



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης
ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις οδικές
και σιδηροδρομικές μεταφορές***



ΣΙΑΤΙΤΣΑΣ ΡΩΜΑΝΟΣ – ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: Μπαλλής Αθανάσιος, Αν. Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία και συνεπώς τις σπουδές μου στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον κύριο Α. Μπαλλή για την αρχική ανάθεση του θέματος της εργασίας, την υπομονή που επέδειξε και τη συνολική καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησής της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στην κυρία Τ. Μοσχόβου, η οποία μέσω των παρατηρήσεων και των συμβουλών της, αλλά και της συνεχούς ενθάρρυνσής της, με βοήθησε σημαντικά σε αυτή την προσπάθεια.

Ευχαριστώ επίσης τους ανθρώπους που έχω την τύχη να με συντροφεύουν όλα αυτά τα χρόνια, δίνοντάς μου δύναμη να συνεχίζω με ό,τι κι αν κάνω. Τέλος, ένα ολόψυχο «ευχαριστώ» οφείλω στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου για όλες τις θυσίες που κάνουν καθημερινά για μένα...

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Εξετάστηκαν έξι μοντέλα οδικών και έξι μοντέλα σιδηροδρομικών οχημάτων. Τα μοντέλα αυτά συγκρίθηκαν {α} ως προς την ευκολία συλλογής στοιχείων για την εφαρμογή τους (μεταβλητές εισόδου) και {β} ως προς την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των υπολογισμών τους (αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα σχετικών εργασιών καθώς και μετρήσεις κατανάλωσης συρμών της ΤΡΑΙΝΟΣΕ). Επιπλέον, για την διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια, εξετάστηκε για όλα τα ανωτέρω μοντέλα, η επιρροή επί μέρους παραμέτρων (κλίση οδού/σιδ.γραμμής, βάρος μεταφερόμενων εμπορευμάτων) μέσω διατύπωσης και επίλυσης μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς (φορηγό-τραίνο) ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, για 13 διαδρομές του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV.

Λέξεις κλειδιά: μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας, ρύποι, οδική μεταφορά, σιδηροδρομική μεταφορά, διατροπική μεταφορά

Abstract

The main subject of the present diploma thesis is the comparison of road and rail freight energy consumption models. A total of six road and six rail freight energy consumption models have been investigated. The comparison of models was based on {a} how easy was the process of required data collection (input variables) and {b} how reliable and valid was the calculation results of each model (relative literature references and TRAINOSE real consumption measurements have been used in order to evaluate models). Furthermore, all models have been applied in road and rail route Thessaloniki – Sofia by formulating and solving a large number of alternative scenarios. The scope was to investigate the influence of individual parameters (road or railway gradient, load weight) on consumption calculation. Moreover, a comparative study of road and intermodal freight transport (truck – train) was performed along 13 routes of Paneuropean Corridor IV, based on the emission of pollutants taking place in each transport scenario.

Keywords: road freight energy consumption model, rail freight energy consumption model, pollutants, road transport, rail transport, intermodal freight transport

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	11
1.1.	Ενέργεια και εκπεμπόμενοι ρύποι στις εμπορευματικές μεταφορές	11
1.2.	Αντικείμενο και στόχος της εργασίας	15
1.3.	Διάρθρωση της εργασίας.....	15
2.	Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	17
2.1.	Κατανάλωση ενέργειας και εκπεμπόμενοι ρύποι στις οδικές μεταφορές	17
2.1.1.	Παράμετροι κατανάλωσης καυσίμου φορτηγών οχημάτων	17
2.1.2.	Μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις οδικές μεταφορές.....	26
2.2.	Κατανάλωση ενέργειας και εκπεμπόμενοι ρύποι στις σιδηροδρομικές μεταφορές.....	40
2.2.1.	Παράμετροι κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού	40
2.2.2.	Μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις σιδηροδρομικές μεταφορές.....	45
2.3.	Μοντέλο GIFT (οδική, σιδηροδρομική και διατροπική μεταφορά).....	52
3.	Μεθοδολογία.....	55
3.1.	Μεταβλητές εισόδου μοντέλων οδικών οχημάτων	55
3.1.1.	Υπολογισμός προφίλ κλίσεων για τα μοντέλα CMEM, PMG και ORNL....	58
3.1.2.	Προσαρμογή μοντέλων CMEM, PMG και ORNL.....	58
3.1.3.	Υπολογισμός κατανάλωσης στην περίπτωση αρνητικών κλίσεων	61
3.2.	Μεταβλητές εισόδου μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων	64
3.2.1.	Υπολογισμός προφίλ κλίσεων για τα μοντέλα Rail_NTUA και MEET II – Μέθοδος εκτίμησης κλίσεων σηράγγων	66
3.2.2.	Προσαρμογή μοντέλου MEET II	70
3.2.3.	Προσαρμογή μοντέλων ώστε να δίνουν αποτελέσματα και για ντιζελοκίνητους συρμούς.....	72
3.3.	Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων.....	74
3.3.1.	Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων οδικών οχημάτων μέσω βιβλιογραφικών αναφορών.....	74
3.3.2.	Έλεγχος εγκυρότητας σιδηροδρομικών οχημάτων στη διαδρομή Δομοκός – Αθήνα	79
3.4.	Σύγκριση αποτελεσμάτων οδικών και σιδηροδρομικών μοντέλων στην διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια	81
3.4.1.	Περιγραφή διαδρομής	81

3.4.2. Σενάρια φόρτωσης	83
3.4.3. Αποτελέσματα μοντέλων οδικών οχημάτων	90
3.4.4. Σύγκριση μεταξύ μοντέλων υπολογισμού σιδηροδρομικών οχημάτων.....	95
4. Εφαρμογή σε διαδρομές του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV: σύγκριση αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς	99
4.1. Περιγραφή Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV	99
4.2. Συλλογή δεδομένων	100
4.3. Σενάρια αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς	103
4.4. Μετατροπή ενέργειας σε εκπεμπόμενους ρύπους.....	104
4.5. Σύγκριση μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς.....	106
4.5.1. Αποτελέσματα εκπεμπόμενων ρύπων	106
4.5.2. Αποτελέσματα κόστους – χρόνου.....	113
5. Συμπεράσματα	116
6. Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.....	118

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1:	Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα []	11
Εικόνα 2:	Μερίδιο τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τύπο καυσίμου στον τομέα των μεταφορών στην Ευρώπη, το 2014 []	13
Εικόνα 3:	Εξοπλισμός ενίσχυσης αεροδυναμικής φορτηγού οχήματος [9]	18
Εικόνα 4:	Ποσοστιαία κατανάλωση λόγω αντίστασης κύλισης και αεροδυναμικής αντίστασης, συναρτήσει της ταχύτητας []	18
Εικόνα 5:	Κατανάλωση καυσίμου οχημάτων διαφορετικού μικτού βάρους, συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου [12]	20
Εικόνα 6:	Κατανάλωση καυσίμου οχημάτων διαφορετικής ιπποδύναμης, συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου [12]	21
Εικόνα 7:	Διάγραμμα διασποράς τιμών κατανάλωσης καυσίμου (lt/100km) συναρτήσει της κλίσης []	22
Εικόνα 8:	Δυνάμεις που ασκούνται σε φορτηγό όχημα κατά την κίνησή του σε ανωφέρεια [15]	26
Εικόνα 9:	Διάγραμμα ροής υπολογισμών του μοντέλου για βαρέα φορτηγά οχήματα [20]	31
Εικόνα 10:	Συντελεστής φόρτωσης CU	38
Εικόνα 11:	Στοιχεία συστήματος ηλεκτροκίνησης (υποσταθμός έλξης - εναέρια γραμμή και «τρίτη σιδηροτροχιά») 30	43
Εικόνα 12:	Διαγραμματική απεικόνιση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της μέσης ταχύτητας και της απόστασης μεταξύ στάσεων σε συρμούς της Γερμανίας [32]	45
Εικόνα 13:	Φύλλο υπολογισμού της κατανάλωσης σύμφωνα με τα μοντέλα CMEM, P.M.G και ORNL	60
Εικόνα 14:	Συντρέχουσες δυνάμεις κατά την κίνηση φορτηγού οχήματος σε κατωφέρεια	62
Εικόνα 15:	Δημιουργία κόμβων μέτρησης υψόμετρου κατά μήκος σιδηροδρομικής γραμμής, μέσω της εφαρμογής Google Earth	66
Εικόνα 16:	Εντοπισμός σημείων ύπαρξης σηράγγων μέσω λογισμικού GIS	68
Εικόνα 17:	Εκτίμηση κλίσεων σηράγγων μέσω των υψομέτρων εισόδου και εξόδου	68
Εικόνα 18:	Προφίλ κλίσεων της σιδηροδρομικής διαδρομής Θεσσαλονίκη- Σόφια, όπως προκύπτει: (α) από τα υψόμετρα σημείων της γραμμής ανά 100 μ. και (β) από τα υψόμετρα των ενδιάμεσων σταθμών	69
Εικόνα 19:	Εξαγωγή ομοιογενών τμημάτων (από άποψη κλίσεων) κατά μήκος εξεταζόμενης διαδρομής	71
Εικόνα 20:	Ποσοστιαία κατανομή της ενέργειας από την παραγωγή έως την χρήση της για την ηλεκτρική ενέργεια και για καύσιμο ντίζελ	72
Εικόνα 21:	Διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια	81
Εικόνα 22:	Πανευρωπαϊκός Διάδρομος IV	99

Εικόνα 23: Χαρτογραφική απεικόνιση των διαδρομών που εξετάσθηκαν, κατά μήκος του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV	101
Εικόνα 24: Εύρεση επί μέρους σιδηροδρομικών αποστάσεων και βέλτιστης διαδρομής, μέσω του λογισμικού TransCAD και της βάσης δεδομένων ETIS-Plus	102
Εικόνα 25: Συγκριτική εφαρμογή των μοντέλων μέσω τριών σεναρίων μεταφοράς	103
Εικόνα 26: Σχηματική επεξήγηση των εκπομπών ρύπων Well-To-Wheel [52]	104

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο φορτηγού, μέσες τιμές κατανάλωσης κενού οχήματος και διαφορές κατανάλωσης κενού και πλήρως έμφορτου οχήματος για διαφορετικές κατηγορίες κλίσης εδάφους [24]	37
Πίνακας 2: Μεταβλητές εισόδου μοντέλων οδικών οχημάτων.....	57
Πίνακας 3: Μεταβλητές εισόδου μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων.....	65
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά πρότυπων εμπορευματοκιβωτίων.....	83
Πίνακας 5: Βάρος εμπορευματοκιβωτίων ανά τύπο και κατηγορία φορτίου	85
Πίνακας 6: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίου Σεναρίων 2#.....	85
Πίνακας 7: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίου Σεναρίων 3#.....	85
Πίνακας 8: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίου Σεναρίων 1#.....	86
Πίνακας 9: Σύνθεση συρμού για τα σενάρια φόρτωσης 1# (Συνήθης μίξη φορτίων)	87
Πίνακας 10: Μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις οχημάτων μεταφοράς εμπορευμάτων [46].....	88
Πίνακας 11: Μέγιστα επιτρεπόμενα βάρη έμφορτου οχήματος για διεθνείς μεταφορές [46].....	88
Πίνακας 12: Κατανάλωση καυσίμου φορτηγού οχήματος ανά κατηγορία και τύπο Ε/Κ	90
Πίνακας 13: Ομαδοποιημένες κλίσεις σιδηροδρομικού τμήματος Θεσσαλονίκη - Σόφια.....	95
Πίνακας 14: Συντελεστές μετατροπής καυσίμου ή ηλεκτρικής ενέργειας σε WTW ρύπους [24].....	105

Ευρετήριο διαγραμμάτων

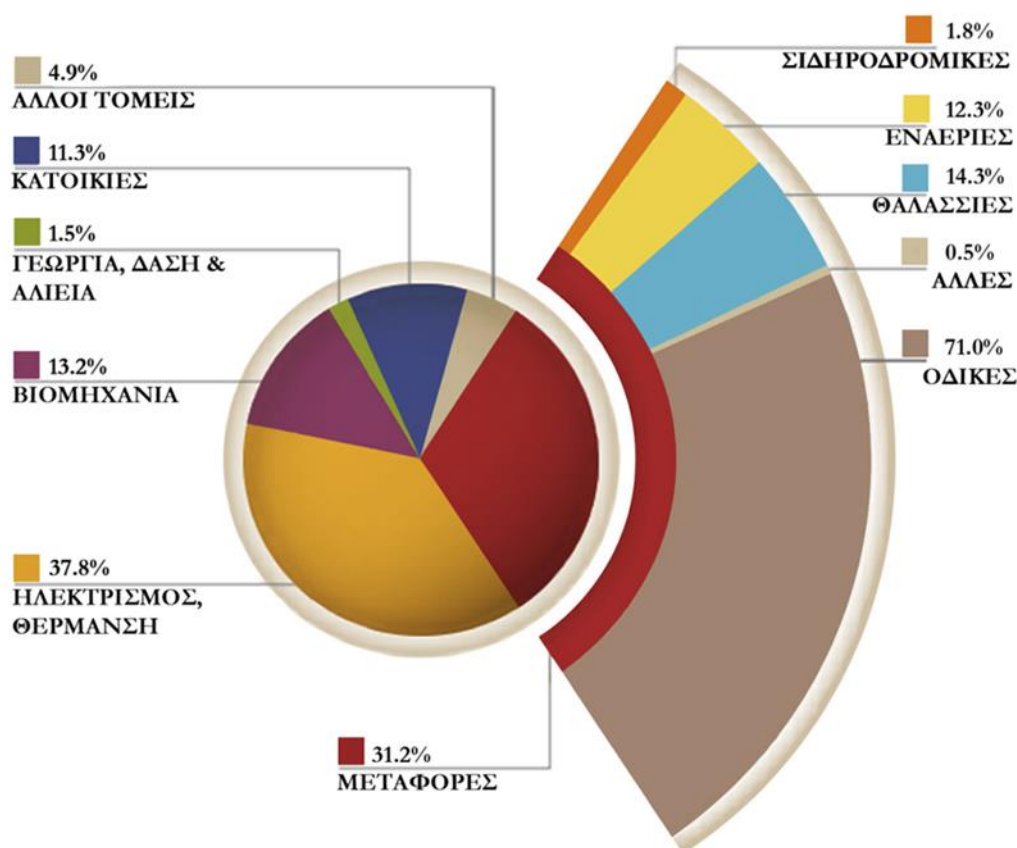
Διάγραμμα 1:	Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις ως προς την κίνηση σε ανηφορικό οδόστρωμα	75
Διάγραμμα 2:	Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας (επίπεδο έδαφος).....	76
Διάγραμμα 3:	Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις για διαφορετικές τιμές μικτού βάρους (επίπεδο έδαφος).....	77
Διάγραμμα 4:	Κατανάλωση καυσίμου πλήρως έμφορτου φορητού οχήματος μικτού βάρους 40 τόνων (κίνηση σε επίπεδο έδαφος με ταχύτητα 85km/h).....	78
Διάγραμμα 5:	Αποτελέσματα συγκριτικής εφαρμογής μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού στο τμήμα Δομοκός - Αθήνα.....	79
Διάγραμμα 6:	Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορητών συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο ελαφριά φορτία).....	91
Διάγραμμα 7:	Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορητών συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία)....	91
Διάγραμμα 8:	Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορητών συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (συνήθης μίξη φορτίων)	92
Διάγραμμα 9:	Κατανάλωση καυσίμου φορητού οχήματος συναρτήσεων του μικτού βάρους με παραδοχή μηδενικών κλίσεων (αριστερά) και για υφιστάμενες κλίσεις της διαδρομής Θεσσαλονίκη – Σόφια (δεξιά) ...	94
Διάγραμμα 10:	Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο ελαφριά φορτία)	97
Διάγραμμα 11:	Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (συνήθης μίξη φορτίων).....	97
Διάγραμμα 12:	Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσεων του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία).....	98
Διάγραμμα 13:	Σχέση απόστασης και εκπομπής ρύπων	107
Διάγραμμα 14:	Συνολικοί WTW ρύποι αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς για σενάρια μόνο ελαφριών φορτίων (πάνω), συνήθης μίξης (στη μέση) και μόνο βαριών/πολύ βαριών φορτίων (κάτω)	108
Διάγραμμα 15:	Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια μόνο ελαφριών φορτίων	110
Διάγραμμα 16:	Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω	

	των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια συνήθους μίξης φορτίων	111
Διάγραμμα 17:	Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια μόνο βαριών φορτίων	112
Διάγραμμα 18:	Σχέση απόστασης και κόστους μεταφοράς	115
Διάγραμμα 19:	Σχέση απόστασης και χρόνου μεταφοράς.....	115

1. Εισαγωγή

1.1. Ενέργεια και εκπεμπόμενοι ρύποι στις εμπορευματικές μεταφορές

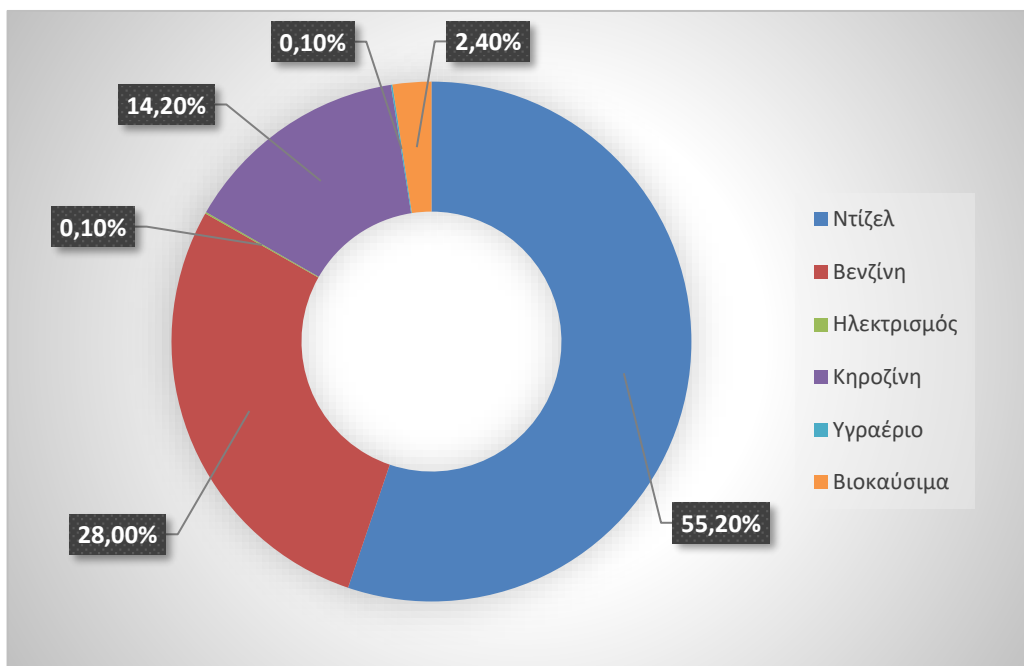
Οι μεταφορές στο σύνολό τους αποτελούν έναν από τους πιο ενεργοβόρους και συνεπώς, ρυπογόνους κλάδους. Οι τεράστιες ποσότητες ενέργειας που καταναλώνονται υπό ποικίλες μορφές για την εξυπηρέτηση των εμπορευματικών μεταφορών, καθώς και η απελευθέρωση ιδιαίτερα βλαβερών ρυπογόνων στοιχείων, καθιστά επιτακτική την ανάγκη όσο το δυνατόν ακριβέστερης πρόβλεψης του αντίκτυπου τους στην ισορροπία του περιβάλλοντος. Εστιάζοντας στην άμεση σύνδεση των εμπορευματικών μεταφορών γενικότερα, και των οδικών και σιδηροδρομικών ειδικότερα, με την κατανάλωση ενέργειας, αξίζει αρχικά να αναφέρουμε ότι στις αναπτυγμένες χώρες οι μεταφορές στο σύνολό τους ευθύνονται για το ένα τρίτο περίπου (31,2%) της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 1: Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [1]

Ειδικότερα, το 71,0% αυτής της ενέργειας διοχετεύεται στις οδικές μεταφορές, με τις εναέριες και θαλάσσιες να ακολουθούν με τα διόλου ευκαταφρόνητα 12,3% και 14,3% αντίστοιχα, έναντι του πολύ μικρότερης τάξης μεριδίου των σιδηροδρομικών μεταφορών (1,8%). Σε απόλυτη σύμπνοια κινούνται και τα ποσοστά εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων ανά τομέα και μέσο μεταφοράς. Όπως είναι εύλογο, η συνεχής αύξηση του όγκου των εμπορευματικών μεταφορών οδηγεί αυτόματα στην αύξηση των πιέσεων στο περιβάλλον. Οι σημαντικότερες από αυτές σχετίζονται πέρα από την κατανάλωση ενέργειας, με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, τον θόρυβο, την ποιότητα των υδάτων, την ποιότητα του εδάφους, την βιοποικιλότητα και την κατάληψη χώρου, ενώ στις αρνητικές συνέπειες των μεταφορών εντάσσονται επίσης η κυκλοφοριακή συμφόρηση και τα τροχαία ατυχήματα, το κοινωνικοοικονομικό κόστος των οποίων είναι τεράστιο [2].

Η αλληλένδετη σχέση των εμπορευματικών μεταφορών με την κατανάλωση ενέργειας, καθώς και την εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η επιλογή ενός ή συνδυασμού μέσων μεταφοράς, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η μεταφορά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε μέσου, η κατηγορία των φορτίων, η φύση και προέλευση των καυσίμων και η αποτελεσματικότητα στην οργάνωση και τη διαχείριση των μεταφορών. Για παράδειγμα, η κυριαρχία των οδικών εμπορευματικών μεταφορών σε συνδυασμό με την σταθερά ανοδική εξάρτησή τους από το πετρέλαιο αυξάνει ολοένα και περισσότερο τις πιέσεις προς το περιβάλλον, διότι η καύση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σθεναρά στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, απελευθερώνοντας τεράστιες ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η χρήση του πετρελαίου και των παραγώγων του από τον τομέα των μεταφορών ανέρχεται συνολικά σε ποσοστό τάξης άνω του 95%, με τις οδικές μεταφορές να είναι υπεύθυνες για το 85% αυτής της κατανάλωσης [3]. Σημειώνεται πως τα κυριότερα προϊόντα του πετρελαίου που συνδέονται με τις εμπορευματικές μεταφορές είναι το καύσιμο ντίζελ, η βενζίνη, η κηροζίνη και το υγραέριο. Το μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας ανά τύπο καυσίμου για τον τομέα των μεταφορών στην Ευρώπη αποτυπώνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα (**Error! Reference source not found.**)



Εικόνα 2: Μερίδιο τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τύπο καυσίμου στον τομέα των μεταφορών στην Ευρώπη, το 2014 [4]

Σειρά από μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί για τις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές, επιλέγοντας μακροσκελείς ή απλοποιημένες προσεγγίσεις, βάσει του φάσματος των παραμέτρων που λαμβάνουν υπόψη. Η εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπεμπόμενων ρύπων στον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών, μέσω αυτών των μοντέλων αποτελεί επίσης κρίσιμο εργαλείο για την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων βελτίωσης των δικτύων μεταφοράς. Όσον αφορά την Ευρώπη, ολοένα και περισσότερα ερευνητικά προγράμματα φιλοδοξούν στην ανάπτυξη στρατηγικών για τον εκσυγχρονισμό και τη μετεξέλιξη του υπάρχοντος συνονθυλεύματος εθνικών δικτύων μεταφορών σε ένα λειτουργικό δίκτυο που θα συνδέει όλα τα σημεία της Ευρώπης, βελτιστοποιώντας τη χρήση όλων των μέσων μεταφοράς, με την κατασκευή κομβικής σημασίας έργων, επέκταση και βελτίωση υποδομών και εύρεση καινοτόμων και βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων, δεδομένων των αυξανόμενων περιορισμών των πόρων και του περιβάλλοντος. Άλλωστε, ένα αποδοτικό σύστημα μεταφορών μπορεί επίσης να συμβάλλει στην δημιουργία ενός περιβάλλοντος που ενθαρρύνει την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας [5]. Τέλος, γίνεται από πλευράς Ευρωπαϊκής Ένωσης, προσπάθεια μείωσης του

αυξημένου σε πολλές περιπτώσεις λειτουργικού κόστους των οικολογικά φιλικότερων συνδυασμένων μεταφορών έναντι των κυρίαρχων οδικών, καθιστώντας τις μία βιώσιμη εναλλακτική, έχοντας γενικευμένο κόστος μικρότερο ή ίσο με αυτό των αμιγώς οδικών [6].

Στα πλαίσια του εθνικού ενεργειακού σχεδιασμού της χώρας μας, σημαντική είναι η διαφοροποίηση από την υφιστάμενη κατάσταση, που προβλέπεται εξαιτίας των τεχνολογικών εξελίξεων και ανάπτυξης του κατάλληλου δικτύου υποδομών στα μέσα σταθερής τροχιάς, όπου θα επιτευχθεί τόσο ο πλήρης εξηλεκτισμός τους όσο και η σημαντική αύξηση του μεριδίου τους στο επιβατικό και εμπορευματικό μεταφορικό έργο. Η αύξηση αυτή θα επιτύχει συνολικά σημαντική μείωση τόσο του κόστους των μετακινήσεων όσο και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας καθοριστικά στην επίτευξη των κεντρικών ενεργειακών στόχων, ενώ ο εξηλεκτισμός των μεταφορών στο σύνολό τους, θα υποκαταστήσει τα εισαγόμενα ρυπογόνα πετρελαιοειδή προϊόντα από καθαρή ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Εκτός αυτού βέβαια, τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ενεργειακή ζήτηση στις μεταφορές εντείνουν την ανάγκη για αποδοτικότερο χωροταξικό σχεδιασμό, ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό και εφαρμογή της ενεργειακής πολιτικής. Με αυτό τον τρόπο η μεταφορά των αγαθών μπορεί να συνδεθεί με τη χρήση εναλλακτικών τρόπων και συνδυασμού μέσων μεταφοράς, κάτι που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και μελέτη που πρέπει να αντιμετωπίζεται με γνώμονα τη λειτουργία τοπικών και περιφερειακών κέντρων διανομής και τη βέλτιστη λειτουργία των εφοδιαστικών αλυσίδων [7]. Σ' αυτή την κατεύθυνση κινείται μεταξύ άλλων και ο κλάδος των logistics, με σημαντική συμβολή στους παραπάνω στόχους, μέσω της αποτελεσματικότερης οργάνωσης και διαχείρισης της μεταφορικής αλυσίδας και των υπηρεσιών αποθήκευσης και διανομής [8].

Στην προσπάθεια αναζήτησης εναλλακτικών λύσεων και στρατηγικών, που σκοπό έχουν τον εκσυγχρονισμό και την βελτιστοποίηση της υφιστάμενης κατάστασης στον τομέα των μεταφορών, καθιστώντας αυτές περισσότερο βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον και συνεπώς, τον ίδιο τον άνθρωπο, η ανάπτυξη και χρήση μοντέλων που παρέχουν την δυνατότητα εκτίμησης των ποσοτήτων της ενέργειας που απελευθερώνονται κατά την κίνηση των δύο μέσων μεταφοράς κρίνεται αναγκαία. Για τον λόγο αυτό, είναι φανερό η εντατική προσπάθεια που

γίνεται από πλευράς επιστημονικής κοινότητας, για ακριβέστερη ποσοτικοποίηση των παραγόντων με τους οποίους συμβάλλουν οι οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές στην κατανάλωση ενέργειας και στην εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων, μέσω συνεχής ανάπτυξης μοντέλων εκτίμησης αυτής της κατανάλωσης.

1.2. Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Συγκεκριμένα, η εργασία στοχεύει στην σύγκριση των υπολογιστικών μοντέλων, όσον αφορά τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψη και την αντίστοιχη ευκολία συλλογής των απαιτούμενων στοιχείων. Ακόμη, μέσω ελέγχων αξιοπιστίας και εγκυρότητας των υπολογισμών επιχειρείται ο προσδιορισμός της ακρίβειας υπολογισμού, το προτεινόμενο πεδίο και ο βέλτιστος τρόπος εφαρμογής τους. Τέλος, αξιοποιώντας επιλεγμένα μοντέλα, πραγματοποιείται σύγκριση των δύο μέσων, μέσω σεναρίων αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς.

1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Η ανάπτυξη του θέματος της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει εκτός της πρώτης εισαγωγικής ενότητας, όπου παρουσιάζεται η αλληλένδετη σχέση των εμπορευματικών χερσαίων μεταφορών με την κατανάλωση ενέργειας και την εκπομπή ρύπων, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους συνδέονται παγκοσμίως με τους τομείς της οικονομίας και του περιβάλλοντος, ακόμη πέντε ενότητες. Στη δεύτερη ενότητα (Βιβλιογραφική Επισκόπηση) παρατίθενται οι σημαντικότεροι παράμετροι κατανάλωσης ενέργειας οδικών και σιδηροδρομικών οχημάτων και ακολουθεί η ανάλυση ορισμένων μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων. Στην τρίτη ενότητα πραγματοποιείται ανασκόπηση των μεταβλητών εισόδου των παραπάνω μοντέλων, βάσει των οποίων γίνεται μια αρχική συγκριτική παρουσίασή τους. Παράλληλα περιγράφονται οι μέθοδοι εκτίμησης που αναπτύσσονται για την εφαρμογή των μοντέλων, καθώς και οι προσαρμογές που πραγματοποιούνται. Ακολουθεί έλεγχος εγκυρότητας των μοντέλων, μέσω

διαθέσιμων πραγματικών μετρήσεων κατανάλωσης. Τέλος, για την διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια, εξετάζεται για όλα τα ανωτέρω μοντέλα, η επιρροή επί μέρους παραμέτρων (κλίση οδού/σιδ.γραμμής, βάρος μεταφερόμενων εμπορευμάτων) μέσω διατύπωσης και επίλυσης μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων. Στην τέταρτη ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση της αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς (φορηγό – τρένο) σε 13 διαδρομές του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV, με γνώμονα τον αντίκτυπο στο περιβάλλον (ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων). Ακολουθεί η πέμπτη ενότητα, όπου συνοψίζονται τα εξαχθέντα συμπεράσματα της εργασίας. Τέλος, στην έκτη ενότητα προτείνονται αντικείμενα για περαιτέρω έρευνα.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

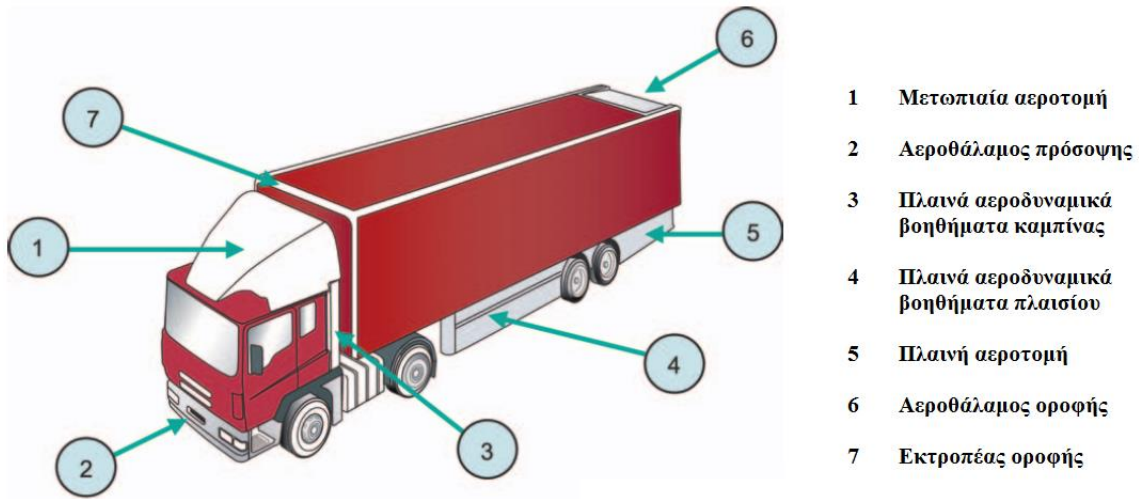
Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται αρχικά, ως θεωρητικό υπόβαθρο, μια παρουσίαση των παραγόντων κατανάλωσης καυσίμου ή ενέργειας στις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Ακολουθεί ανάλυση των μοντέλων υπολογισμού που εξετάστηκαν, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στις οδηγίες, τα πρότυπα και τις βάσεις δεδομένων στις οποίες στηρίζονται, καθώς και στους οργανισμούς, τα ερευνητικά κέντρα και τα προγράμματα, στα πλαίσια των οποίων αναπτύχθηκαν.

2.1. Κατανάλωση ενέργειας και εκπεμπόμενοι ρύποι στις οδικές μεταφορές

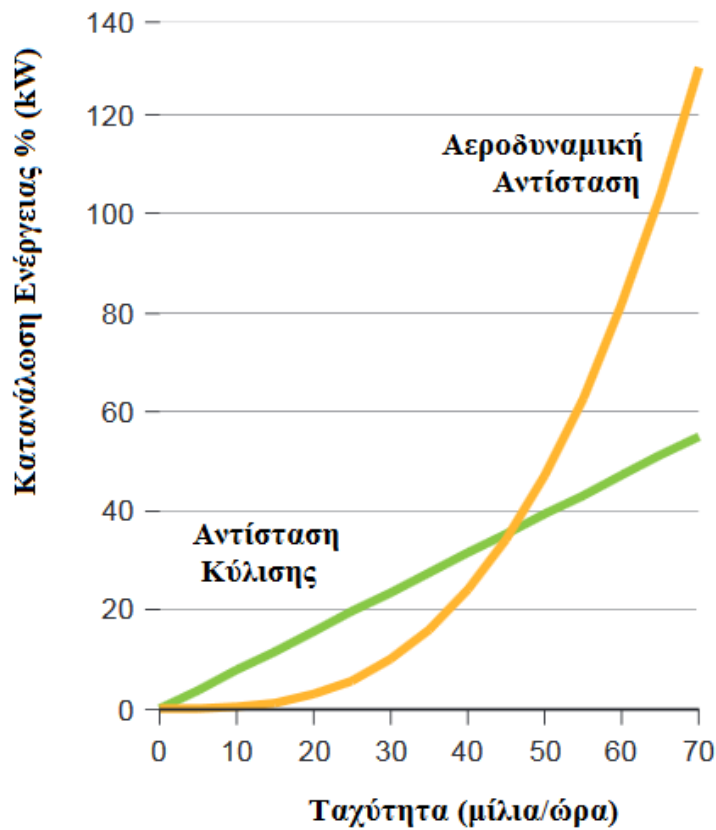
2.1.1. Παράμετροι κατανάλωσης καυσίμου φορτηγών οχημάτων

Ταχύτητα κίνησης

Η παράμετρος της ταχύτητας υπεισέρχεται στις σχέσεις υπολογισμού της κατανάλωσης, λόγω της επίδρασης της κυρίως στην αεροδυναμική αντίσταση, δηλαδή την δύναμη που αντιστέκεται στη κίνηση του οχήματος εντός του ατμοσφαιρικού αέρα. Η αεροδυναμική αντίσταση είναι μία από τις βασικές δυνάμεις που καλείται να υπερκεράσει και ένα φορτηγό. Η εξάρτησή από το τετράγωνο της ταχύτητας με την οποία κινείται το όχημα συνεπάγεται ότι αύξηση της ταχύτητας οδηγεί αυτομάτως σε εκθετική αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης, και συνεπώς, της ανάγκης για ενέργεια. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για χαμηλές ταχύτητες, η αεροδυναμική αντίσταση είναι πρακτικά αμελητέα, ενώ γίνεται για ταχύτητες άνω των 70 km/h καθίσταται υπεύθυνη σχεδόν για το 50% της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπρόσθετοι παράγοντες επηρεάζουν την αεροδυναμική αντίσταση, όπως το κατά πόσο αεροδυναμικό είναι το σχήμα του οχήματος (συντελεστής αεροδυναμικότητας C_{RR}), το εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας (A_f) και η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα (ρ) [9].



Εικόνα 3: Εξοπλισμός ενίσχυσης αεροδυναμικής φορτηγού οχήματος [9]



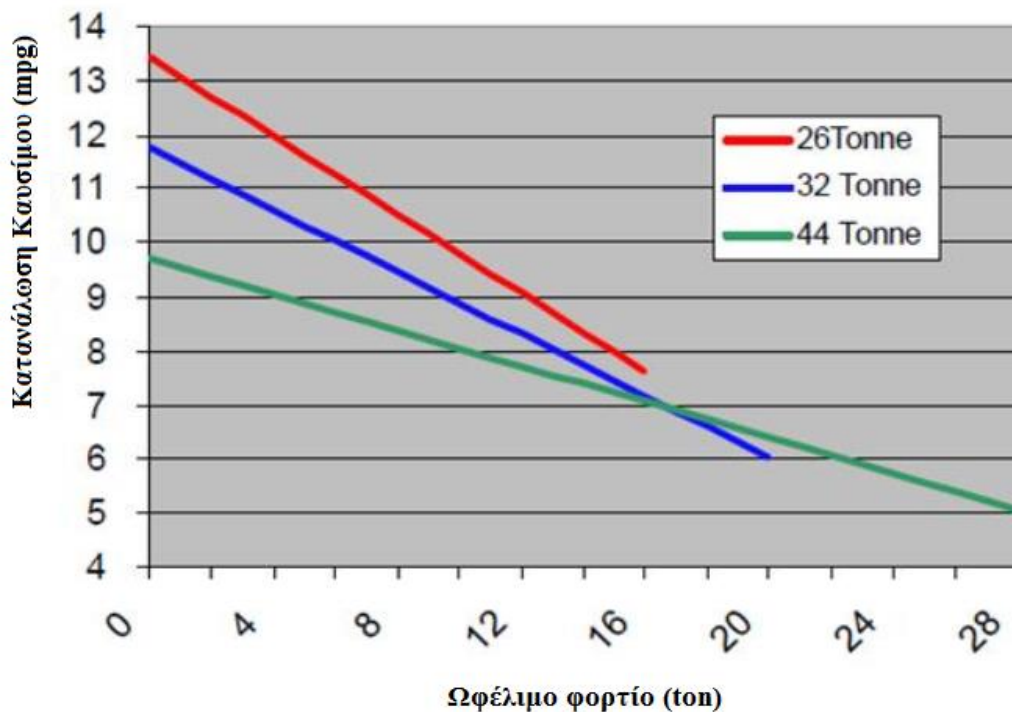
Εικόνα 4: Ποσοστιαία κατανάλωση λόγω αντίστασης κύλισης και αεροδυναμικής αντίστασης, συναρτήσει της ταχύτητας [10]

Ελαστικά – Οδόστρωμα

Η αντίσταση κύλισης αποτελεί ακόμη έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κατανάλωσης καυσίμου. και είναι η δύναμη που απαιτείται προκειμένου η κίνηση του οχήματος να διατηρηθεί σε ευθεία γραμμή και υπό σταθερή ταχύτητα. Συγκεκριμένα, η δύναμη τριβής ανάμεσα στο ελαστικό και το οδόστρωμα είναι εκείνη που επιτρέπει την κίνηση, την επιτάχυνση, την πέδηση και την αλλαγή πορείας του οχήματος. Παρόλο που και εδώ η επιρροή της ταχύτητας είναι υπαρκτή, η αντίσταση κύλισης οφείλεται κυρίως στην ελαστική παραμόρφωση (κατά 80-95%), τις τριβές μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού τροχού (0-15%) και τις αεροδυναμικές απώλειες λόγω της κυκλοφορίας του αέρα μέσα και γύρω από το ελαστικό (0-5%) [11]. Προκειμένου να καταστεί δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν οι παραπάνω παράγοντες, στον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης, υπεισέρχεται η σταθερά αντίστασης κύλισης C_{RR} , που αποτελεί τον λόγο της αντίστασης κύλισης προς το φορτίο του ελαστικού. Η σταθερά είναι αδιάστατη και οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται από 0.004 έως 0.009, ανάλογα τον τύπο του οχήματος, των ελαστικών και την ποιότητα του οδοστρώματος. Η τιμή 0.004 αντιστοιχεί σε νέο οδόστρωμα και ελαστικά, ενώ η τιμή 0.009 σε οδόστρωμα που έχει υποστεί φθορές και αντίστοιχα μεταχειρισμένα ελαστικά.

