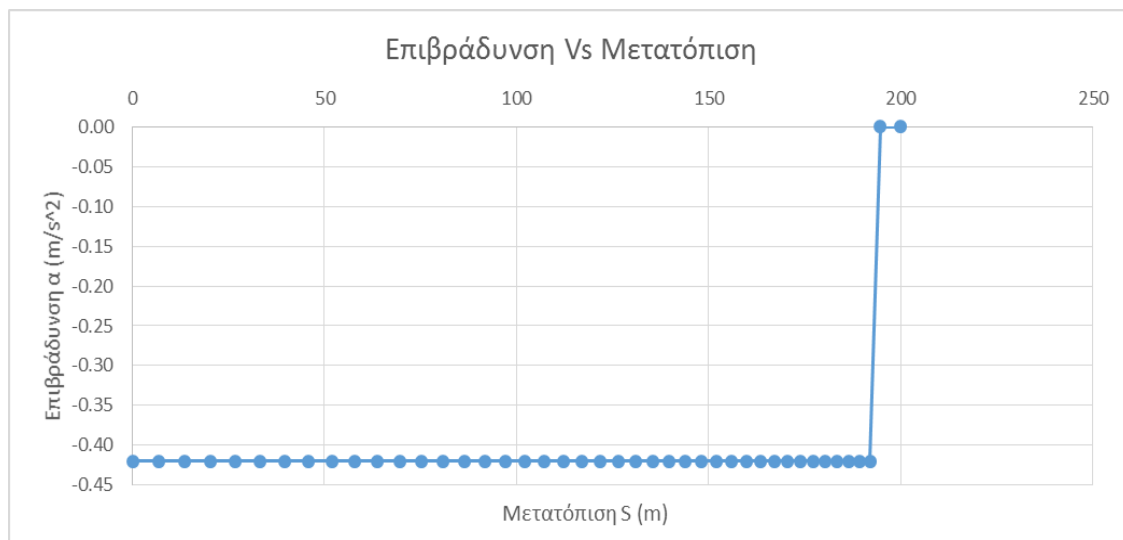
Εικόνα 48. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα IV.



Εικόνα 49. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα IV.



Εικόνα 50. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα IV.



Εικόνα 51. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα IV.

Από τα τα διαγράμματα των **εικόνων 48** έως **51** παρατηρήθηκε ότι :

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό αυτοκίνητο 200 m $T_{IV} = 21,53$ s
- Η μέση ταχύτητά του ήταν $V_{\mu} = 35,12$ km/h
- Ο χρόνος της επιβράδυνσής του διήρκεσε για $t = 20,50$ s

- Ο χρόνος δυναμικής ισορροπίας μέχρι να καλύψει το τμήμα διήρκεσε για $t = 1,03 \text{ s}$
- Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ήταν $FC = 0,21$ λίτρα για ($1,03 \text{ s}$ κίνησης σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας)
- Οι συνολικές εκπομπές $CO_2 = 0,55 \text{ kg}$ ($1,03 \text{ s}$ κίνησης σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας)

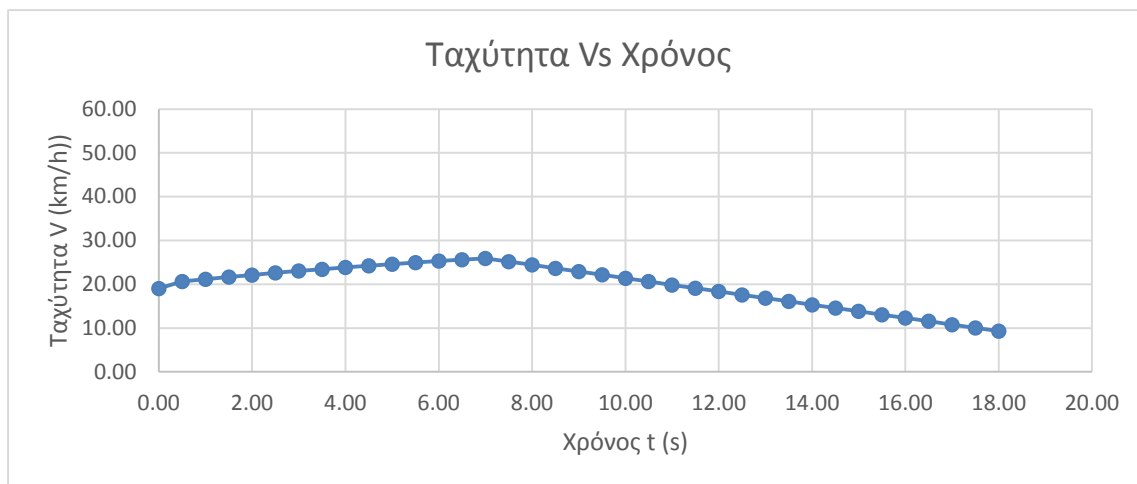
Για το τμήμα V της διαδρομής προέκυψε ο πίνακας 26.

