



Διερεύνηση Θεμάτων για τη Βελτίωση της Κατανάλωσης Ενέργειας και των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στις Εμπορευματικές Σιδηροδρομικές Μεταφορές

Αναπλ. Καθηγητής Μπαλλής Α., Μοσχόβου Τ., Τουρνάκη Ε.

¹ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου, Αθήνα

E-mail: abal@central.ntua.gr, tmosch@central.ntua.gr, etournaki@central.ntua.gr

Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των τεχνικών και οργανωτικών προϋποθέσεων ώστε οι συνδυασμένες σιδηροδρομικές εμπορευματικές μεταφορές να είναι ενεργειακά και περιβαλλοντικά πλεονεκτικότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες οδικές. Η σχετική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μοντέλου στο οποίο υπεισέρχονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά των μηχανών έλξης, των μεταφερόμενων μονάδων και των φορταμαξών. Η σχετική ανάλυση κατέληξε στις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται ώστε να υπάρχει θετική συμβολή των εμπορευματικών σιδηροδρομικών μεταφορών στο περιβάλλον (ευνοϊκό προφίλ κλίσεων, υψηλός βαθμός πληρότητας, κατάλληλο τροχαίο υλικό, βελτιστοποίηση της φόρτωσης, ηλεκτροκίνηση με παραγωγή ενέργειας από πηγές με μικρό αποτύπωμα άνθρακα).

Λέξεις κλειδιά: ενέργεια, ρύποι, σιδηροδρομική μεταφορά, αποτύπωμα άνθρακα

Abstract

The main goal of this study is to investigate the technical and organizational conditions in order for intermodal rail freight transport to be energy and environmentally more efficient than the respective road transport. The investigation was carried out using a model, which takes into account the technical characteristics of the railway track as well as the characteristics of the locomotives, the transported units and the rail wagons. The analysis performed resulted in the conditions that must be satisfied in order for intermodal rail freight transport to have a positive contribution on the environment (advantageous gradient profile, high load factor, suitable rolling stock, optimization of wagon loading, electric traction with energy produced by sources with a reduced carbon footprint).

Keywords: energy, emissions, railway transport, carbon footprint



1. Εισαγωγή

Οι μεταφορές ευθύνονται για το ένα τρίτο περίπου των ατμοσφαιρικών ρύπων στο περιβάλλον (Eurostat Energy data, 2012) με το μεγαλύτερο ποσοστό να αφορά σε εκπομπές ρύπων από τις οδικές μεταφορές (Stathopoulos et al, 1993). Για το λόγο αυτό στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής πολιτικής για τη βελτίωση του περιβάλλοντος περιλαμβάνονται μέτρα για την ενίσχυση των φιλικών προς το περιβάλλον μεταφορικών μέσων. Δημιουργείται έτσι μια πρόκληση-ευκαιρία για το σιδηρόδρομο προκειμένου να αυξήσει το μερίδιό του σε σχέση με τα οδικά μέσα τόσο στις επιβατικές όσο κυρίως στις εμπορευματικές μεταφορές που είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Βασικές συνιστώσες της προσπάθειας αυτής είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους, η εξοικονόμηση ενέργειας και η περαιτέρω βελτίωση του φιλικού προς το περιβάλλον χαρακτήρα του σιδηροδρόμου.

Η μείωση του λειτουργικού κόστους είναι μια μόνιμη επιδίωξη των εμπορευματικών σιδηροδρομικών μεταφορών καθώς τα ευαίσθητα στο κόστος εμπορεύματα που διακινούνται σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις αποτελούν την κατεξοχήν αγορά του. Ειδικότερα για την Ελλάδα, η ενίσχυση των σιδηροδρομικών μεταφορών στα Βαλκάνια αποτελεί έναν βασικό στρατηγικό στόχο για την υποστήριξη του οποίου προγραμματίζονται σημαντικά έργα που αφορούν τη βελτίωση των σιδηροδρομικών υποδομών (Μπαλλής κ.α. 2014).

Η προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας συναρτάται άμεσα με τις δράσεις για τη μείωση του κόστους. Ως προς το θέμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι ευρέως διαδεδομένη η αντίληψη ότι ο σιδηρόδρομος είναι φιλικό προς το περιβάλλον μέσο. Αν και αυτό ισχύει για αρκετές περιπτώσεις, δεν είναι πάντοτε αληθές: ακόμη και χωρίς ακριβείς υπολογισμούς γίνεται αντιληπτό ότι μία ντηζελομηχανή 4.500 ίππων και μάζας 120 t που έλκει π.χ. 5 φορτάμαξες κάθε μία από τις οποίες μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο 25t καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από 5 σύγχρονα φορτηγά που μεταφέρουν την ίδια ποσότητα αγαθών. Αντιθέτως, ο προσδιορισμός των προϋποθέσεων ώστε η σιδηροδρομική μεταφορά να είναι ενεργειακά και περιβαλλοντικά πλεονεκτικότερη (αποσυμφόρηση κυκλοφορίας, μείωση ενέργειας, μείωση ατυχημάτων, μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα, κλπ) απαιτεί μία συστηματική προσέγγιση καθώς χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής και των συρμών επιδρούν καθοριστικά στο αποτέλεσμα.