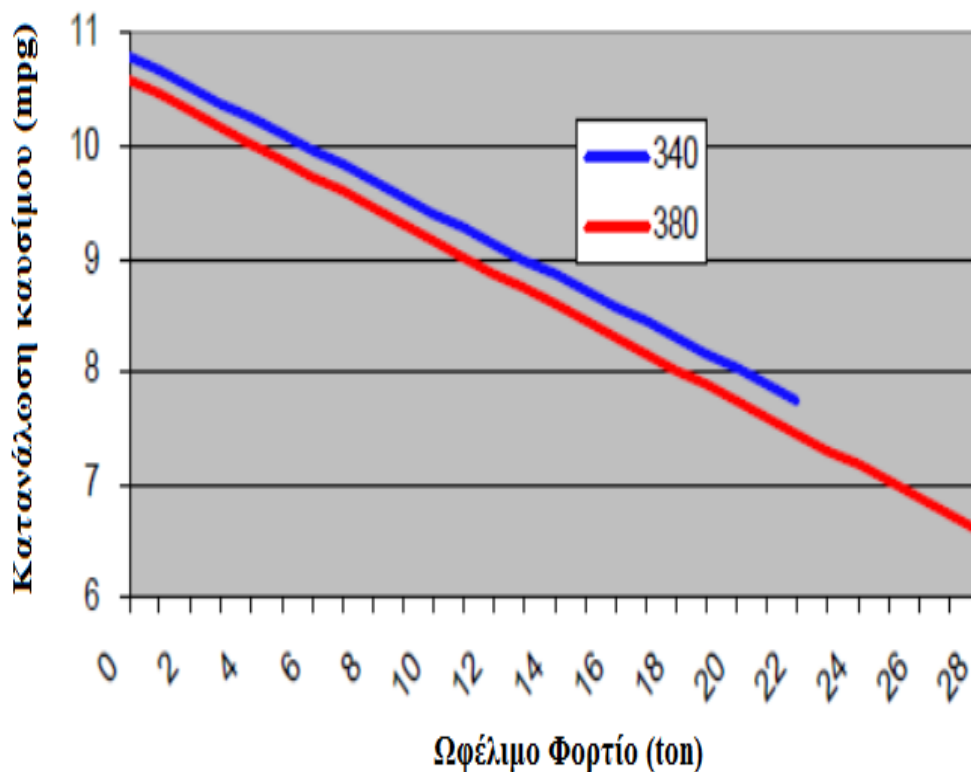
Μικτό βάρος οχήματος και ωφέλιμο φορτίο

Τόσο το συνολικό βάρος του οχήματος (μικτό βάρος), όσο και το βάρος του αμαξώματος (απόβαρο) και το βάρος του καθαρού φορτίου (ωφέλιμο φορτίο) που μεταφέρεται έχουν όπως είναι λογικό εξαιρετικά υψηλή επιρροή στην κατανάλωση καυσίμου, αφού η μηχανική αντίσταση κύλισης είναι ευθέως ανάλογη του βάρους. Όσον αφορά το μικτό βάρος σε συνάρτηση με το ωφέλιμο φορτίο, σε σειρά ερευνητικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν από το Υπουργείο Συγκοινωνιών του Ηνωμένου Βασιλείου σε συνεργασία και με άλλους φορείς, έγινε μια προσπάθεια ρεαλιστικής απεικόνισης της επίδρασης των παραπάνω επιμέρους μεγεθών στην κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 5: Κατανάλωση καυσίμου οχημάτων διαφορετικού μικτού βάρους, συναρτήσει του ωφέλιμου φορτίου [12]

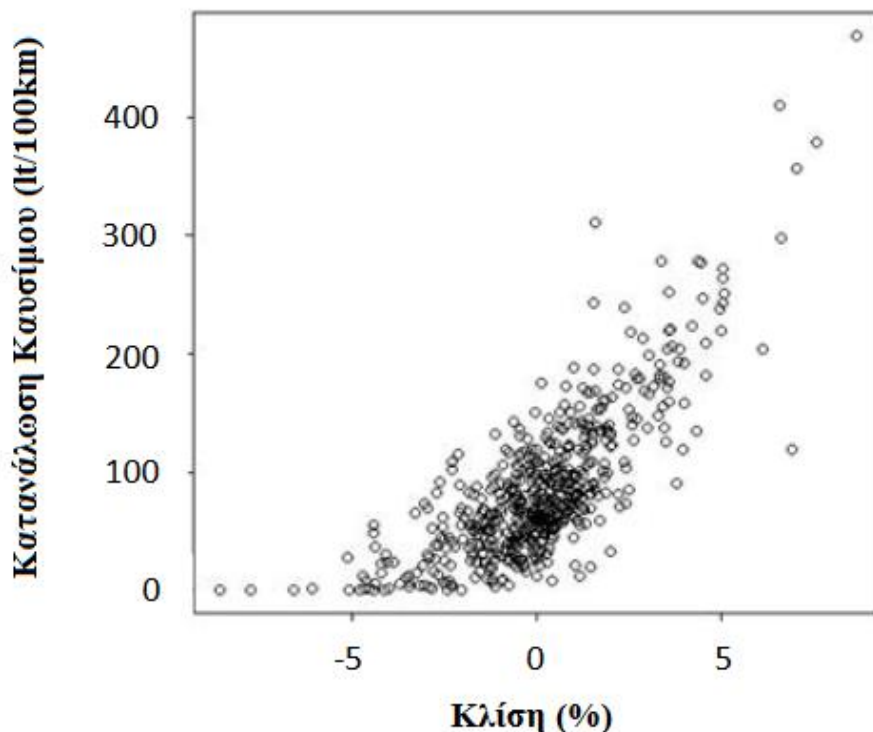
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός κατανάλωσης (mpg - μίλια ανά γαλόνι) μειώνεται όσο αυξάνεται το ωφέλιμο φορτίο του οχήματος, ενώ παράλληλα διαπιστώθηκε ότι διαφορετική ιπποδύναμη μεταξύ κοινών κατά τα άλλα χαρακτηριστικών οχημάτων, δεν επιδρά με πολύ διαφορετικό τρόπο στην αυξομείωση της κατανάλωσης. Στη συνέχεια υπέβαλλαν σε κύκλους οδήγησης φορτηγά οχήματα τριών διαφορετικών κατηγοριών βάρους (26, 32 και 44 τόνων) με κοινό όμως ωφέλιμο φορτίο. Τα αποτελέσματα, όπως απεικονίζονται και στα παρακάτω διαγράμματα, έδειξαν ότι όταν το ωφέλιμο φορτίο ξεπερνάει την οριακή τιμή των 17 περίπου τόνων, η μεταφορά του με όχημα μεγαλύτερου μικτού βάρους (32 ή 44 τόνων) οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση έως και 30%. Το γενικότερο συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι είναι οικονομικότερο και ενεργειακά αποδοτικότερο, τα οχήματα που κινούνται να μεταφέρουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο φορτίο [12].



Εικόνα 6: Κατανάλωση καυσίμου οχημάτων διαφορετικής ιπποδύναμης, συναρτήσεως του ωφέλιμου φορτίου [12]

Κλίση, επίκληση και οριζοντιογραφικές ακτίνες

Η κατά μήκος κλίση του άξονα του δρόμου στον οποία κινείται το όχημα υπεισέρχεται σαν παράμετρος, είτε άμεσα είτε έμμεσα, σε όλα τα μοντέλα τα οποία εξετάστηκαν. Αναλόγως όμως τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη, η ακρίβεια του δείκτη επιρροής της εμπεριέχει σε μερικές περιπτώσεις ενδεχόμενα σφάλματα. Ο τρόπος λειτουργίας της μηχανής του οχήματος είναι εντελώς διαφορετικός σε περίπτωση ανηφορικής ή κατηφορικής οδού. Στην πρώτη περίπτωση οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα αυξάνονται, κατεβάζοντας την σχέση μετάδοσης και έτσι η κατανάλωση αυξάνεται, ενώ στην δεύτερη περίπτωση και αφότου η αρνητική κλίση ξεπεράσει κάποια οριακή τιμή, η κατανάλωση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (μηδενική). Από δυναμικής άποψης, το βάρος του οχήματος αποτελεί είτε μια επιπρόσθετη δύναμη σ' αυτές που ήδη καλείται να υπερνικήσει το όχημα, σε περίπτωση ανηφορικού εδάφους, είτε μια βοηθητική δύναμη ίδιας φοράς με την κίνηση, σε περίπτωση κατηφορικού εδάφους. Είναι λοιπόν εύλογο, η παράμετρος της κλίσης να αντιπροσωπεύει έναν από τους βασικότερους παράγοντες στα μοντέλα κατανάλωσης καυσίμου ενός φορτηγού οχήματος.



Εικόνα 7: Διάγραμμα διασποράς τιμών κατανάλωσης καυσίμου (lt/100km) συναρτήσει της κλίσης [13]

Επομένως, η εξαγωγή ενός αναλυτικότερου προφίλ ανύψωσης της διαδρομής κρίνεται απαραίτητη προϋπόθεση για ακριβέστερη εκτίμηση της κατανάλωσης, σε αντίθεση με την χρήση γενικών διορθωτικών συντελεστών. Σημειώνεται, πως κατά την αύξηση της κατά μήκος κλίσης, η βαρυτικές δυνάμεις (μετατροπή της ενέργειας που καταναλώνεται σε δυναμική ενέργεια) μετατρέπονται στην πλέον υπεύθυνη παράμετρο κατανάλωσης. Σε αντίθεση με την κατά μήκος κλίση, η επίκληση, δηλαδή η εγκάρσια κλίση του δρόμου, καθώς και οι οριζοντιογραφικές καμπύλες της διαδρομής, δηλαδή η καμπυλότητα που δημιουργείται κατά την χάραξη μιας οδού και την κατακόρυφη προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο, δεν αποτελούν βασικούς παράγοντες κατανάλωσης. Αυτό συμβαίνει διότι χάρη στον ευνοϊκό γεωμετρικό σχεδιασμό των οδικών τμημάτων εξυπηρετούν περισσότερο την οδηγική ασφάλεια και άνεση. Επομένως, έχοντας ουσιαστικό υποβοηθητικό ρόλο, ο δείκτης επιρροής τους στην κατανάλωση κρίνεται αμελητέος, ειδικά στα σύγχρονα οδικά δίκτυα [14].

Υποχρεωτικές στάσεις

Κατά την μεταφορά αγαθών μέσω οδικών δικτύων, τόσο εντός συνόρων μιας χώρας, όσο και διασυνοριακά, ο οδηγός του φορτηγού οχήματος θα αναγκαστεί να πραγματοποιήσει έναν αριθμό υποχρεωτικών στάσεων ο οποίος ταυτίζεται με τον αριθμό των σταθμών διοδίων ή/και των σταθμών ελέγχου στα σύνορα κάθε χώρας που θα χρειαστεί να διασχίσει. Επιπλέον, δεδομένου της συχνά μεγάλης απόστασης της διαδρομής, οι οδηγοί υποχρεούνται βάσει κοινοτικής και εθνικής νομοθεσίας, να πραγματοποιήσουν στάσεις ανάπαυσης (π.χ. ο ημερήσιος χρόνος οδήγησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 9 ώρες) [15]. Οι επανεκκινήσεις που συνοδεύουν τις παραπάνω στάσεις έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην οικονομία καυσίμου, διότι το όχημα επιταχύνει, προκειμένου να αναπτύξει εκ νέου σταθερή ταχύτητα, λειτουργώντας σε χαμηλές σχέσεις μετάδοσης και υψηλές στροφές. Όσο λοιπόν ο αριθμός των στάσεων αυξάνεται και το όχημα υπόκεινται στην παραπάνω διαδικασία, η κατανάλωση καυσίμου ακολουθεί ανοδική πορεία.

Μηχανολογικά χαρακτηριστικά, είδος καυσίμου και νέες τεχνολογίες

Τα μηχανολογικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, και ως επακόλουθο του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του τύπου καυσίμου, αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία που επιδρούν στην κατανάλωση σε συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η θερμοδυναμική απόδοση είναι εκείνη που καθορίζει την ειδική κατανάλωση κάθε κινητήρα, και εξαρτάται από το σύστημα τροφοδοσίας, τα χαρακτηριστικά των θαλάμων καύσης, αλλά και την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης, μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων, των αξόνων μετάδοσης κίνησης και του διαφορικού για την κατανομή της ισχύος, μεταφέρει ενέργεια από την μηχανή στους τροχούς του οχήματος. Ο τύπος του κιβωτίου ταχυτήτων, είτε αυτός είναι συμβατικός (χειροκίνητο, αυτόματο, ημιαυτόματο κιβώτιο), είτε ανερχόμενης τεχνολογίας (κιβώτιο ταχυτήτων διπλού συμπλέκτη, κιβώτιο συνεχώς μεταβαλλόμενης μετάδοσης) παίζει πρωταρχικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος μετάδοσης. Τέλος, η ισχύς που απαιτείται από συσκευές πρόσθετων λειτουργιών ενός φορτηγού οχήματος (συμπιεστής κλιματιστικού, γεννήτρια, αντλία νερού, συμπιεστής αέρα, αντλία λαδιού, υδραυλικό τιμόνι κ.α.) αποτελεί μια ακόμη παράμετρο κατανάλωσης, λόγω όμως της μικρότερου βαθμού συμμετοχής της σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, μπορεί σε πρώτη φάση να αγνοηθεί [16].

Το είδος και η απόδοση του καυσίμου που χρησιμοποιείται από την μηχανή των οχημάτων αποτελεί με τη σειρά του καθοριστικό παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας και βάρους εκπεμπόμενων ρύπων. Παρόλο που η συντριπτική πλειοψηφία των βαρέων φορτηγών οχημάτων που προορίζονται για εμπορευματικές μεταφορές, εφοδιάζεται με μηχανές ντίζελ (σε ποσοστό που ξεπερνάει το 90%), διαφορετικοί τύποι καυσίμου, όπως η βενζίνη, το φυσικό αέριο, τα βιοκαύσιμα, το υγραέριο και το υδρογόνου αντιστοιχούν σε διαφορετικούς συσχετισμούς απόδοσης και κατανάλωσης καυσίμου [17]. Η επίδραση του τύπου καυσίμου, καθώς και της τεχνολογίας του κινητήρα είναι περισσότερο αισθητή κατά την μετατροπή της κατανάλωσης σε εκπεμπόμενους ρύπους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα, κάτι που θα αναφερθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

Αστάθμητοι παράγοντες

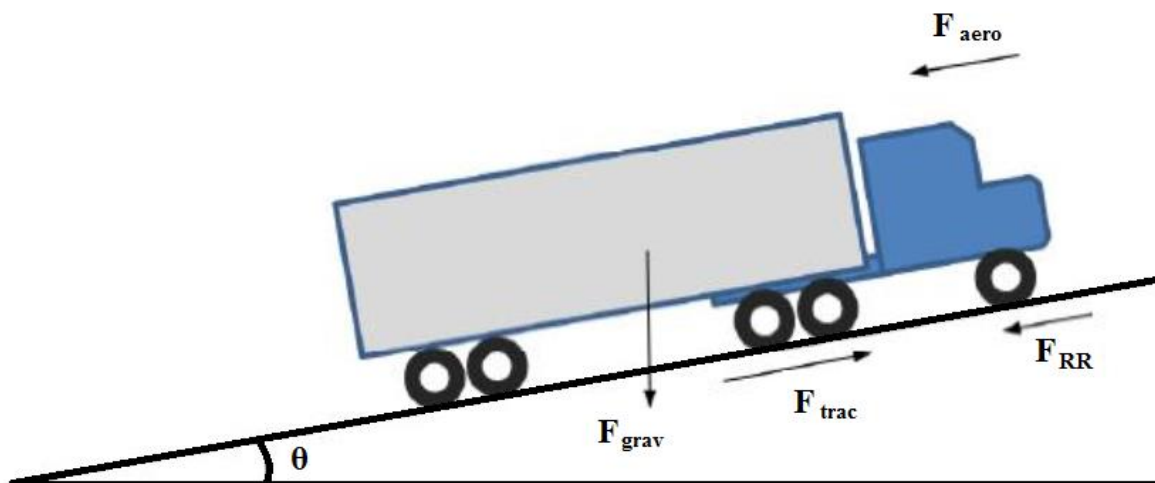
Για όσους παράγοντες αναφέρθηκαν μέχρι αυτό το σημείο, υπάρχει όπως επεξηγήθηκε δυνατότητα παραμετροποίησης τους με θεώρηση κάποιων χαρακτηριστικών (τυπικών) τιμών. Μια σειρά επιπλέον αστάθμητων παραγόντων επηρεάζουν ανοδικά την κατανάλωση καυσίμου, και παρόλο που ο τρόπος ποσοτικοποίησής τους σε ένα μοντέλο υπολογισμού είναι λόγω της φύσης τους, εξαιρετικά δύσκολος και επισφαλής, αξίζει να αναφερθούν. Μεταξύ λοιπόν αυτών των παραγόντων περιλαμβάνονται οι παρακάτω [18]:

- Κυκλοφοριακές συνθήκες (κυκλοφοριακή συμφόρηση, συχνές απρογραμματίστες στάσεις, απαγόρευση κυκλοφορίας, κακή σηματοδότηση και διαχείριση της κυκλοφορίας σε αστικές οδικές αρτηρίες)
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (χαμηλή θερμοκρασία – ανάγκη προθέρμανσης κινητήρα, υψηλή θερμοκρασία – αυξημένη χρήση κλιματιστικού, χαμηλά επίπεδα οξυγόνου σε υψηλά υψόμετρα – μείωση αποδοτικότητας κινητήρα, επιφυλακτική οδήγηση σε περίπτωση βροχής, χιονιού ή παγετού)
- Οδηγική συμπεριφορά (απότομες επιταχύνσεις ή φρεναρίσματα, απότομες στροφές, υψηλές ταχύτητες και μεγάλες διακυμάνσεις ταχύτητας, διάρκεια χρόνου του κινητήρα στο «ρελαντί»)
- Συντήρηση/κατάσταση του οχήματος (φθορά εξαρτημάτων, μικρότερη πίεση ελαστικών από την προτεινόμενη, πολυκαιρισμένα λάδια, φραγμένα φίλτρα αέρα)

2.1.2. Μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις οδικές μεταφορές

Το μοντέλο ORNL (Oak Ridge National Laboratory)

Η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος του Εθνικού Εργαστηρίου του Oak Ridge των ΗΠΑ συνολικής διάρκειας ενός έτους. Αντικείμενο του προγράμματος ήταν η ανάλυση της χρήσης φορτηγών οχημάτων και των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και την ποσότητα των ρύπων που εκπέμπουν, μέσω μετρήσεων βασικών στοιχείων όπως η ταχύτητα, η επιτάχυνση των οχημάτων και η κλίση των οδικών τμημάτων. Βασικός στόχος των παραπάνω διεργασιών ήταν, μελετώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών σε οδικές αρτηρίες ανά τις ΗΠΑ και σε διαφορετικές κατηγορίες φορτηγών οχημάτων, να εντοπιστούν προηγμένες και αποδοτικότερες τεχνολογίες που θα προσέφεραν καλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου, και άρα βελτίωση της ενεργειακής οικονομίας στον κλάδο των οδικών μεταφορών. Για αυτόν τον λόγο μάλιστα, οι πόροι του προγράμματος ενισχύθηκαν από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Το μοντέλο αποτελεί ένα από τα πλέον αναγνωρισμένα και αποδεκτά μοντέλα, όσον αφορά την ακρίβειά του, σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου ενός φορτηγού οχήματος. Η τεχνική έκθεση του συνολικού κύκλου διεργασιών και των αποτελεσμάτων του προγράμματος δημοσιεύτηκε από το εν



Εικόνα 8: Δυνάμεις που ασκούνται σε φορτηγό όχημα κατά την κίνησή του σε ανωφέρεια

λόγω εργαστήριο (ORNL) το 2011 και περιγράφει αναλυτικά τις μεθόδους εκτίμησης που αναπτύχθηκαν [19] [20].

Διερευνώντας τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας κατά την κίνηση ενός οχήματος, στόχος είναι η εύρεση τρόπων μείωσης των ενεργειακών απωλειών που σχετίζονται με την αεροδυναμική αντίσταση, την αντίσταση τριβής, το σύστημα πέδησης, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, καθώς και άλλους παραμέτρους. Ως επακόλουθο, βασικός πυλώνας του μοντέλου αποτελεί η ανάλυση της ενέργειας έλξης, η οποία απαιτείται προκειμένου να υπερνικηθούν οι παραπάνω αντιστάσεις. Η δύναμη έλξης (tractive force), όπως αυτή αναφέρεται, είναι η δύναμη που ασκείται κατά την επαφή του οχήματος με το οδόστρωμα και επιτρέπει στο όχημα να επιβραδύνει, να επιταχύνει και να υπερνικήσει τις εξωτερικές αντιστάσεις, δηλαδή την αντίσταση κύλισης και την αεροδυναμική αντίσταση και επιπροσθέτως, σε περίπτωση ανωφέρειας, την δύναμη της βαρύτητας. Όταν το όχημα επιταχύνει και άρα ο κινητήρας του καλείται να τροφοδοτήσει με ισχύ τους τροχούς, η δύναμη παίρνει θετική τιμή, ενώ αντίθετα όταν επιβραδύνει, η τιμή της γίνεται αρνητική. Η αεροδυναμική αντίσταση και η αντίσταση κύλισης είναι πάντοτε θετικές, ενώ η βαρυτική δύναμη είναι θετική στις ανωφέρειες και αρνητική στις κατωφέρειες. Το έργο της ελκτικής δύναμης αποτελεί την ενέργεια έλξης. Οι δυνάμεις¹ που ασκούνται σε φορτηγό όχημα κατά τη κίνησή του σε ανωφέρεια παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

Αναλύοντας τις παραπάνω δυνάμεις, και σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, προκύπτει η σχέση:

$$F_{trac} = m * \frac{dv}{dt} + m * g * \sin\theta + F_{aero} + F_{RR}$$

ενώ εκφράζοντας το έργο της δύναμης έλξης ως άθροισμα των έργων των αντιστάσεων και των μεταβολών της κινητικής και δυναμικής ενέργειας, σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, ισχύει:

¹ Faero: η αεροδυναμική αντίσταση
FRR: η αντίσταση κύλισης
Fgrav: η δύναμη της βαρύτητας
Ftrac: η δύναμη έλξης

$$\Delta E_{trac} = \frac{1}{2} * m * (v_2^2 - v_1^2) + m * g * (h_2 - h_1) + \Delta E_{aero} + \Delta E_{RR}$$

Η κατανάλωση καυσίμου που υπολογίζεται από το μοντέλο αναφέρεται στα διαστήματα κατά τα οποία η ελκτική δύναμη είναι θετική, εφόσον είναι ξεκάθαρο πως για τα συμβατικά φορτηγά οχήματα οι απαιτήσεις σε ενέργεια καυσίμου είναι υπαρκτές μόνο σε αυτές τις περιόδους. Βασιζόμενοι στο συμπέρασμα πως η συνολική κατανάλωση καυσίμου αποτελεί συνάρτηση της μηχανικής ενέργειας που απαιτείται κατά τις περιόδους όπου η ελκτική δύναμη είναι θετική, οι ερευνητές θεώρησαν αποδεκτή την παραδοχή σταθερής αποδοτικότητας του κινητήρα κατά τη διάρκεια της οδήγησης, παρά το γεγονός πως ο κινητήρας βρίσκεται σε εναλλασσόμενες καταστάσεις λειτουργίας. Λαμβάνεται λοιπόν μια τυπική τιμή θερμικής απόδοσης του κινητήρα ($\eta_{\text{κινητήρα}} = 0.42$). Παρόμοιες τυπικές τιμές δίνονται για την ποσοτικοποίηση και άλλων παραγόντων που οδηγούν σε απώλειες ενέργειας, όπως η ενέργεια που διοχετεύεται σε δευτερεύοντες λειτουργίες του φορτηγού, όπως το σύστημα κλιματισμού. Η χρήση αυτών των τιμών, σε μια προσπάθεια απλοποίησης της διαδικασίας και ενίσχυση της ευχρηστίας και της άνεσης στον υπολογισμό, και παρά τους πιθανούς φαινομενικά κινδύνους ανακρίβειας, αποδείχτηκε βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, ιδιαίτερα ικανοποιητική για την εκτίμηση της τελικής κατανάλωσης. Οι σχέσεις υπολογισμού των επί μέρους απαιτούμενων μεγεθών παρατίθενται στη συνέχεια, ξεκινώντας με την αντίσταση κύλισης, η οποία ισούται με:

$$F_{RR} = C_{RR} * m * g \quad (N)$$

όπου:

C_{RR}: συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα του οδοστρώματος και των ελαστικών (τυπική τιμή 0.007)

*m*g*: το μικτό βάρος του οχήματος (*m* σε kg)

ενώ το αντίστοιχο έργο της αντίστασης κύλισης θα ισούται με:

$$E_{RR,drive} = C_{RR} * m * g * \sum \Delta s_i \quad (J)$$

όπου:

s_i : το μήκος των σημείων της διαδρομής όπου το όχημα επιτάχυνε (σε m)

Η αεροδυναμική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$F_{aero} = C_D * A_f * 0.5 * \rho * v^2 \text{ (N)}$$

και το έργο της ισούται με:

$${}^2E_{aero,drive} = C_D * A_f * \int (0.5 * \rho * v^3)$$

Όπου:

C_D : συντελεστής αντίστασης επιφάνειας (τυπική τιμή 0.62)

A_f : το εμβαδόν της πρόσοψης του φορτηγού (τυπική τιμή 10 m²)

ρ : η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα (kg/m³)

Τελικά, η ενέργεια έλξης για μια διαδρομή θα ισούται με:

$$E_{trac} = E_{RR,drive} + E_{aero,drive} + \Delta W \text{ (J)}$$

όπου:

ΔW : η μεταβολή της μηχανικής ενέργειας (δυναμικής και κινητικής)

Τέλος, δεδομένης της μεθοδολογίας αλλά και των παραδοχών που περιεγράφηκαν παραπάνω, η σχέση που καταλήγει στη στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου σε λίτρα είναι η εξής:

$$F_{C,track} = \frac{1}{n_{engine} * LHV} * \left(\frac{E_{trac}}{n_{trans}} + E_{acces} \right), \quad E_{trac} \text{ σε MJ}$$

² το ολοκλήρωμα αφορά ολοκλήρωση ως προς τον χρόνο για τη διάρκεια της επιτάχυνσης

όπου:

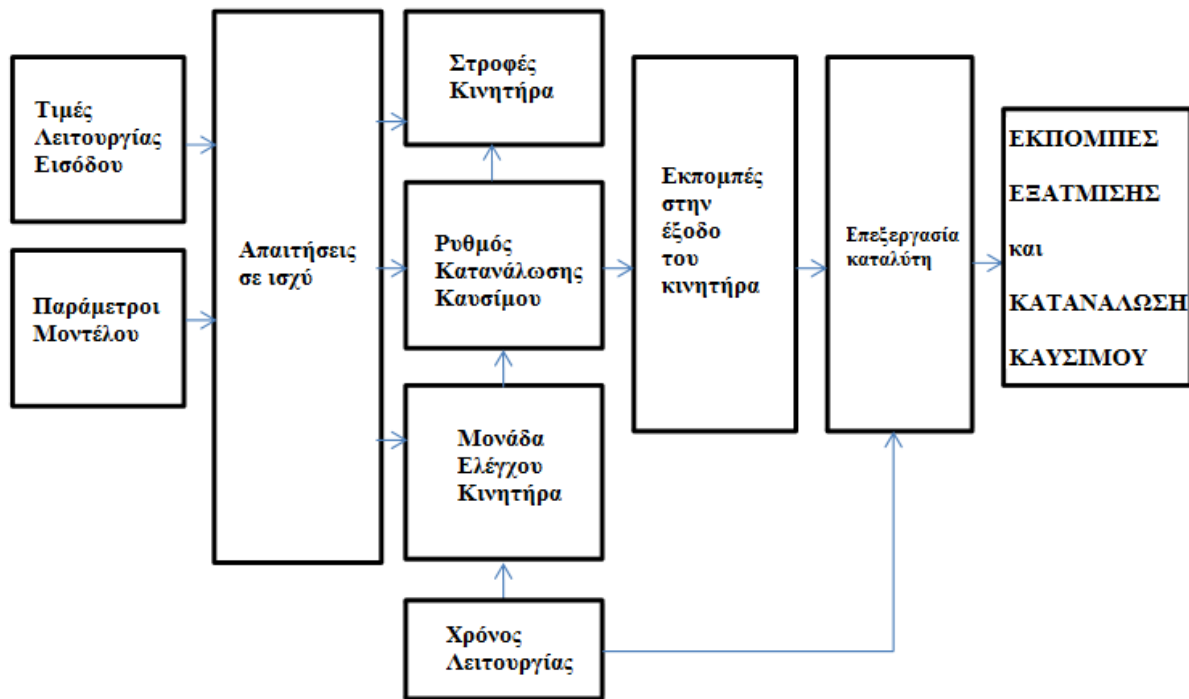
n_{engine} :	η θερμοδυναμική απόδοση του κινητήρα (τυπική τιμή 0.45)
LHV :	χαμηλότερη θερμογόνος θερμογόνος δύναμη (τυπική τιμή 35.8)
n_{trans} :	συντελεστής που αφορά το σύστημα κίνησης (τυπική τιμή 0.9)
E_{access} :	η ενέργεια που καταναλώνεται από τα αξεσουάρ του οχήματος (π.χ. ραδιόφωνο, κλιματισμός)

Το μοντέλο CMEM (Comprehensive Modal Emissions Modeling)

Η δημιουργία του μοντέλου CMEM [21] [22] [23]—είναι αποτέλεσμα συνεργασίας ερευνητών τριών αμερικανικών πανεπιστημίων: του Πανεπιστημίου Riverside της Καλιφόρνια, του Πανεπιστημίου του Michigan και του Πανεπιστημίου του Berkeley. Το αρχικό πεδίο εφαρμογής του μοντέλου εστίαζε στην ανάλυση εκπομπής ρύπων ελαφρών οχημάτων, ωστόσο, αργότερα επεκτάθηκε και συμπεριέλαβε μετρήσεις βαρέων φορτηγών οχημάτων. Η εκτίμηση των ρύπων βασίζεται σε τρεις συνιστώσες: τον ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου (FR), τις εκπομπές στην έξοδο του κινητήρα ($g_{emissions}/g_{fuel}$) και τον δείκτη μετεπεξεργασίας του καταλύτη (after-treatment pass fraction):

$$tailpipe\ emissions = FR * \left(\frac{g_{emissions}}{g_{fuel}} \right) * after - treatment\ pass\ fraction.$$

Οι δύο ομάδες συντελεστών εισόδου του μοντέλου είναι οι τιμές λειτουργίας εισόδου και οι παράμετροι του μοντέλου. Η πρώτη περιλαμβάνει την ταχύτητα, την επιτάχυνση, την κλίση του δρόμου και τα δευτερεύοντα φορτία του φορτηγού, ενώ τις παραμέτρους του μοντέλου αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως η μάζα, οι διαστάσεις, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, καθώς και στοιχεία που περιγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες κίνησης, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία κ.α. Η ροή των υπολογισμών παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής υπολογισμών του μοντέλου για βαρέα φορτηγά οχήματα [21]

Η συνολική ελκτική ισχύς (σε kW) που απαιτείται για την κίνηση του οχήματος προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{trac} = (M * a + M * g * \sin\theta + 0.5 * C_D * A * \rho * v + M * g * C_r * \cos\theta) * \frac{v}{1000}$$

όπου:

- v : η ταχύτητα του οχήματος (m/s)
- a : η επιτάχυνση του οχήματος (m/s²)
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²)
- C_R : η αντίσταση κύλισης
- ρ : η πυκνότητα του αέρα (kg/m³)
- C_D : ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης
- A : το εμβαδόν της πρόσοψης (m²)
- M : η μάζα του οχήματος (kg)

Ενώ η τελική απαιτούμενη ισχύς ισούται με:

$$P = \frac{P_{trac}}{n_t} + P_{acc}$$

όπου:

n_t : η αποδοτικότητα του συστήματος μετάδοσης κίνησης

P_{acc} :: η απαιτούμενη ισχύς για εξαρτήματα του οχήματος

Οι τελικές σχέσεις υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου δίνονται ως εξής:

$$FR = \left(k * N * V + \frac{P}{n} \right) * \frac{1}{35.8} * (1 + b_1 * (N - N_0)^2)$$

$$K = K_0 * (1 + C * (N - N_0))$$

$$N_0 = 30 * \sqrt{\frac{3.0}{v}}$$

όπου:

FR : στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου (g/sec)

k : η τριβή του κινητήρα

N : οι στροφές του κινητήρα (στροφές ανά δευτερόλεπτο)

V : κυβισμός (lt)

n : ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα

b_1, C : σταθερές με συνήθεις τιμές 10^{-4} , 0.00125

35.8: η θεωρούμενη ως χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη (σε KJ/g)

Το μοντέλο P.M.G. (PERE – MOVES – GREET)

Πρόκειται για μοντέλο που σχεδιάστηκε ως συνδυασμός ήδη υπαρχόντων μοντέλων και βάσεων δεδομένων, προκειμένου να καλύψει μεθοδολογικά κενά και να εξελιχθεί σε ένα πλήρες εργαλείο εκτίμησης της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπεμπόμενων ρύπων οδικών οχημάτων. Όπως προμηνύουν τα αρχικά του προγράμματος PERE (Physical Emission Rate Estimator), το μοντέλο χρησιμοποιεί βασικές αρχές φυσικής και κινηματικής προκειμένου να μοντελοποιήσει το σύστημα προώθησης του οχήματος και την επίδραση της μηχανής εσωτερικής καύσης [24]. Ως παραμέτρους εισόδου δέχεται χαρακτηριστικά μεγέθη του οχήματος, το οποίο στη συνέχεια υποβάλλεται σε κύκλους οδήγησης ορισμένους από τον χρήστη με στόχο τον υπολογισμό των τιμών κατανάλωσης καυσίμου ανά δευτερόλεπτο. Η συνεργασία των ερευνητών στόχευε στην δημιουργία ενός μοντέλου που θα ήταν ικανό να προσομοιώσει την απόδοση παρόντων και μελλοντικών τεχνολογιών σχεδιασμού οχημάτων, με γνώμονα την μείωση των εκπομπών προς το περιβάλλον, γι' αυτό και χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ. Ωστόσο, το γεγονός ότι το πεδίο εφαρμογής του περιλαμβάνει τόσο συμβατικά οχήματα βαριάς ή ελαφριάς χρήσης (βενζινοκίνητα, ντιζελοκίνητα), όσο και οχήματα πιο προηγμένης τεχνολογίας (υβριδικά, ηλεκτρικά), το καθιστά ανακριβές σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι υπολογισμοί στηρίζονται και πάλι στην θεωρία της ενέργειας έλξης. Η απαιτούμενη ισχύς (Watts) για την κίνηση του οχήματος προκύπτει από την υπερνίκηση της αδράνειας, της κλίσης του δρόμου, της τριβής των ελαστικών και των αεροδυναμικών αντιστάσεων, που προσμετρώνται κατά την πραγματοποίηση πολλαπλών κύκλων οδήγησης, και αποτελεί την ελκτική ισχύ:

$$P_b = VSP * m = m * v * (a * (1 + \epsilon) + g * grade + g * C_R) + 0.5 * \rho * C_D * A_f * v^3$$

όπου:

v : η ταχύτητα του οχήματος (m/s)

a : η επιτάχυνση του οχήματος (m/s²)

ϵ : παράγοντας που αντιπροσωπεύει τις περιστρεφόμενες μάζες

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²)

$grade$: η κλίση του δρόμου

C_R :	η αντίσταση κύλισης
ρ :	η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3)
C_D :	ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης
A_f :	η μετωπική επιφάνεια του οχήματος (m^2)
m :	η μάζα του οχήματος (ton)
VSP :	απαίτηση σε ισχύ για το όχημα

Βάσει των παραπάνω, το μοντέλο καταλήγει στον υπολογισμό της στιγμιαίας κατανάλωσης καυσίμου σύμφωνα με την σχέση:

$$FR = \varphi * \frac{\left(k * N * V + \frac{\frac{P_b}{n_t} + P_{acc}}{n} \right)}{LHV}$$

όπου:

φ :	ο λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου (τυπική τιμή 1 για την βενζίνη)
k :	η τριβή του κινητήρα
N :	οι στροφές του κινητήρα
V :	η χωρητικότητα του κινητήρα
n_t :	η αποδοτικότητα του συστήματος μετάδοσης
n :	η αποδοτικότητα του κινητήρα
P_{acc} :	η απαιτούμενη ισχύς για εξαρτήματα του οχήματος
LHV :	η χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου

Το μοντέλο DSLV του Γερμανικού Συνδέσμου Διαμεταφορέων

Πρόκειται για τη μέθοδο που προτείνεται στον οδηγό του Γερμανικού Συνδέσμου Διαμεταφορέων με τίτλο «Calculating GHG Emissions for freight forwarders and logistic services» [25]. Το μοντέλο συνιστά μια πιο απλοϊκή προσέγγιση σε σύγκριση με όσα μοντέλα παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ακολουθεί το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16258, το οποίο καθιερώνει μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό και τη δήλωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με οποιαδήποτε μεταφορά (επιβατική ή εμπορευματική). Περιλαμβάνει γενικές αρχές, ορισμούς, μεθόδους υπολογισμού, κανόνες επιμερισμού και προτεινόμενα δεδομένα με σκοπό να προωθήσει τυποποιημένους, ακριβείς, αξιόπιστους και επαληθεύσιμους υπολογισμούς καταναλώσεων και εκπομπών. Μέχρι τη δημοσίευσή του στα τέλη του 2012, δεν υπήρχε κανένα αντίστοιχο πρότυπο, γεγονός που περιέπλεκε σημαντικά την διαδικασία υπολογισμού του αποτυπώματος άνθρακα των μεταφορών. Ωστόσο, το πρότυπο περιλαμβάνοντας σχετικά απλές, τυποποιημένες διαδικασίες επιτρέπει τον υπολογισμό των WTW και TTW εκπομπών (όροι που θα επεξηγηθούν στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο) με μόνο δεδομένο την κατανάλωση καυσίμων, χωρίς να υστερεί από άποψη πολυπλοκότητας και θεωρητικού υποβάθρου. Οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου είναι οι εξής:

- το φορτίο των φορτηγών
- η απόσταση της οδικής μεταφοράς
- ένας χαρακτηρισμός του εδάφους (λοφώδες / επίπεδο) που αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής ώστε να γίνει διόρθωση της κατανάλωσης ανάλογα με την κλίση
- το ποσοστό της διαδρομής εντός αστικού δικτύου (P), που είναι ο λόγος του μήκους της διαδρομής εντός του αστικού δικτύου προς τη συνολική διαδρομή της μεταφοράς ώστε να γίνει διόρθωση της κατανάλωσης που είναι αυξημένη κατά 40% για κίνηση σε αστικούς δρόμους σε σχέση με τους αυτοκινητόδρομους

Η μέθοδος αναφέρει ότι παρόλο που οι ρύποι από τις οδικές μεταφορές έχουν μειωθεί δραστικά τα τελευταία χρόνια, η μέση κατανάλωση καυσίμου έχει παραμείνει σταθερή μετά την εισαγωγή του προτύπου EURO III. Γι' αυτό το λόγο, οι τιμές της

κατανάλωσης ανά t·km δεν διαφοροποιούνται, επί του παρόντος, ανάλογα με το πρότυπο, του οποίου τα όρια το όχημα πληροί, ή με την ηλικία του οχήματος. Μόνο πολύ παλιά φορτηγά οχήματα έχουν υψηλότερες τιμές κατανάλωσης από αυτές που προκύπτουν από τη μέθοδο.