Πίνακας 26 : Υπολογιστικό φύλλο της για την κίνηση στο τμήμα V της διαδρομής.

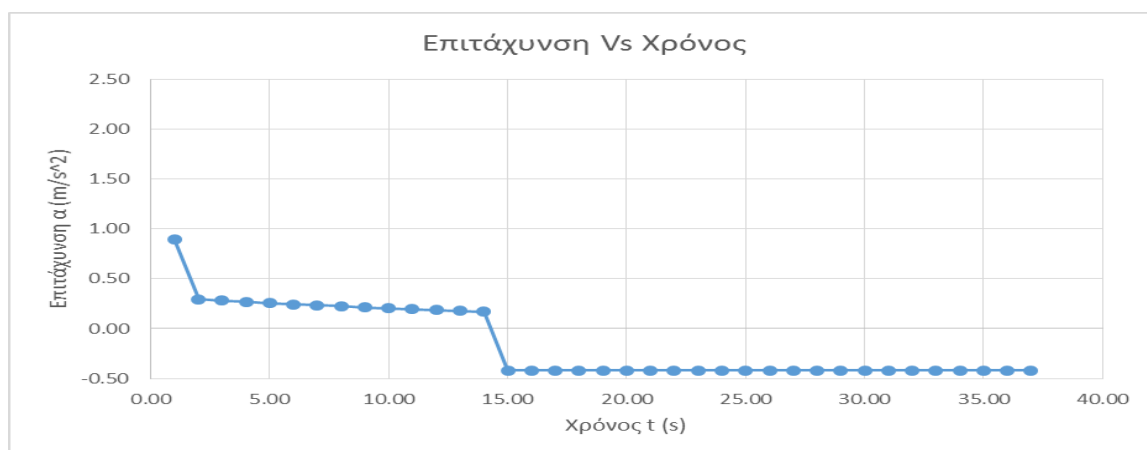
Time (s)	Instantaneous speed (m/s)	speed (km/h)	Rv) tn x 1000 (kg)	Available rimpull (N)	Gear	Instantaneous acceleration (m/s ²)	Advance distance (m)	Cumulative distance (m)	PI (kW)	Gear ratio	rpm	bSFC (g/kWh)	Fuel consumption (l/h)	CO2 (kg/h)	Fuel consumption (l)	CO2 (kg)	
0.00	5.28	19	48451	343425	3	0.89	0.00	0	1813.28	60.7	1721	209	446.17	1190.38	0.0620	0.165	
0.50	5.73	20.62	24862	112099	4	0.29	2.90	2.90	642.04	49.38	1520	201	152.12	405.86	0.0211	0.056	
1.00	5.87	21.14	24563	107200	4	0.28	2.97	5.87	629.64	49.38	1559	202	149.76	399.56	0.0208	0.055	
1.50	6.01	21.65	23885	102515	4	0.27	3.04	8.91	616.45	49.38	1596	203	147.16	392.62	0.0204	0.055	
2.00	6.15	22.13	23428	98036	4	0.26	3.11	12.02	602.60	49.38	1631	204	144.79	386.31	0.0201	0.054	
2.50	6.27	22.59	22991	93752	4	0.24	3.17	15.19	588.24	49.38	1665	206	142.28	379.61	0.0198	0.053	
3.00	6.40	23.03	22573	89655	4	0.23	3.23	18.41	573.49	49.38	1697	207	139.59	372.42	0.0194	0.052	
3.50	6.51	23.45	22174	85737	4	0.22	3.28	21.70	558.44	49.38	1728	210	137.86	367.81	0.0191	0.051	
4.00	6.63	23.85	21792	81990	4	0.21	3.34	25.04	543.20	49.38	1758	213	135.99	362.82	0.0189	0.050	
4.50	6.73	24.24	21427	78407	4	0.20	3.39	28.43	527.84	49.38	1786	216	133.90	357.26	0.0186	0.050	
5.00	6.83	24.60	21077	74981	4	0.20	3.44	31.87	512.43	49.38	1813	218	131.63	351.19	0.0183	0.049	
5.50	6.93	24.95	20743	71705	4	0.19	3.49	35.36	497.05	49.38	1839	221	129.19	344.69	0.0179	0.048	
6.00	7.03	25.29	20424	68571	4	0.18	3.53	38.89	481.73	49.38	1864	223	126.62	337.82	0.0176	0.047	
6.50	7.11	25.61	20118	65575	4	0.17	3.58	42.47	466.54	49.38	1888	226	123.93	330.63	0.0172	0.046	
7.00	7.20	25.92				-0.42	3.55	46.02								5978.96	0.830
7.50	6.99	25.16				-0.42	3.44	49.46									
8.00	6.78	24.41				-0.42	3.34	52.80									
8.50	6.57	23.65				-0.42	3.23	56.03									
9.00	6.36	22.90				-0.42	3.13	59.16									
9.50	6.15	22.14				-0.42	3.02	62.18									
10.00	5.94	21.38				-0.42	2.92	65.10									
10.50	5.73	20.63				-0.42	2.81	67.91									
11.00	5.52	19.87				-0.42	2.71	70.62									
11.50	5.31	19.12				-0.42	2.60	73.22									
12.00	5.10	18.36				-0.42	2.50	75.72									
12.50	4.89	17.60				-0.42	2.39	78.11									
13.00	4.68	16.85				-0.42	2.29	80.40									
13.50	4.47	16.09				-0.42	2.18	82.58									
14.00	4.26	15.34				-0.42	2.08	84.66									
14.50	4.05	14.58				-0.42	1.97	86.63									
15.00	3.84	13.82				-0.42	1.87	88.50									
15.50	3.63	13.07				-0.42	1.76	90.26									
16.00	3.42	12.31				-0.42	1.66	91.92									
16.50	3.21	11.56				-0.42	1.55	93.47									
17.00	3.00	10.80				-0.42	1.45	94.92									
17.50	2.79	10.04				-0.42	1.34	96.26									
18.00	2.58	9.29				-0.42	1.24	97.50									