Ο όρος "αποτύπωμα άνθρακα" αναφέρεται στη συνολική ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο από ένα άτομο, μια οικογένεια, ένα κτήριο, έναν οργανισμό, μία δραστηριότητα ή μία εταιρεία. Περιλαμβάνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται τόσο από τα καύσιμα που καίγονται άμεσα π.χ. για τη θέρμανση ενός σπιτιού ή για την κίνηση ενός οχήματος, κτλ, όσο και από τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται κατά την παραγωγή των προϊόντων ή των υπηρεσιών που το άτομο, η οικογένεια, ο οργανισμός, κτλ χρησιμοποιεί, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από τα εργοστάσια που παράγουν προϊόντα, καθώς και από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (US Environmental Protection Agency, 2014).

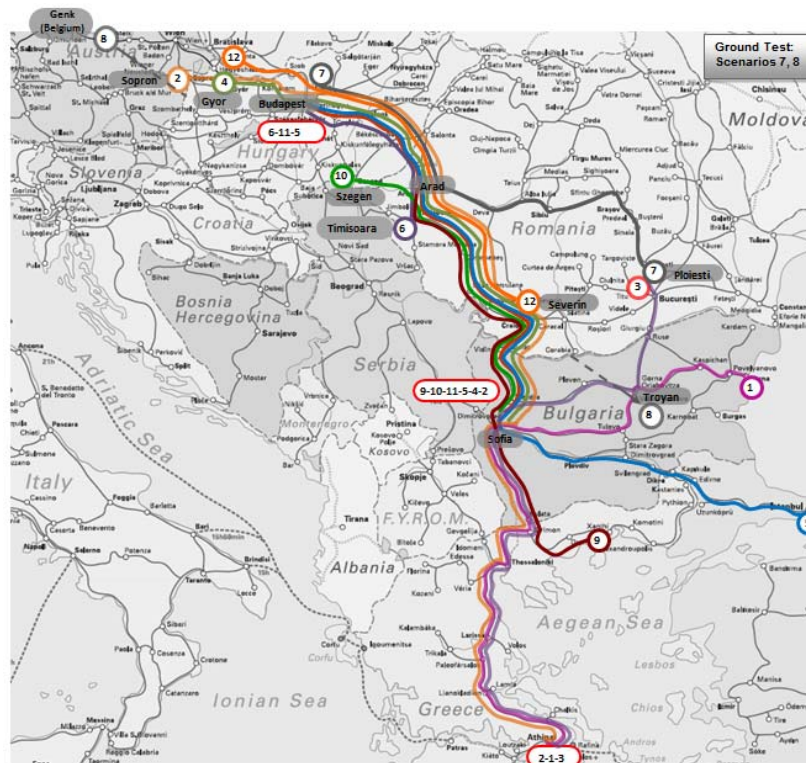
Στην περίπτωση των μεταφορών, το "αποτύπωμα άνθρακα" μπορεί να αναφέρεται είτε στις Tank-To-Wheels (TTW) εκπομπές ρύπων είτε στις Well-To-Wheels (WTW) εκπομπές ρύπων. Οι πρώτες (TTW) αφορούν τις άμεσες εκπομπές ρύπων που παράγονται από τη λειτουργία των οχημάτων ενώ οι δεύτερες (WTW) αφορούν τις συνολικές εκπομπές ρύπων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που παράγονται κατά τη διαδικασία της εξόρυξης, της

επεξεργασίας, της μεταφοράς και της διανομής των καυσίμων. Στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί γίνονται για τις WTW εκπομπές ρύπων.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας των σιδηροδρομικών συρμών, όπως αυτό που υπολογίζει την ενέργεια είτε βάσει της μέσης ταχύτητας και της απόστασης μεταξύ διαδοχικών στάσεων είτε συναρτήσει του αριθμού των στάσεων, της υψομετρικής διαφοράς στην αρχή και στο τέλος της διαδρομής και της μέγιστης και μέσης ταχύτητας του συρμού (Hickman et al, 1999). Μια διαφορετική προσέγγιση (Helms et al, 2002) βασίστηκε στον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας ανά χιλιόμετρο που προκύπτει ως συνάρτηση μόνο της μικτής μάζας του συρμού (M_{train}), ενώ στα πλαίσια της ανάπτυξης του υπολογιστικού εργαλείου EcotransIT World ο υπολογισμός έγινε με ανεξάρτητη μεταβλητή και πάλι τη μάζα του συρμού (IFEU Heidelberg, 2010).