Βάσει των παραπάνω, υπολογίζεται η κατανάλωση του φορτηγού οχήματος για κάθε ομάδα εμπορευματοκιβωτίων ανάλογα με την κλίση και το ωφέλιμο φορτίο τους, χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα που ακολουθεί, εφαρμόζοντας τον τύπο:

$$E [l/100km] = A [l/100km] + B [l/100km] * \frac{N [t]}{C [t]}$$

όπου:

- E Κατανάλωση καυσίμου φορτηγού σε l/100km ανάλογα με την κλίση και το μεταφερόμενο ωφέλιμο φορτίο*
- A Κατανάλωση κενού οχήματος σε l/100km*
- B Διαφορά στην κατανάλωση μεταξύ πλήρως έμφορτου και κενού οχήματος σε l/100 km*
- N Το ωφέλιμο φορτίο της ομάδας εμπορευματοκιβωτίων που εξετάζεται σε τόνους*
- C Το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο του φορτηγού (26t)*

Πίνακας 1: Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο φορτηγού, μέσες τιμές κατανάλωσης κενού οχήματος και διαφορές κατανάλωσης κενού και πλήρως έμφορτου οχήματος για διαφορετικές κατηγορίες κλίσης εδάφους [25]

	Λοφώδες έδαφος		Επίπεδο έδαφος		Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο tonnes
	Κατανάλωση κενού οχήματος	Διαφορά στην κατανάλωση μεταξύ πλήρως έμφορτου και κενού οχήματος	Κατανάλωση κενού οχήματος	Διαφορά στην κατανάλωση μεταξύ πλήρως έμφορτου και κενού οχήματος	
	l/100km	l/100km	l/100km	l/100km	
Φορτηγό μικτού βάρους 24-40t	22,7	14,4	21,5	8,2	26

Αφού υπολογιστεί η παραπάνω κατανάλωση, διορθώνεται ανάλογα με το ποσοστό της συνολικής διαδρομής που λαμβάνει χώρα σε αστικό δίκτυο, όπου η κατανάλωση θεωρείται αυξημένη κατά 40 %. Η διόρθωση αυτή γίνεται σύμφωνα με τον τύπο:

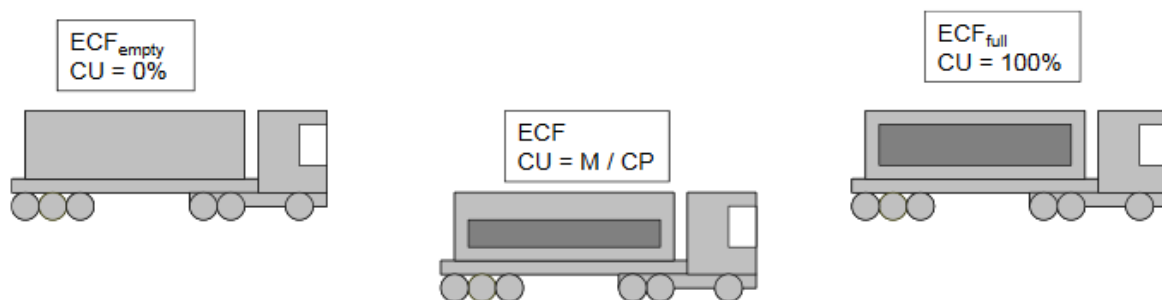
$$F [l] = D [km] * \frac{(100 - P)}{100} * \frac{E [l/100km]}{100} + D [km] * \frac{P}{100} * CF * \frac{E [l/100km]}{100}$$

όπου:

- F* η τελική κατανάλωση καυσίμου του φορτηγού σε l/100km για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης μεταφοράς
- D* η απόσταση της μεταφοράς σε km
- P* το ποσοστό της διαδρομής στο σύνολό της που πραγματοποιείται σε αστικές οδούς
- E* η κατανάλωση καυσίμου φορτηγού σε l/100km ανάλογα με την κλίση και το μεταφερόμενο ωφέλιμο φορτίο, που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα
- CF* ο συντελεστής διόρθωσης της κατανάλωσης για κυκλοφορία αστικού δικτύου (λαμβάνεται ίσος με 1.4 για φορτηγά οχήματα μικτού βάρους 24-40t)

Το μοντέλο EcotransIT (Ecological Transport Information Tool for World Transports)

Το μοντέλο ολοκληρώθηκε το 2010, στα πλαίσια ανάπτυξης του διαδικτυακού εργαλείου EcotransIT World, το οποίο παρέχει δυνατότητες εκτίμησης κατανάλωσης τόσο οδικών, όσο και σιδηροδρομικών, θαλάσσιων και εναέριων εμπορευματικών μεταφορών [26].—Οι ερευνητές προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν αντιπροσωπευτικά την κατανάλωση καυσίμου και τους εκπεμπόμενους ρύπους από την κίνηση φορτηγών οχημάτων στράφηκαν στη συγκέντρωση και ανάλυση υπέρογκων στατιστικών στοιχείων, μετρήσεων και πινάκων κατηγοριοποίησης των οχημάτων. Η διαδικασία υπολογισμού που χρησιμοποιεί το μοντέλο ταυτίζεται κατά κύριο λόγο με αυτή του μοντέλου MOVES (βλέπε P.M.G.) και οι συντελεστές εκπομπών προέρχονται από την βάση δεδομένων HBEFA (HBEFA/INFRAS 2014), το πρωτόκολλο GHG και σε αναλύσεις της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (EPA). Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στον συντελεστή φόρτωσης του οχήματος και τον συντελεστή κενών δρομολογίων, καταλήγοντας σε σχέση υπολογισμού της μορφής:



Εικόνα 10: Συντελεστής φόρτωσης CU

$$ECF = ECF_{empty} + (ECF_{full} - ECF_{empty}) * CU$$

$$CU = M/CP$$

όπου:

ECF: η τελική κατανάλωση ενέργειας έμφορτου οχήματος

ECF_{empty}: η τελική κατανάλωση ενέργειας κενού οχήματος

ECF_{full}: η τελική κατανάλωση ενέργειας πλήρως έμφορτου οχήματος

M: η μάζα του φορτίου (ton)

CP: το όριο ωφέλιμου φορτίου του οχήματος (ton)

CU: ο λόγος της μάζας του φορτίου προς το όριο ωφέλιμου φορτίου (συντελεστής φόρτωσης)

Βάσει της διαδρομής που επιλέγεται, το εργαλείο διαχωρίζει αυτόματα τα τμήματα της διαδρομής που ανήκουν σε υπεραστικό ή αστικό δίκτυο (αυτοκινητόδρομος ή άλλος δρόμος), λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές τιμές μέσης ταχύτητας και επιτάχυνσης, βάσει των συνθηκών κυκλοφορίας. Τέλος, το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή διόρθωσης, ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους, χαρακτηρίζοντας την χώρα στην οποία πραγματοποιείται το κύριο μέρος της μεταφοράς ως επίπεδη, λοφώδη ή ορεινή (με συντελεστή 0.95, 0 ή 1,05 αντίστοιχα). Μ αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζει εμμέσως και την επίδραση της κλίσης στην κατανάλωση.

2.2. Κατανάλωση ενέργειας και εκπεμπόμενοι ρύποι στις σιδηροδρομικές μεταφορές

2.2.1. Παράμετροι κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού

Ταχύτητα κίνησης

Η παράμετρος της ταχύτητας κίνησης του συρμού υπεισέρχεται κυρίως στην αεροδυναμική αντίσταση, η οποία αποτελεί μέρος της αντίστασης κύλισης του συρμού που θα αναλυθεί εκτενέστερα στην συνέχεια. Υπενθυμίζουμε ότι αυξανόμενη της ταχύτητας αυξάνεται η ανάγκη σε ενέργεια στο τετράγωνο. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιούνται προσπάθειες ανάπτυξης ολοένα πιο προηγμένων συστημάτων λογισμικών ηλεκτρονικών υπολογιστών, προκειμένου να υπολογίζεται ανά περίπτωση και διαδρομή η βέλτιστη ταχύτητα με στόχο την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής εξοικονόμησης ενέργειας. Τέλος, τεχνικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού, όπως η μετωπική επιφάνεια των μηχανών έλξης και η μορφή των ελκόμενων οχημάτων (ανοιχτά ή κλειστά) επηρεάζουν με τη σειρά τους την αεροδυναμική αντίσταση του συρμού.

Μικτή μάζα συρμού, ωφέλιμο φορτίο και τρόπος φόρτωσης

Η αύξηση της συνολικής μάζας του συρμού και άρα και του κυκλοφοριακού έργου, οριζόμενου ως η μεταφορική απόσταση επί τη μεταφερόμενη μάζα συμπεριλαμβανομένης και της ίδιας μάζας των συρμών, οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωσή ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμου [27]. Μια εξίσου σημαντική παράμετρος στις επιβατικές, αλλά ιδίως στις εμπορευματικές μεταφορές είναι ο λόγος της συνολικής μεταφερόμενης μάζας του συρμού προς το ωφέλιμο φορτίο. Όσο αυξάνουμε το ωφέλιμο φορτίο προς μεταφορά, κρατώντας σταθερή την μάζα των μηχανών έλξης, η κατανάλωση ανά τόνο φορτίου ανά χιλιόμετρο όλο και μειώνεται. Εύλογα λοιπόν, οι σιδηροδρομικές επιχειρήσεις καταβάλλουν προσπάθειες μείωσης του παραπάνω λόγου, αναπτύσσοντας μεθοδολογίες κατασκευής φορταμαξών με όσο το δυνατόν μικρότερο απόβαρο [28]. Τέλος, καθοριστικός παράγοντας είναι ο τρόπος φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων σε έναν συρμό. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η ανάπτυξη αλγορίθμων με στόχο την βέλτιστη δυνατή φόρτωση διαφορετικών τύπων μεταφερόμενων μονάδων σε διαφορετικά είδη φορταμαξών, συνυπολογίζοντας τους περιορισμούς στην σύνθεση

του συρμού, την κατάσταση της υποδομής (επιτρεπόμενα φορτία ανά άξονα), τις διατομές των σηράγγων και την ασφάλεια [29].

Στάσεις διαδρομής και επιτάχυνση συρμού κατά την εκκίνηση

Κατά την σιδηροδρομική μεταφορά εμπορευμάτων, ο συρμός θα χρειαστεί να πραγματοποιήσει έναν αριθμό ενδιάμεσων στάσεων, ο οποίος θα ισούται με τον αριθμό των διαφορετικών προορισμών των μετακινούμενων αγαθών, τα σημεία μεταξύ συνόρων χωρών (έλεγχος, αλλαγή μηχανής βάσει κανονισμών και περιορισμών κ.α.), σημεία απότομων διασταυρώσεων και διακλαδώσεων των γραμμών, καθώς και τυχόν έκτακτων στάσεων. Ειδικά στις διατροπικές μεταφορές, η συνολική διαδικασία της μεταφόρτωσης από το ένα μέσο στο άλλο αποτελεί κρίσιμο, λόγω των ζητημάτων που ανακύπτουν, αλλά αναπόσπαστο στοιχείο. Η επίδραση του αριθμού των στάσεων έγκειται, μεταξύ άλλων, στο ότι ο συρμός καταναλώνει σημαντικό ποσό ενέργειας για να υπερνικήσει τις αδρανειακές δυνάμεις (αδρανειακή αντίσταση) και να εκκινήσει και στη συνέχεια να επιταχύνει για να κινηθεί με μια σταθερή ταχύτητα. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός ότι καταβάλλονται, από πλευράς σιδηροδρομικών οργανισμών και επιχειρήσεων, προσπάθειες εισαγωγής νέων τεχνολογιών κατασκευής σταθμών με στόχο την βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας [30].

Κλίση σιδηροδρομικής γραμμής (Αντίσταση γραμμής)

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας από έναν σιδηροδρομικό συρμό είναι και εδώ η κλίση της σιδηροδρομικής γραμμής (αντίσταση κλίσης). Η πλειοψηφία των μοντέλων που εξετάστηκαν λαμβάνουν υπόψη την κλίση είτε έμμεσα, μέσω συντελεστών διόρθωσης βάσει ενός χαρακτηρισμού του εδάφους (λοφώδες, ορεινό, επίπεδο), είτε άμεσα μέσω της υψομετρικής διαφοράς αρχής και τέλους της διαδρομής ή μέσω εξαγωγής του αναλυτικού προφίλ διαμόρφωσης των κλίσεων σε κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής. Πέρα από την κλίση, οι οριζοντιογραφικές καμπύλες παίζουν επίσης ρόλο (αντίσταση καμπύλης και αλλαγών) ενώ κι άλλοι παράγοντες όπως το είδος των σιδηροτροχιών (συνεχώς συγκολλημένες κτλ.), οι υπερυψώσεις ή τυχόν φθορές της σιδηροδρομικής γραμμής συμμετέχουν στην διαμόρφωση της τελικής κατανάλωσης.

Αντίσταση κύλισης συρμού

Η ειδική αντίσταση κύλισης ολόκληρου του συρμού αποτελεί συνάρτηση των επιμέρους ειδικών αντιστάσεων κύλισης των μηχανών έλξης και των εμπορικών ελκόμενων οχημάτων, και συνεπώς του αντίστοιχου βάρους τους και του συνολικού, καθώς και του αριθμού των μηχανών έλξης. Συγκεκριμένα, ισχύει:

$$W_{KY\Lambda,\Sigma} = \frac{n * W_{ME\Lambda} + W_{KY\Lambda,EM\Pi} * G_{E\Lambda K}}{G_{\Sigma}}$$

Όπου:

$W_{KY\Lambda,\Sigma}$: η ειδική αντίσταση κύλισης ολόκληρου του συρμού

n : ο αριθμός των μηχανών έλξης

$W_{ME\Lambda}$: η αντίσταση κύλισης της μηχανής έλξης [N]

$W_{KY\Lambda,EM\Pi}$: η ειδική αντίσταση κύλισης εμπορικών ελκόμενων οχημάτων [%o]

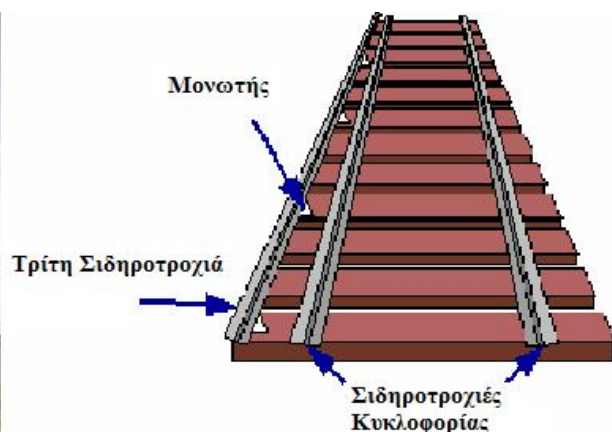
$G_{E\Lambda K}$: το βάρος των ελκόμενων οχημάτων [kN]

G_{Σ} : το συνολικό βάρος του συρμού [kN]

Η αντίσταση κύλισης των μηχανών έλξης είναι συνάρτηση του βάρους που αναλαμβάνουν οι κινητήριοι τροχοί και της ταχύτητας του συρμού, ενώ η αντίσταση κύλισης των εμπορικών ελκόμενων οχημάτων είναι συνάρτηση του συντελεστή c_0 (αντιπροσωπεύει την τριβή στην έδραση των αξόνων), του συντελεστή m (κλειστά ή ανοιχτά οχήματος και αεροδυναμική) και της ταχύτητας του συρμού. Όσον αφορά τον απαιτούμενο αριθμό μηχανών έλξης, ο τρόπος υπολογισμού παρατίθεται κατά την περιγραφή των σχέσεων του αναλυτικού μοντέλου Rail_NTUA (βλέπε ενότητα 2.2.2). Η διαμόρφωση της αντίστασης κύλισης ενός εμπορευματικού συρμού είναι όπως γίνεται αντιληπτό πολυπαραγοντικής φύσης, αφού η διαδικασία υπολογισμού της συνδέεται με μια σειρά αλληλεξαρτώμενων μεγεθών και σταθερών, βάσει της κατασκευής και λειτουργίας του.

Σύστημα έλξης, νέες τεχνολογίες και λειτουργικές αλλαγές

Το είδος του συστήματος έλξης του συρμού παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας. Στο σημείο αυτό, οι σιδηροδρομικές μεταφορές και οι εκπεμπόμενοι ρύποι που αντιστοιχούν σε αυτές διαφοροποιούνται δραματικά με την εξέλιξη των ηλεκτρομηχανών έλξης, έναντι των ντιζελομηχανών ανά την Ευρώπη και τον κόσμο. Στον αντίποδα, όπως προαναφέρθηκε η χρήση του πετρελαίου ως καύσιμο από την συντριπτική πλειοψηφία των βαρέων φορτηγών οχημάτων καθιστά τις οδικές μεταφορές κατά βάση περισσότερο ρυπογόνες, διότι τα εναλλακτικά είδη καυσίμου, όπως η βενζίνη, το φυσικό αέριο και τα βιοκαύσιμα υστερούν για την ώρα από άποψης κόστους ή αποδοτικότητας. Στην περίπτωση όμως των σιδηροδρομικών μεταφορών, ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης των ηλεκτρομηχανών, οδηγεί στην θεώρηση της ηλεκτροκίνησης ως του οικονομικότερου και αποτελεσματικότερου τρόπου λειτουργίας ενός σιδηροδρομικού δικτύου, υπό τον όρο ότι υπάρχει διαθέσιμη φθηνή ηλεκτρική ενέργεια και ότι η πυκνότητα της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας δικαιολογεί την απαιτούμενη επένδυση εξηλεκτισμού.



Εικόνα 11: Στοιχεία συστήματος ηλεκτροκίνησης (υποσταθμός έλξης - εναέρια γραμμή και «τρίτη σιδηροτροχιά»)[31]

Η διαφορά απόδοσης των δύο ειδών έγκειται στο γεγονός ότι οι ηλεκτρομηχανές είναι απλώς μηχανές μετατροπής και όχι παραγωγής ενέργειας. Αντλώντας ενέργεια από μία ειδικά διαμορφωμένη «τρίτη σιδηροτροχιά» ή μέσω εναέριας γραμμής (παντογράφος), η οποία ακολουθεί παράλληλα σιδηροτροχιές κυκλοφορίας, την μετασχηματίζουν στη μορφή που απαιτείται και αναπτύσσουν συχνά ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική τους, προκειμένου να εκκινήσουν

την έλξη ενός βαρέως συρμού ή να ανέβουν μια έντονη κλίση με μεγάλη ταχύτητα. Επιπλέον, στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται η αθόρυβη λειτουργία τους, το χαμηλό κόστος συντήρησης και η υψηλότερη ωφέλιμη ζωή σε σχέση με τις ντιζελομηχανές [31].

Ανεξαρτήτως του είδους συστήματος έλξης, η τεχνολογική πρόοδος και ορισμένες λειτουργικές αλλαγές που λαμβάνουν τόπο κατά την εξέλιξη των σιδηροδρομικών μεταφορών, οδηγούν σε ολοένα και μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης και κατ' επέκταση των παραγόμενων ρύπων. Η τοποθέτηση νέων ενεργειακά πιο αποδοτικών μηχανών έλξης, η αναπαλαίωση ή αντικατάσταση παλαιών με μηχανές που διαθέτουν δύο ή τρεις ανεξάρτητους κινητήρες για διαχείριση της λειτουργίας τους σε αναλογία με την απαιτούμενη ισχύ, οδηγούν σε μείωση των μεγάλων ποσών ενέργειας, τόσο κατά την κίνηση, όσο και για την διάρκεια που οι μηχανές βρίσκονται ακινητοποιημένες («ρελαντί»). Τέλος, η εκτεταμένη πλέον τοποθέτηση των μηχανών έλξης στο μέσον αμαξοστοιχιών για να μειωθεί η συνολική ισχύς που απαιτείται για την κίνησή τους, η βελτίωση της λίπανσης των σιδηροτροχιών για τη μείωση της τριβής ή η χρήση προηγμένων λογισμικών υποβοήθησης της ασφάλειας, μέσω εντοπισμού ελαττωμάτων που σπαταλούν ενέργεια, είναι κάποιες από τις λειτουργικές αλλαγές που πραγματοποιούνται με το πέρασ του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας [32].

Αστάθμητοι παράγοντες

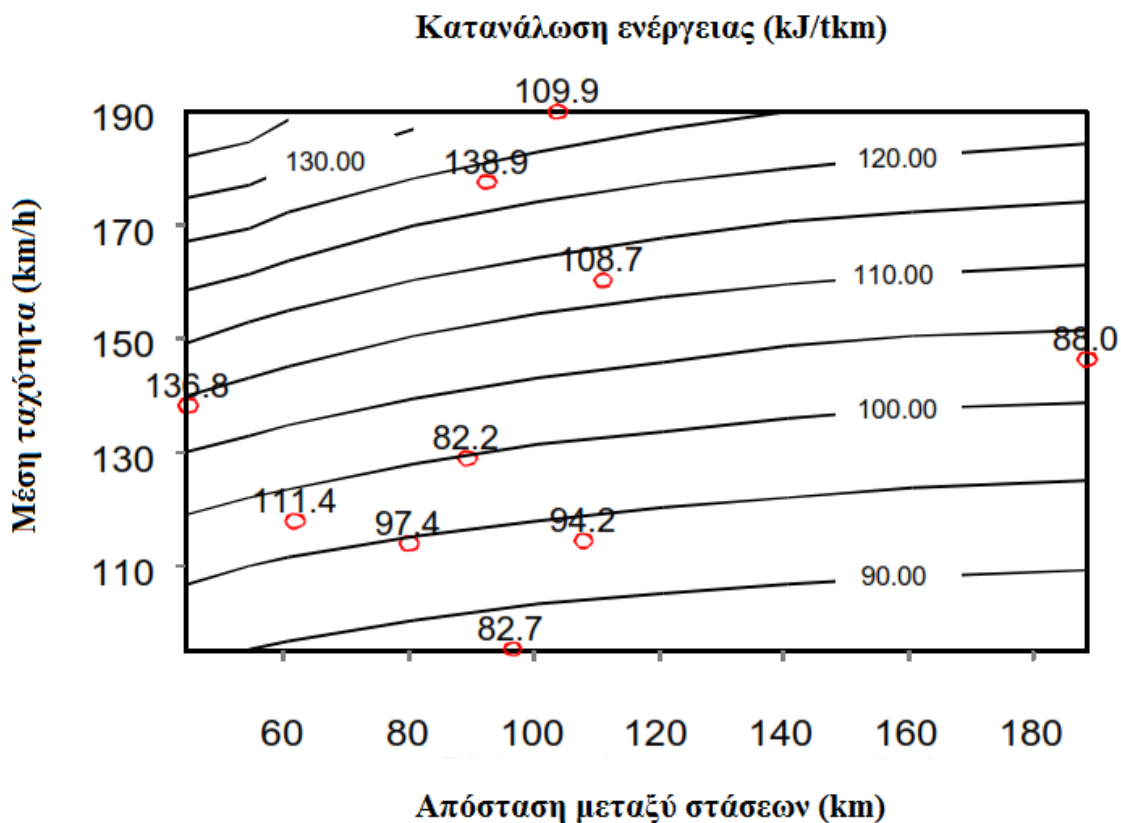
Σε αντιστοιχία με την περίπτωση των φορτηγών οχημάτων, οι αστάθμητοι παράγοντες δεν είναι αμελητέοι ούτε στη περίπτωση των σιδηροδρομικών συρμών. Οι κυριότεροι σχετίζονται με τα παρακάτω:

- Σηματοδότηση και σύνδεση των γραμμών
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, άνεμος)
- Εκπαίδευση / οδηγική συμπεριφορά μηχανοδηγών
- Συντήρηση μηχανών έλξης και μόνιμων εγκαταστάσεων ηλεκτροκίνησης
- Επιλογή συστήματος έλξης και τρόπος διάταξης και φόρτωσης (αλγόριθμος φόρτωσης, ηλεκτροκίνηση/ντιζελοκίνηση)

2.2.2. Μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων για τις σιδηροδρομικές μεταφορές

Απλοποιημένο μοντέλο MEET (MEET I)

Το μοντέλο αναπτύχθηκε από τους Jorgesen και Sorenson το 1999, στα πλαίσια του προγράμματος MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport) [33]. Οι ερευνητές θεώρησαν ότι πρωταρχικής σημασίας παράμετρος για την κατανάλωση ενέργειας από την μηχανή έλξης ενός σιδηροδρομικού συρμού είναι η μέση ταχύτητα που αυτός αναπτύσσει στο σύνολο μιας διαδρομής. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές παραδοχές και πραγματοποιώντας μετρήσεις πεδίου σε ένα ευρύ φάσμα τύπων συρμών στην Γερμανία (επιβατικούς και εμπορευματικούς), απεικόνισαν σε λεπτομερή διαγράμματα τον ρόλο που διαδραμάτιζε η μέση ταχύτητα στην κατανάλωση ενέργειας και την εκπομπή ρυπογόνων ουσιών, καθώς και την επιρροή της από την μέση απόσταση μεταξύ των στάσεων των συρμών.



Εικόνα 12: Διαγραμματική απεικόνιση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της μέσης ταχύτητας και της απόστασης μεταξύ στάσεων σε συρμούς της Γερμανίας [33]

Η σχέση υπολογισμού στην οποία το μοντέλο καταλήγει για την εύρεση της κατανάλωσης ενέργειας για μεγάλους εμπορευματικούς συρμούς είναι:

$$EC = 0.019 * \frac{V_{average}^2}{\ln(x)} + 63$$

όπου:

EC : η κατανάλωση ενέργειας (σε $KJ/ton-km$)

$V_{average}$: η μέση ταχύτητα του συρμού (km/h)

x : η μέση απόσταση μεταξύ διαδοχικών στάσεων (km)
και $80km \leq x \leq 200km$

Αναλυτικό μοντέλο MEET (MEET II)

Στα πλαίσια του ίδιου προγράμματος, αναπτύχθηκε ακόμη ένα εναλλακτικό και περισσότερο αναλυτικό μοντέλο, το οποίο στηρίχθηκε στην ανάλυση του δύναμης έλξης του συρμού, λαμβάνοντας εξισώσεις δυναμικής των οχημάτων, αντίστοιχες με αυτές που παρουσιάστηκαν για τις οδικές μεταφορές. Ακολουθώντας, η διαίρεση της δύναμης έλξης με το συνολικό βάρος του συρμού επέτρεψε την μετατροπή των μονάδων σε KJ/ton και μέσω της παρακάτω εξίσωσης εκφράστηκε συναρτήσει τριών σταθερών του μοντέλου και της ταχύτητας του συρμού, η οποία λόγω της αεροδυναμικής αντίστασης έχει επίδραση δευτέρου βαθμού:

$$F' = B_0 + B_1 * v + B_2 * v^2$$

όπου:

F' : η δύναμη έλξης σε KN/ton

B_0, B_1, B_2 : σταθερές του μοντέλου ($B_0=24.7, B_1=0, B_2=84.5 \times 10^{-3}$ για εμπορευματικούς συρμούς)

v : η ταχύτητα του συρμού (m/s)

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την κίνηση ενός εμπορευματικού συρμού, μέσω ολοκλήρωσης της δύναμης έλξης, τελικά εκφράζεται ως δευτέρου βαθμού συνάρτηση, με μεταβλητές τον αριθμό των στάσεων, την

υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του σημείου τερματισμού της διαδρομής, της μέσης και της μέγιστης ταχύτητας με την οποία κινείται ο συρμός:

$$EC = \frac{N_{stop} + 1}{L} * \frac{V_{max}^2}{2} + B_0 + B_1 * V_{avg} + B_2 * V_{avg}^2 + g * \frac{\Delta h}{L}$$

Όπου:

<i>EC:</i>	<i>η κατανάλωση ενέργειας (σε KJ/ton-km)</i>
<i>N_{stop}:</i>	<i>ο αριθμός των στάσεων</i>
<i>L:</i>	<i>το μήκος της διαδρομής (km)</i>
<i>V_{avg}:</i>	<i>η μέση ταχύτητα κίνησης του συρμού (m/s)</i>
<i>V_{max}:</i>	<i>η μέγιστη ταχύτητα κίνησης του συρμού (m/s)</i>
<i>Δh:</i>	<i>η υψομετρική διαφορά αρχής και τέλους της διαδρομής (m)</i>
<i>g:</i>	<i>η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s²)</i>
<i>B₀, B₁, B₂:</i>	<i>σταθερές του μοντέλου (B₀=24.7, B₁=0, B₂=84.5x10⁻³ για εμπορευματικούς συρμούς)</i>

Το μοντέλο IFEU (Institut fur Energie und Umweltforschung)

Το μοντέλο αναπτύχθηκε το 2002 από ομάδα ερευνητών της Χαϊδελβέργης της Γερμανίας, στα πλαίσια προγράμματος χρηματοδοτούμενου από το γερμανικό Ινστιτούτο Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Ερευνών (IFEU) [34]. Βάση του μοντέλου είναι και εδώ η ανάλυση της ελκτικής δύναμης που απαιτείται για την υπερνίκηση των αντιστάσεων, ωστόσο δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην συνεισφορά της αεροδυναμικής αντίστασης στην απώλεια ενέργειας, και συγκεκριμένα θεωρεί ότι εκείνη είναι υπεύθυνη για το 40-50% της κατανάλωσης. Μέσω της ανάλυσης που πραγματοποίησαν, οι ερευνητές κατέληξαν σε μια, φαινομενικά τουλάχιστον, απλοϊκή προσέγγιση, σε σύγκριση με τα δύο προαναφερθέντα, αφού η κατανάλωση ενέργειας εκφράστηκε ως συνάρτηση μόνο της μικτής μάζας του συρμού, ως εξής:

$$EC = 315 * M_{train}^{0,6}$$

όπου:

<i>EC:</i>	<i>η κατανάλωση ενέργειας (σε Wh/km)</i>
<i>M_{train}:</i>	<i>η μικτή μάζα του συρμού (ton)</i>

Το μοντέλο EcoTransIT (Ecological Transport Information Tool for World Transports)

Το εν λόγω μοντέλο αποτελεί φυσική εξέλιξη αυτού του Ινστιτούτου Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Ερευνών (IFEU) και δημιουργήθηκε το 2010, στα πλαίσια ανάπτυξης ενός σύγχρονου υπολογιστικού εργαλείου, του EcotransIT World [35]. Με στόχο την δημιουργία μιας απλής συνάρτησης υπολογισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους διάφορους τύπους συρμών, οι ερευνητές στράφηκαν στην συλλογή στατιστικών στοιχείων από σιδηροδρομικές μεταφορικές εταιρίες, οργανισμούς και φορείς, συγκεντρώνοντας μια τεράστια βάση δεδομένων προς ανάλυση. Στο σχετικό εγχειρίδιο, αναφέρεται ότι μελετήθηκαν πάνω από 200.000 δρομολόγια εμπορευματικών συρμών, ενώ συλλέχθηκαν ετήσιοι μέσοι όροι κατανάλωσης από την Κίνα, τον Καναδά και τις Η.Π.Α.. Η εκτίμηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για την κίνηση ενός σιδηροδρομικού συρμού εκφράζεται και εδώ με μόνη ανεξάρτητη μεταβλητή την μάζα του, βάσει της εξίσωσης:

$$EC = 1200 * GTW^{-0.62}$$

όπου:

EC: η κατανάλωση ενέργειας (σε Wh/ton-km)

GTW: η συνολική μάζα του συρμού (συμπεριλαμβάνει και την μάζα των μηχανών έλξης)

Επιπλέον, το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης προσαρμόζεται βάσει της τοπογραφίας της εκάστοτε χώρας, με τον πολλαπλασιασμό της με έναν διορθωτικό συντελεστή. Συγκεκριμένα, με 0.9 όταν η μεταφορά πραγματοποιείται σε σχετικά επίπεδη χώρα και με 1.1 όταν το μεγαλύτερο μέρος της πραγματοποιείται σε ορεινή χώρα. Μ' αυτόν τον έμμεσο τρόπο, στο μοντέλο υπεισέρχεται και η παράμετρος της κλίσης.

Το μοντέλο Rail_NTUA

Το μοντέλο δημιουργήθηκε το 2014 από την απόφοιτο της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Ελένη Τουρνάκη, στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής της εργασίας, η οποία στόχευε στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα των σιδηροδρομικών συνδυασμένων και των οδικών μεταφορών, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά της μεταφοράς και παραμέτρους που δεν συμπεριλαμβάνονται σε αντίστοιχες μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο βασίζεται στις σχέσεις υπολογισμού του Κ. Λυμπέρη και την θεωρία της έλξης και προκύπτει βάσει των αντιστάσεων που καλείται να υπερκεράσει ο σιδηροδρομικός συρμός κατά την κίνησή του. Οι σχέσεις υπολογισμού παρουσιάζονται παρακάτω [36]:

Η βασική του εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$a = 2,78 * \Sigma w$$

όπου:

a : η ειδική κατανάλωση ενέργειας (Wh/ton-km)

Σw : το σύνολο των ειδικών αντιστάσεων

2,78: συντελεστής που προκύπτει από τη μετατροπή των μονάδων

$$\left(\frac{daN}{t} * \frac{1W \cdot s}{N \cdot m} * \frac{1000 m}{1 km} * \frac{1h}{3600 s} * \frac{10 N}{1daN} \right)$$

Το σύνολο των ειδικών αντιστάσεων αποτελείται από τις ειδικές αντιστάσεις καμπύλης, κλίσης και κύλισης του συρμού. Αρχικά, υπολογίζονται η αντίσταση κύλισης των μηχανών έλξης και η ειδική αντίσταση κύλισης του ελκόμενου τροχαίου υλικού από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$W_{ME\Lambda} = 5 \cdot G_{KA} + 4 \cdot \left\{ \frac{(V + 15)}{10} \right\}^2$$

όπου:

$W_{ME\Lambda}$: η αντίσταση κύλισης της μηχανής έλξης (N)

G_{KA} : το βάρος που αναλαμβάνουν οι κινητήριιοι τροχοί (kN)

V η ταχύτητα κίνησης του συρμού (km/h)

$$w_{KY\Lambda,EM\Pi} = c_0 + (0,007 + m) \left(\frac{V}{10}\right)^2$$

όπου:

$w_{KY\Lambda,EM\Pi}$ η ειδική αντίσταση κύλισης εμπορικών ελκόμενων οχημάτων (‰)

$c_0=1,4/2,0$ για ένσφαιρους/ ολισθαίνοντες τριβείς στην έδραση των αξόνων

V ταχύτητα συρμού (km/h)

$m=0,05/0,025$ για μεικτής μορφής οχήματα (κλειστά/ανοιχτά)/ για οχήματα που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ειδική αντίσταση κύλισης ολόκληρου του συρμού:

$$W_{KY\Lambda,\Sigma} = \frac{n * W_{ME\Lambda} + W_{KY\Lambda,EM\Pi} * G_{E\Lambda K}}{G_{\Sigma}}$$

όπου:

$w_{KY\Lambda,\Sigma}$ η ειδική αντίσταση κύλισης ολόκληρου του συρμού
 n ο αριθμός των μηχανών έλξης

$W_{ME\Lambda}$ η αντίσταση κύλισης της μηχανής έλξης (N)

$w_{KY\Lambda,EM\Pi}$ η ειδική αντίσταση κύλισης εμπορικών ελκόμενων οχημάτων (‰)

$G_{E\Lambda K}$ το βάρος των ελκόμενων οχημάτων (kN)

G_{Σ} το συνολικό βάρος του συρμού (kN)

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού μηχανών έλξης, είναι απαραίτητη η γνώση του τύπου και των τεχνικών χαρακτηριστικών των μηχανών έλξης που θα χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση καθώς και η μικτή ελκόμενη μάζα της αμαξοστοιχίας. Έχοντας αυτά τα δεδομένα και χρησιμοποιώντας τη θεωρία της έλξης προκύπτει το ζητούμενο και τελικά η συνολική μάζα του συρμού. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την θεωρία της έλξης ισχύει ότι [37]:

Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να έλξει μια μηχανή έλξης είναι το ελάχιστο των παρακάτω ποσοτήτων:

Μέγιστο ελκόμενο φορτίο για εκκίνηση σε ανωφέρεια

$$G_{ΕΛΚ} = \frac{\Pi - w_i \cdot G_{ΜΕΛ}}{w_o + w_i} \quad [\%o] \quad \text{και} \quad \Pi = \mu * M_{ΚΤ} * g$$

όπου:

$G_{ΜΕΛ}$: το βάρος της μηχανής έλξης σε kN

Π : η δύναμη πρόσφυσης της μηχανής έλξης σε kN

$G_{ΕΛΚ}$: το βάρος των ελκόμενων οχημάτων σε N

w_o : η ειδική αντίσταση εκκίνησης

w_i : η ειδική αντίσταση κλίσης

μ : ο συντελεστής πρόσφυσης συναρτήσει της ταχύτητας και συγκεκριμένα:

- $\mu = 0,161 + \frac{7,5}{V+44}$ για ξηρή κατάσταση σιδηροτροχιάς και αμμοβολημένη
- $\mu = 0,130 + \frac{7,5}{V+44}$ για υγρή κατάσταση σιδηροτροχιάς και αμμοβολημένη

$M_{ΚΤ}$: η μάζα που αναλαμβάνουν οι κινητήριои τροχοί

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($=9,81 \text{ m/s}^2$)

Μέγιστο ελκόμενο βάρος βάσει της ωριαίας ισχύος

$$(G_{ΜΕΛ} + G_{ΕΛΚ}) = \frac{Z\omega\rho}{\Sigma w}$$

όπου:

$G_{ΜΕΛ}$: το βάρος της μηχανής έλξης [kN]

$G_{ΕΛΚ}$: το βάρος των ελκόμενων οχημάτων [kN]

$Z\omega\rho$: η ωραία ισχύς της μηχανής έλξης [N]

Σw : το σύνολο των ειδικών αντιστάσεων [%o]

Μέγιστο ελκόμενο φορτίο λόγω ζεύξης

$$G_{ΕΛΚ} = \frac{Z_{ΑΓΚ}}{\Sigma w}$$

όπου:

$G_{ΕΛΚ}$: το βάρος των ελκόμενων οχημάτων [KN]

$Z_{ΑΓΚ}$: η δύναμη του αγκίστρου [N]

Σw : το σύνολο των ειδικών αντιστάσεων [%o]

Η αντίσταση κλίσης προκύπτει από το προφίλ των κλίσεων της εξεταζόμενης διαδρομής ενώ ως ειδική αντίσταση καμπύλης λαμβάνεται μία εκτιμώμενη μέση τιμή της ειδικής αντίστασης καμπύλης (π.χ. ίση με 1,5 %o) σε όλα τα τμήματα της διαδρομής. Στα κατηφορικά τμήματα της διαδρομής όπου η ειδική αντίσταση κλίσης είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των ειδικών αντιστάσεων καμπύλης και κύλισης, η ειδική κατανάλωση λαμβάνεται ίση με μηδέν ενώ στα υπόλοιπα κατηφορικά τμήματα, όπου η κλίση είναι μικρότερη από το άθροισμα των αντιστάσεων καμπύλης και κύλισης και έως 0%o, η ειδική κατανάλωση υπολογίζεται για αντιστάσεις κλίσης και καμπύλης ίσες με μηδέν επειδή θεωρείται ότι η αντίσταση καμπύλης αντισταθμίζεται από την αντίσταση κλίσης, που στην περίπτωση της κατωφέρειας υποβοηθά και δεν αντιστέκεται στην κίνηση του συρμού.