Το φορτηγό αυτοκίνητο εισέρχεται στο τελευταίο τμήμα της διαδρομής με αρχική ταχύτητα $V_0 = 19$ km/s που αντιστοιχεί στην τελική ταχύτητα του τμήματος IV. Επειδή πρόκειται για το τελευταίο τμήμα της διαδρομής πρέπει να εξεταστεί εάν το εναπομένον μήκος της διαδρομής επαρκεί για την ασφαλή επιβράδυνση του φορτηγού μέχρι την στάση του. Γίνεται προσδιορισμός της θέσης όπου πρέπει να αρχίσει η επιβράδυνση του φορτηγού προκειμένου να καταλήξει σε στάση στο τέρμα της διαδρομής. Η απόσταση που καλύπτει το φορτηγό επιβραδυνόμενο μέχρι στάσης ορίζεται ως η κρίσιμη απόσταση, όπως εξηγήθηκε στην **παράγραφο 5.4**. Ο προσδιορισμός γίνεται με την χρήση των σχέσεων της κινηματικής **23** έως **27**. Από τις σχέσεις αυτές βρέθηκε ότι το φορτηγό θα διανύσει απόσταση $S_1 = 42,47$ m επιταχυνόμενο, ενώ για το εναπομένον μήκος $S_2 = 54,78$ m θα κινηθεί με σταθερή επιβράδυνση $\alpha_2 = -0,42$ m/s² μέχρι στάσης στο τέρμα της διαδρομής. Στο τμήμα V