Εκτίμηση των μεταφορικών ροών και των αντίστοιχων ρύπων που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου έγιναν από διάφορες σχετικές εργασίες όπως αυτή των Cristea et al (2013) χρησιμοποιώντας στοιχεία μεταξύ διαφορετικών προελεύσεων-προορισμών, των Bauer et al (2010), όπου προτείνονται λύσεις οι οποίες ελαχιστοποιούν τις εκπομπές ρύπων στις μεταφορικές υπηρεσίες, κ.α. Οδηγίες σχετικές με τον υπολογισμό των ρύπων από τις εμπορευματικές μεταφορές έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί, όπως οι οδηγίες από την CEFIC (2011) για εκτίμηση, διαχείριση αλλά και αξιολόγηση-προώθηση καλών πρακτικών για μείωση των εκπομπών από μεταφορικές υπηρεσίες, αλλά και το μοντέλο που αναπτύχθηκε από την ITF/OECD (2014) για την πρόβλεψη του μεταφορικού όγκου και των αντίστοιχων εκπομπών ρύπων από διεθνείς εμπορευματικές ροές καλύπτοντας έτσι το κενό στη μέτρηση και μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον τομέα των μεταφορών.

Στην επιστημονική αυτή περιοχή συνέβαλε και το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα GIFT (<http://gift-project.eu/>) εντοπίζοντας (υλοποιημένα ή και προτεινόμενα) τεχνικά έργα και διερευνώντας πράσινες διαδρομές κατά μήκος των τριών Πανευρωπαϊκών Διαδρόμων IV (Εικόνα 1), V και VII για την προώθηση των εμπορευματικών σιδηροδρομικών μεταφορών και την αξιοποίηση μερικώς ή ολικώς των υποδομών των σιδηροδρομικών αξόνων (GIFT, 2014b).



Εικόνα 1: Σιδηροδρομικές μεταφορικές υπηρεσίες του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου που εξετάστηκαν στο έργο GIFT (GIFT, 2014a)

Η διερεύνηση που έγινε στο έργο GIFT έδειξε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις και υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις ο σιδηρόδρομος μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες με μικρότερο κόστος, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σχέση με την οδική μεταφορά (GIFT, 2014a).

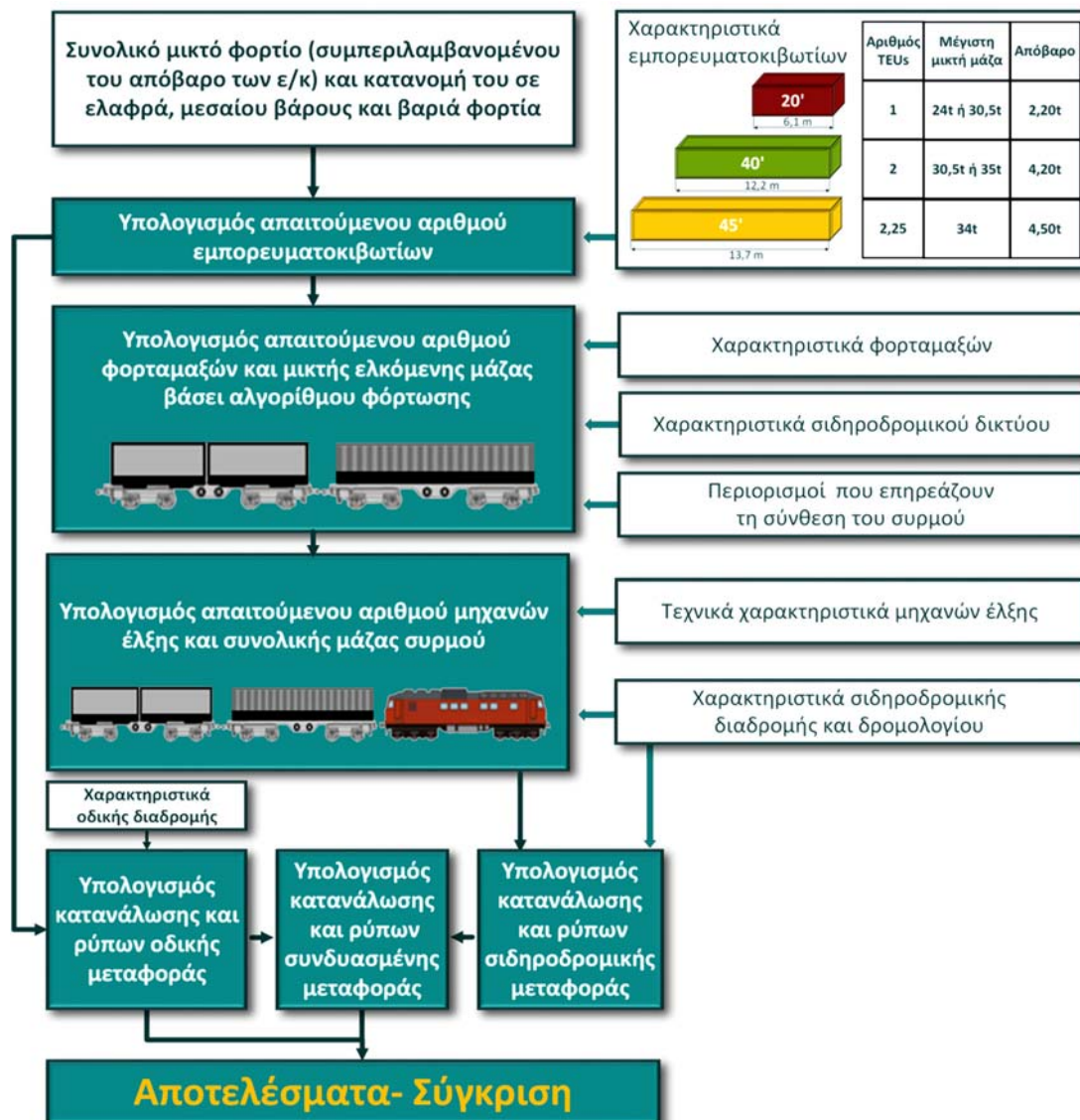
2. Κατανάλωση ενέργειας και εκπεμπόμενοι ρύποι στις σιδηροδρομικές μεταφορές