2.3. Μοντέλο GIFT (οδική, σιδηροδρομική και διατροπική μεταφορά)

Ο βασικός στόχος του ευρωπαϊκού προγράμματος GIFT (Green Intermodal Freight Transport) [38] είναι να χαρτογραφηθεί, να αναλυθεί και να γίνει αξιολόγηση της κατάστασης του τομέα των εμπορευματικών μεταφορών στις Περιφέρειες της Νοτιοανατολικής Ευρώπης με σκοπό να προταθούν νέες πολιτικές και στρατηγικές στον τομέα των υποδομών, των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών, της νομοθεσίας και των προτύπων έτσι ώστε να προωθηθούν οι πράσινες συνδυασμένες εμπορευματικές μεταφορές. Οι διαδρομές που έχουν επιλεγεί προς διερεύνηση ανήκουν στους τρεις πανευρωπαϊκούς σιδηροδρομικούς διαδρόμους IV, V και VII, οι οποίοι καλύπτουν σχεδόν το σύνολο της περιοχής της Ν.Α. Ευρώπης. Στα πλαίσια του προγράμματος, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις, αναπτύχθηκε μια σειρά από εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση και τεκμηρίωση των προτάσεων. Η εν λόγω μεθοδολογία λοιπόν

αποτελεί συγκριτικό και υπολογιστικό εργαλείο κόστους, χρόνου και εκπομπής ρύπων σε οδικές, σιδηροδρομικές και συνδυασμένες εμπορευματικές μεταφορές. Χρησιμοποιεί ως συντελεστές εισόδου τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων, το καθαρό βάρος του φορτίου, τις επιμέρους αποστάσεις που διανύονται είτε σε οδικό είτε σε σιδηροδρομικό δίκτυο και τέλος συντελεστές απόδοσης (KPI's = Key Performance Indicators) που έχουν αναπτυχθεί για αυτόν τον σκοπό. Αναλυτικότερα, για κάθε εξεταζόμενη διαδρομή, αναπτύσσονται τρία διαφορετικά σενάρια. Κρατώντας πάντα σταθερά τα σημεία εκκίνησης και προορισμού, στο πρώτο σενάριο (αμιγώς οδική μεταφορά) θεωρείται ότι η μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων γίνεται εξ ολοκλήρου μέσω του διαθέσιμου οδικού δικτύου, κάτι που συμβαίνει μόνο στο αρχικό και τελικό κομμάτι της διαδρομής στα επόμενα δυο εναλλακτικά σενάρια (Α. Διατροφική μεταφορά – απευθείας εξυπηρέτηση και Β. Διατροφική μεταφορά – μέθοδος ακτινωτού τροχού), όπου στο ενδιάμεσο και μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής μεταπηδούμε σε υπάρχον ή μη σιδηροδρομικό δίκτυο. Λόγω του πρωταρχικού ρόλου που παίζουν στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας και τον υπολογισμό των αντίστοιχων μεταβλητών, κρίνεται εύλογο σ' αυτό το σημείο να γίνει μια πιο εκτεταμένη αναφορά στους συντελεστές απόδοσης (KPI's) που χρησιμοποιούνται:

- *Μοναδιαίο Κόστος Διαδρομής (Relative Unit Cost)*

Είναι το μέσο κόστος εμπορευματικής μεταφοράς και υπολογίζεται για μια ενδεικτική απόσταση 100 χιλιομέτρων και μετρήσεις για φορτία διαφορετικού καθαρού βάρους (10, 15, 20 και 25t). Ο τελικός δείκτης προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των παραπάνω τεσσάρων κατηγοριών και εκφράζεται σε (€/ton-km) για κάθε μέσο μεταφοράς αντίστοιχα

- *Χρόνος Καθυστέρησης (Delay Risk)*

Είναι ο μέσος χρόνος καθυστέρησης, που περιλαμβάνει σοβαρές διαταραχές του χρονοδιαγράμματος (ακυρώσεις, απεργίες κτλ), τα δεδομένα των οποίων, λόγω της φύσης τους, συλλέγονται αποκλειστικά από τους μεταφορείς εμπορευμάτων των σιδηροδρομικών διαδρόμων GIFT και εκφράζεται σε min/100km

- *Χρόνος Μεταφοράς (Transport Time)*

Είναι ο μέσος χρόνος μεταφοράς από κόμβο σε κόμβο για τις χώρες που μελετήθηκαν και συμπεριλαμβάνονται στις εξεταζόμενες διαδρομές.

Προκύπτει βάσει στατιστικών δεδομένων και μέσω ερωτηματολογίων στους συμμετέχοντες οργανισμούς. Εκφράζεται σε h/100km

- Εκπομπή CO₂ (Polluters CO₂)

Είναι οι εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Υπολογίζονται μέσω του διαδικτυακού εργαλείου EcoTransIT calculator και βάσει των προεπιλεγμένων ρυθμίσεων. Εκφράζεται σε συνολικά gr/ton-km που παράγονται σε κάθε μεταφορική δραστηριότητα.

Σε αντιστοιχία με τους παραπάνω συντελεστές προκύπτουν: το κόστος των επιμέρους και συνολικών διαδρομών (σε ευρώ), ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος για την πραγματοποίηση του κάθε σεναρίου (σε ώρες), στον οποίο συμπεριλαμβάνονται κατά προσέγγιση οι πιθανές καθυστερήσεις και τέλος η συνολική ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων (σε κιλά ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα CO_{2e})

3. Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται αρχικά ανασκόπηση των μεταβλητών εισόδου των μοντέλων, βάσει των οποίων γίνεται μια αρχική συγκριτική παρουσίασή τους. Παράλληλα, περιγράφονται οι μέθοδοι εκτίμησης που αναπτύσσονται για την εφαρμογή των μοντέλων, καθώς και προσαρμογές που πραγματοποιούνται. Ακολουθεί έλεγχος εγκυρότητας των μοντέλων, κάνοντας χρήση διαθέσιμων πραγματικών μετρήσεων κατανάλωσης. Τέλος, διατυπώνοντας και επιλύοντας σενάρια στο οδικό και σιδηροδρομικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερο φάσμα μετρήσεων.

3.1. Μεταβλητές εισόδου μοντέλων οδικών οχημάτων

Όσον αφορά τις οδικές μεταφορές, παρατηρούμε ότι τα μοντέλα υπολογισμού DSLV, EcotransIT και GIFT χρησιμοποιούν ένα πολύ μικρό αριθμό μεταβλητών για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου, ενώ λαμβάνουν υπόψη τους εμμέσως την παράμετρο της κλίσης, μέσω διορθωτικών συντελεστών. Το ίδιο συμβαίνει και με άλλες παραμέτρους, όπως η ταχύτητα και η συχνότητα των στάσεων. Για παράδειγμα το διαδικτυακό εργαλείο EcotransIT εντοπίζει αυτόματα την κατηγορία της οδού της διαδρομής που εισάγεται, και λαμβάνει την αντίστοιχη μέση τιμή, όπως προκύπτει από μετρήσεις της βάσης δεδομένων του. Το βασικό πλεονέκτημά των απλούστερων αυτών μοντέλων είναι πως παρέχουν την δυνατότητα γρήγορου υπολογισμού για μεγάλο αριθμό διαδρομών, εφόσον δεν απαιτούν αναλυτικά στοιχεία της διαδρομής ή των χαρακτηριστικών των οχημάτων. Ωστόσο, είναι εύλογο η εκτίμηση που προκύπτει να εμπεριέχει σφάλματα και ανακρίβεια σε ορισμένες περιπτώσεις, για παράδειγμα σε διαδρομές με ιδιαίτερη ανομοιογένεια.

Στον αντίποδα, τα μοντέλα CMEM, P.M.G. και ORNL απαιτούν περισσότερα δεδομένα εισόδου, πέρα από το μικτό βάρος, την απόσταση ή έναν γενικό χαρακτηρισμό της μορφολογίας του εδάφους. Τα εν λόγω μοντέλα ακολουθούν μια υπολογιστική διαδικασία βασισμένη στην «στιγμιαία ταχύτητα», και απαιτούν μετρήσεις πεδίου, από τις οποίες προκύπτει η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου, (συναρτήσει και των υπολοίπων μεταβλητών εισόδου). Στην περίπτωση που οι

ανωτερω μετρησεις δεν είναι εφικτο να πραγματοποιηθουν, τα απαιτουμενα στοιχεια μπορουν να προκυψουν βάσει παραδοχών (τα θέμα παρουσιαζεται αναλυτικότερα στη συνέχεια).

Πίνακας 2: Μεταβλητές εισόδου μοντέλων οδικών οχημάτων

Παράμετροι	Μοντέλα	CMEM	PMG	ORNL	DSLTV	EcotransIT	GIFT
Μήκος διαδρομής (Υπεισέρχεται έμμεσα στους υπολογισμούς)		√	√	√	√	√	√
Ταχύτητα		Προφίλ ταχύτητας			Μέση τιμή (εμμέσως)		
Βάρος (ωφέλιμο/μικτό βάρος)		√	√	√	√	√	√
Αντίσταση κλίσης (κατά μήκος κλίση οδού)		Προφίλ κλίσεων			Χαρακτηρισμός εδάφους		
Αντίσταση κύλισης (συντελεστής αντ. κύλισης)		√	√	√	-	-	-
Αεροδυναμική αντίσταση (μετωπική επιφάνεια, συντ. αεροδ. αντίστασης)		√	√	√	-	-	-
Κινητήρας (Απόδοση κινητήρα και κιβωτίου ταχυτήτων – Ισχύς πρόσθετων λειτουργιών) (Στροφές – Τριβή – Κυβικά μηχανής)		√	√	√	-	-	-
		√	-	-	-	-	-
Καύσιμα (θερμογόνο δύναμη καυσίμου)		√	√	√	-	-	-

3.1.1. Υπολογισμός προφίλ κλίσεων για τα μοντέλα CMEM, PMG και ORNL

Για την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων των οδικών τμημάτων, χρησιμοποιείται το λογισμικό **Google Earth Pro**. Εισάγοντας τα σημεία εκκίνησης και προορισμού, η πορεία της διαδρομής προκύπτει αυτόματα από το λογισμικό και αποθηκεύεται σε αρχείο μορφής (.kml). Στη συνέχεια εισάγεται προς επεξεργασία στην διαδικτυακή εφαρμογή **GPS Visualizer** [39]. Πιο συγκεκριμένα, εκμεταλλευόμαστε την δυνατότητα της εφαρμογής να εξάγει αυτόματα υψόμετρα μεταξύ ίσων τμημάτων κατά μήκος της διαδρομής που εισάγεται, καλώντας τον χρήστη να επιλέξει το μήκος των διαδοχικών ίσων τμημάτων. Έτσι, εισάγοντας τα δεδομένα που προκύπτουν σε υπολογιστικό φύλλο **Excel**, συγκεντρώνουμε τον απαραίτητο αριθμό διαδοχικών υψομέτρων κατά μήκος της διαδρομής. Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό φύλλο περιλαμβάνει το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το υψόμετρο και την χιλιομετρική θέση των σημείων που συλλέχθηκαν, από τα οποία προκύπτουν οι κλίσεις των συνεχόμενων επί μέρους τμημάτων κατά μήκος της διαδρομής. Ακολουθεί **διόρθωση των κλίσεων σε σημεία σηράγγων** (βλέπε ενότητα 3.2.1). Τέλος, για τον εντοπισμό σημείων διοδίων της διαδρομής, όπου το όχημα θα υποχρεωθεί να κάνει στάση, χρησιμοποιούμε διαδικτυακούς χάρτες που παρέχουν σχετικά στοιχεία.

3.1.2. Προσαρμογή μοντέλων CMEM, PMG και ORNL

Μία ακόμη βασική παράμετρος των μοντέλων οδικών οχημάτων που ακολουθούν αναλυτικούς υπολογισμούς της κατανάλωσης είναι το **προφίλ ταχύτητας** του οχήματος. Έτσι, για τα παραπάνω μοντέλα ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου γίνεται με χρήση της στιγμιαίας ταχύτητας και όχι με χρήση μιας μέσης ταχύτητας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση, απαιτεί η κατανάλωση να υπολογιστεί είτε με χρήση κάποιου πρότυπου κύκλου οδήγησης είτε με συλλογή των απαιτούμενων στοιχείων με μετρήσεις πεδίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός με βάση τον κύκλο οδήγησης ενδεχόμενα να μην δίνει ακριβή αποτελέσματα καθώς ένας πρότυπος κύκλος οδήγησης μπορεί να απέχει σημαντικά από τον πραγματικό. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει η παραδοχή διατήρησης σταθερής ταχύτητας κατά την διαδρομή με εξαίρεση τα σημεία υποχρεωτικής στάσης (διόδια, διέλευση συνόρων χωρών κτλ.), όπου υπολογίζεται ένα τυπικό προφίλ

(επιβράδυνση, στάση και εν συνεχεία επιτάχυνση με σταθερό ρυθμό). Συγκεκριμένα θεωρούμε, ότι το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα 50 km/h στα τμήματα εντός αστικού δικτύου και 85 km/h σε υπεραστικές οδούς. Ακόμη, ότι πριν τα σημεία υποχρεωτικής στάσης, το όχημα επιβραδύνει με 1 m/s^2 και μετά από αυτά επιταχύνει $0,3 \text{ m/s}^2$, μέχρι να ανακτήσει την ταχύτητά του. Βάσει αυτής της θεώρησης, δημιουργείται το απαιτούμενο προφίλ ταχύτητας, ενώ χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της κινητικής μπορεί να υπολογιστεί και ο χρόνος διέλευσης από κάθε σημείο.

Οι σχέσεις υπολογισμού των μοντέλων CMEM, PMG και ORNL εισήχθησαν σε υπολογιστικά φύλλα. Στην συνέχεια, έγιναν παραδοχές για μεταβλητές εισόδου (όπως προτείνονται στην βιβλιογραφία) ως εξής:

✓ Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης:	0,62
✓ Εμβαδόν πρόσοψης οχήματος (m^2):	10 (2,5 x 4,0)
✓ Θερμοδυναμική απόδοση κινητήρα:	0,45
✓ Αποδοτικότητα συστήματος μετάδοσης:	0,9
✓ Χαμηλότερη θερμογόνος τιμή καυσίμου (MJ/lt):	35,8
✓ Συντελεστής αντίστασης κύλισης:	0,007
✓ Τριβή κινητήρα:	2,9
✓ Κυβικά μηχανής (λίτρα):	10
✓ Στροφές κινητήρα (ανά δευτερόλεπτο):	10
✓ Σταθερά ϵ (περιστρεφόμενες μάζες):	0,1
✓ Λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου:	1

Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται μέρος του υπολογιστικού φύλλου, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η εφαρμογή των μοντέλων CMEM, PMG και ORNL για την διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια:

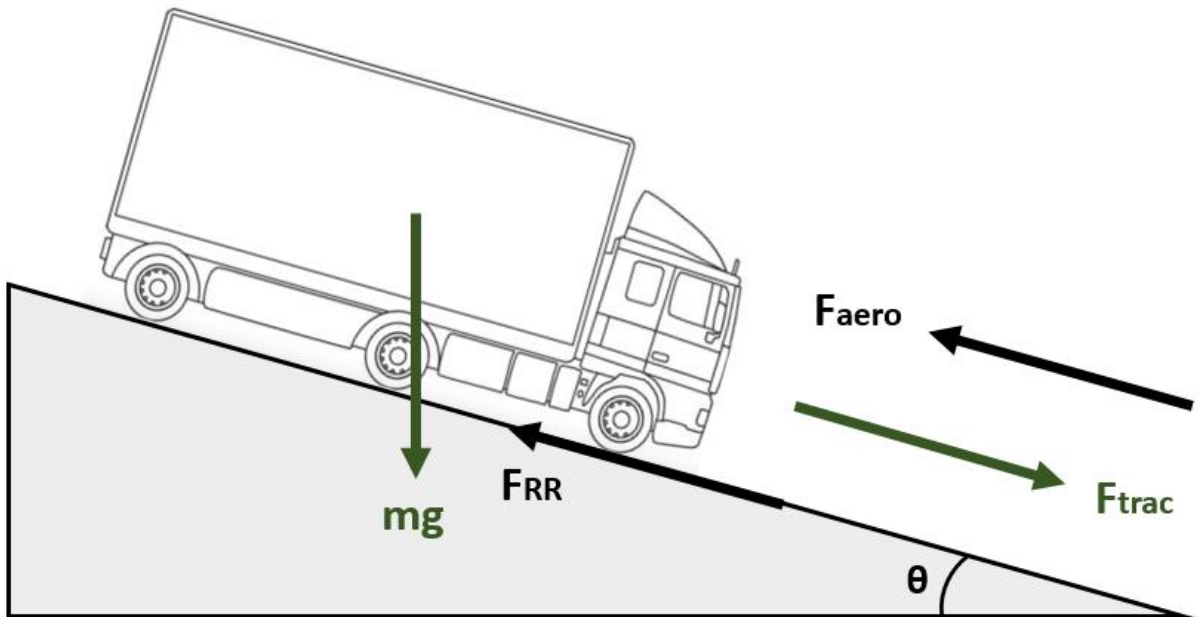
Κατανάλωση φορτηγού ανά κατηγορία μικτού βάρους στο οδικό τμήμα ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ - ΣΟΦΙΑ (ΥΑΝΑ)			ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (lt/100km) ΜΕΘΟΔΟΣ ORNL	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (lt/100km) ΜΕΘΟΔΟΣ CMEM	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (lt/100km) ΜΕΘΟΔΟΣ P.M.G.		ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ (ώρες)				
ΜΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ (kg)	40000		44,46	53,82	53,85		4,03				
ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ											
Γεωγραφικό Πλάτος (δεκαδικές μοίρες)	Γεωγραφικό Μήκος (δεκαδικές μοίρες)	Υψόμετρο (m)	Απόσταση τμήματος (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Διορθωμένο Υψόμετρο (m)	Κλίση τμήματος	Μικτό προφίλ ταχύτητας (50km/h σε αστικές περιοχές, 85km/h σε εθνική οδό)	Χρονος διέλευσης (sec)	Σταθμός διοδίων ή σύνορα χωρών = 1	Εντός πόλης = 1 Εκτός πόλης = 0	Σταθμοί διαδρομής - Σήραγγες = 'tunnel'
40,6400672	22,9444164	36,7	0	0	36,7		0,00	0,00			
40,64183811	22,94337912	45	300	300	36,6	-0,03%	13,42	44,72			1 Θεσσαλονίκη
40,64285521	22,94028158	36,5	300	600	36,5	-0,03%	13,89	63,25			1 Θεσσαλονίκη
40,64369113	22,93716616	26,7	300	900	26,7	-3,27%	13,89	84,85			1 Θεσσαλονίκη
40,64564096	22,93529562	21,2	300	1200	21,2	-1,83%	13,89	106,45			1 Θεσσαλονίκη
40,64833384	22,93544126	30,9	300	1500	30,9	3,23%	13,89	128,05			1 Θεσσαλονίκη
40,65103261	22,93539089	42	300	1800	42	3,70%	13,89	149,65			1 Θεσσαλονίκη
40,65371149	22,9350192	45,1	300	2100	45,1	1,03%	13,89	171,25			1 Θεσσαλονίκη
40,65636154	22,93439274	40,8	300	2400	40,8	-1,43%	13,89	192,85			1 Θεσσαλονίκη
40,65898706	22,93516521	44	300	2700	44	1,07%	13,89	214,45			1 Θεσσαλονίκη
40,66164495	22,93580013	43,6	300	3000	43,6	-0,13%	13,89	236,05			1 Θεσσαλονίκη
40,66430608	22,93641134	46,2	300	3300	46,2	0,87%	13,89	257,65			1 Θεσσαλονίκη
40,66691875	22,93729746	49,7	300	3600	49,7	1,17%	13,89	279,25			1 Θεσσαλονίκη
40,66952419	22,93823527	46,1	300	3900	46,1	-1,20%	13,89	300,85			1 Θεσσαλονίκη
40,67215691	22,93897534	46,3	300	4200	46,3	0,07%	13,89	322,45			1 Θεσσαλονίκη

Εικόνα 13: Φύλλο υπολογισμού της κατανάλωσης σύμφωνα με τα μοντέλα CMEM, P.M.G και ORNL

3.1.3. Υπολογισμός κατανάλωσης στην περίπτωση αρνητικών κλίσεων

Για την διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος κατανάλωσης καυσίμου, πραγματοποιείται μια σημαντική διόρθωση. Αυτή σχετίζεται με την θεώρηση πως η κατανάλωση καυσίμου που υπολογίζεται από τα μοντέλα αναφέρεται στα διαστήματα κατά τα οποία η ελκτική δύναμη είναι θετική, εφόσον είναι ξεκάθαρο πως για τα συμβατικά φορτηγά οχήματα οι απαιτήσεις σε ενέργεια καυσίμου είναι υπαρκτές μόνο σε αυτές τις περιόδους. Υπενθυμίζεται ότι κατά την κίνηση ενός φορτηγού ασκούνται σε αυτό οι εξής δυνάμεις: το βάρος του, η αεροδυναμική αντίσταση, η αντίσταση κύλισης και η δύναμη έλξης. Προκειμένου το όχημα να διατηρήσει την ταχύτητά του σε επίπεδο ή ανηφορικό οδόστρωμα, η ελκτική δύναμη, παίζοντας εξισορροπητικό ρόλο, καλείται να υπερνικήσει τις δύο αντιστάσεις, προστιθέμενου και του βάρους σε περίπτωση ανωφέρειας.

Αντίθετα, όταν έχουμε κίνηση του οχήματος σε κατωφέρεια, η συνιστώσα του βάρους συμβάλλει θετικά στην κίνηση, ακόμα κι αν μειώσουμε την δύναμη έλξης που προσφέρεται στην μηχανή. Μετά από ανάλυση των δυνάμεων που συντρέχουν, προκύπτει ότι για κάποιες τιμές της γωνίας θ (κλίση της οδού), και συναρτήσει του βάρους και της ταχύτητας του οχήματος, η κίνησή του μπορεί να συνεχιστεί με μηδενική συμμετοχή της ελκτικής δύναμης και συνεπώς με μηδενική κατανάλωση. Δηλαδή, για μια οριακή τιμή της κλίσης, το βάρος είναι από μόνο του ικανό να υπερνικήσει τις δύο αντιστάσεις. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της **ελάχιστης κλίσης της οδού για μηδενισμό κατανάλωσης σε κατωφέρεια**, συναρτήσει της μικτής μάζας και της ταχύτητας κίνησης του οχήματος γίνεται βάσει των παρακάτω σχέσεων:



Εικόνα 14: Συντρέχουσες δυνάμεις κατά την κίνηση φορτηγού οχήματος σε κατωφέρεια

Έστω ότι ένα όχημα βρίσκεται προ μιας κατωφέρειας και κινείται με ταχύτητα v . Σύμφωνα με τους νόμους του Νεύτωνα, για να διατηρήσει την ταχύτητά του σταθερή κατά την κατάβαση αρκεί να ισχύει ($F_{trac}=0$):

$$m * g * \sin\theta = F_{aero} + F_{RR}$$

Οι τιμές των αντιστάσεων F_{aero} και F_{RR} δίνονται από τις σχέσεις:

$$F_{aero} = C_D * A_f * 0.5 * \rho * v^2 \quad \text{και} \quad F_{RR} = C_{RR} * m * g$$

όπου όπως αναφέρθηκε λαμβάνουμε:

$$C_D=0,62, A_f=10, \rho=1,2\text{kg/m}^3, C_{RR}=0,007 \text{ και } g=9,81\text{m/s}^2$$

Άρα, αντικαθιστώντας στην σχέση $F_{\text{trac}}=0$, προκύπτει:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{3,72 * v^2 + 0,0687 * m}{9,81 * m}\right)$$

Σχέσεις της παραπάνω μορφής εισάγονται στο φύλλο υπολογισμών, και για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής υπολογίζεται αυτόματα η αντίστοιχη τιμή, συναρτήσει της ταχύτητας και της μικτής μάζας που εισάγουμε ως μεταβλητή εισόδου. Έτσι, μέσω συναρτήσεων του Excel η τιμή της κατανάλωσης μηδενίζεται στα τμήματα αρνητικής κλίσης μεγαλύτερης κατά απόλυτη τιμή από την ελάχιστη, καθώς και στα τμήματα όπου το όχημα επιβραδύνει.

3.2. Μεταβλητές εισόδου μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων

Όσον αφορά τις σιδηροδρομικές μεταφορές, παρατηρούμε ότι συμβαίνει κάτι αντίστοιχο: Τα μοντέλα υπολογισμού EcotransIT, GIFT, IFEU και MEET I απαιτούν περιορισμένο αριθμό δεδομένων εισόδου, όπως το μικτό βάρος του συρμού, η απόσταση της διαδρομής και η μέση ταχύτητα, τα οποία είναι σχετικά εύκολο να συλλεχθούν. Παρέχουν δηλαδή την δυνατότητα γρήγορης εφαρμογής σε μεγάλο αριθμό διαφορετικών διαδρομών, εμπεριέχοντας όμως ενδεχόμενο σφάλμα και ανακρίβεια. Το μοντέλο MEET II μπορεί επίσης να εφαρμοστεί με ευκολία σε διαδρομές που γνωρίζουμε κατά προσέγγιση την μέση και μέγιστη ταχύτητα του συρμού, και επιπλέον το υψόμετρο του σταθμού εκκίνησης και αυτό του σταθμού προορισμού. Όμως λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο της κλίσης κατά αυτόν τον τρόπο, η πιθανότητα εσφαλμένης εκτίμησης της κατανάλωσης είναι υψηλή, ειδικά σε διαδρομές που παρουσιάζουν μεγάλη υψομετρική ανομοιογένεια.

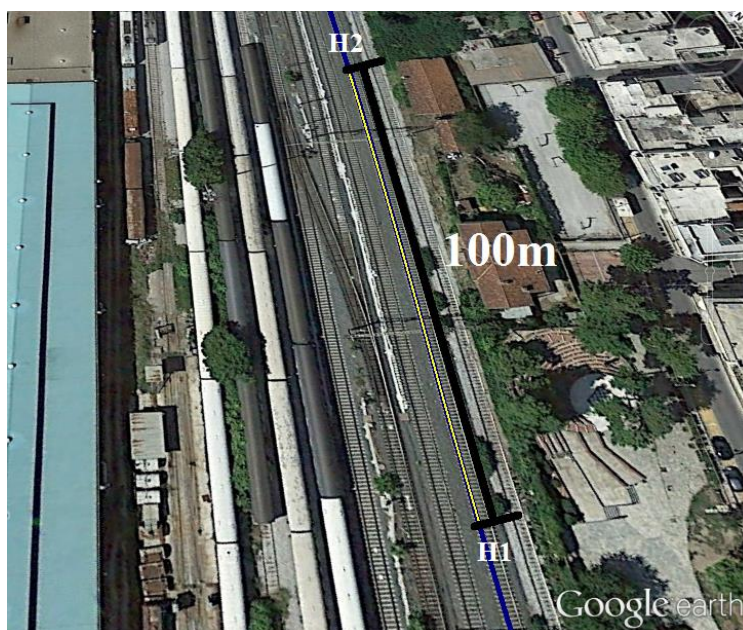
Για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου Rail_NTUA, απαιτείται η εξαγωγή του προφίλ κλίσεων της εξεταζόμενης διαδρομής. Εφόσον τα χαρακτηριστικά της διαδρομής είναι διαθέσιμα, το μοντέλο του MEET II μπορεί επίσης να εφαρμοστεί με περισσότερη ακρίβεια, και συγκεκριμένα τμηματικά τόσες φορές, όσες ο αριθμός των ομοιογενών τμημάτων της διαδρομής. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται στη συνέχεια (βλ. 3.2.1, 3.2.2)

Πίνακας 3: Μεταβλητές εισόδου μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων

Παράμετροι / Μοντέλα	Rail_NTUA	MEET II	MEET I	IFEU	EcotransIT	GIFT
Μήκος διαδρομής (Υπεισέρχεται έμμεσα στους υπολογισμούς)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ταχύτητα (Υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των αντιστάσεων κύλισης)	Μέση	Μέση, Μέγιστη	Μέση	-	-	-
Βάρος (Μικτή μάζα συρμού)	<ul style="list-style-type: none"> • Ωφέλιμο φορτίο (αλγ. φόρτωσης) • Απόβαρο βαγονιών • Βάρος μηχανών έλξης (αναλυτικοί υπολογισμοί) 	✓	✓	✓	✓	✓
Αντίσταση κλίσης (κατά μήκος κλίση γραμμής)	Προφίλ κλίσεων	ΔΗ αρχής/ τέλους	-	-	Χαρακτηρισμός εδάφους	
Αντίσταση καμπύλης	<ul style="list-style-type: none"> • Αντίσταση βαγονιών • Αντίσταση μηχανών έλξης • Αντίσταση τριβής • Ειδική αντίσταση εκκίνησης • Ειδική αντίσταση καμπύλης (αναλυτικοί υπολογισμοί) 	(Αριθμός στάσεων)	(Απόσταση διαδοχικών στάσεων)	-	-	-
Αντίσταση κύλισης						
Αεροδυναμική αντίσταση						
Σύστημα Έλξης (Είδος/Αριθμός μηχ. Έλξης)	Χαρακτηριστικά μηχανών έλξης (δύναμη πρόσφυσης, ισχύς) (αναλυτικοί υπολογισμοί)	✓	✓	✓	✓	✓

3.2.1. Υπολογισμός προφίλ κλίσεων για τα μοντέλα Rail_NTUA και MEET II – Μέθοδος εκτίμησης κλίσεων σηράγγων

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου Rail_NTUA για τον υπολογισμό κατανάλωσης ενέργειας των σιδηροδρομικών οχημάτων, απαιτείται η εξαγωγή του **προφίλ κλίσεων** της εξεταζόμενης διαδρομής. Αν αυτό δεν είναι διαθέσιμο (π.χ. από σχέδια μηκοτομής της σιδηροδρομικής γραμμής ή σχετικά στοιχεία του Σιδηροδρομικού Οργανισμού), το προφίλ κλίσεων μπορεί να προσδιοριστεί μέσω ανεύρεσης του υψομέτρου ενός ικανού αριθμού διαδοχικών σημείων κατά μήκος της διαδρομής.



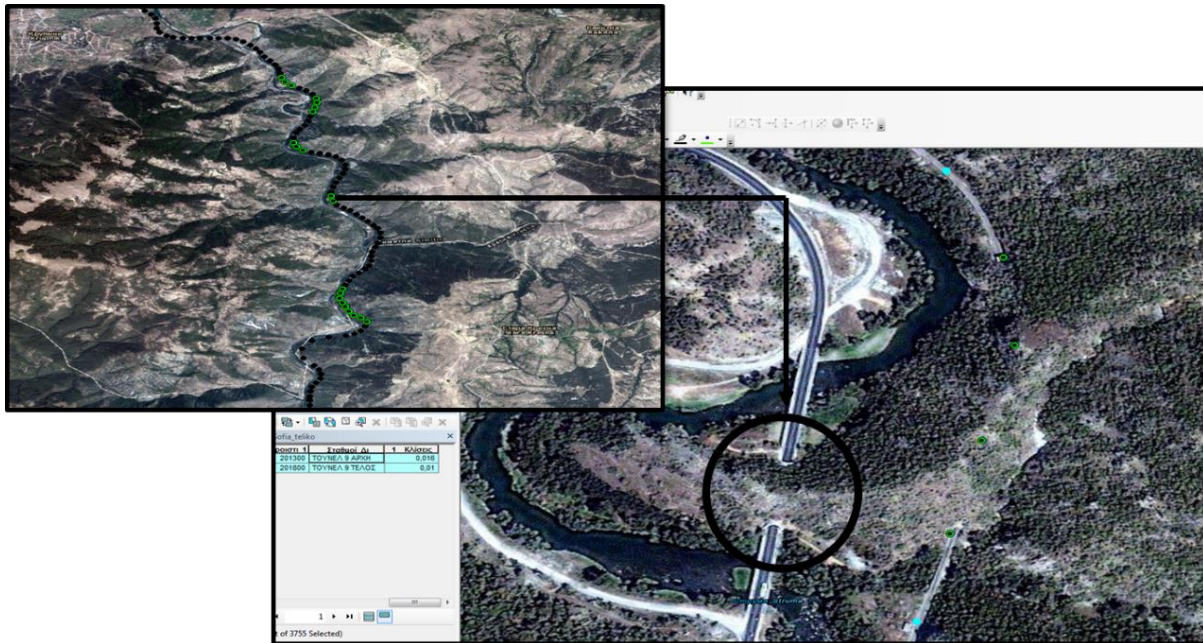
Εικόνα 15: Δημιουργία κόμβων μέτρησης υψομέτρου κατά μήκος σιδηροδρομικής γραμμής, μέσω της εφαρμογής Google Earth

Η διαδικασία που ακολουθείται για το υπολογισμό του προφίλ της κλίσης μιας σιδηροδρομικής γραμμής διαφέρει από την αντίστοιχη διαδικασία υπολογισμού για τα οδικά τμήματα. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το λογισμικό Google Earth, ενώ απεικονίζει τα υφιστάμενα σιδηροδρομικά δίκτυα, δεν παρέχει την δυνατότητα αυτόματης εξαγωγής της πορείας της σιδηροδρομικής διαδρομής. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η δημιουργία μιας «εισαγόμενης από τον χρήστη» διαδρομής χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα στο Google Earth εργαλεία σχεδιασμένα για αυτόν τον σκοπό («Χάρακας – Νέα Διαδρομή»). Η ανωτέρω «εισαγόμενη» διαδρομή χαράσσεται ακολουθώντας την σιδηροδρομική διαδρομή που απεικονίζεται στον

χάρτη του Google Earth. Μετά από δοκιμές προέκυψε ότι μια «εισαγόμενη» διαδρομή που δημιουργείται εισάγοντας σημεία ανά 100 μέτρα προσεγγίζει ικανοποιητικά την διαδρομή Google Earth. Η «εισαγόμενη» διαδρομή (συντεταγμένες X και Ψ των σημείων που ορίζουν την διαδρομή) αποθηκεύεται σε αρχείο τύπου (.kml). Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες X και Ψ εισάγονται στο διαδικτυακό εργαλείο «GPS Visualizer», απ' όπου εξάγονται τα υψόμετρα Z των αντίστοιχων σημείων της «εισαγόμενης» διαδρομής.

Το προφίλ κλίσεων που προκύπτει με την παραπάνω διαδικασία, εμπεριέχει ορισμένα σφάλματα, κυρίως λόγω ύπαρξης **σηράγγων**, που οδηγούν σε εξωπραγματικές διαφορές υψομέτρων μεταξύ διαδοχικών σημείων. Έτσι, κρίνεται απαραίτητος ο εντοπισμός αυτών των σημείων και η διόρθωσή των κλίσεων τους.

Για την πραγματοποίηση των παραπάνω διορθώσεων, επιχειρείται η εισαγωγή των δεδομένων σε **περιβάλλον GIS**. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα εισάγονται μέσω υπολογιστικού φύλλου του Excel (το οποίο περιέχει το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, το υψόμετρο, την απόσταση μεταξύ των σημείων, την αθροιστική τους απόσταση στο λογισμικό ArcMap, επιλέγοντας κοινό σύστημα συντεταγμένων (παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς GCS_WGS_1984), ώστε να υπάρχει αντιστοιχία με τον χάρτη βάσης (basemap) που προστίθεται για την χαρτογραφική απεικόνιση της διαδρομής. Στη συνέχεια, η διαδρομή μετατρέπεται σε layer, προκειμένου να μπορεί να γίνει επεξεργασία. Πλέον, έχοντας ενσωματώσει τα δεδομένα μας, μπορούμε να εντοπίσουμε (μέσω του attribute table), τα τμήματα που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές κλίσεων (π.χ. μεγαλύτερες από 20‰ ή 14‰ αν η γραμμή έχει κατασκευαστεί με τον νέο κανονισμό).



Εικόνα 16: Εντοπισμός σημείων ύπαρξης σήραγγων μέσω λογισμικού GIS

Αποδεικνύεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των τμημάτων όπου παρουσιάζονται υψηλές κλίσεις ανήκει σε περιοχές όπου η σιδηροδρομική γραμμή διέρχεται μέσω σήραγγας. Μέσω παράλληλης χαρτογραφικής απεικόνισης που προσφέρει το λογισμικό, τα εν λόγω τμήματα εντοπίζονται επ' ακριβώς και διορθώνονται βάσει του της διαφοράς υψομέτρου μεταξύ των σημείων εισόδου και των σημείων εξόδου, χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

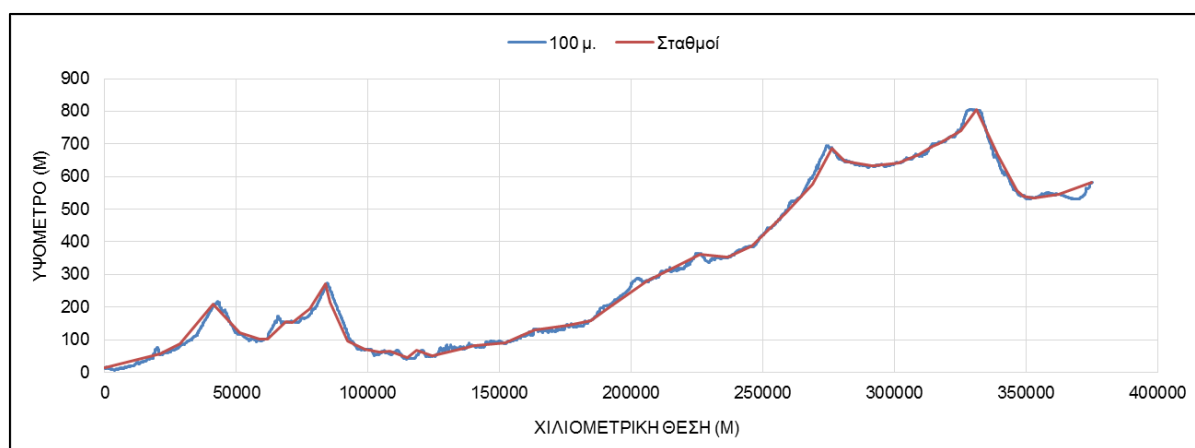
$$H_i = H_{\text{εισόδου}} + (X_i - X_{\text{εισόδου}}) * \left(\frac{H_{\text{εξόδου}} - H_{\text{εισόδου}}}{X_{\text{εξόδου}} - X_{\text{εισόδου}}} \right)$$



Εικόνα 17: Εκτίμηση κλίσεων σήραγγων μέσω των υψομέτρων εισόδου και εξόδου

Μ' αυτόν τον τρόπο τελικά επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός προφίλ κλίσεων που μπορεί να θεωρηθεί ότι αντανακλά την πραγματικότητα σε ικανοποιητικό βαθμό.

Παρόλο που η παραπάνω διαδικασία οδηγεί σε εκτίμηση των πραγματικών κλίσεων, είναι όπως γίνεται αντιληπτό αρκετά χρονοβόρα, γεγονός που θα καθιστούσε απαγορευτική την επιλογή της για μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, π.χ. εξαγωγή υψομέτρων κατά μήκος του συνόλου του σιδηροδρομικού δικτύου μιας χώρας. Για τον λόγο αυτό, εξετάσθηκε και ένας **εναλλακτικός τρόπος εξαγωγής του προφίλ των κλίσεων.**



Εικόνα 18: Προφίλ κλίσεων της σιδηροδρομικής διαδρομής Θεσσαλονίκη- Σόφια, όπως προκύπτει: (α) από τα υψόμετρα σημείων της γραμμής ανά 100 μ. και (β) από τα υψόμετρα των ενδιάμεσων σταθμών

Συγκεκριμένα, εντοπίζονται οι ενδιάμεσοι σιδηροδρομικοί σταθμοί της διαδρομής, οι οποίοι κατά κανόνα δεν βρίσκονται μέσα σε σήραγγες και βάσει των συντεταγμένων τους εξάγονται τα αντίστοιχα υψόμετρα. Παράλληλα, ανατρέχοντας στις αντίστοιχες δηλώσεις δικτύου, συλλέγονται οι χιλιομετρικές θέσεις των σταθμών, από τις οποίες προκύπτει τόσο η αθροιστική απόσταση της διαδρομής όσο και η απόσταση μεταξύ των σταθμών. Η εικόνα 18 παρουσιάζει τα προφίλ κλίσεων που προκύπτουν μέσω των δύο τρόπων υπολογισμού. Αν και συγκρίνοντας τα δύο προφίλ κλίσεων δεν φαίνονται αισθητές διαφορές, ο έλεγχος εγκυρότητας (βλ. ενότητα 3.3.2) δείχνει πως τα αποτελέσματα κατανάλωσης που προκύπτουν αξιοποιώντας το προφίλ κλίσεων μέσω μετρήσεων υψομέτρων σταθμών δεν οδηγούν σε τόσο ακριβείς εκτιμήσεις.