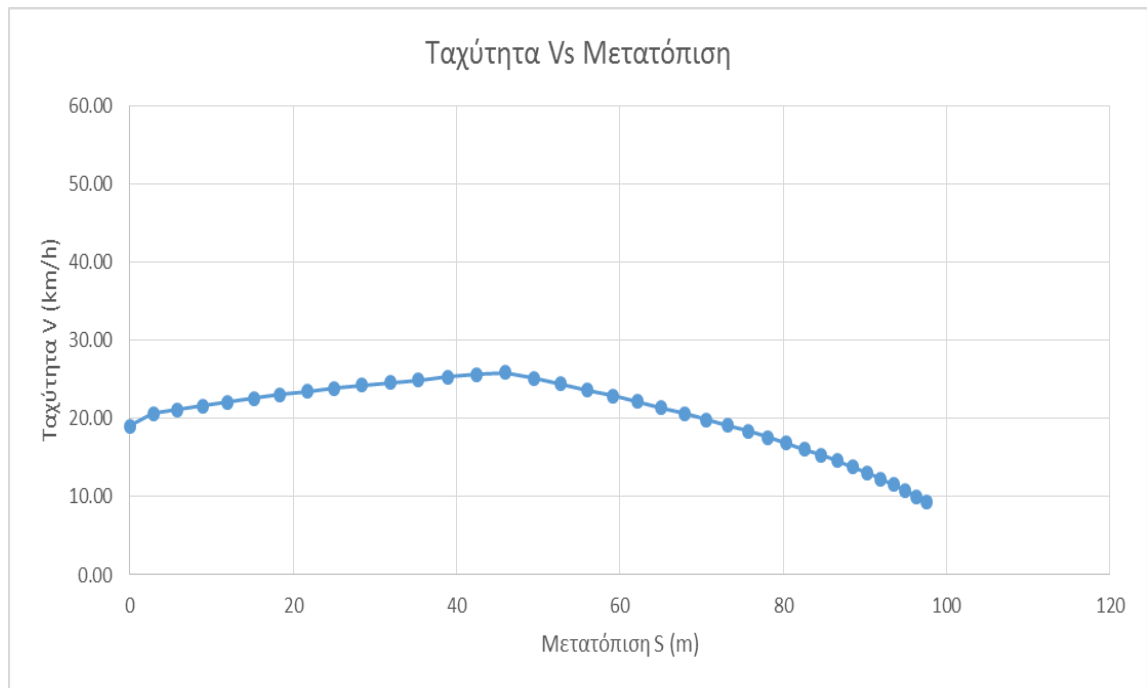
υπολογίζονται η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO₂ μόνο για τη φάση της επιτάχυνσης και όχι για τη φάση της επιβράδυνσης Η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας και της στιγμιαίας επιτάχυνσης στο τμήμα V φαίνεται στις **εικόνες 52** έως **54**.



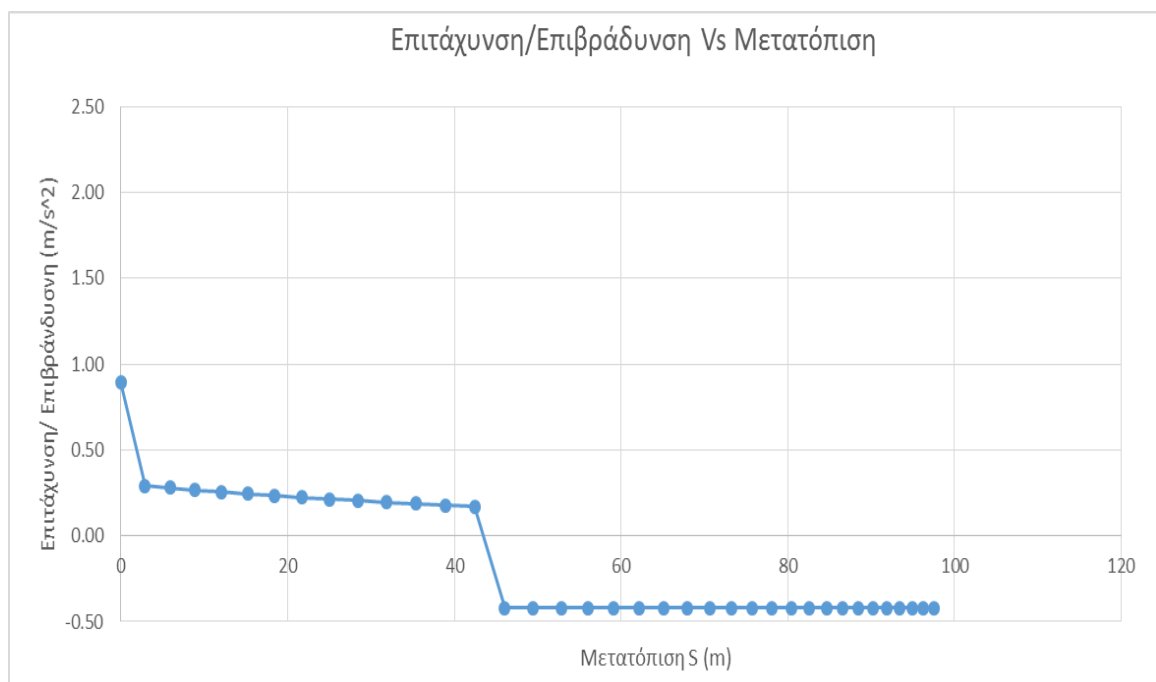
Εικόνα 52. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με τον χρόνο για το τμήμα V