3.2.2. Προσαρμογή μοντέλου MEET II

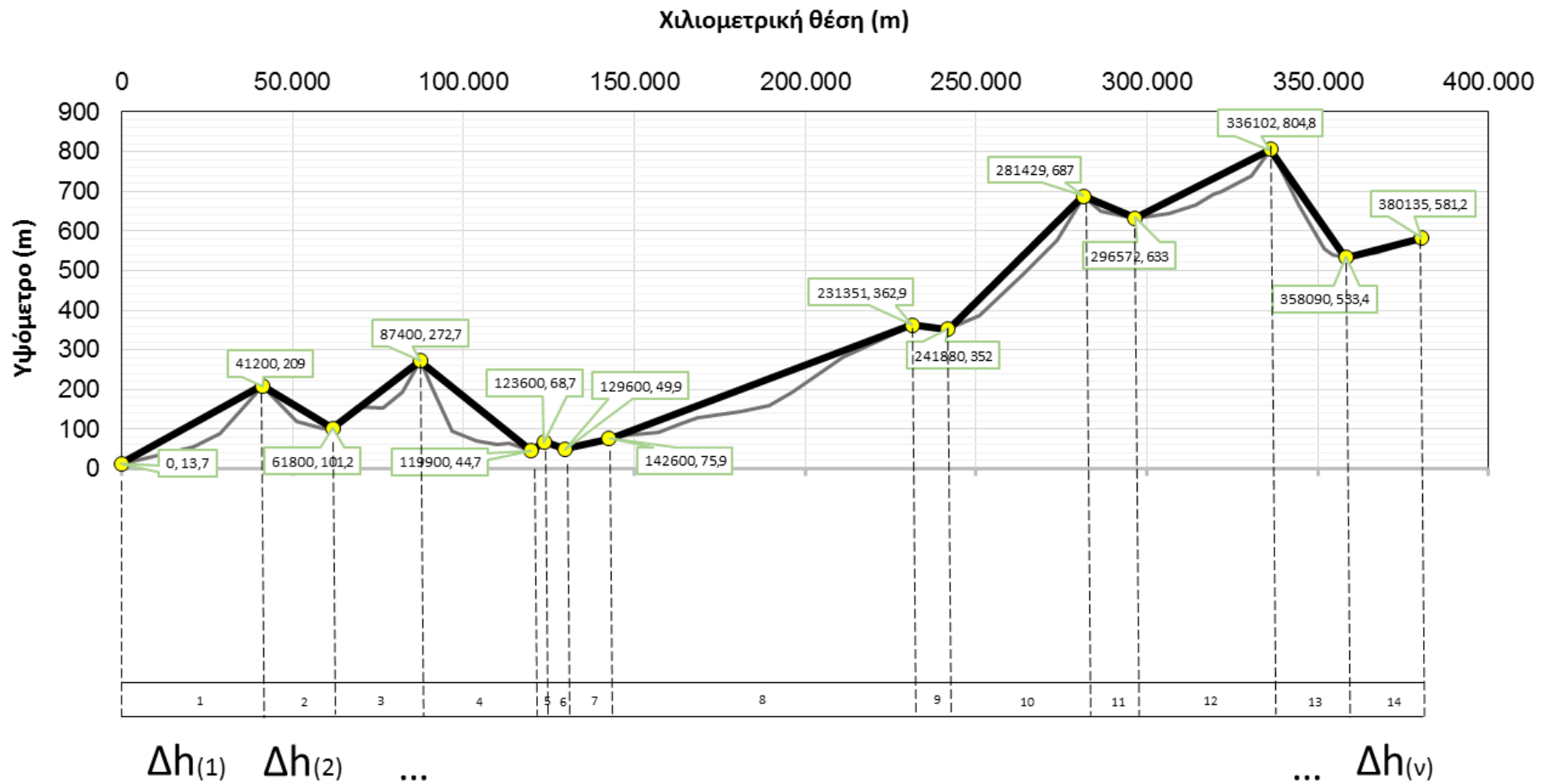
Αξιοποιώντας το προφίλ κλίσεων που εξάγεται με τον παραπάνω τρόπο, είναι επίσης εφικτή και η προσαρμογή του μοντέλου MEET II σε ομοιογενή από άποψη κλίσεων τμημάτων της διαδρομής, προκειμένου ο υπολογισμός μέσω του μοντέλου να είναι ακριβέστερος [40][41].

Όπως έχει αναλυτικά παρουσιαστεί κατά την βιβλιογραφική επισκόπηση, η σχέση υπολογισμού, στην οποία καταλήγει το εν λόγω μοντέλο για την εκτίμηση της κατανάλωσης είναι η παρακάτω:

$$EC = \frac{N_{stop} + 1}{L} * \frac{V_{max}^2}{2} + B_o + B_1 * V_{avg} + B_2 * V_{avg}^2 + g * \frac{\Delta h}{L}$$

Στην περίπτωση λοιπόν που προσδιοριστεί ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους ομοιογενών τμημάτων (μήκος, υψομετρική διαφορά), το μοντέλο εφαρμόζεται τόσες φορές όσα και τα παραπάνω ομοιογενή τμήματα. Τα αποτελέσματα του ελέγχου εγκυρότητας της ενότητας 3.3.2 αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή του μοντέλου MEET II σύμφωνα με τα παραπάνω οδηγεί σε εκτιμήσεις πολύ πιο κοντά στην πραγματικότητα.

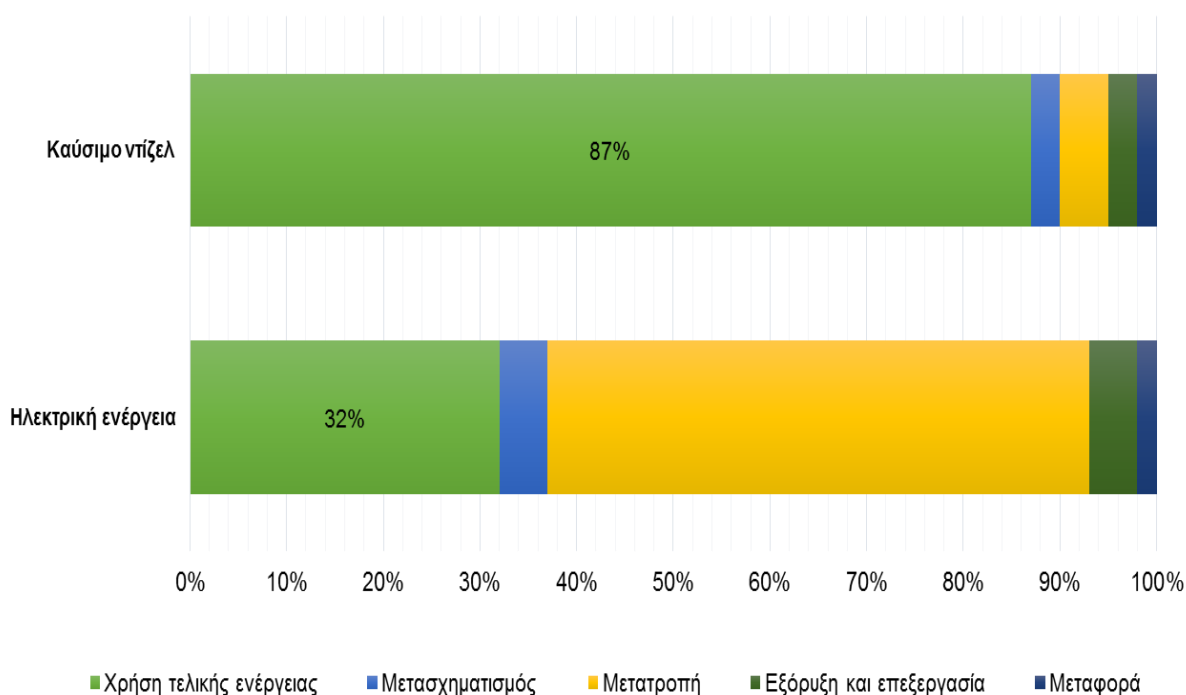
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η λογική εξαγωγής των ομοιογενών τμημάτων κατά μήκος εξεταζόμενης διαδρομής (Θεσσαλονίκη – Σόφια):



Εικόνα 19: Εξαγωγή ομοιογενών τμημάτων (από άποψη κλίσεων) κατά μήκος εξεταζόμενης διαδρομής

3.2.3. Προσαρμογή μοντέλων ώστε να δίνουν αποτελέσματα και για ντιζελοκίνητους συρμούς

Οι υπολογισμοί ορισμένων εκ των μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων που εξετάστηκαν αναφέρονται σε κατανάλωση ενέργειας ηλεκτροκίνητων συρμών. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εφαρμογή τους, σε τμήματα ντιζελοκίνησης, υιοθετείται ένας τρόπος **μετασχηματισμού της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των ηλεκτροκίνητων συρμών σε κατανάλωση καυσίμου ντιζελοκίνητων συρμών** μέσω ενός συντελεστή (**37%**). Ο συγκεκριμένος συντελεστής χρησιμοποιείται στο μοντέλο του EcotransIT, ενώ η ίδια παραδοχή έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλες σχετικές εργασίες και μελέτες [42].



Εικόνα 20: Ποσοστιαία κατανομή της ενέργειας από την παραγωγή έως την χρήση της για την ηλεκτρική ενέργεια και για καύσιμο ντίζελ

Σύμφωνα με δημοσίευση του IFEU [43], η κατανάλωση της τελικής ενέργειας της ντιζελοκίνησης μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της κατανάλωσης της τελικής ενέργειας της ηλεκτροκίνησης, διότι η συνολική απόδοση της ντιζελοκίνητης (συμπεριλαμβανομένης και της παραγωγής του καυσίμου) είναι σχεδόν ίδια με τη συνολική απόδοση της ηλεκτροκίνησης (συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας).

Τελικά, η απόδοση μιας ηλεκτρομηχανής είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη μιας ντιζελομηχανής, όμως ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι οι κύριες απώλειες ενέργειας λαμβάνουν χώρα υψηλότερα στην αλυσίδα, κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στις ντιζελομηχανές η απώλειες λαμβάνουν χώρα στη μηχανή αυτή καθαυτή.

Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος σε ενέργεια για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου ντίζελ και την διαφορετική απόδοση των δύο ειδών μηχανών, μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά παραδοχή η χρήση της συνάρτησης της ηλεκτροκίνησης για τον υπολογισμό της τελικής κατανάλωσης της ντιζελοκίνησης, διαιρώντας με την απόδοση της μετατροπής της τελικής ενέργειας από ηλεκτρική σε ντίζελ (που είναι κατά προσέγγιση 0,37).

3.3. Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων

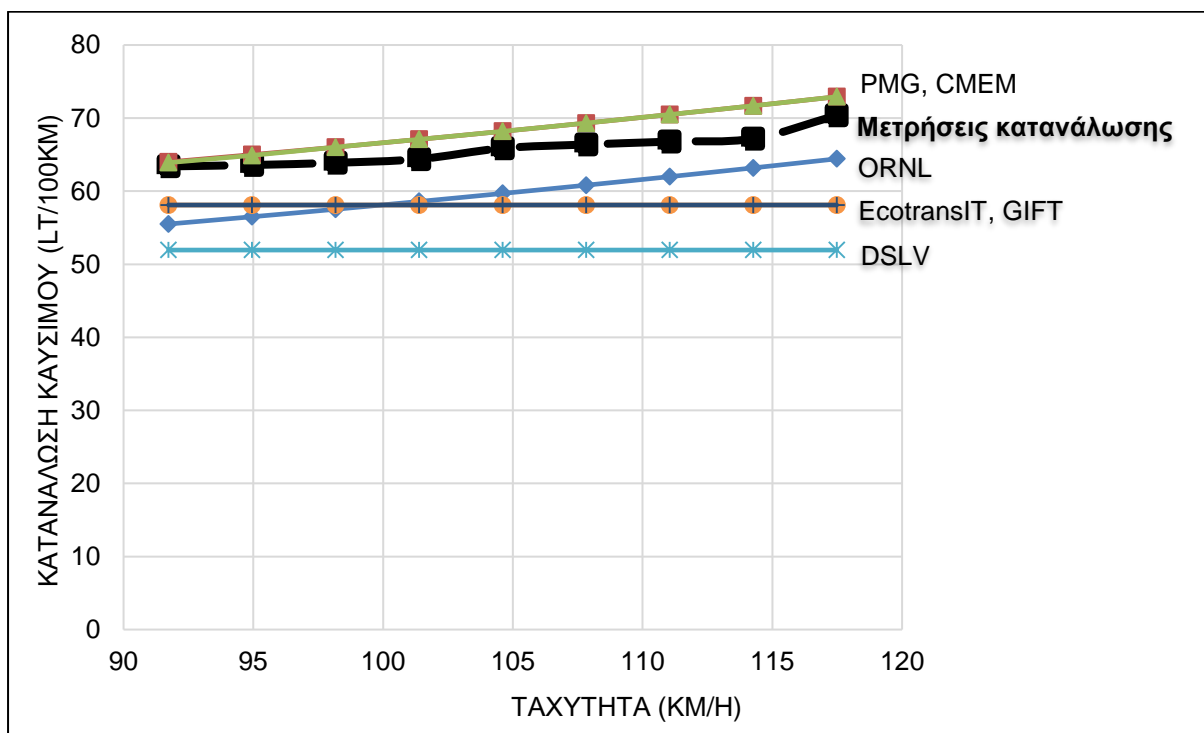
3.3.1. Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων οδικών οχημάτων μέσω βιβλιογραφικών αναφορών

Όπως γίνεται αντιληπτό, η βασική διαφοροποίηση των πιο απαιτητικών μοντέλων σε σύγκριση με τα απλούστερα, είναι καταρχάς ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουν υπόψη τους στον υπολογισμό την **κλίση της διαδρομής**. Η συγκεκριμένη παράμετρος έχει ιδιαίτερα μεγάλη επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας. Για αυτό και το **πρώτο σενάριο ελέγχου** πραγματοποιείται βάσει αυτής της παραμέτρου.

Οι τιμές κατανάλωσης που προκύπτουν από τα μοντέλα οδικών οχημάτων συγκρίνονται με πραγματικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια σχετικής μελέτης του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. [44] και αναφέρονται σε **κίνηση φορτηγού οχήματος σε ανηφορικό οδόστρωμα**. Λόγω του ότι τα επιτρεπόμενα όρια ταχύτητας στις Η.Π.Α. είναι πιο υψηλά από τα αντίστοιχα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το φάσμα ταχυτήτων στο οποίο υπάρχει διαθεσιμότητα πραγματικών μετρήσεων είναι περίπου από 90 -115 km/h. Οι μετρήσεις αναφέρονται σε φορτηγό όχημα μικτού βάρους 33,4 τόνων και σε μέση κλίση +1,5%.

Παρατηρούμε ότι τα μοντέλα CMEM και PMG συγκλίνουν αφενός μεταξύ τους, διότι έχουν πολύ κοντινούς αλγόριθμους υπολογισμού, και αφετέρου με τις πραγματικές μετρήσεις σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό βαθμό, της τάξεως του 5%. Ακολουθεί το μοντέλο του ORNL με απόκλιση της τάξεως του 10% από τις πραγματικές μετρήσεις. Τα μοντέλα EcotransIT και GIFT, για χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας εκτιμούν ικανοποιητικά την υφιστάμενη κατανάλωση, όμως για μεγαλύτερες τιμές αποκλίνουν κατά 20-25%. Τέλος, το μοντέλο του DSLV, όταν εφαρμόζεται για λοφώδες έδαφος, κίνηση εντός αστικού δικτύου και για πλήρως έμφορτο όχημα δίνει ως αποτέλεσμα μια σταθερή μέση τιμή κατανάλωσης που παρουσιάζει απόκλιση της τάξεως του 30%. Αυτό είναι εν μέρει λογικό, διότι το μοντέλο του DSLV, υπολογίζοντας την κατανάλωση βάσει μέσης τιμής μετρήσεων δεν ακολουθεί τις υψηλότερες τιμές που προκύπτουν για το αρκετά ακραίο σενάριο κλίσεων που εξετάστηκε στα πλαίσια της μελέτης (κλίση +1,5% για 100km). Παρ' όλα αυτά, το γεγονός ότι τα μοντέλα CMEM, PMG και ακολούθως το μοντέλο του ORNL, λαμβάνουν υπόψη τους την κλίση με

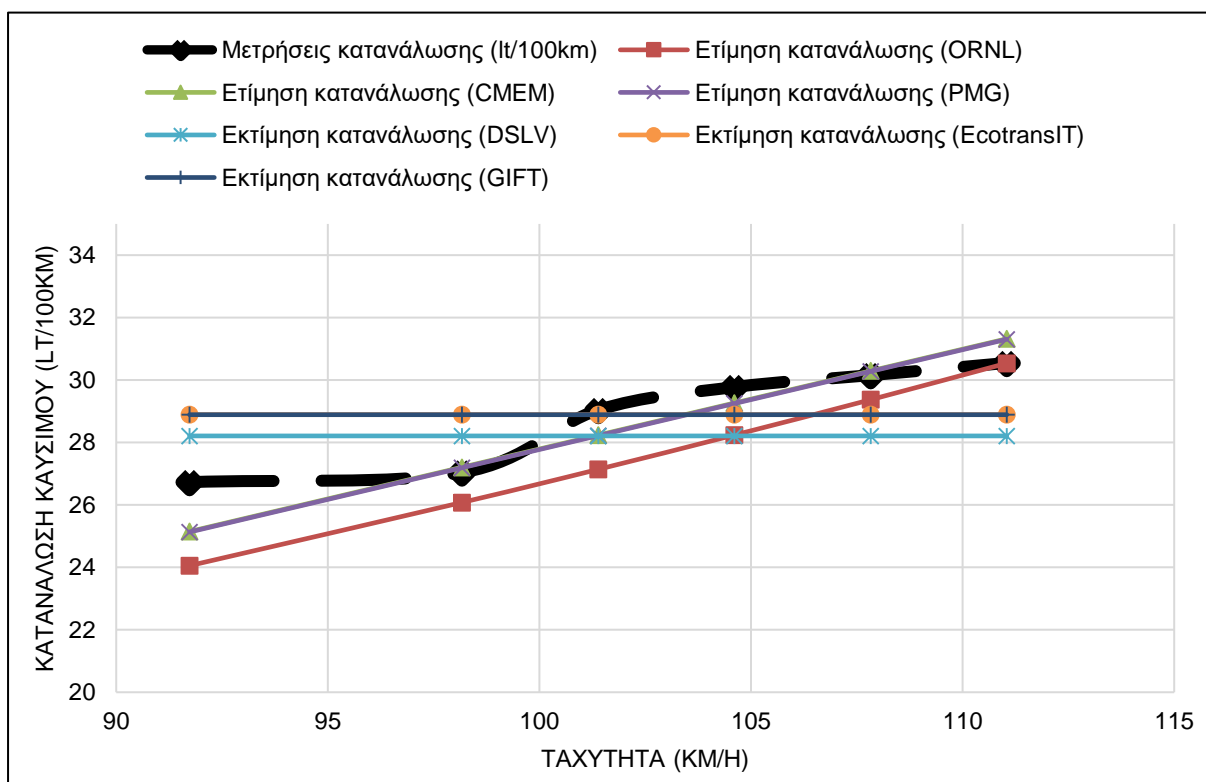
περισσότερη ακρίβεια αποδεικνύεται αξιοποιώντας τα συμπεράσματα μιας ακόμη μελέτης της Γερμανικής Ένωσης Αυτοκινητοβιομηχανιών [45]. Σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη, σε περίπτωση κίνησης του οχήματος σε ανηφορικό οδόστρωμα, η κατανάλωσή του μπορεί να αυξηθεί κατά περίπου 50%. Παρόλο που η διατύπωση του παραπάνω σεναρίου είναι ασαφής, πραγματοποιούμε έναν αντίστοιχο έλεγχο και εφαρμόζουμε τα μοντέλα για αύξηση της κλίσης από 0% σε 0,5%. Η αύξηση στις τιμές κατανάλωσης που προκύπτουν είναι της τάξης του 25% για το μοντέλο του DSLV (επίπεδο-λοφώδες έδαφος), 38% για το μοντέλο του ORNL και 52,3% για τα μοντέλα CMEM και PMG.



Διάγραμμα 1: Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις ως προς την κίνηση σε ανηφορικό οδόστρωμα

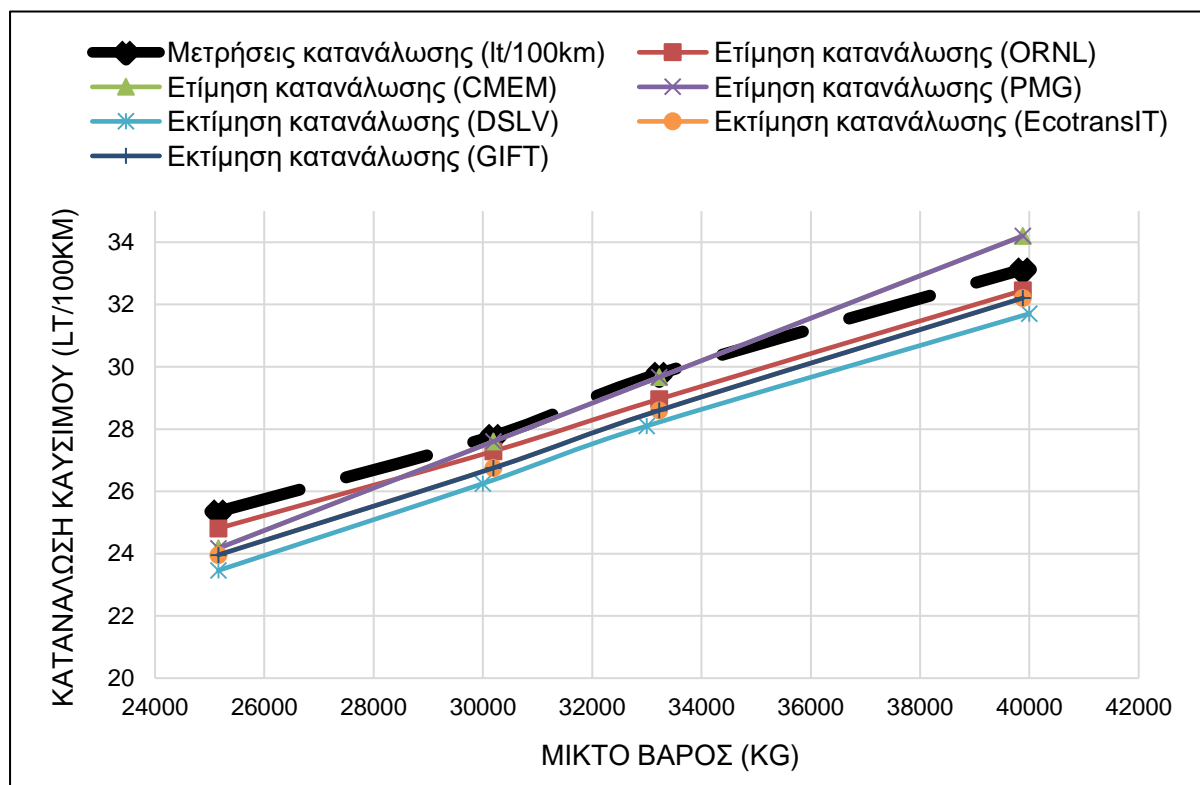
Κατά το **δεύτερο σενάριο ελέγχου**, οι τιμές κατανάλωσης που προκύπτουν από τα μοντέλα συγκρίνονται με πραγματικές μετρήσεις κατανάλωσης [44] φορτηγού οχήματος μικτού βάρους 33,4 τόνων για διάφορες τιμές της **ταχύτητας** και για κίνηση σε επίπεδο έδαφος

Παρατηρούμε ότι για κάποιες τιμές της ταχύτητας τα μοντέλα συγκλίνουν τόσο μεταξύ τους, όσο και με τις πραγματικές μετρήσεις. Ειδικότερα, τα μοντέλα CMEM και PMG ακολουθούν τις πραγματικές μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ ακολουθεί και πάλι το μοντέλο του ORNL με ελαφρώς χαμηλότερες εκτιμήσεις. Τα μοντέλα του DSLV, αυτή τη φορά εφαρμόζεται για επίπεδο έδαφος και για πλήρως έμφορτο φορτηγό όχημα κινούμενο σε αυτοκινητόδρομο. Το γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο του DSLV, (αλλά και τα EcotransIT-GIFT) συγκλίνει περισσότερο με τις πραγματικές μετρήσεις οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι η δοκιμή αναφέρεται σε επίπεδο έδαφος, οπότε δεν υφίσταται διαφορά της κλίσης που λαμβάνεται μεταξύ των μοντέλων. Ο δεύτερος είναι ότι η δοκιμή αναφέρεται σε φορτηγό μικτού βάρους 33,4 τόνων, τιμή που αντιστοιχεί σχεδόν επ' ακριβώς στην μέση τιμή του φάσματος μετρήσεων του DSLV. Υπενθυμίζεται πως το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει δυνατότητα εκτίμησης της κατανάλωσης για φορτηγά οχήματα μικτού βάρους 24-40 τόνων.



Διάγραμμα 2: Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας (επίπεδο έδαφος)

Κατά το **τρίτο σενάριο ελέγχου**, γίνεται σύγκριση των τιμών υπολογισμού με πραγματικές μετρήσεις κατανάλωσης [44] για διαφορετικές τιμές **μικτού βάρους**. Οι μετρήσεις αναφέρονται σε κίνηση φορτηγών οχημάτων σε οδόστρωμα μηδενικής κλίσης με ταχύτητα 65 μιλίων/ώρα (περίπου 105km/h)



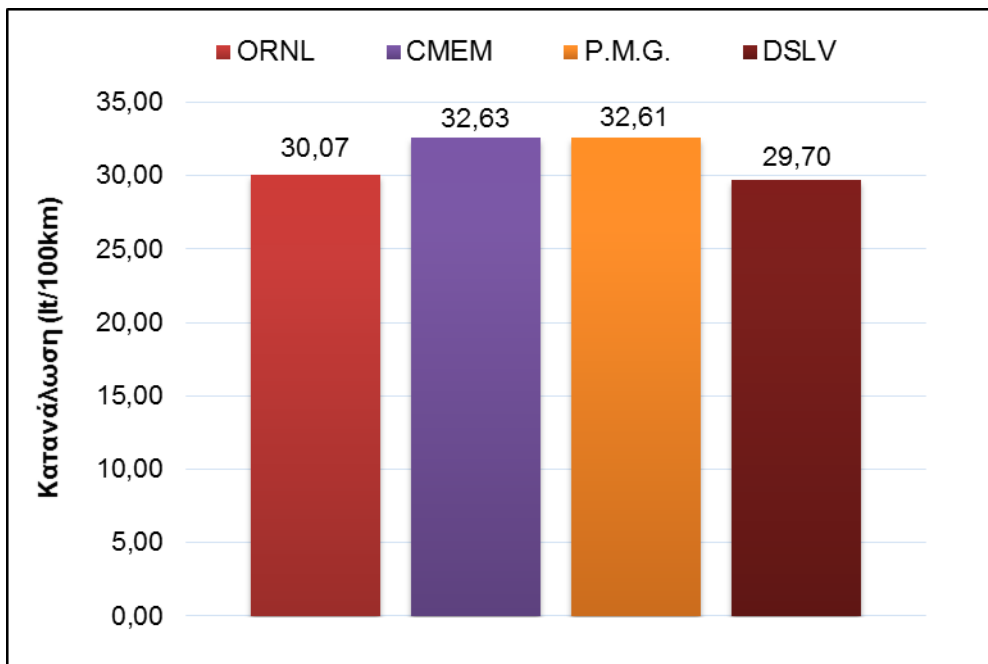
Διάγραμμα 3: Σύγκριση μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμου με πραγματικές μετρήσεις για διαφορετικές τιμές μικτού βάρους (επίπεδο έδαφος)

Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές, τα μοντέλα συγκλίνουν τόσο μεταξύ τους όσο και με τις μετρήσεις πραγματικής κατανάλωσης, με τα μοντέλα PMG, CMEM και ORNL να προσεγγίζουν ακριβέστερα τις πραγματικές καταναλώσεις. Τονίζεται όμως ότι το εν λόγω σενάριο ελέγχου (όπως και το δεύτερο) αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες (μηδενική κλίση) και δεν αντιπροσωπεύει ρεαλιστικές συνθήκες κίνησης.

Βάσει της παραπάνω αξιολόγησης, προκύπτει καταρχάς το συμπέρασμα ότι η παράμετρος της κλίσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανάλωση καυσίμου. Συνεπώς, κρίσιμο ζήτημα για ένα μοντέλο υπολογισμού είναι ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει υπόψη του την κλίση. Τα πιο σύνθετα μοντέλα CMEM, PMG και ORNL ανταποκρίνονται σε γενικές γραμμές με περισσότερη ακρίβεια, ανεξαρτήτως εάν η

δοκιμή πραγματοποιείται σε ανηφορικό ή επίπεδο οδόστρωμα. Όσον αφορά τα μοντέλα DSLV, EcotransIT και GIFT, βασίζοντας τις μετρήσεις τους σε μέσες τιμές ταχύτητας και συνυπολογίζοντας έμμεσα την κλίση μέσω διορθωτικών συντελεστών, παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από την πραγματικότητα ($\pm 10-30\%$)

Τα ανωτέρω συμπεράσματα συμφωνούν με στοιχεία σχετικής μελέτης που έχει δημοσιευτεί από την Γερμανική Ένωση Αυτοκινητοβιομηχανιών [45]. Σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη, ένα πλήρως έμφορτο φορτηγό όχημα μικτού βάρους 40 τόνων απαιτεί σήμερα περίπου 32 λίτρα καυσίμου ανά 100 χιλιόμετρα όταν κινείται σε οδό με μηδενική κλίση και με την μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα. Τα αποτελέσματα των μοντέλων, όταν εφαρμόζονται στο παραπάνω σενάριο παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

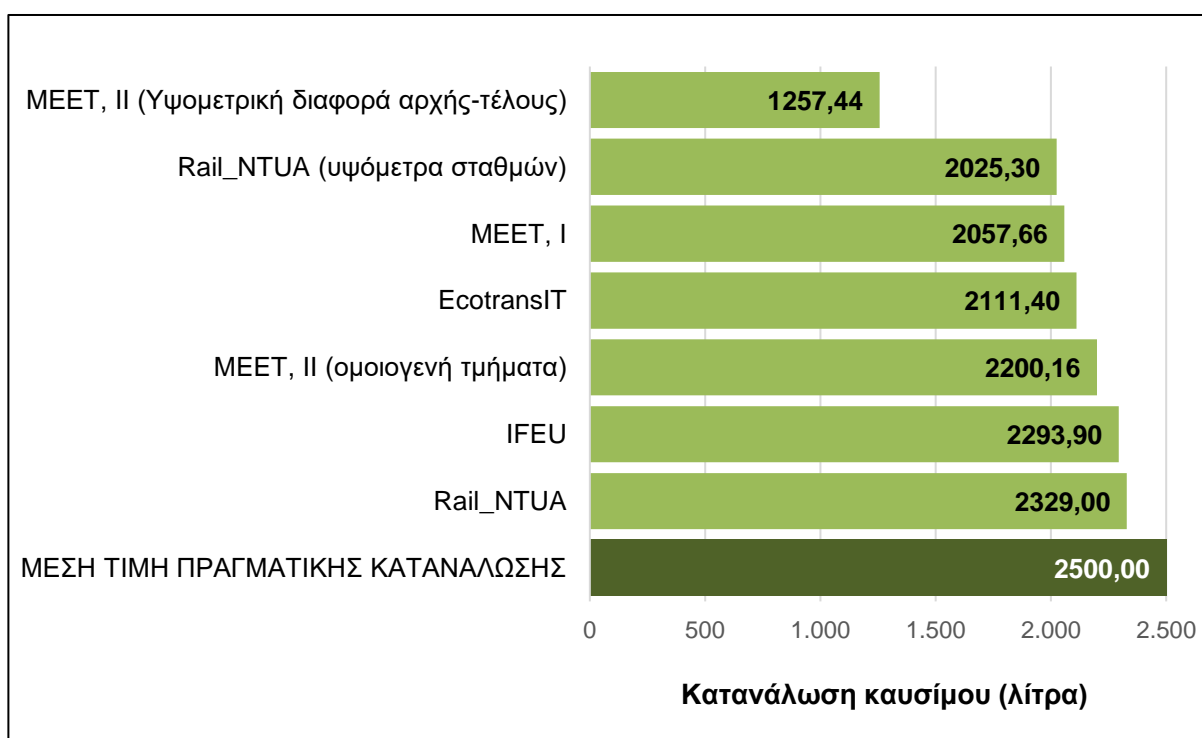


Διάγραμμα 4: Κατανάλωση καυσίμου πλήρως έμφορτου φορτηγού οχήματος μικτού βάρους 40 τόνων (κίνηση σε επίπεδο έδαφος με ταχύτητα 85km/h)

Παρατηρούμε πως τα μοντέλα CMEM και PMG υπολογίζουν κατανάλωση 32,6 λίτρων ανά 100 χιλιόμετρα, τιμή που συμφωνεί με το συμπέρασμα της παραπάνω μελέτης. Τα μοντέλα ORNL και DSLV, παρόλο που δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από την μέτρηση, εκτιμούν ελαφρώς μικρότερη τιμή κατανάλωσης.

3.3.2. Έλεγχος εγκυρότητας σιδηροδρομικών οχημάτων στη διαδρομή Δομοκός – Αθήνα

Τα μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικής μεταφοράς Rail_NTUA, IFEU, MEET I, MEET II, EcotransIT και GIFT εφαρμόζονται στο σιδηροδρομικό τμήμα Δομοκός – Αθήνα, για το οποίο υπάρχει διαθεσιμότητα μετρήσεων κατανάλωσης καυσίμου ντιζελοκίνητων συρμών της ΤΡΑΙΝΟΣΕ. Λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας περαιτέρω πραγματικών μετρήσεων, τα συμπεράσματα της σύγκρισης δεν είναι σε καμία περίπτωση απόλυτα. Ωστόσο, αξιοποιώντας την παραπάνω διαδρομή υπάρχει η δυνατότητα μιας ενδεικτικής συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ των μοντέλων υπολογισμού.



Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα συγκριτικής εφαρμογής μοντέλων υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού στο τμήμα Δομοκός - Αθήνα

Παρατηρούμε πως το μοντέλο Rail_NTUA, όταν εφαρμόζεται βάσει του αναλυτικού προφίλ κλίσεων, προσεγγίζει την τιμή πραγματικής κατανάλωσης με απόκλιση μόλις -6,84% (όταν εφαρμόζεται βάσει προφίλ κλίσεων μέσω μετρήσεων ενδιάμεσων σταθμών αποκλίνει κατά -18,99%), ενώ ακολουθεί το μοντέλο IFEU, με επίσης μικρή απόκλιση -8,24%. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στην

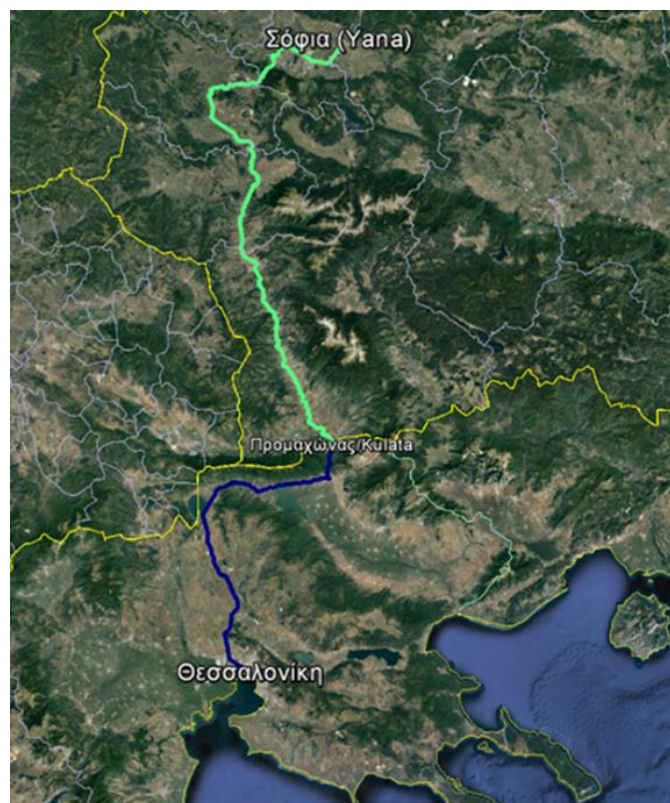
συγκεκριμένη διαδρομή, τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των δύο τρόπων εφαρμογής του μοντέλου MEET, II παρουσιάζουν τεράστια διαφορά. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του μόνο την υψομετρική διαφορά μεταξύ Δομοκού και Αθήνας, που είναι -78,9 m, επομένως η σχέση υπολογισμού οδηγεί σε πολύ μικρή τιμή κατανάλωσης (απόκλιση -49,70%). Αυτό συμβαίνει, διότι κατά αυτόν τον τρόπο εφαρμογής, το μοντέλο όχι μόνο δεν συνυπολογίζει τα τμήματα που παρουσιάζουν ανωφέρεια, αλλά θεωρεί την διαδρομή ως γενόμενη σε αρνητική κλίση καθ' όλο το μήκος της. Αντίθετα, όταν το μοντέλο εφαρμόζεται τμηματικά σε ομοιογενή τμήματα, το αποτέλεσμα βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό, αποκλίνοντας -11,99% από την πραγματική μέτρηση. Ακολουθούν τα μοντέλα EcotransIT και GIFT (απόκλιση -15,54%) και MEET, I (απόκλιση -17,69%).

3.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων οδικών και σιδηροδρομικών μοντέλων στην διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια

Το σύνολο των μοντέλων που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εφαρμόζονται στο οδικό και σιδηροδρομικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια, το οποίο παρουσιάζει σημαντική ανωφέρεια. Η εφαρμογή των μοντέλων πραγματοποιείται για τρεις κατηγορίες σεναρίων φόρτωσης (ελαφριά, συνήθης μίξη και βαριά). Στόχος της εφαρμογής είναι η διερεύνηση της επιρροής της κλίσης, του βάρους και του είδους των εμπορευμάτων, καθώς και του τρόπου με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη από τα μοντέλα στον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας.

3.4.1. Περιγραφή διαδρομής

Το σιδηροδρομικό και οδικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας/Κυλάτα – Σόφια (Yana) είναι εκείνο που συνδέει αρχικά την χώρα μας με την γειτονική Βουλγαρία και εν συνεχεία με τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης κατά μήκος του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV και ως εκ τούτου αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο τμήμα για τις εμπορευματικές μεταφορές στην Ελλάδα.



Εικόνα 21: Διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια

Τα βασικά στοιχεία της διαδρομής μέχρι σήμερα είναι τα παρακάτω:

- Μήκος οδικού τμήματος: 328,5 km
- Μήκος σιδηροδρομικού τμήματος: 380,1 km
- Μήκος ηλεκτροκίνησης: 237,5 km (62%)
- Μήκος ντιζελοκίνησης: 142,6 km (38%)
- Μήκος μονής σιδηροδρομικής γραμμής: 267,0 km (70%)
- Μήκος διπλής σιδηροδρομικής γραμμής: 113,1 km (30%)
- Ταχύτητα σιδηροδρομικής γραμμής: 60 – 80 km/h
- Μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο: 20 ton

Δεδομένης της αρνητικής επίδρασης που έχει η υφιστάμενη κατάσταση των υποδομών κατά μήκος του συγκεκριμένου τμήματος, καταβάλλονται προσπάθειες βελτίωσής του μέσω προτάσεων αναβάθμισης. Τα έργα που έχουν προταθεί και είτε είναι σε εξέλιξη, είτε έχουν προγραμματιστεί με χρονικό ορίζοντα έως το 2020 ανά επιμέρους σιδηροδρομικό τμήμα της διαδρομής αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας

- Εγκατάσταση συστήματος ηλεκτροκίνησης
- Εκσυγχρονισμός υποδομών (γεφυρών κτλ.) κατά μήκος της διαδρομής (αύξηση μέγιστου επιτρεπόμενου αξονικού φορτίου από 20 σε 22,5 ton)
- Μετατροπή υφιστάμενης βοηθητικής γραμμής μήκους 60 km σε κύρια γραμμή (μετατροπή σιδηροδρομικής γραμμής από μονή σε διπλή)
- Βελτιστοποίηση συνδέσεων του λιμένα Θεσσαλονίκης με τον σιδηροδρομικό διάδρομο (κατασκευή ανισόπεδων κόμβων κ.α.)

Προμαχώνας/Kulata – Σόφια (Yana)

- Αναβάθμιση υφιστάμενης μονής σιδηροδρομικής γραμμής 207 km σε διπλή
- Εκσυγχρονισμός υποδομών κατά μήκος της διαδρομής (αύξηση μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας εμπορευματικών συρμών στα 120 km/h και επιβατικών στα 160 km/h)
- Βελτιστοποίηση του τερματικού σταθμού της Σόφιας (εξέλιξη σε εμπορευματικό κόμβο μεταφορτώσεων)

3.4.2. Σενάρια φόρτωσης

Προκειμένου η σύγκριση των μοντέλων να πραγματοποιηθεί βάσει μεγαλύτερου φάσματος μετρήσεων, το καθένα από αυτά εφαρμόζεται στις εξεταζόμενες διαδρομές για τρεις κατηγορίες σεναρίων φόρτωσης (16 συνολικά σενάρια φόρτωσης). Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο εισάγονται σενάρια φόρτωσης είναι να καταστεί δυνατή και μια εξίσου ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα ρύπων που προκύπτουν (βλέπε ενότητα 4). Ακολουθεί η επεξήγηση της έννοιας των σεναρίων φόρτωσης, καθώς και στοιχεία σχετικά με εκείνα που τελικά επιλέγονται.

Για την μεταφορά των φορτίων, μέσω οδικού ή σιδηροδρομικού δικτύου, χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις εμπορευματοκιβώτια τυποποιημένων διαστάσεων. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι εμπορευματοκιβωτίων είναι των 20, των 40 και των 45 ποδών.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά πρότυπων εμπορευματοκιβωτίων

Τύπος Ε/Κ	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Ύψος (m)	Μέγιστο μικό βάρος (tn)	Απόβαρο [t]	Μέγιστο ωφέλιμο βάρος [t]
20 ποδών	6,058	2,438	2,591	30,50	2,20	28,30
40 ποδών	12,192	2,438	2,896	30,50	4,00	26,50
45 ποδών	13,716	2,500	2,896	34,00	4,50	29,50

Το φορτίο που μεταφέρεται αποτελείται συνήθως από διάφορες διατάξεις εμπορευματοκιβωτίων, δηλαδή περισσότερα του ενός και διαφορετικών τύπων. Είναι επίσης αρκετά σύνηθες, ανάλογα με το είδος των αγαθών που μεταφέρονται, τα εμπορευματοκιβώτια να μην εξαντλούν την ικανότητά τους σε βάρος. Τα σενάρια φόρτωσης αναφέρονται ακριβώς σε αυτό το γεγονός και αφορούν ποικίλες διατάξεις μεταφερόμενου φορτίου (πλήθος κάθε τύπου εμπορευματοκιβωτίου και μικό βάρος).

Τα σενάρια φόρτωσης που επιλέγονται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής αντλούνται από την διπλωματική εργασία [36]. Σημειώνεται πως η κατανομή των φορτίων σε ελαφριά, μεσαίου βάρους, βαριά και πολύ βαριά έχει

πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τα ποσοστά που έχουν προκύψει από ευρωπαϊκή έρευνα [46] σχετική με τη διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων σε δύο από τους μεγαλύτερους σταθμούς μεταφόρτωσης της Ευρώπης, στα λιμάνια του Ρότερνταμ και του Αμβούργου. Για αυτόν τον λόγο κρίνονται αντιπροσωπευτικά για το σύνολο των διακινούμενων εμπορευματοκιβωτίων ανά την Ευρώπη. Συνεπώς, η χρήση τους στις εξεταζόμενες διαδρομές μπορούμε να πούμε πως προσδίδει και ρεαλιστικό χαρακτήρα στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται, αφού κάθε σενάριο αποτελεί την πλέον συνήθη διάταξη εμπορευματοκιβωτίων ανάλογα με το συνολικό τους βάρος και τον τύπο. Τα σενάρια φόρτωσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική ανά κατηγορία είναι τα παρακάτω:

Σενάρια #1 (συνήθης μίξη φορτίων). Αυτή η ομάδα σεναρίων περιλαμβάνει αγαθά όλων των κατηγοριών, από ελαφρά αγαθά (π.χ. προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας, ηλεκτρονικός εξοπλισμός) μέχρι πολύ βαριά (π.χ. προϊόντα χάλυβα, βαρέλια πετρελαίου). Το συνολικό μικτό βάρος των αγαθών κυμαίνεται από 100 (Σενάριο 11) έως 600 τόνους (Σενάριο 16).

Σενάρια #2 (μόνο ελαφριά φορτία). Αυτή η ομάδα σεναρίων περιλαμβάνει μόνο ελαφριά αγαθά, τα οποία παρόλο που καταλαμβάνουν τον όγκο εμπορευματοκιβωτίων μεγάλων διαστάσεων (40' και 45'), δεν εξαντλούν σε καμία περίπτωση την ικανότητά τους σε βάρος. Το συνολικό μικτό βάρος των αγαθών κυμαίνεται από 100 (Σενάριο 21) έως 400 τόνους (Σενάριο 24).

Σενάρια #3 (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία). Αυτή η ομάδα σεναρίων περιλαμβάνει αποκλειστικά φορτία μεγάλου έως πολύ μεγάλου βάρους, για την μεταφορά των οποίων γίνεται χρήση εμπορευματοκιβωτίων 20'. Το συνολικό μικτό βάρος των αγαθών κυμαίνεται από 200 (Σενάριο 31) έως 1200 τόνους (Σενάριο 36).

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται αρχικά το βάρος των εμπορευματοκιβωτίων ανά τύπο και κατηγορία φορτίου και εν συνεχεία το πλήθος των εμπορευματοκιβωτίων ανά τύπο και κατηγορία βάρους αγαθών που μεταφέρεται σε κάθε σενάριο (κατά απόλυτη αντιστοιχία με τον πίνακα 5):

Πίνακας 5: Βάρος εμπορευματοκιβωτίων ανά τύπο και κατηγορία φορτίου

Κατηγορία βάρους αγαθών	Ε/Κ	Μικτό βάρος Ε/Κ (tn)	Απόβαρο Ε/Κ (tn)	Ωφέλιμο φορτίο Ε/Κ (tn)
Ελαφριά	45'	13,5	4,5	9
	40'	12	4	8
Μεσαίου βάρους	45'	31,5	4,5	27
	40'	28	4	24
Βαριά	20'	23	2,2	20,8
	20'	30	2,2	27,8

Πίνακας 6: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίου Σεναρίων 2#

Σενάρια ομάδας #2.Χ		#2.1	#2.2	#2.3	#2.4
Ελαφριά	45'	5	10	15	20
	40'	3	6	8	11
Μεσαίου βάρους	45'	0	0	0	0
	40'	0	0	0	0
Βαριά	20'	0	0	0	0
	20'	0	0	0	0
ΣΥΝΟΛΟ Ε/Κ		8	16	23	31
ΜΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		103,5	207	298,5	402
ΩΦΕΛΙΜΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		69	138	199	268

Πίνακας 7: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίο Σεναρίων 3#

Σενάρια ομάδας #3.Χ		#3.1	#3.2	#3.3	#3.4	#3.5	#3.6
Ελαφριά	45'	0	0	0	0	0	0
	40'	0	0	0	0	0	0
Μεσαίου βάρους	45'	0	0	0	0	0	0
	40'	0	0	0	0	0	0
Βαριά	20'	6	12	18	24	30	37
	20'	2	4	6	8	10	12
ΣΥΝΟΛΟ Ε/Κ		8	16	24	32	40	49
ΜΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		198	396	594	792	990	1211
ΩΦΕΛΙΜΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		180,4	360,8	541,2	721,6	902	1103,2

Πίνακας 8: Πλήθος Ε/Κ ανά τύπο και κατηγορία φορτίο Σεναρίων 1#

Σενάρια ομάδας #1.Χ		#1.1	#1.2	#1.3	#1.4	#1.5	#1.6
Ελαφριά	45'	2	4	6	8	11	13
	40'	1	2	4	5	6	7
Μεσαίου βάρους	45'	1	1	2	3	3	4
	40'	0	1	1	1	2	2
Βαριά	20'	1	2	2	3	4	5
	20'	0	1	1	1	1	2
ΣΥΝΟΛΟ Ε/Κ		5	11	16	21	27	33
ΜΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		93,5	213,5	296	389,5	493	616,5
ΩΦΕΛΙΜΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ (t)		73,8	172,4	233,4	307,2	387	488,6

Όσον αφορά την **σύνθεση εμπορευματικού συρμού** για καθένα από τα παραπάνω σενάρια, προκύπτει βάσει του **αλγορίθμου φόρτωσης** του μοντέλου Rail_NTUA: η μικτή ελκόμενη μάζα του συρμού (άθροισμα του μικτού βάρους των εμπορευματοκιβωτίων και του απόβαρου των βαγονιών), ο απαιτούμενος αριθμός ηλεκτροκίνητων ή ντιζελοκίνητων μηχανών έλξης και τελικά η **μικτή μάζα του συρμού** (περιλαμβανομένου του απαιτούμενου αριθμού μηχανών έλξης). Σ' αυτό το σημείο γίνεται η παραδοχή χρήσης μηχανών έλξης ελληνικών προδιαγραφών. Για τα τμήματα της ηλεκτροκίνησης θεωρούμε ότι χρησιμοποιείται τετραξονική ηλεκτρομηχανή βάρους 80 τόνων και για αυτά της ντιζελοκίνησης εξαξονική ντιζελομηχανή βάρους 120 τόνων. Το βάρος τους είναι στα όρια της αντοχής του σιδηροδρομικού δικτύου που εξετάσθηκε, όπου το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ανά άξονα είναι 22,5 τόνοι, αλλά σε πολλά σημεία δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 20 τόνους ανά άξονα ($\frac{120}{6}$ και $\frac{80}{4}$).

Παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας με τα στοιχεία σύνθεσης του συρμού και τελικά της μικτής μάζας του που χρησιμοποιήθηκε ανά σενάριο φόρτωσης, όπως αυτές προκύπτουν από την διπλωματική [36]:

Πίνακας 9: Σύνθεση συρμού για τα σενάρια φόρτωσης 1# (Συνήθης μίξη φορτίων)

ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ #1 (ΣΥΝΗΘΗΣ ΜΙΞΗ ΦΟΡΤΙΩΝ)							
Κατηγορία βάρους αγαθών	ΤΥΠΟΣ Ε/Κ	#1.1	#1.2	#1.3	#1.4	#1.5	#1.6
Ελαφριά	Ελαφριά 45'	2	4	6	8	11	13
	Ελαφριά 40'	1	2	4	5	6	7
Μεσαίου βάρους	Μεσαίου βάρους 45'	1	1	2	3	3	4
	Μεσαίου βάρους 40'	0	1	1	1	2	2
Βαριά	Βαριά 20'	1	2	2	3	4	5
	Βαριά 20'	0	1	1	1	1	2
ΣΥΝΟΛΟ Ε/Κ		5	11	16	21	27	33
ΜΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ		93,5	213,5	296	389,5	493	616,5
ΩΦΕΛΙΜΟ ΒΑΡΟΣ Ε/Κ		73,8	172,4	233,4	307,2	387	488,6
ΜΙΚΤΗ ΕΛΚΟΜΕΝΗ ΜΑΖΑ		187,5	425	625	812,5	1033,5	1274,5
Απαιτούμενος αριθμός ηλεκτρομηχανών		1	1	1	1	1	2
Βάρος ηλεκτρομηχανής		80	80	80	80	80	80
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΣΥΡΜΟΥ (ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ)		267,5	505	705	892,5	1113,5	1434,5
Απαιτούμενος αριθμός ντιζελομηχανών		1	1	1	1	2	2
Βάρος ντιζελομηχανής		120	120	120	120	120	120
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΣΥΡΜΟΥ (ΝΤΙΖΕΛΟΚΙΝΗΣΗ)		307,5	545	745	932,5	1273,5	1514,5

Έχοντας στην διάθεσή μας τα παραπάνω δεδομένα εισόδου και το προφίλ των κλίσεων της σιδηροδρομικής διαδρομής, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε συγκριτική εφαρμογή των σιδηροδρομικών μοντέλων Rail_NTUA, IFEU, MEET I, MEET II, EcotransIT και GIFT σε κάθε σενάριο φόρτωσης.

Όσον αφορά την πραγματοποίηση των σεναρίων από στόλο φορτηγών οχημάτων και για τον προσδιορισμό του **απαιτούμενου αριθμού φορτηγών ανά κατηγορία μικτού βάρους**, ανατρέχουμε σε σχετικούς πίνακες μεγίστων επιτρεπόμενων φορτίων και διαστάσεων, όπως αυτές ορίζονται για την μεταφορά εμπορευμάτων [47].

Πίνακας 10: Μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις οχημάτων μεταφοράς εμπορευμάτων [47]

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	
Μέγιστο ύψος	4m
Μέγιστο πλάτος	
Όχημα οποιουδήποτε τύπου	2,55m
Ψυκτικές υπερκατασκευές των ψυγείων με παχέα τοιχώματα	2,60m
Μέγιστο μήκος	
Όχημα με κινητήρα	12m
Ρυμουλκούμενο	12m
Αρθρωτό όχημα	16,50m
Οδικός συρμός	18,75m

Πίνακας 11: Μέγιστα επιτρεπόμενα βάρη έμφορτου οχήματος για διεθνείς μεταφορές [47]

Είδος οχήματος	Βάρος (kg)
Διαξονικό ρυμουλκούμενο	18000
Τριαξονικό ρυμουλκούμενο	24000
Διαξονικά οχήματα με κινητήρα	18000
Τριαξονικά οχήματα με κινητήρα	25000-26000
Τετραξονικά οχήματα με κινητήρα	32000
Οδικοί συρμοί με πέντε ή έξι άξονες	40000
Αρθρωτά οχήματα με πέντε ή έξι άξονες	40000-44000
Τετραξονικοί συρμοί αποτελούμενοι από διαξονικό φορτηγό και διαξονικό ρυμουλκούμενο	36000
Τετραξονικά αρθρωτά οχήματα αποτελούμενα από διαξονικό ημιρυμουλκούμενο με απόσταση των αξόνων του ημιρυμουλκούμενου	36000-38000

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιτρεπόμενα όρια, και λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγιστο ωφέλιμο βάρος που μπορούν να μεταφέρουν τα φορηγά είναι 25.000-29.000 kg καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα: λόγω των διαστάσεων της συρόμενης βάσης ή του ρυμουλκούμενου οχήματος, τα φορηγά μπορούν να μεταφέρουν μόνο ένα εμπορευματοκιβώτιο 40' ή 45' και δύο 20'. Έτσι, στην περίπτωση χρήσης ε/κ 40' ή 45', τα φορηγά θα μεταφέρουν ένα την φορά, διότι εξαντλούν το διαθέσιμο χώρο και παράλληλα δεν υπερβαίνεται η μέγιστη μεταφορική ικανότητα. Ωστόσο, στα παραπάνω σενάρια φόρτωσης, τα εμπορευματοκιβώτια 20 ποδών χρησιμοποιούνται για μεταφορά μόνο βαριών φορτίων. Άρα, ενώ από άποψης κατάληψης χώρου, μπορούν να μεταφερθούν από ένα φορηγό, ξεπερνάνε το μέγιστο επιτρεπόμενο μικτό βάρος. Επομένως, και σε αυτή την περίπτωση, τα φορηγά θα μεταφέρουν ένα την φορά. Έτσι, για κάθε σενάριο φόρτωσης, ο απαιτούμενος αριθμός φορηγών οχημάτων ισοδυναμεί με το πλήθος των εμπορευματοκιβωτίων προς μεταφορά.

3.4.3. Αποτελέσματα μοντέλων οδικών οχημάτων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς ανά σενάριο φόρτωσης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατανάλωση καυσίμου σε λίτρα ανά 100 χλμ. για το φορτηγό όχημα που θα μεταφέρει το κάθε ε/κ ανάλογα με την κατηγορία βάρους, όπως προκύπτει από το κάθε μοντέλο για το οδικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια.

Για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης του στόλου φορτηγών οχημάτων για κάθε σενάριο φόρτωσης, πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό των φορτηγών με την τελική κατανάλωση καυσίμου που έχει υπολογιστεί για την αντίστοιχη κατηγορία μικτού βάρους του, ανάλογα δηλαδή το βάρος του εμπορευματοκιβωτίου που μεταφέρει κάθε φορά. Το άθροισμα τους δίνει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου ανά σενάριο φόρτωσης.

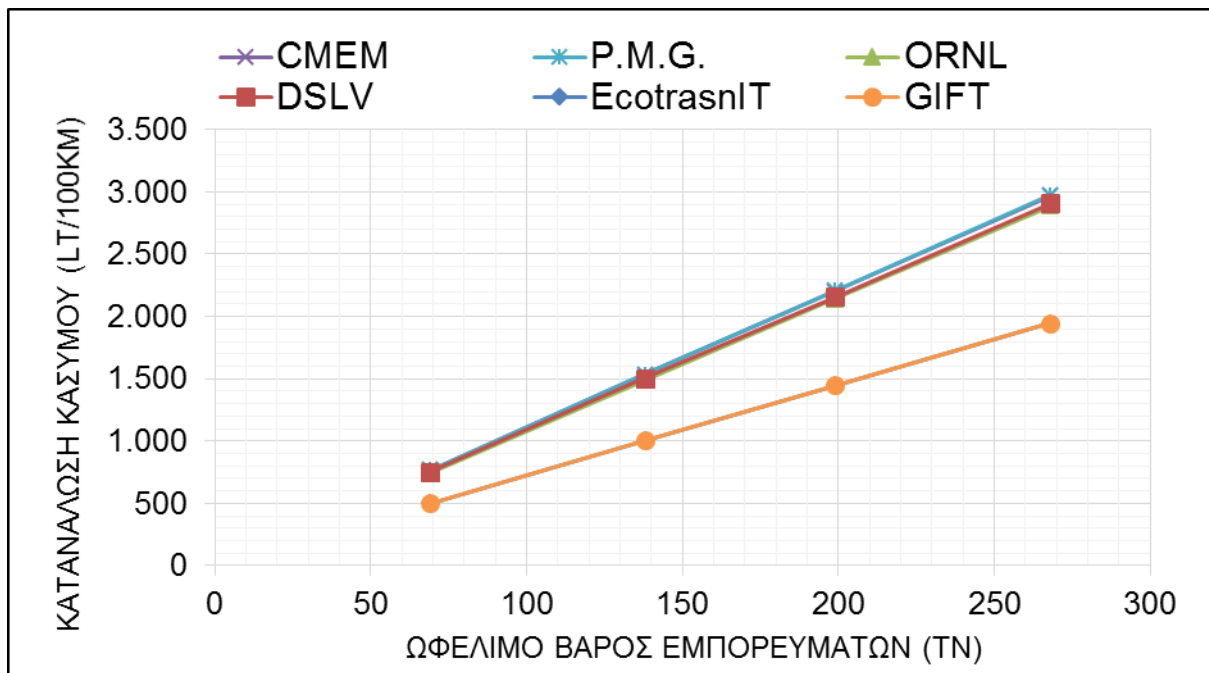
Πίνακας 12: Κατανάλωση καυσίμου φορτηγού οχήματος ανά κατηγορία και τύπο Ε/Κ

Κατηγορία βάρους φορτίου	Τύπος Ε/Κ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (λίτρα / 100 χλμ.)					
		ORNL	CMEM	P.M.G.	DSLIV	EcotransIT	GIFT
Ελαφριά	45'	28,68	29,64	29,65	28,83	24,17	24,17
	40'	27,79	28,37	28,38	28,22	23,92	23,92
Μεσαίου βάρους	45'	43,63	52,55	52,57	40,81	57,08	57,08
	40'	41,04	48,73	48,75	38,30	53,12	53,12
Βαριά	20'	38,35	44,65	44,67	35,89	46,34	46,34
	20'	44,29	53,56	53,59	41,24	59,83	59,83

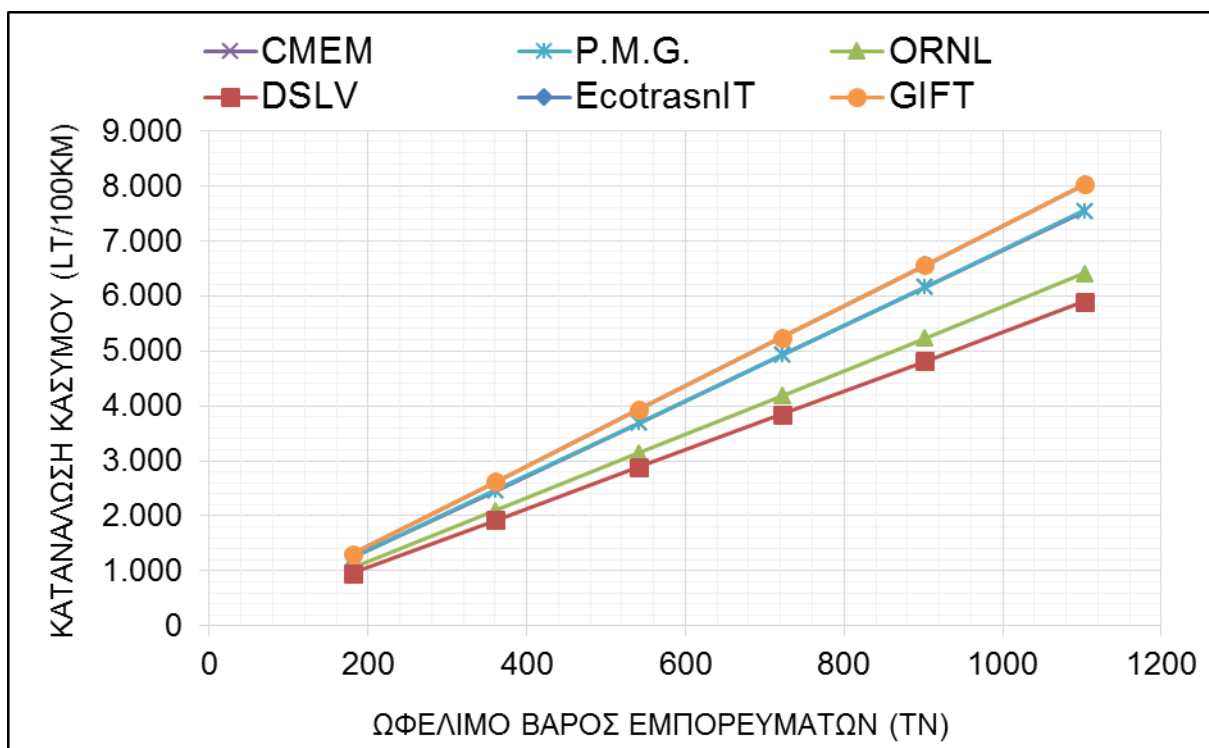
Θεωρώντας ότι τα μοντέλα που ακολουθούν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού (CMEM, PMG, ORNL) εκτιμούν ακριβέστερα την κατανάλωση καυσίμου του στόλου φορτηγών ανά σενάριο, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που πραγματοποιείται μεταφορά μόνο ελαφριών φορτίων, τα μοντέλα EcotransIT και GIFT παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές κατανάλωσης, με απόκλιση έως και -35%, ενώ το μοντέλο του DSLIV ακολουθεί τις εκτιμήσεις των πιο σύνθετων μοντέλων.

Στα σενάρια φόρτωσης μόνο βαριών και πολύ βαριών φορτίων, το φάσμα των αποτελεσμάτων διαφοροποιείται αρκετά. Παρατηρούμε ότι τα μοντέλα EcotransIT και GIFT υπολογίζουν υψηλότερες καταναλώσεις, ειδικά όσο αυξάνεται το συνολικό ωφέλιμο βάρος των μεταφερόμενων αγαθών (+6,12%). Αρκετά χαμηλότερες τιμές κατανάλωσης εκτιμώνται μέσω του μοντέλου ORNL (-16,33%). Τέλος, αντίθετα με τα

σενάρια ελαφριών φορτίων, σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο του DSLV εκτιμάει πολύ χαμηλότερες τιμές (-22,45%).

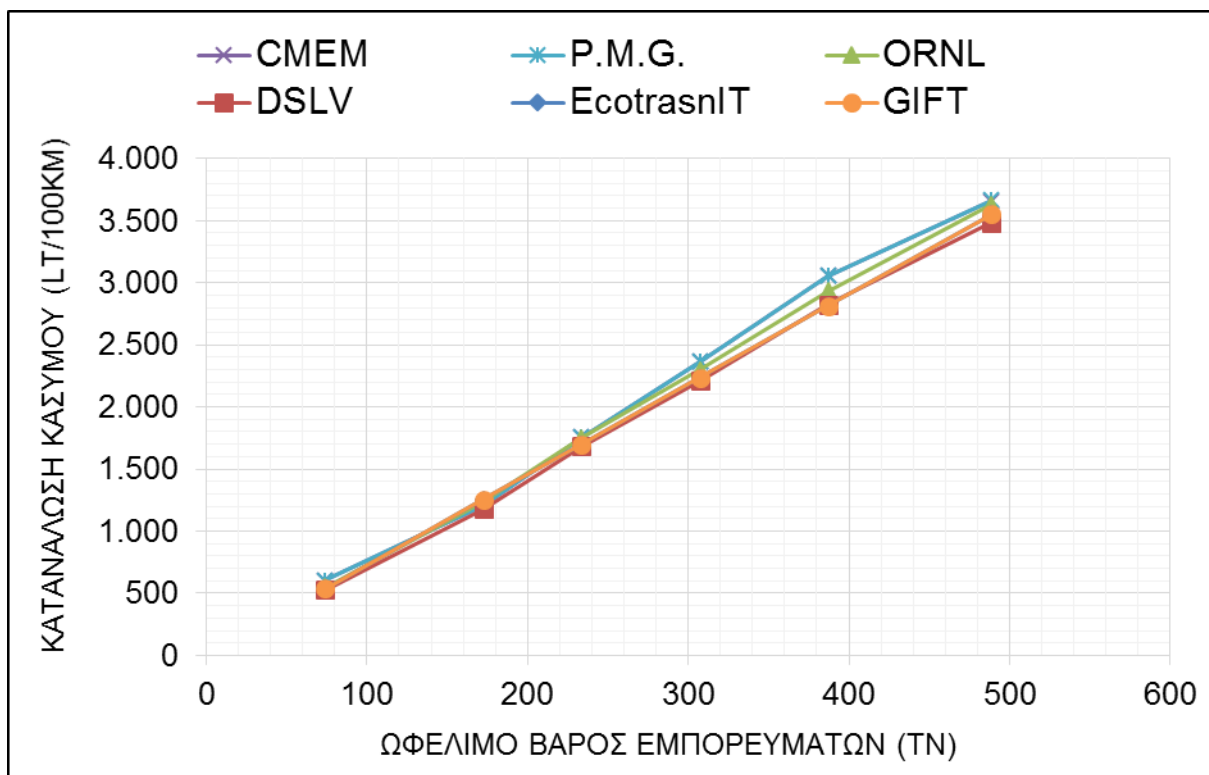


Διάγραμμα 6: Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορητών συναρτήσεως του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο ελαφριά φορτία)



Διάγραμμα 7: Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορητών συναρτήσεως του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία)

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως στην περίπτωση της συνήθους μίξης φορτίων, όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν σχεδόν απόλυτη σύγκλιση, με αποκλίσεις το πολύ έως 5%. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι τα σενάρια φόρτωσης της συγκεκριμένης κατηγορίας περιλαμβάνουν φορτηγά οχήματα ποικίλων κατηγοριών μικτού βάρους και ο μέσος όρος τους συμπίπτει με τις μέσες τιμές εκτίμησης που λαμβάνει για παράδειγμα το μοντέλο DSLV. Υπενθυμίζεται πως τα μοντέλα που δεν ακολουθούν πορεία υπολογισμού της κατανάλωσης μέσω αναλυτικών σχέσεων, στηρίζονται σε μέσες τιμές ενός μεγάλου φάσματος πραγματικών μετρήσεων. Μέσω αυτών καταλήγουν σε πιο απλοϊκές σχέσεις υπολογισμού. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, προσαρμόζονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά για σενάρια που περιλαμβάνουν φορτηγά οχήματα όλων των συνήθων τιμών μικτού βάρους, όχι όμως όταν τα οχήματα που κινούνται ανήκουν μόνο σε χαμηλές ή μόνο σε υψηλές κατηγορίες μικτού βάρους.

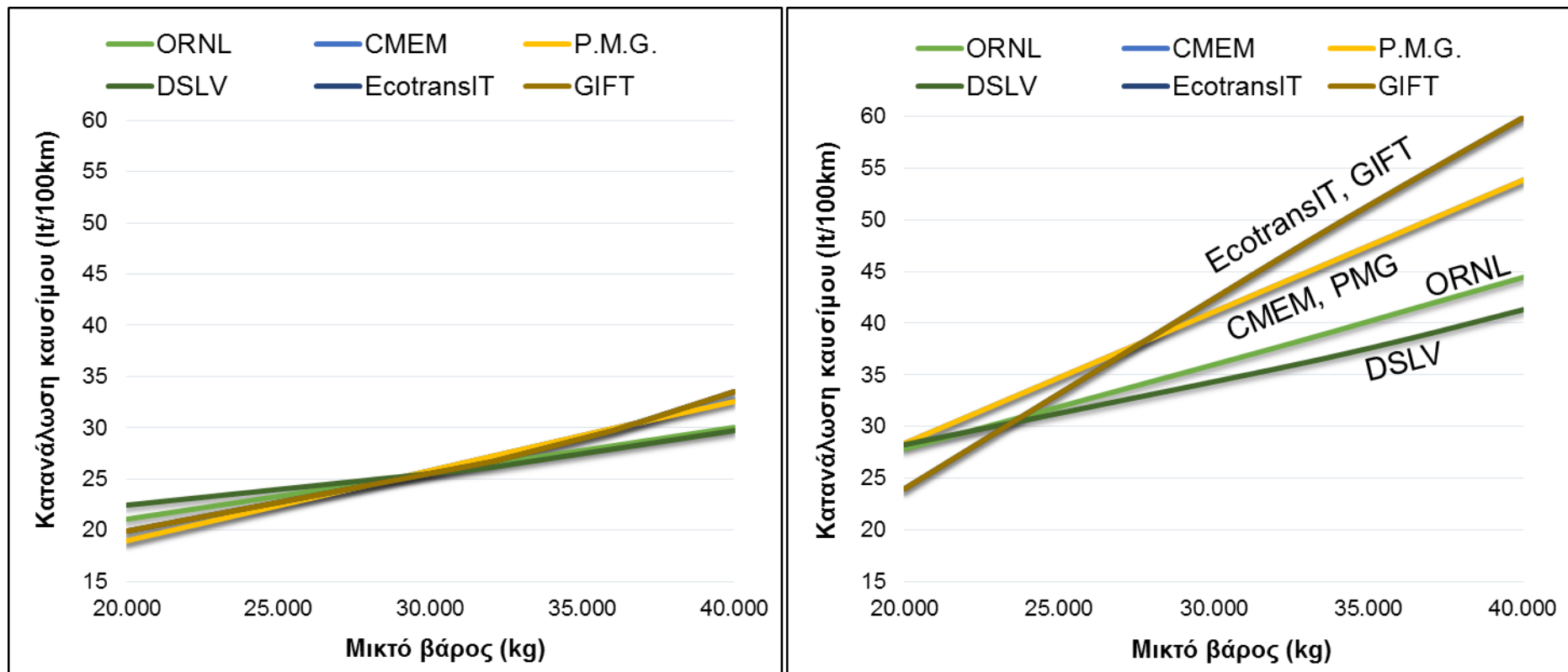


Διάγραμμα 8: Κατανάλωση καυσίμου ομάδας φορτηγών συναρτήσεσι του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (συνήθης μίξη φορτίων)

Στο οδικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια, πραγματοποιούμε μια επιπλέον συγκριτική ανάλυση, προκειμένου να γίνει σύγκριση των μοντέλων υπολογισμού σε συνάρτηση τόσο με το βάρος όσο και την κλίση της οδού. Στην πρώτη ανάλυση γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα τμήματα της διαδρομής έχουν μηδενική κλίση, ενώ στην δεύτερη ανάλυση, γίνεται υπολογισμός της κατανάλωσης βάσει των υφιστάμενων κλίσεων της διαδρομής.

Παρατηρούμε ότι σε περίπτωση κίνησης σε οδόστρωμα με μηδενική κλίση (ιδανικές συνθήκες), τα μοντέλα παρουσιάζουν σχετική σύγκλιση. Αντίθετα, όταν εφαρμόζονται σε πραγματικές συνθήκες, παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, ειδικά για μεγαλύτερες τιμές μικτού βάρους του φορτηγού οχήματος. Η σημαντική επίδραση της κλίσης στον υπολογισμό, αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Σημειώνεται πως στους υπολογισμούς των μοντέλων GIFT και EcotrasnIT πιθανώς να λαμβάνονται υπόψιν μεγαλύτερες τιμές τις ταχύτητας από αυτές που υποτέθηκαν κατά την εφαρμογή των μοντέλων CMEM, PMG και ORNL, λόγω των μεγαλύτερων επιτρεπόμενων ορίων ταχύτητας που ισχύουν στις Η.Π.Α.. Αντίθετα, το μοντέλο του DSLV, όντας ευρωπαϊκής προέλευσης μοντέλο εκτιμάει πολύ χαμηλότερες καταναλώσεις.



Διάγραμμα 9: Κατανάλωση καυσίμου φορτηγού οχήματος συναρτήσει του μικτού βάρους με παραδοχή μηδενικών κλίσεων (αριστερά) και για υφιστάμενες κλίσεις της διαδρομής Θεσσαλονίκη – Σόφια (δεξιά)

3.4.4. Σύγκριση μεταξύ μοντέλων υπολογισμού σιδηροδρομικών οχημάτων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την αντίστοιχη κατανάλωση σιδηροδρομικού συρμού ανά σενάριο φόρτωσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Οι μεταβλητές εισόδου που υπεισέρχονται στα μοντέλα είναι σε αντιστοιχία με τα χαρακτηριστικά του σιδηροδρομικού τμήματος Θεσσαλονίκη – Σόφια (μήκος ντιζελοκίνησης – ηλεκτροκίνησης, μέση ταχύτητα γραμμής κτλ.). Το μικτό βάρος του συρμού διαμορφώνεται βάσει του σεναρίου φόρτωσης, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.3, ενώ για τα μοντέλα MEET I και MEET II γίνονται λογικές παραδοχές όσον αφορά τον αριθμό στάσεων και την απόσταση μεταξύ διαδοχικών στάσεων. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα του μοντέλου MEET II έχουν προκύψει μετά από προσαρμογή του σε ομοιογενή τμήματα της διαδρομής. Παρατίθεται επιπλέον ο πίνακας με τις ομαδοποιημένες κλίσεις που συλλέχθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου Rail_NTUA, σύμφωνα με την διαδικασία και την μέθοδο εκτίμησης που παρουσιάστηκαν.

Πίνακας 13: Ομαδοποιημένες κλίσεις σιδηροδρομικού τμήματος Θεσσαλονίκη - Σόφια

Κλίση σιδηρ. τμήματος Θεσσαλονίκη - Σόφια (‰)	Απόσταση για την οποία διατηρείται η κλίση (m)
Μικρότερη από -4	124.697,15
Από -4 έως 0	37.425,22
0-4	50.645,70
4-8	41.973,70
8-12	35.176,61
12-15	18.301,19
15-16	7.526,48
16-17	4.603,80
17-19	9.647,93
19-21	45.447,50

Παρατηρούμε καταρχάς ότι το μοντέλο Rail_NTUA, το οποίο ακολουθεί αναλυτική πορεία υπολογισμού της κατανάλωσης και λαμβάνει υπόψη του το παραπάνω προφίλ κλίσεων, εκτιμάει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την πλειοψηφία των σεναρίων φόρτωσης όλων των κατηγοριών. Αυτό συμβαίνει διότι το σιδηροδρομικό τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια παρουσιάζει μεγάλες ανωφέρειες σε σημαντικό ποσοστό της διαδρομής.

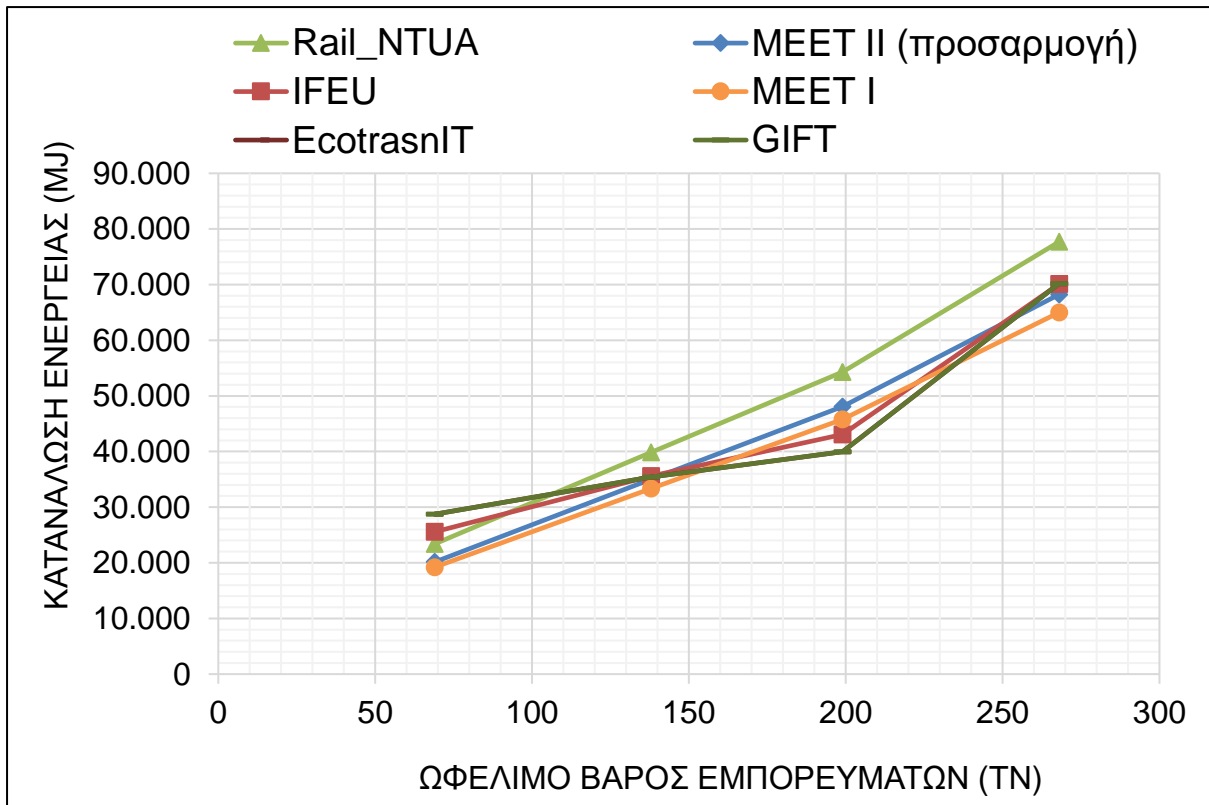
Θεωρώντας ότι η εκτίμηση της κατανάλωσης που προκύπτει από το μοντέλο Rail_NTUA είναι περισσότερο ακριβής, παρατηρούμε ότι τα υπόλοιπα μοντέλα υπολογίζουν αφενός μικρότερες τιμές κατανάλωσης ενέργειας (με απόκλιση έως και 20% για βαριά φορτία) αφετέρου δεν έχουν γενικά μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους για αρκετά σενάρια φόρτωσης.

Σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούνται σημεία αλλαγής των κλίσεων των γραμμών. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτά τα σημεία προστίθεται μια μηχανή έλξης με αποτέλεσμα μια πιο απότομη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η αύξηση αυτή είναι πιο έντονη στα μοντέλα IFEU και EcotrasnIT – GIFT. Αυτό συμβαίνει επειδή, για αυτά τα μοντέλα, έχει γίνει η παραδοχή ότι στην περίπτωση της ύπαρξης παραπάνω της μίας μηχανών έλξης κάθε μηχανή έλκει ίδιο ποσοστό του συνολικού φορτίου (π.χ. στην περίπτωση δύο μηχανών έλξης καθεμία θεωρείται ότι έλκει το μισό φορτίο του συρμού). Όμως, όσο μικρότερη είναι η ελκόμενη μάζα τόσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωση ανά t km. Τα παραπάνω διαφορετικά σημεία αλλαγής των κλίσεων που παρουσιάζουν τα μοντέλα οδηγούν σε διαφορετικές αποκλίσεις ανά σενάριο φόρτωσης

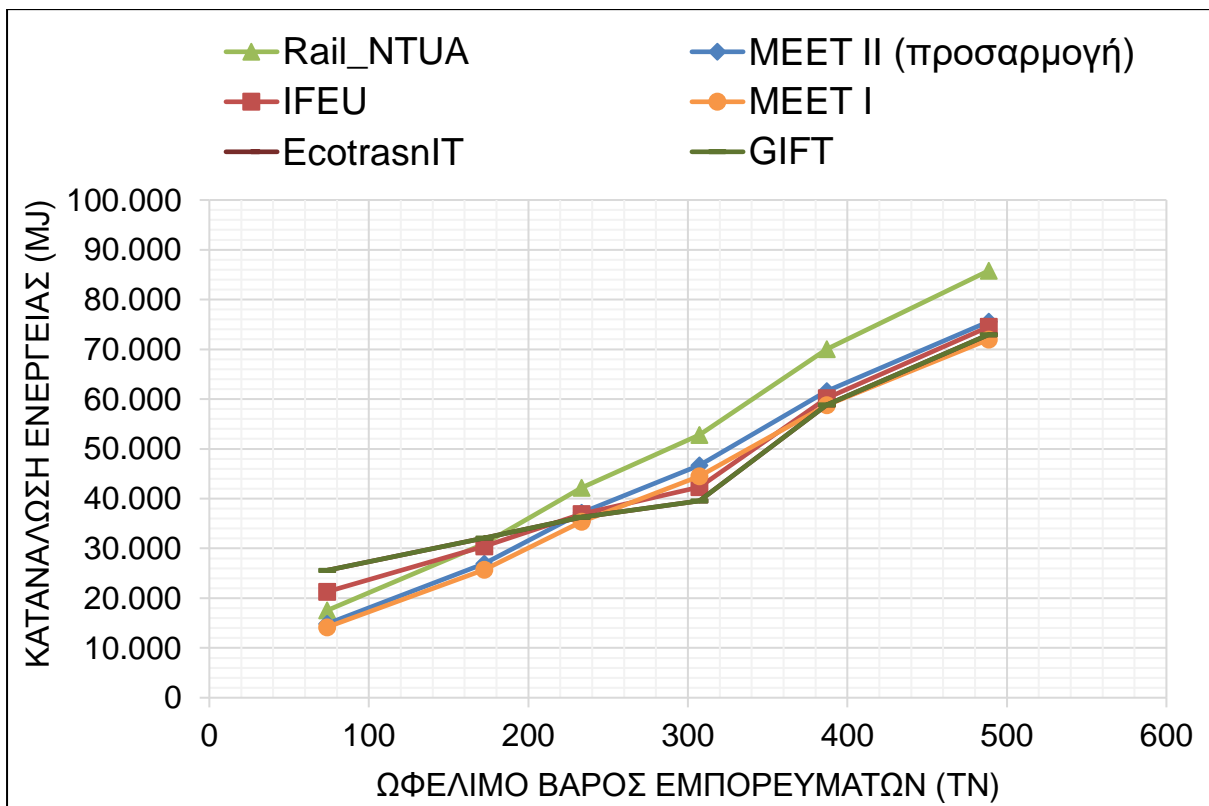
Συγκεκριμένα, εξετάζοντας συνολικά τα τρία διαγράμματα, παρατηρούμε πως όταν το συνολικό ωφέλιμο βάρος των εμπορευμάτων κυμαίνεται από 400 έως 800 περίπου τόνους, οι τιμές υπολογισμού των μοντέλων (με εξαίρεση το Rail_NTUA) οδηγούν σε αρκετά κοντινές τιμές κατανάλωσης.

Αντίθετα, για σενάρια φόρτωσης χαμηλότερου και ειδικά υψηλότερου συνολικού ωφέλιμου βάρους εμπορευμάτων (άνω των 800 τόνων), οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών υπολογισμού της κατανάλωσης αυξάνονται.

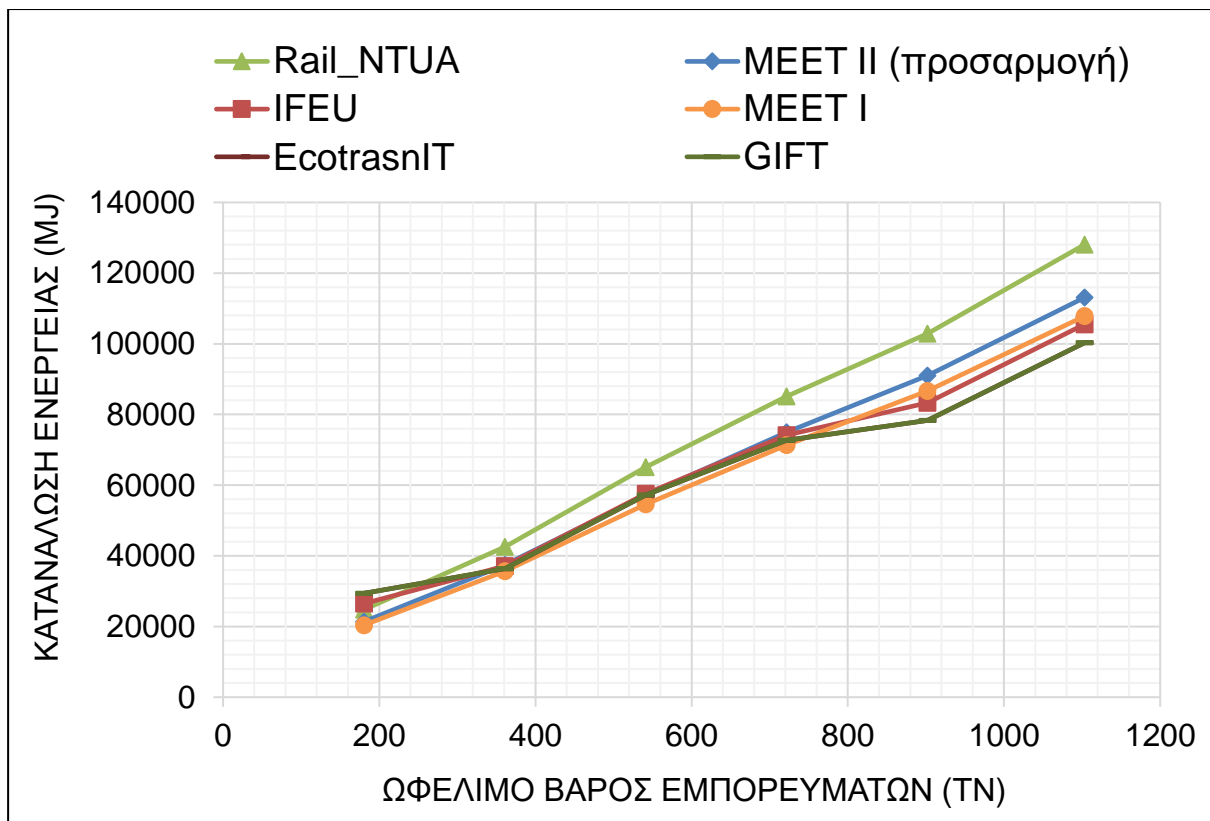
Τέλος, επισημαίνεται ότι το φάσμα αποτελεσμάτων των μοντέλων και οι αποκλίσεις τους παρουσιάζουν σημαντική συσχέτιση με τις αντίστοιχες της διαδρομής Δομοκός – Αθήνα που εξετάστηκε για ένα σενάριο φόρτωσης συνήθους μίξης φορτίων.



Διάγραμμα 10: Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσεως του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο ελαφριά φορτία)



Διάγραμμα 11: Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσεως του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (συνήθης μίξη φορτίων)



Διάγραμμα 12: Κατανάλωση ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού συναρτήσει του ωφέλιμου βάρους των εμπορευμάτων (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία)

4. Εφαρμογή σε διαδρομές του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV: σύγκριση αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς

4.1. Περιγραφή Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV

Ο Πανευρωπαϊκός Διάδρομος IV είναι ένας από τους κύριους εμπορευματικούς συνδέσμους της Κεντρικής με την Νοτιοανατολική Ευρώπη και αποτελεί τον κορμό του μεταγενέστερου διαδρόμου 22 (νότια επέκταση έως και την Αθήνα) και διέρχεται από την Ελλάδα (τμήμα Θεσσαλονίκη-Προμαχώνας), την Βουλγαρία (τμήμα Kulata – Sofia – Vidin), την Ρουμανία (Calafat – Arad – Curtici), την Ουγγαρία (Bratislava – Breclav), την Τσεχία (Kuty – Prague) και τη Γερμανία (Dresden/Nuremberg). Περιλαμβάνει ακόμα τα τμήματα Arad – Brasov – Constanta και Sofia – Edirne – Istanbul, τα οποία εξασφαλίζουν πρόσβαση στη Μαύρη Θάλασσα και την Τουρκία.



Εικόνα 22: Πανευρωπαϊκός Διάδρομος IV

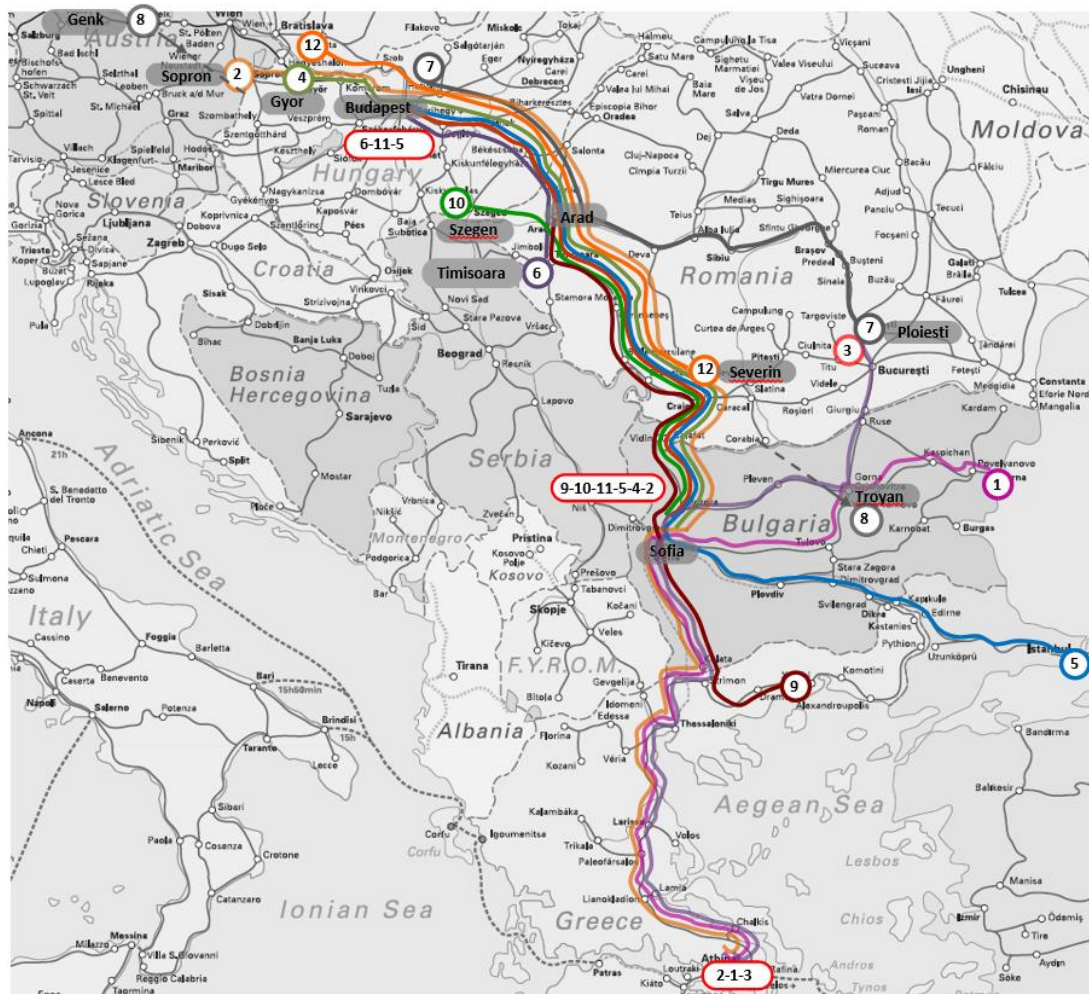
Οι προοπτικές που διανοίγονται για τις εμπορευματικές σιδηροδρομικές και διατροφικές μεταφορές μέσω του συγκεκριμένου διαδρόμου είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την χώρα μας. Έργα εκσυγχρονισμού και επιδιόρθωσης υποδομών και τερματικών σταθμών (αύξηση μεταφορικής ικανότητας, ταχύτητας και βελτίωση διαχείρισης), εγκατάσταση συστήματος ηλεκτροκίνησης σταδιακά στο 100% του μήκους του διαδρόμου, αναβάθμιση γραμμών από μονές σε διπλές, αντικατάσταση τμημάτων μεγάλων κλίσεων, καθώς και νέα έργα (γέφυρες κτλ.) είναι σε εξέλιξη ή έχουν προγραμματιστεί με χρονικό ορίζοντα έως το 2020. Το συνολικό μήκος του σιδηροδρομικού δικτύου είναι 4340 km, ενώ του οδικού 3640 km. Η μέση ταχύτητα του σιδηροδρομικού διαδρόμου είναι 80 km/h και το μέγιστο αξονικό φορτίο γραμμής 22,5 t (σε αρκετά τμήματα 20 t). Τέλος, στο 88% του μήκους της διαδρομής κινούνται ηλεκτροκίνητοι συρμοί, ενώ στο 12% έχουμε ντιζελοκίνηση.

4.2. Συλλογή δεδομένων

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και ακολούθως της εκπομπής ρύπων σε μεγάλο αριθμό διαδρομών, εφαρμόζουμε μοντέλα που δεν απαιτούν προφίλ κλίσεων και παράλληλα, βάσει των αξιολογήσεων των παραπάνω κεφαλαίων, εκτιμούν ικανοποιητικά την κατανάλωση των οδικών και σιδηροδρομικών οχημάτων αντίστοιχα. Η εφαρμογή τους πραγματοποιείται στις παρακάτω 13 διαδρομές, οι οποίες καλύπτουν όλο το εύρος του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV. Σε αυτές τις διαδρομές συμπεριλαμβάνεται και το τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια, το οποίο έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα. Οι τιμές κατανάλωσης που υπολογίστηκαν για το συγκεκριμένο τμήμα θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για λόγους σύγκρισης.

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης μέσω των εξεταζόμενων μοντέλων, τόσο για τα οδικά όσο και για τα σιδηροδρομικά τμήματα απαιτείται καταρχάς ο προσδιορισμός ορισμένων βασικών δεδομένων, όπως η απόσταση, το υψόμετρο του σημείου εκκίνησης και αυτό του προορισμού και η χιλιομετρική θέση των σημείων όπου τα μεταφορικά μέσα διασχίζουν σύνορα μεταξύ χωρών.

ΔΙΑΔΡΟΜΗ		ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (km)	
ΑΦΕΤΗΡΙΑ	ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΣ	ΑΜΙΓΩΣ ΟΔΙΚΗ	ΔΙΑΤΡΟΠΙΚΗ
Αθήνα (Ελλάδα)	Varna (Βουλγαρία)	1145,07	1176,10
Αθήνα (Ελλάδα)	Sopron (Ουγγαρία)	1983,70	2241,20
Αθήνα (Ελλάδα)	Ploiesti (Ρουμανία)	1284,60	1350,60
Gyor (Ουγγαρία)	Sofia (Βουλγαρία)	997,50	1178,50
Sisli (Τουρκία)	Budapest (Ουγγαρία)	1578,00	1671,50
Budapest (Ουγγαρία)	Timisoara (Ρουμανία)	351,90	332,30
Budapest (Ουγγαρία)	Ploiesti (Ρουμανία)	813,20	825,90
Troyan (Βουλγαρία)	Genk (Βέλγιο)	2174,30	2554,10
Καβάλα (Ελλάδα)	Arad (Ρουμανία)	874,60	1123,30
Szeged (Ουγγαρία)	Sofia (Βουλγαρία)	702,40	940,90
Sofia (Βουλγαρία)	Budapest (Ουγγαρία)	888,40	1061,40
Dr. Turnu Severin	Dunajska Streda	686,80	799,30
Θεσσαλονίκη (Ελλάδα)	Σόφια (Βουλγαρία)	328,50	380,10
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ		13.809 km	15.635 km



Εικόνα 23: Χαρτογραφική απεικόνιση των διαδρομών που εξετάστηκαν, κατά μήκος του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV

Για την εύρεση της απόστασης των οδικών τμημάτων χρησιμοποιούνται διαδικτυακές εφαρμογές εύρεσης διαδρομής [48], προκειμένου να πραγματοποιηθεί και ανεύρεση της βέλτιστης κάθε φορά διαδρομής.

Για την μέτρηση των αποστάσεων των σιδηροδρομικών τμημάτων χρησιμοποιείται το λογισμικό **TransCAD** (Transport Planning Software) [49], ενώ παράλληλα πραγματοποιείται εύρεση της αντίστοιχης βέλτιστης σιδηροδρομικής διαδρομής, χρησιμοποιώντας εργαλείο που έχει αναπτυχθεί για αυτόν τον σκοπό [8]. Οι χάρτες του σιδηροδρομικού δικτύου αντλούνται από την βάση δεδομένων του ευρωπαϊκού προγράμματος **ETIS-Plus** (European Transport Information System) [50], το οποίο, μέσω συνεχούς προσπάθειας συλλογής δεδομένων για τα οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα μεταφορών, έχει ως στόχο την παροχή έγκυρων δεδομένων εισόδου για την υποστήριξη ανάπτυξης και εφαρμογής μοντέλων, μεθοδολογιών και την διαμόρφωση δεικτών αξιολόγησης.



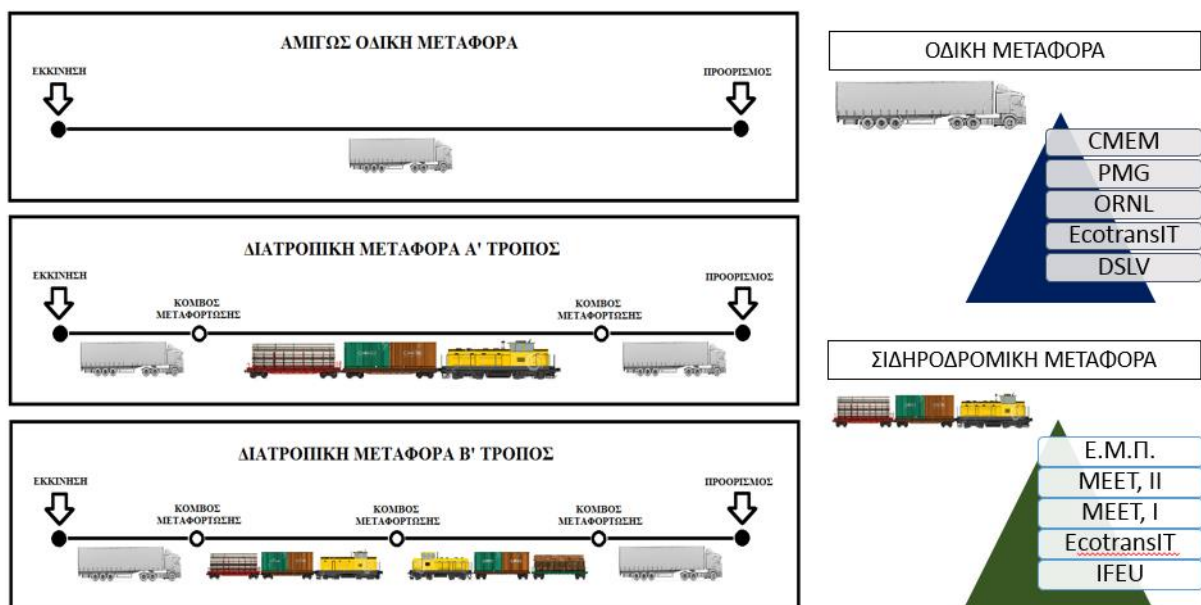
Εικόνα 24: Εύρεση επί μέρους σιδηροδρομικών αποστάσεων και βέλτιστης διαδρομής, μέσω του λογισμικού TransCAD και της βάσης δεδομένων ETIS-Plus

Για την εύρεση των υψομέτρων της αρχής και του τέλους κάθε σιδηροδρομικού τμήματος, χρησιμοποιείται αρχικά η εφαρμογή **Google Earth Pro**, μέσω της οποίας εντοπίζονται τα σημεία που μας ενδιαφέρουν. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις εισάγονται προς επεξεργασία σε μορφή κειμένου (.txt) στην διαδικτυακή

εφαρμογή **GPS Visualizer** [39], απ' όπου εξάγονται οι ακριβείς τιμές των υψομέτρων. Τέλος για να εντοπιστεί το υφιστάμενο είδος κίνησης των συρμών σε κάθε τμήμα των διαδρομών, καθώς και δεδομένα για την μεταφορική ικανότητα και την ταχύτητα των γραμμών, χρησιμοποιούμε ενημερωμένα στοιχεία του προγράμματος GIFT [51], ενώ πραγματοποιείται και επιπλέον έλεγχος μέσω διαδραστικών χαρτών, που είναι διαθέσιμοι στο διαδίκτυο και είναι αποτέλεσμα συνεργασίας σιδηροδρομικών επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται κατά μήκος του υπό εξέταση διαδρόμου [52].

4.3. Σενάρια αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς, η εφαρμογή των μοντέλων πραγματοποιείται για κάθε διαδρομή βάσει **τριών σεναρίων μεταφοράς**.



Εικόνα 25: Συγκριτική εφαρμογή των μοντέλων μέσω τριών σεναρίων μεταφοράς

Η σύγκριση μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροπικής μεταφοράς (απευθείας εξυπηρέτηση και μέθοδος ακτινωτού τροχού³) πραγματοποιείται με γνώμονα τον αντίκτυπο που έχει κάθε σενάριο μεταφοράς στο περιβάλλον. Γίνεται

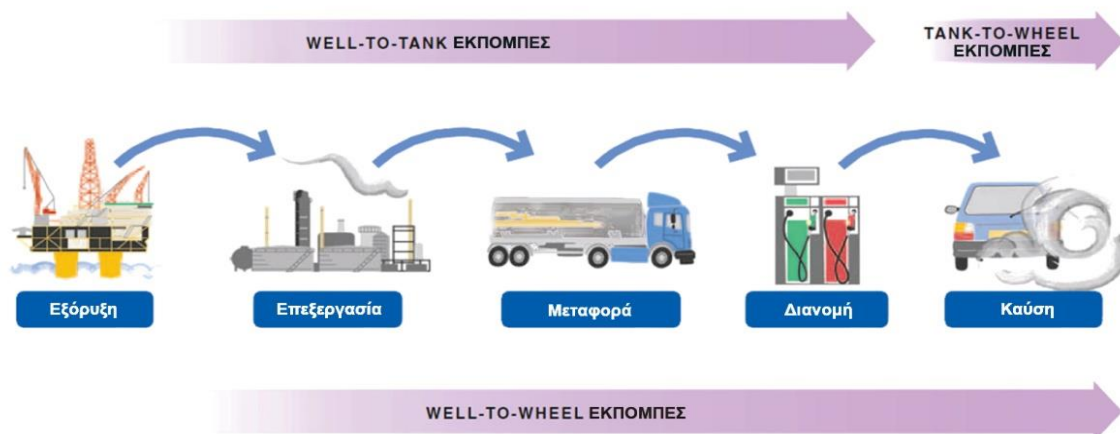
³ Η έννοια του «ακτινωτού τροχού» (hub and spoke) σχετίζεται με τη συλλογή μέσω ενός κεντρικού σημείου (κόμβος) και τη διανομή προς διάφορες κατευθύνσεις (ακτίνες). Ο κόμβος είναι ένα κεντρικό σημείο για τη συλλογή, διαλογή, μεταφόρτωση και διανομή των εμπορευμάτων για συγκεκριμένη περιοχή. **Error! Reference source not found.**

λοιπόν, σε όρους εκπεμπόμενων ρύπων και συγκεκριμένα ποσότητας ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (kgCO_{2e}) που απελευθερώνεται σε κάθε περίπτωση. Σημειώνεται πως για την παραπάνω σύγκριση, αξιοποιούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα που προσεγγίζουν πιο ικανοποιητικά την κατανάλωση, χωρίς παράλληλα να απαιτούν προφίλ κλίσεων.

4.4. Μετατροπή ενέργειας σε εκπεμπόμενους ρύπους

Η μετατροπή της ενέργειας σε εκπεμπόμενους ρύπους δεν είναι μονοσήμαντη, αφού εξαρτάται από το ενεργειακό περιεχόμενο του είδους καυσίμου ή την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα μεταφορικά μέσα κάθε χώρας.

Η ποσότητα των ρύπων που υπολογίζεται αφορά τις συνολικές εκπομπές ρύπων (Well-To-Wheel). Αυτές συμπεριλαμβάνουν τις εκπομπές ρύπων τόσο κατά την λειτουργία των οχημάτων (Tank-To-Wheel) όσο και εκείνες που παράγονται κατά την διαδικασία της εξόρυξης, της επεξεργασίας, της μεταφοράς και της διανομής των καυσίμων (Well-To-Tank) [53]. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 16258, οι έμμεσοι αυτοί ρύποι πρέπει να συνυπολογίζονται [54].



Εικόνα 26: Σχηματική επεξήγηση των εκπομπών ρύπων Well-To-Wheel [53]

Οι συντελεστές μετατροπής που απαιτούνται για την έκφραση της ενέργειας σε εκπεμπόμενους ρύπους για τις εξεταζόμενες διαδρομές, συλλέχθηκαν και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 14: Συντελεστές μετατροπής καυσίμου ή ηλεκτρικής ενέργειας σε WTW ρύπους [25]

ΟΔΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ	kgCO_{2e}/lt	kgCO_{2e}/MJ
Καύσιμο ντίζελ (0% βιοντίζελ)	3,24	0,088
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ	Ντιζελοκίνηση	Ηλεκτροκίνηση
	KgCO_{2e}/lt	KgCO_{2e}/kWh
Ελλάδα (Δομοκός-Θεσσαλονίκη)	-	1,004
Ελλάδα (Αθήνα-Δομοκός και Θεσσαλονίκη-Kulata) (βιοντίζελ 5%)	3,17	-
Βουλγαρία	-	0,660
Ρουμανία	-	0,556
Ουγγαρία	-	0,637
Σλοβακία	-	0,199
Τουρκία	-	0,720
Αυστρία		0,115
Γερμανία (βιοντίζελ 7%)	3,15	0,527
Βέλγιο	-	0,393

Προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των εκπεμπόμενων WTW αερίων του θερμοκηπίου (σε kg CO_{2e}), τα λίτρα καυσίμου ή οι κιλοβατώρες που καταναλώνονται, βάσει των σχέσεων υπολογισμού κάθε μοντέλου, πολλαπλασιάζονται ανά περίπτωση με τους παραπάνω συντελεστές (προκαθορισμένοι από ευρωπαϊκά πρότυπα).

Όσον αφορά τους συντελεστές μετατροπής στην περίπτωση της ηλεκτροκίνησης, αξίζει να σημειωθεί πως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (όντας δευτερογενής μορφή ενέργειας) επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα. Για παράδειγμα στην Ελλάδα η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται κυρίως από καύση λιγνίτη (55% περίπου), γι' αυτό και ο συντελεστής μετατροπής προκύπτει υψηλός σε σχέση με άλλες χώρες, όπου σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή, γεωθερμική κ.α.). Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Αυστρίας, η οποία εδώ και έναν χρόνο ανακοίνωσε ότι η μεγαλύτερη περιφέρεια της πρωτεύουσάς της τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργείται με χρήση 100% ανανεώσιμων πηγών.

4.5. Σύγκριση μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς

4.5.1. Αποτελέσματα εκπεμπόμενων ρύπων

Οι υπολογισμοί σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιούνται μέσω των μοντέλων **IFEU** και **DSLIV** για τα σιδηροδρομικά και οδικά τμήματα αντίστοιχα.

Στα **σενάρια αμιγώς οδικής μεταφοράς**, ο υπολογισμός των εκπεμπόμενων ρύπων του στόλου φορητών οχημάτων μέσω του μοντέλου του DSLIV, γίνεται σύμφωνα με τις εξής παραδοχές:

- Τα φορητά μεταφέρουν μόνο το ωφέλιμο φορτίο των εμπορευματοκιβωτίων
- Το έδαφος λαμβάνει τον χαρακτηρισμό λοφώδες
- Το ποσοστό της διαδρομής εντός αστικού δικτύου είναι 10%

Για τα **οδικά τμήματα των σεναρίων διατροφικής μεταφοράς**, το μοντέλο εφαρμόζεται βάσει των παρακάτω παραδοχών:

- Τα φορητά μεταφέρουν μόνο το ωφέλιμο φορτίο των εμπορευματοκιβωτίων
- Το έδαφος λαμβάνει τον χαρακτηρισμό επίπεδο
- Το ποσοστό της διαδρομής εντός αστικού δικτύου είναι 100%

Στα **σιδηροδρομικά τμήματα των σεναρίων διατροφικής μεταφοράς**, λαμβάνεται μέση ταχύτητα 60 km/h. Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου του μοντέλου IFEU διαμορφώνονται μέσω των σεναρίων φόρτωσης (μικτό βάρος, αριθμός μηχανών έλξης) και των επί μέρους αποστάσεων της κάθε διαδρομής που έχουν συλλεχθεί. Βάσει αυτών υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπεμπόμενοι ρύποι στα επί μέρους τμήματα της κάθε διαδρομής. Τα επί μέρους τμήματα δημιουργούνται ανάλογα με το είδος κίνησης και την χώρα που κινείται ο συρμός, ώστε οι υπολογισμοί να γίνονται κάθε φορά χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους συντελεστές μετατροπής.

Ο δεύτερος τρόπος διατροφικής μεταφοράς, όπου εκτός των μεταφορτώσεων από φορητό σε τρένο και από τρένο σε φορητό, έχουμε μεταφόρτωση και από τρένο σε τρένο οδηγεί σε μεγαλύτερες ποσότητες εκπομπόμενων ρύπων. Στο σύνολο των περιπτώσεων, οι ρύποι που υπολογίζονται για αυτά τα σενάρια διατροφικής

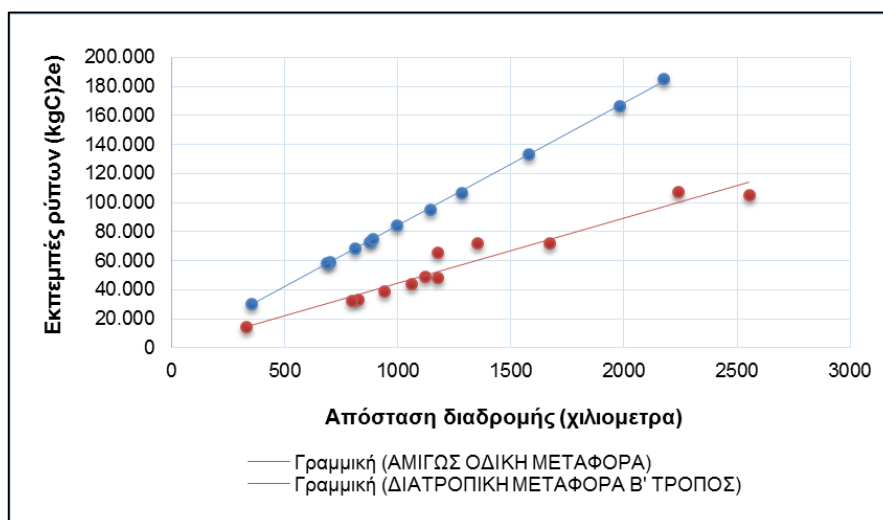
μεταφοράς συγκρίνονται με τους αντίστοιχους ρύπους της αμιγώς οδικής μεταφοράς. Λαμβάνουμε δηλαδή την δυσμενέστερη τιμή ρύπων διατροφικής μεταφοράς.

Στα διαγράμματα που προκύπτουν μετά τις μετρήσεις για το **σύνολο των διαδρομών**, παρατηρούμε ότι για μεταφορά ελαφριών φορτίων κάτω των 85 τόνων, η αμιγώς οδική μεταφορά αποδεικνύεται φιλικότερη προς το περιβάλλον, αφού οι ρύποι που εκπέμπονται είναι λιγότεροι από τους αντίστοιχους της διατροφικής μεταφοράς. Αντίθετα για μεταφορά φορτίων συνολικού ωφέλιμου βάρους άνω των 85 τόνων, η διατροφική μεταφορά οδηγεί σε χαμηλότερες ποσότητες ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα.

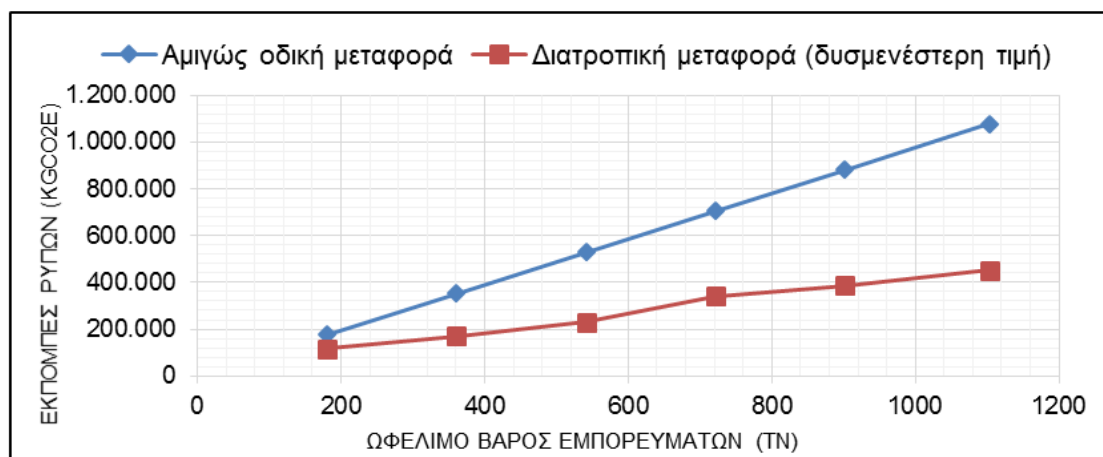
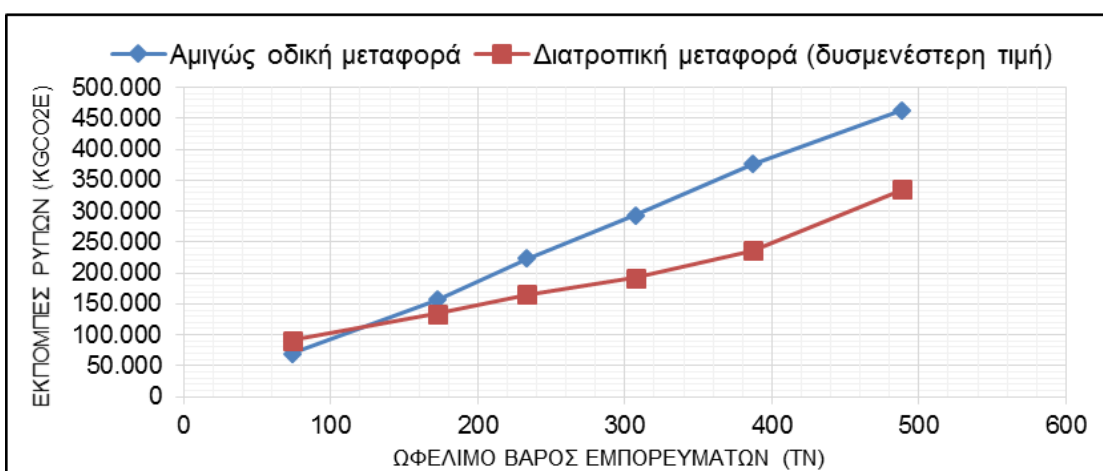
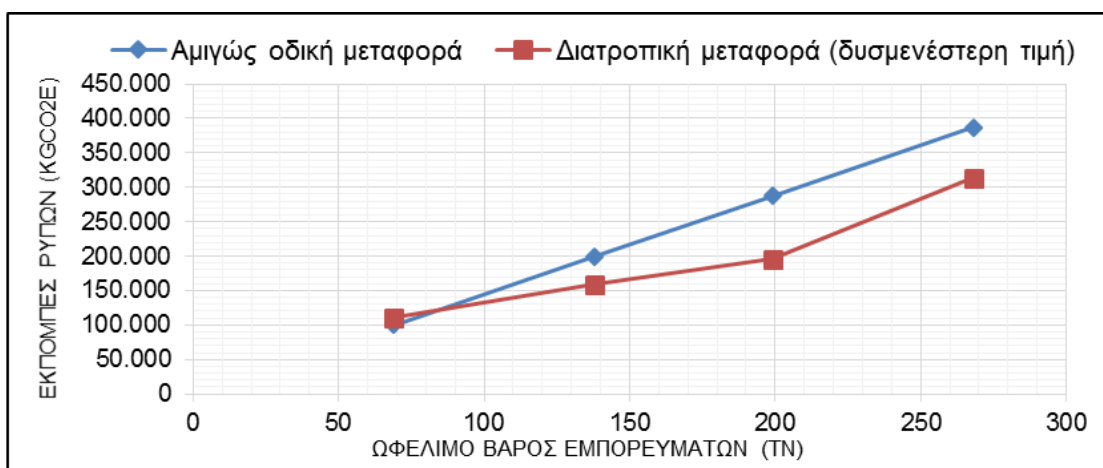
Παρόμοιας μορφής είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την κατηγορία σεναρίων συνήθους μίξης φορτίων, όπου η αμιγώς οδική μεταφορά έχει μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον μόνο για μεταφορά φορτίων κάτω των 120 τόνων. Για μεγαλύτερες τιμές, συμφέρει από περιβαλλοντικής άποψης η διατροφική μεταφορά.

Τέλος, για την τρίτη ομάδα σεναρίων φόρτωσης (μόνο βαριά και πολύ βαριά φορτία), παρατηρούμε ότι η υπεροχή της διατροφικής μεταφοράς είναι καθολική.