Εικόνα 53. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης σε σχέση με χρόνο για το τμήμα V



Εικόνα 54. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα V



Εικόνα 55. Διάγραμμα μεταβολής της επιβράδυνσης σε σχέση με την μετατόπιση για το τμήμα V.

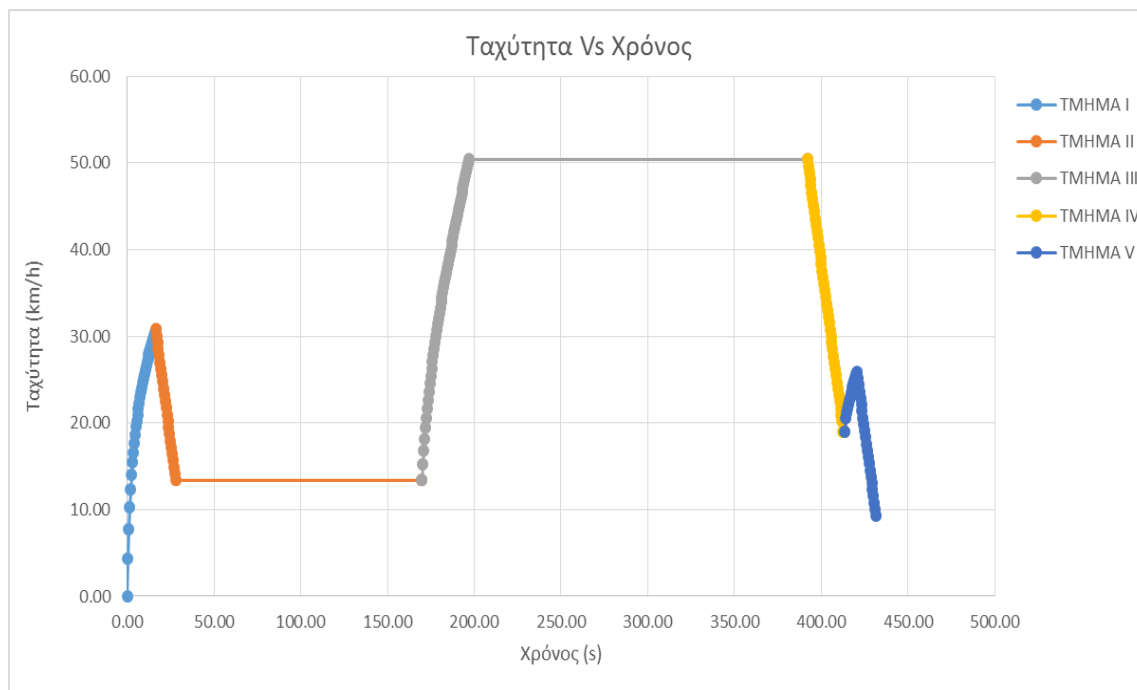
Από τα τα διαγράμματα των **εικόνων 52** έως **55** παρατηρήθηκε ότι :

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό αυτοκίνητο 100 m $T_V = 18$ s
- Η μέση ταχύτητά του ήταν $V_m = 20$ km/h
- Ο χρόνος της επιτάχυνσης του διήρκεσε για $t = 6,50$ sec
- Ο χρόνος της επιβράδυνσής του διήρκεσε για $t = 11,50$ sec
- Η συνολική κατανάλωση καυσίμου ήταν $FC = 0,31$ λίτρα
- Οι συνολικές εκπομπές $CO_2 = 0,83$ kg

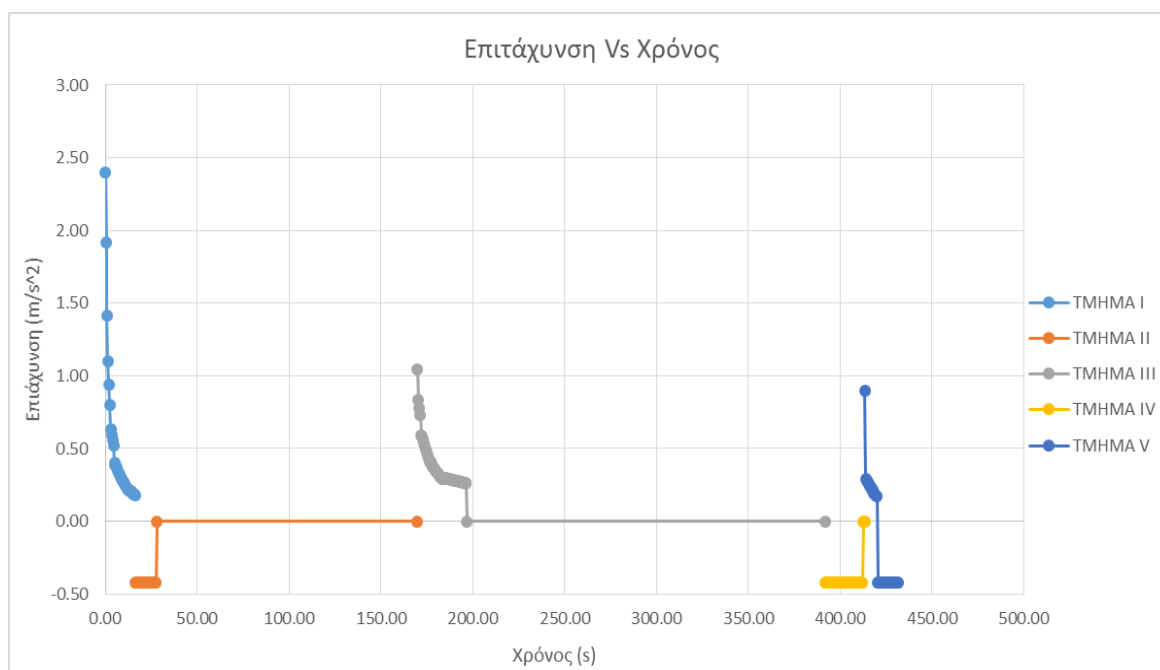
Ανακεφαλαιώνοντας, από τους υπολογισμούς παρατηρήθηκε ότι:

- Ο συνολικός χρόνος για να διανύσει το φορτηγό αυτοκίνητο όλη τη διαδρομή μήκους 4000 m είναι $T_{ολ} = 431,54$ s
- Το ποσοστό του χρόνου όπου κινείται επιταχυνόμενο είναι $T_a = 11,59$ %
- Το ποσοστό του χρόνου όπου κινείται επιβραδυνόμενο είναι $T_{επ} = 10,08$ %
- Το ποσοστό του χρόνου όπου βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας είναι $T_d = 78,33$ %
- Ο αθροιστικός χρόνος επιτάχυνσης και δυναμικής ισορροπίας είναι $T = 388,04$ s
- Η κατανάλωση καυσίμου για τις φάσεις όπου το φορτηγό δεν ήταν επιβραδυνόμενο είναι 31,71 λίτρα και οι εκπομπές CO_2 είναι 82,91 kg.
- Ο μέσος ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου είναι 294 l/h
- Ο μέσος ρυθμός εκπομπών CO_2 είναι 769 kg/h.

Στα διαγράμματα των εικόνων 56 και 57 φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο σε ολόκληρη την διαδρομή των 4000m.



Εικόνα 56. Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο για ολόκληρη την διαδρομή.



Εικόνα 57. Διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης σε σχέση με το χρόνο για ολόκληρη την διαδρομή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6. Συμπεράσματα

Ο τελικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση των εκπομπών CO₂ δεδομένου φορτηγού αυτοκινήτου συναρτήσει της ενεργούς κλίσης της οδού μεταφοράς. Αρχικά αναζητήθηκε στη βιβλιογραφία κατάλληλο μοντέλο κίνησης του φορτηγού και κατανάλωσης καυσίμου. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμου, των τεχνικών χαρακτηριστικών του φορτηγού (ταχύτητα, βάρος, ισχύς, στροφές κινητήρα κ.α.) και των χαρακτηριστικών της οδού μεταφοράς. Τελικώς, καταστρώθηκε κατάλληλο λογιστικό φύλλο για τον υπολογισμό των αναμενόμενων εκπομπών CO₂ συναρτήσει των χαρακτηριστικών του φορτηγού και της οδού.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται αποκλειστικά από τη βιβλιογραφία. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης, αφορούν σε έναν μόνο τύπο φορτηγού, τον CAT 793D του οίκου Caterpillar.