Σημειώνεται ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των διαδρομών, η σύγκριση είναι ευνοϊκότερη για το φορτηγό, διότι η απόσταση της αμιγώς οδικής μεταφοράς είναι μικρότερη από εκείνη της διατροφικής, λόγω του πιο ανεπτυγμένου οδικού δικτύου. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πιο ξεκάθαρα η σχέση της απόστασης και της εκπομπής ρύπων για σενάρια αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς:



Διάγραμμα 13: Σχέση απόστασης και εκπομπής ρύπων



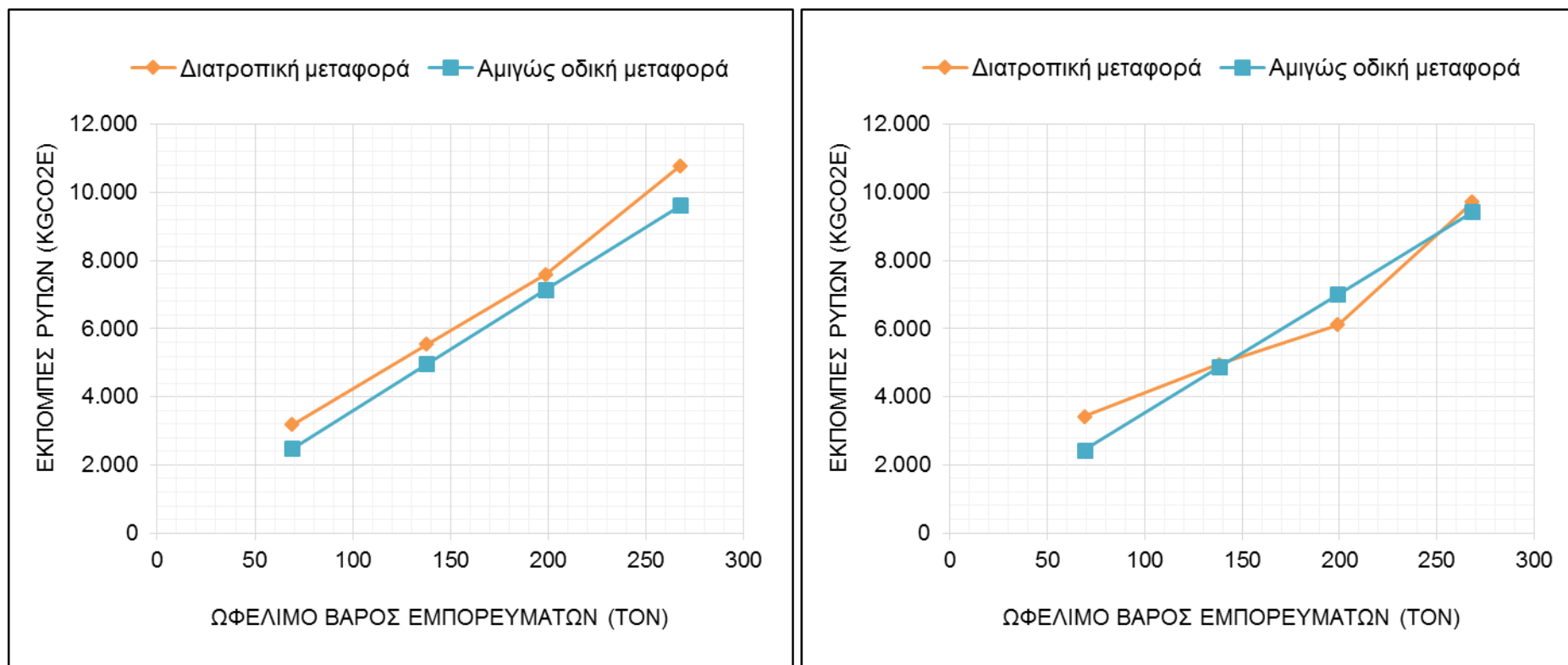
***Υπολογισμός με τα μοντέλα IFEU και DSLV**

Διάγραμμα 14: Συνολικοί WTW ρύποι αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς για σενάρια μόνο ελαφριών φορτίων (πάνω), συνήθης μίξης (στη μέση) και μόνο βαριών/πολύ βαριών φορτίων (κάτω)

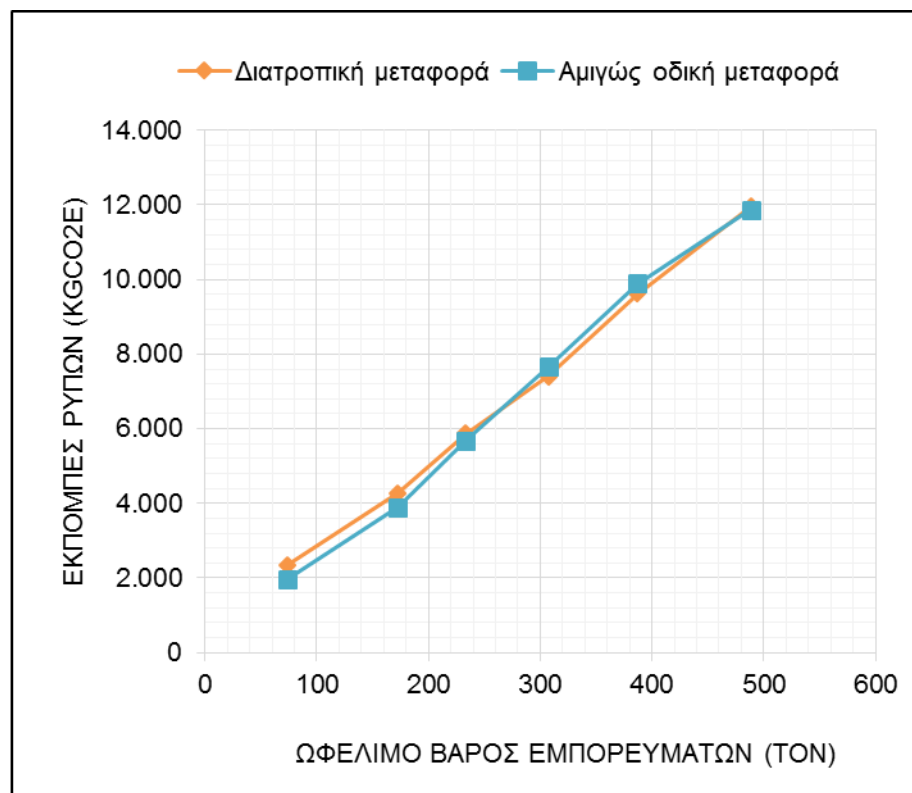
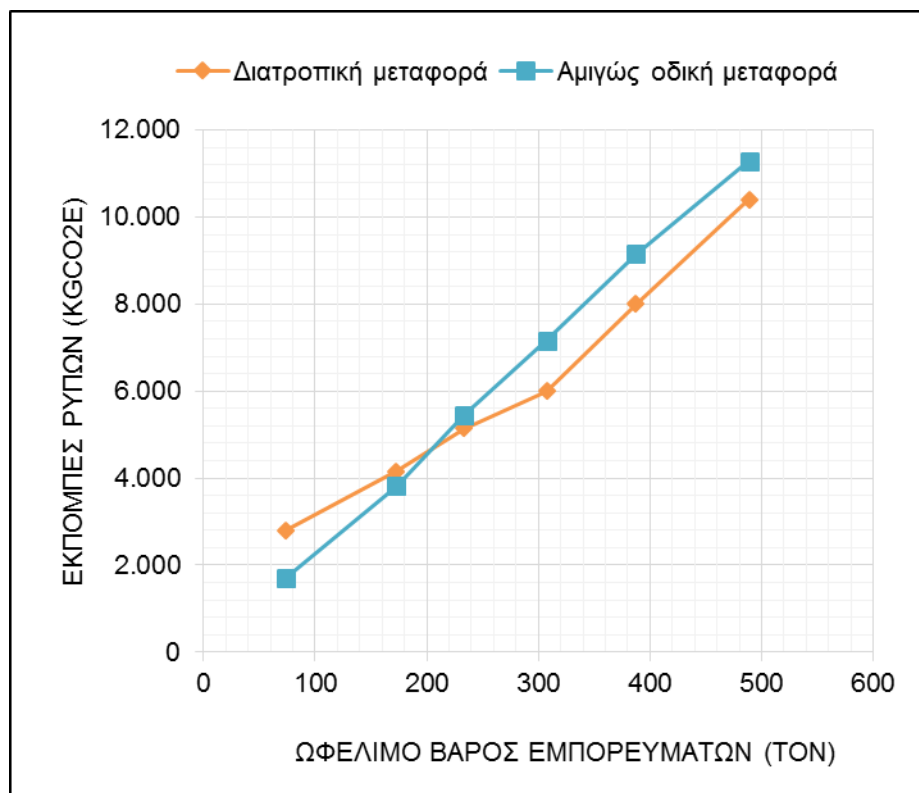
Απομονώνοντας το **τμήμα Θεσσαλονίκη – Σόφια**, στο οποίο έχουμε εξάγει και το ακριβές προφίλ κλίσεων, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι, όπως είναι εύλογο, τα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς, όπως προκύπτουν από συνδυασμό απλούστερων ή πιο σύνθετων μοντέλων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Ενδεικτικά, αξιοποιώντας τις μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενη ενότητα (με σκοπό την σύγκριση μεταξύ των μοντέλων), συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν βάσει των παρακάτω συνδυασμών:

- Υπολογισμός WTW ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς με τα μοντέλα IFEU και DSLV (δεν απαιτούν προφίλ κλίσεων)
- Υπολογισμός WTW ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς με τα μοντέλα Rail_NTUA και CMEM (αναλυτικός υπολογισμός +προφίλ κλίσεων)

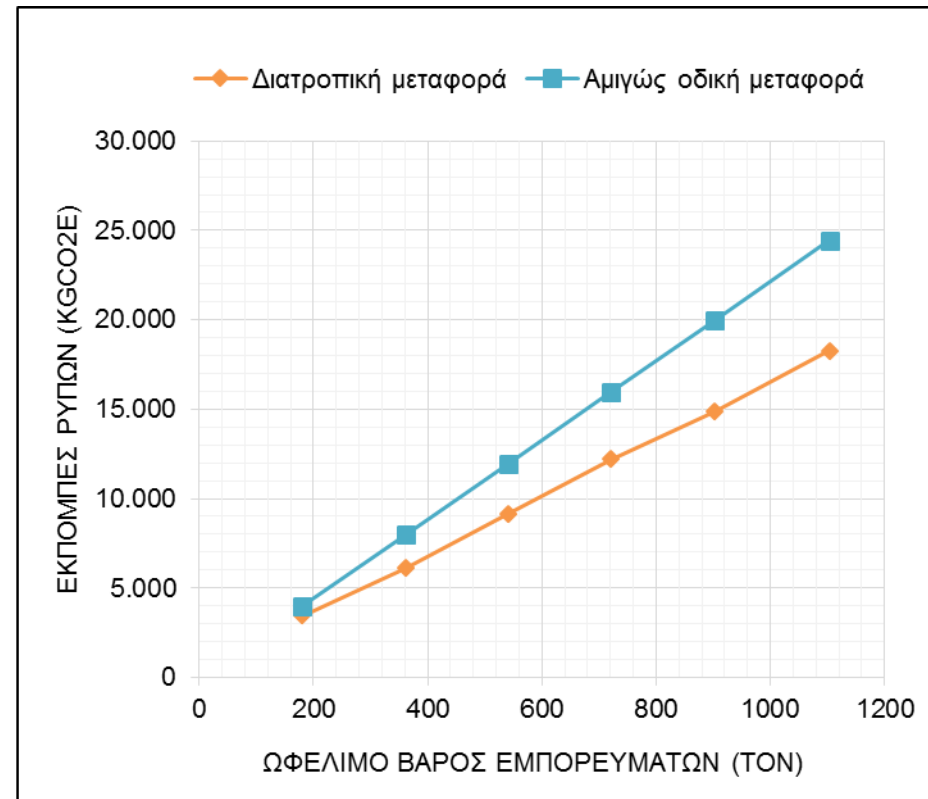
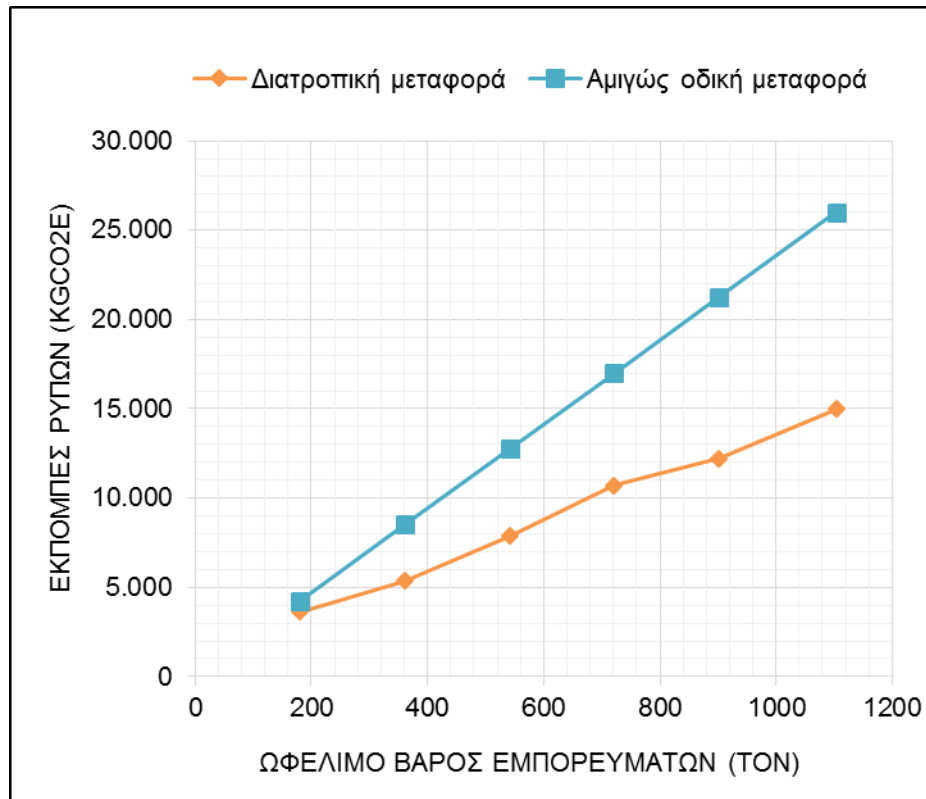
Παρατηρούμε ότι αναλόγως τον συνδυασμό μοντέλων που επιλέγεται σε μια ανάλυση τέτοιου τύπου, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν δίολου αμελητέες διαφοροποιήσεις, ειδικότερα στα σενάρια μεταφοράς ελαφριών και συνήθης μίξης φορτίων. Στα σενάρια όπου μεταφέρονται μόνο βαριά φορτία, η σύγκριση ναι μεν καταλήγει σε κοινό συμπέρασμα, καθιστώντας την διατροφική μεταφορά φιλικότερη περιβαλλοντικά, με μικρότερη παρόλα αυτά διαφορά.



Διάγραμμα 15: Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια μόνο ελαφριών φορτίων



Διάγραμμα 16: Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια συνήθης μίξης φορτίων



Διάγραμμα 17: Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς μέσω των μοντέλων IFEU και DLSV (αριστερά) και μέσω των μοντέλων Rail_NTUA και CMEM (δεξιά) για σενάρια μόνο βαριών φορτίων

Όσον αφορά την διαφοροποίηση της διαδρομής Θεσσαλονίκη – Σόφια, σε σύγκριση με το σύνολο των διαδρομών, όπου παρατηρείται κατά κύριο λόγο υπεροχή της διατροφικής μεταφοράς, οφείλεται στο είδος κίνησης και τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (δευτερογενής ενέργεια). Υπενθυμίζεται ότι η συγκεκριμένη διαδρομή περιλαμβάνει το τμήμα Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας, όπου έχουμε ντιζελοκίνηση, και το τμήμα Προμαχώνας/Kulata – Σόφια, όπου έχουμε ηλεκτροκίνηση, η οποία όμως τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται κατά μικρότερο ποσοστό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε σύγκριση με άλλες χώρες από τις οποίες διέρχονται οι υπόλοιπες διαδρομές (βλ. 4.4 – Πίνακας 14)

4.5.2. Αποτελέσματα κόστους – χρόνου

Σε αυτή την ενότητα, αξιοποιείται η δυνατότητα εκτίμησης του **χρόνου μεταφοράς** (συμπεριλαμβάνει τον καθαρό χρόνο μεταφοράς, τον χρόνο που απαιτείται για τις μεταφορτώσεις στην περίπτωση διατροφικής μεταφοράς και τον κατά προσέγγιση χρόνο καθυστέρησης) και του **κόστους μεταφοράς** που παρέχει το **μοντέλο GIFT**, μέσω των αντίστοιχων δεικτών που επεξηγήθηκαν στην ενότητα 2.3. Πραγματοποιώντας λοιπόν μετρήσεις, δίνεται η δυνατότητα επιπλέον σύγκρισης αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς ως προς τον χρόνο και το κόστος (σε σχέση με την απόσταση).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το σύνολο των 13 διαδρομών που εξετάστηκαν, μπορούμε να τα σχολιάσουμε κατηγοριοποιώντας τα σε δύο σενάρια επιλογής μονοτροπικής (αμιγώς οδική) ή διατροφικής μεταφοράς, στην περιοχή της Ν.Α. Ευρώπης με κριτήρια:

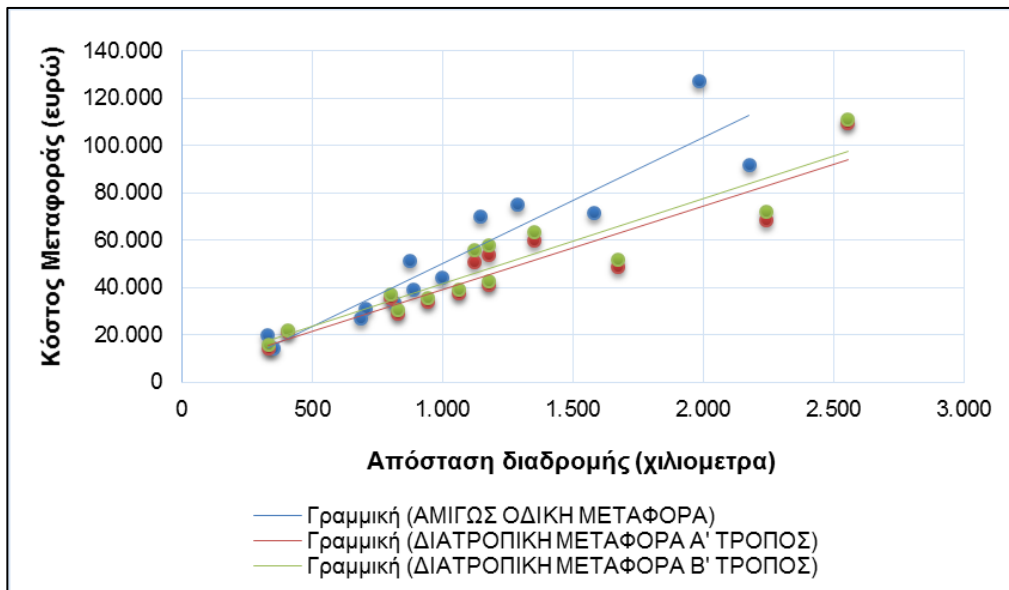
- την μείωση του κόστους μεταφοράς των μεταφορτώσεων
- τη μείωση του χρόνου διεκπεραίωσης της μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου μεταφορτώσεων αλλά και του χρόνου καθυστερήσεων
- τη μείωση των εκλυόμενων εκπομπών CO_{2e}

Σενάριο 1: Η διανυόμενη απόσταση είναι μικρότερη των 500 χλμ.

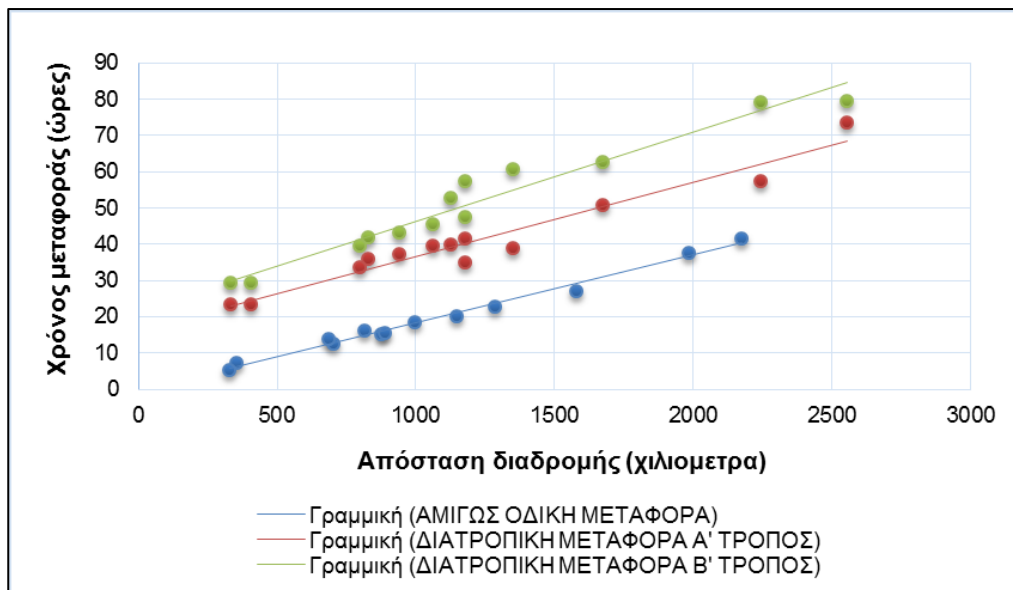
- Όταν πρωταρχικός στόχος αποτελεί η μείωση του κόστους μεταφοράς, τότε προτείνεται η επιλογή αμιγώς οδικής μεταφοράς, παρουσιάζοντας χαμηλότερο κόστος μεταφοράς
- Όταν ο ελάχιστος χρόνος μεταφοράς είναι το πρωτεύον κριτήριο επιλογής, η επιλογή αμιγώς οδικής μεταφοράς αποτελεί μονόδρομο, καταγράφοντας σταθερά χαμηλότερους χρόνους μεταφοράς, λόγω του ότι δεν υπάρχουν καθυστερήσεις λόγω μεταφορτώσεων. Επίσης, τα διανυόμενα χιλιόμετρα της αμιγώς οδικής μεταφοράς είναι σταθερά λιγότερα από εκείνα της διατροπικής. Παρόλα αυτά, η επιλογή αμιγώς οδικής μεταφοράς οδηγεί σε μεγαλύτερη εκπομπή ρύπων.
- Όταν ο πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, κατά την μεταφορά των εμπορευμάτων, ο συνδυασμός οδικής και σιδηροδρομικής μεταφοράς αποτελεί την βέλτιστη επιλογή, ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές σε επίπεδα της τάξεως του -50%. Αντιστοίχως, το μειονέκτημα της συνδυασμένης μεταφοράς έγκειται στην ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου μεταφοράς εξαιτίας των μεταφορτώσεων που μεσολαβούν κατά την εναλλαγή των μέσων.

Σενάριο 2: Η διανυόμενη απόσταση είναι μεγαλύτερη των 500km:

- Όταν η μείωση του χρόνου μεταφοράς αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο, ως βέλτιστη επιλογή αποδεικνύεται η μονοτροπική μεταφορά μέσω οδικού δικτύου, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο κίνησης 20 – 30 ώρες.
- Όταν στόχος αποτελεί η μείωση του κόστους μεταφοράς, βέλτιστος αποδεικνύεται ο συνδυασμός οδικής και σιδηροδρομικής μεταφοράς. Όμως, λόγω των μεταφορτώσεων που μεσολαβούν κατά την εναλλαγή μέσου μεταφοράς, ο μέσος χρόνος μεταφοράς αυξάνεται.
- Όταν στόχος είναι η μείωση των εκπομπών ρύπων, βέλτιστη επιλογή αποδεικνύεται και σε αυτή την περίπτωση η συνδυασμένη μεταφορά.



Διάγραμμα 18: Σχέση απόστασης και κόστους μεταφοράς



Διάγραμμα 19: Σχέση απόστασης και χρόνου μεταφοράς

5. Συμπεράσματα

Το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπεμπόμενων ρύπων των οδικών και σιδηροδρομικών μεταφορών έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα. Πολλά μοντέλα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπεμπόμενων ρύπων έχουν αναπτυχθεί τόσο για τις οδικές όσο και για τις σιδηροδρομικές μεταφορές. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνολικά έξι μοντέλα οδικών μεταφορών (CMEM, PMG, ORNL, DSLV, EcotransIT και GIFT) και έξι μοντέλα σιδηροδρομικών μεταφορών (Rail_NTUA, MEET I, MEET II, IFEU, EcotransIT και GIFT).

Ο έλεγχος αξιοπιστίας/εγκυρότητας που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έδειξε ότι τα οδικά μοντέλα που περιλαμβάνουν ως μεταβλητές εισόδου τα προφίλ κλίσεων και ταχύτητας (CMEM, PMG, ORNL) εκτιμούν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική κατανάλωση συγκριτικά με τα μοντέλα που βασίζουν τις μετρήσεις τους σε μέσες τιμές ή διορθωτικούς συντελεστές (DLSV, EcotransIT, GIFT). Αντίστοιχος έλεγχος που έγινε στο τμήμα Δομοκός – Αθήνα για τα σιδηροδρομικά μοντέλα, έδειξε ότι εκείνα που αξιοποιούν το προφίλ κλίσεων της διαδρομής (Rail_NTUA, MEET II) υπολογίζουν τιμές κατανάλωσης αρκετά κοντά στις πραγματικές (έως και -7%). Τα μοντέλα στα οποία η κλίση δεν λαμβάνεται υπόψη ή λαμβάνεται προσεγγιστικά π.χ. μέσω χαρακτηρισμών εδάφους ως «επίπεδο/λοφώδες/ορεινό» (EcotransIT, GIFT), παρουσιάζουν αποκλίσεις της τάξεως του -15% από τις πραγματικές μετρήσεις.

Η εφαρμογή όλων των ανωτέρω μοντέλων στη διαδρομή Θεσσαλονίκη – Σόφια, έδειξε πως αν και όλα περιλαμβάνουν ως μεταβλητή εισόδου το βάρος των μεταφερόμενων εμπορευμάτων, τα αποτελέσματα τους για διάφορα σενάρια μεταφοράς παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, για μεταφορά μόνο ελαφριών ή μόνο βαριών εμπορευματοκιβωτίων, οι τιμές υπολογισμού παρουσιάζουν μεταξύ τους αποκλίσεις έως και 30%. Για παράδειγμα, τα οδικά μοντέλα EcotransIT και GIFT υπερεκτιμούν την κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση μεταφοράς βαριών φορτίων, ενώ αντίστοιχα την υποεκτιμούν στην περίπτωση ελαφριών φορτίων. Αντίθετα, στα σενάρια μεταφοράς συνήθους μίξης

(μίξη ελαφρών, μεσαίου βάρους και βαριών εμπορευμάτων), τα αποτελέσματα των μοντέλων οδικών οχημάτων παρουσιάζουν σχετική σύγκλιση ($\pm 5\%$)

Αντίστοιχα, οι τιμές υπολογισμού των μοντέλων σιδηροδρομικών οχημάτων συγκλίνουν στην περιοχή 400 – 800 περίπου τόνων ωφέλιμου βάρους εμπορευμάτων. Αντίθετα όταν εξετάζονται σενάρια μεταφοράς μικρότερου ή μεγαλύτερου ωφέλιμου βάρους, τα αποτελέσματα των μοντέλων αποκλίνουν έως και 40%.

Τέλος, όσον αφορά την σύγκριση της αμιγώς οδικής και διατροφικής μεταφοράς, η οποία πραγματοποιείται σε διαδρομές του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου IV, αποδεικνύεται πως στις περισσότερες περιπτώσεις η διατροφική μεταφορά είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον (λιγότεροι εκπεμπόμενοι ρύποι), ιδιαίτερα μάλιστα όταν η μεταφορά αφορά σε βαριά φορτία και όταν οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (δευτερογενής ενέργεια) είναι σε μεγάλο ποσοστό ανανεώσιμες.

6. Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα

Η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου σε περισσότερες διαδρομές οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου και η καταγραφή της πραγματικής κατανάλωσης, με παράλληλη γνώση των χαρακτηριστικών των οχημάτων μπορεί να οδηγήσει σε πιο σαφή συμπεράσματα, όσον αφορά την ακρίβεια υπολογισμού των υπολογιστικών μοντέλων που εξετάστηκαν.

Η εξαγωγή υψομέτρων κατά μήκος μεγάλου αριθμού διαδρομών με την μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική είναι μεν εφικτή, παρόλα αυτά είναι αρκετά χρονοβόρα. Η ανάπτυξη μιας εφαρμογής, η οποία θα παρείχε τα ίδια ή και ακριβέστερα αποτελέσματα σε συντομότερο χρόνο και με λιγότερο κόπο (π.χ. με αυτοματοποίηση των διαδικασιών που εκτελέστηκαν δια χειρός στην παρούσα εργασία) θα καθιστούσε δυνατή την σύγκριση των μοντέλων σε περισσότερες διαδρομές του Ευρωπαϊκού δικτύου.

Βιβλιογραφία

- ¹ International Energy Agency, 2015. Railway Handbook 2015: Energy Consumption and CO₂ Emissions. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.uic.org/IMG/pdf/iea-uic_2015-2.pdf
- ² Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, Brian Slack 2013. The Geography of Transport Systems, New York, Routledge. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://people.hofstra.edu/geotrans/>
- ³ International Energy Agency , 2016, Paris, Transport – Global EV Outlook 2016. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf
- ⁴ Sustainable Energy Authority of Ireland, 2014, Dublin, Energy in transport report, 2014. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.seai.ie/Publications/Statistics_Publications/Energy_in_Transport/Energy-in-Transport-2014-report.pdf
- ⁵ Τσαμπούλας, Δ., 2010. Ο Αναπτυξιακός Ρόλος των Μεταφορών για την Ελλάδα. 12η Πανελλήνια Επιμελητηριακή Συνδιάσκεψη Μεταφορών με Θέμα «Μεταφορές – Μοχλός ανάπτυξης της Ελληνικής Οικονομίας και της Περιφέρειας: Προβληματισμοί και προκλήσεις», 2010.
- ⁶ Hanssen, T., Mathisen, T., Jørgensen, F., 2012. Generalized Transport Costs in Intermodal Freight Transport, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, (54): 189-200.
- ⁷ Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2012, Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων, Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός – Οδικός Χάρτης για το 2050, Μάρτιος 2012. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2012/04/energeiakos-sxediasmos.pdf>
- ⁸ Μπαλλής, Θ., 2012. Ανάπτυξη εφαρμογής εύρεσης βέλτιστης διαδρομής σε περιβάλλον GIS – Εφαρμογή στο ευρωπαϊκό δίκτυο συνδυασμένων μεταφορών. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ⁹ Cenex, 2014. Fleet carbon reduction guidance – Introduction and overview. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.cenex.co.uk/wp-content/uploads/2014/02/FCRTGuidance.pdf>
- ¹⁰ National Petroleum Council, 2012, Chapter Ten Heavy-Duty Engines & Vehicles. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.npc.org/reports/FTF-report-080112/Chapter_10-HD_Engines-Vehicles.pdf
- ¹¹ Chuang, D., 2012, Packed Snow Performance of Low Rolling Resistance Class 8 Heavy Truck Tires, National Research Council Canada
- ¹² Michael Coyle, 2007. Effects of Payload on the Fuel Consumption of Trucks, Department for Transport. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

<https://www.scribd.com/document/130012093/RR5-Effects-of-Payload-on-the-Fuel-Consumption-of-Trucks>

- ¹³ G. Scenson, D. Fjeld, 2012, Swedish University of Agricultural Sciences, The influence of road characteristics on fuel consumption for logging trucks, επιστημονικό άρθρο. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://road-transport-technology.org/Proceedings/HVTT%2012/The%20Influence%20of%20Road%20Characteristics%20on%20Fuel%20Consumption%20for%20Logging%20Trucks%20-%20Svenson.pdf>
- ¹⁴ Min-Wook, K., et al., 2013, New highway geometric design methods for minimizing vehicular fuel consumption and improving safety
- ¹⁵ Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, 2016, Οδικές Εμπορευματικές Μεταφορές, Εγκύκλιος Φ450/10735/1241/23-3-2012. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.yme.gr/?getwhat=1&oid=449&id=&tid=449>
- ¹⁶ Pettersson, N., Johansson, H., 2006, Modelling and control of auxiliary loads in heavy vehicles, International Journal of control Vol. 79, No. 5, Μάιος 2006
- ¹⁷ Diesel Technology Forum, Οργάνωση σχετική με κινητήρες ντίζελ, καύσιμα και τεχνολογία. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.dieselforum.org/index.cfm>
- ¹⁸ Σταθόπουλος, Α., 2000. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταφορές και κυκλοφορία - μη συμβατικά οχήματα, πανεπιστημιακό σύγγραμμα. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://docplayer.gr/606971-Metafores-kai-kykloforia-mi-symvatika-ohimata.html>
- ¹⁹ Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2011, Large Scale Duty Cycle Project: Trackive Energy Analysis Methodology and Results from Long-Haul Truck Drive Cycle Evaluations, Μάιος 2011. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub33189.pdf>
- ²⁰ Φαφουτέλλης Παναγιώτης, Κατανάλωση καυσίμου φορτηγών οδικών οχημάτων, 2015, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ²¹ University of Vermont Transportation Research Center, 2009, Modeling the Emissions of Heavy-Duty Diesel Vehicles on Interstate 89/189 and US Route 7 in the Burlingtonh Area, Νοέμβριος 2009. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.uvm.edu/~transctr/research/trc_reports/UVM-TRC-09-006.pdf
- ²² Matthew Barth, Theodore Younglove, George Scora, 2005, Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emission and Fuel Consumption Model, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://merritt.cdlib.org/d/ark:%252F13030%252Fm5cj8fkb/1/producer%252FPRR-2005-01.pdf>
- ²³ Matthew Barth, Theodore Younglove, George Scora, Modal Emissions Model for Heavy-Duty Diesel Vehicles, επιστημονικό άρθρο. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://cmscert.engr.ucr.edu/cmem/docs/TRR2004-HDDV.pdf>
- ²⁴ Edward Nam, Assesment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency, Advanced Technology Viehicle

-
- Modeling in PERE, Μάρτιος 2004. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www3.epa.gov/otaq/models/ngm/420d04002.pdf>
- ²⁵ Schmied, M., Knörr, W., 2012. Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258-Terms, Methods, Examples. European Association for forwarding, transport, logistics and customs services (CLECAT). Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.clecat.org/images/CLECAT_Guide_on_Calculating_GHG_emissions_for_freight_forwarding_and_logistics_services.pdf
- ²⁶ IVE mnH, Infras AG, IFEU, 2016. Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports, Methodology and Data Update, Berne – Hannover – Heideelberg, 30 Ιουνίου 2016. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.ecotransit.org/download/ETW_Methodology_Background_Report_2016.pdf
- ²⁷ Αμπακούμκιν, Κ., Λυμπέρης, Κ., 2001. Ειδικά θέματα σιδηροδρομικής, Σημειώσεις κατά την παράδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- ²⁸ David Weenberg, 2011, Stochholm Engineering Sciences, Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.167679!/Menu/general/column-content/attachment/Licentiate_thesis_Wennberg.pdf
- ²⁹ Μπασέτας Ευστάθιος Κ., Εμπορευματικές σιδηροδρομικές μεταφορές: ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε συρμό, 2013, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ³⁰ Asian Development Bank Project, 2015, Improving energy efficiency and reducing emissions through intelligent railway station buildings. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/173696/energy-intelligent-railway-station.pdf>
- ³¹ Καλτσούνης Α, 2005, Σιδηροδρομική, Συστήματα έλξης, πανεπιστημιακό σύγγραμμα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ³² Lukaszewicz, P., 2001. Energy consumption and running time for trains: Modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.13.2462&rep=rep1&type=pdf>
- ³³ Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., Sorenson, S., 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, Deliverable 22 for the project MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport). Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>

-
- ³⁴ Helms, H., Lambrecht, U., Höpfner, U., 2003. Energy savings by light-weighting, Final report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/f10000125.pdf
- ³⁵ IVE mnH, Infras AG, IFEU, 2016. Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports, Methodology and Data Update, Berne – Hannover – Heideelberg, 30 Ιουνίου 2016. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.ecotransit.org/download/ETW_Methodology_Background_Report_2016.pdf
- ³⁶ Τουρνάκη Ελένη, Το αποτύπωμα άνθρακα στις σιδηροδρομικές συνδυασμένες μεταφορές: Εφαρμογή στη γραμμή Αθηνών-Θεσσαλονίκης, 2014, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ³⁷ Λυμπέρης Κ., 2015, Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές, Πανεπιστημιακό σύγγραμμα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ³⁸ Ministry of Development, Competitiveness, Infrastructure, Transports and Network, 2014. Desktop Testing Methodology, Deliverable 5.1.1. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.gift-project.eu/index.php/el/download>
- ³⁹ Διαδικτυακή εφαρμογή GPS Visualizer, εφαρμογή επεξεργασίας χαρτογραφικών δεδομένων με πολλαπλές επιλογές. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.gpsvisualizer.com/>
- ⁴⁰ Parajuli, A., 2005. Modeling road and rail freight energy consumption: a comparative analysis, Master's thesis, Queensland University of Technology. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://eprints.qut.edu.au/16193/1/Ashis_Parajuli_Thesis.pdf
- ⁴¹ Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., Sorenson, S., 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, Deliverable 22 for the project MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport). Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.ocs.polito.it/biblioteca/mobilita/MEET.pdf>
- ⁴² Den Boer, E., Otten, M., van Essen, H., 2011. Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database, Report. STREAM International Freight. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.shortsea.be/html_nl/publicaties/documents/CEdelft-STREAMInternationalFreight2011.pdf
- ⁴³ Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), 2013. Energy savings by light-weighting, Final Report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/f10000125.pdf
- ⁴⁴ United States Department of Energy, 2011. Oscar Franzese, Effect of Weight and Roadway Grade on the Fuel Economy of Class-8 Freight Trucks, October 2011. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL_TM_2011_471.pdf

-
- ⁴⁵ Verband der Automobilindustrie, 2008 The Commercial Vehicle – environmentally friendly and efficient. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.vda.de/en/services/Publications/the-commercial-vehicle.html>
- ⁴⁶ Carrillo Zanuy, A., Kendra, M. , Čamaj, J. , Mašek, J., Stolz, S., Márton, P., 2011. Intermodal application of VEL-Wagon (Versatile, Efficient and Longer Wagon for European Transportation), Deliverable report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.vel-wagon.eu/index.php/downloads>
- ⁴⁷ Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Μεταφορές και Δίκτυα, 2016. Οδικές Εμπορευματικές Μεταφορές, Θεωρητική Εκπαίδευση Υποψηφίων Οδηγών Φορτηγών. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.yme.gr/pdf/book_FORTHGA.pdf
- ⁴⁸ Διαδικτυακή εφαρμογή εύρεσης αποστάσεων και βέλτιστης διαδρομής οδικού δικτύου. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.bing.com/>
- ⁴⁹ Λογισμικό TransCAD, Transportation Planning Software. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.caliper.com/tcovu.htm>
- ⁵⁰ Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ETIS-Plus, European Transport Information System, Data from ETISplus. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.etisplus.eu/default.aspx>
- ⁵¹ Ministry of Development, Competitiveness, Infrastructure, Transports and Network, 2014. Gift Project, Gift Transport Network Proposals for Corridor IV, Deliverable 4.2.1: Synthesis Report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://en.calameo.com/books/00221835235e762e526cd>
- ⁵² Lorinc Czako, 2016 Orient/East-Med Rail Freight Corridor 7, Annual activity and performance report of the rail freight corridor, Ιούνιος 2016. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.rfc7.eu/>
- ⁵³ Auvinen, H., Mäkelä, K., Lischke, A., Burmeister, A., De Ree, D., Ton, J., 2011. Existing methods and tools for calculation of carbon footprint of transport and logistics, Deliverable of the project COFRET. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.cofret-project.eu/downloads/pdf/COFRET_Deliverable_2.1_final.pdf
- ⁵⁴ Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), 2013. Energy savings by light-weighting, Final Report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fl0000125.pdf