Ωστόσο, στην εργασία αναπτύχθηκε η μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατή η εκτίμηση των αναμενόμενων εκπομπών CO₂ από τη χρήση φορτηγών αυτοκινήτων συναρτήσει των τεχνικών χαρακτηριστικών των φορτηγών και της οδού μεταφοράς.

Από την εργασία αυτή προέκυψαν δύο σημαντικά συμπεράσματα :

- Ο ρυθμός των εκπομπών CO₂ είναι για τις συνήθεις συνθήκες οδού μεταφοράς ανεξάρτητος των χαρακτηριστικών των οδών. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το φορτίο στον κινητήρα μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων και του συστήματος μετάδοσης της ισχύος κρατάει τις στροφές του κινητήρα σε συγκεκριμένο εύρος και συνεπώς περιορίζονται οι εκπομπές CO₂ μεταξύ 800 – 1100 kg/h για τον τύπο φορτηγού που μελετήθηκε. Απόκλιση από αυτό το εύρος παρατηρείται σε δύο περιπτώσεις: σε πολύ χαμηλές ταχύτητες και στροφές κινητήρα (όπου ενεργοποιείται ο μετατροπέας ροπής στρέψης) και όταν το φορτηγό κινείται με μέγιστες ταχύτητες, δηλαδή στα άκρα της καμπύλης λειτουργίας του.
- Είναι δυνατόν να υπολογιστεί μέσω των εξισώσεων της κινηματικής, των τεχνικών χαρακτηριστικών του φορτηγού και της οδού μεταφοράς η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου και οι στιγμιαίες εκπομπές CO₂. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε η μεθοδολογία για τους υπολογισμούς αυτούς όταν το φορτηγό επιταχύνεται ή βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Μελλοντικά θα μπορούσε να επεκταθεί η μοντελοποίηση και για επιβραδυνόμενο φορτηγό, καθώς επίσης και να αναπτυχθεί λογισμικό όπου εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα θα είναι δυνατή η μελέτη διαφόρων σεναρίων επιλογής εξοπλισμού και σχεδιασμού των οδών, όσον αφορά στις ενεργειακές απαιτήσεις του μεταλλευτικού έργου και τις επαγόμενες εκπομπές CO₂.

Βιβλιογραφία

- Aziz A, Kecojevic V (2008). *The CO₂ footprint of the US mining industry and the potential costs of CO₂ legislation*. Mineral Resources Engineering **13**(3) 111-129.
- Caterpillar (2010). *CAT 793D mining truck*. Peoria, IL, 32p.
- Caterpillar (2016). *Performance handbook, Ed. 46*. Peoria, IL, 2378p.
- EPA (2005). *Average carbon dioxide emissions resulting from gasoline and diesel fuel*. US Environmental Protection Agency – Office of Transportation and Air Quality, Washington DC, 3p.
- Parreira J (2013). *An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system*. Unpublished PhD Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, 212p.
- Sahoo LK, Bandyopadhyay S, Banerjee R (2010). *Energy performance of dump trucks in opencast mine*. In ECOS 2010 (eds. D Favrat et al) – Proceedings of the 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems, Lausanne, Switzerland, June 14-17, 8p.
- Καραπάνος Χ, Κοτσιλιέρης Α, Κουντουράς Λ (2001). *Μηχανές εσωτερικής καύσης II*. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Αθήνα, 275σ.
- Μιχαλακόπουλος Θ (2006). *Συστήματα φόρτωσης-μεταφοράς σε τεχνικά έργα και μεταλλεία*. Σημειώσεις από τις παραδόσεις, ΕΜΠ, Αθήνα, 92σ.
- Φατσής Α (2013). *Μέτρηση ισχύος σε Μ.Ε.Κ*. Παρουσίαση μαθήματος Θεωρία εμβολοφόρων κινητήρων, <https://eclass.gunet.gr/modules/document/?course=LABGU291> (ανακτήθηκε 27.02.2017).