Η εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου και των ρύπων των εμπορευματικών σιδηροδρομικών μεταφορών αποτελεί ένα πρόβλημα πολυπαραγοντικής φύσεως. Οι κυριότερες παράμετροι που την επηρεάζουν και λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της είναι: το είδος του συστήματος έλξης του συρμού, η συνολική του μάζα, η ταχύτητα κίνησής του, τα χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού, κλπ.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή (Εικόνα 2) είχε ως στόχο τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και βάσει αυτής του αποτυπώματος άνθρακα μίας σιδηροδρομικής συνδυασμένης μεταφοράς και της ισοδύναμης της αμιγώς οδικής μεταφοράς. Σε πρώτο βήμα εισάγονται ως δεδομένα το συνολικό ωφέλιμο φορτίο της εξεταζόμενης μεταφοράς και η κατανομή του σε ελαφριά, μεσαίου βάρους και βαριά εμπορεύματα καθώς και τα χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων που θα



χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη μεταφορά ώστε να υπολογιστεί ο απαιτούμενος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων. Βάσει αυτού και εισάγοντας επιπλέον τα χαρακτηριστικά της οδικής διαδρομής (απόσταση διαδρομής, ποσοστό διαδρομής εντός αστικού δικτύου, χαρακτηρισμός κλίσης διαδρομής) υπολογίζονται η κατανάλωση και οι ρύποι της οδικής μεταφοράς. Όσον αφορά τη σιδηροδρομική μεταφορά, τα εμπορευματοκιβώτια φορτώνονται σε εμπορευματικές φορτάμαξες χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο φόρτωσης που έχει προκύψει από τους περιορισμούς που τίθενται από τον κανονισμό φόρτωσης του ΟΣΕ (Ballis et al, 2014), λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των φορταμαξών και του δικτύου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός μηχανών έλξης λαμβάνοντας υπόψη τους τύπους και τα χαρακτηριστικά τους αλλά και παραμέτρους της διαδρομής και του δρομολογίου. Έχοντας καταλήξει στην τελική σύνθεση του συρμού, υπολογίζεται η συνολική του μάζα και τελικά η κατανάλωση και οι ρύποι της σιδηροδρομικής μεταφοράς (Τουρνάκη, 2014).



Εικόνα 2: Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας (Τουρνάκη, 2014)



Το μοντέλο για τον υπολογισμό της κατανάλωσης και των ρύπων της σιδηροδρομικής μεταφοράς είναι ένα μοντέλο που προκύπτει από τις αντιστάσεις που καλείται να υπερκεράσει ο σιδηροδρομικός συρμός κατά την κίνησή του (Τουρνάκη, 2014). Η βασική του εξίσωση είναι:

$$a \left(\frac{Wh}{tkm} \right) = 2,78 * \Sigma w \quad (1)$$

Όπου:

a η ειδική κατανάλωση ενέργειας

Σw το σύνολο των ειδικών αντιστάσεων

2,78 συντελεστής που προκύπτει από τη μετατροπή των μονάδων (Βλ. Εξίσωση 2)

$$\left(\frac{daN}{t} * \frac{1Ws}{Nm} * \frac{1000m}{1km} * \frac{1h}{3600s} * \frac{10N}{1daN} \right) \quad (2)$$

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:

$$W_{MEΛ} = 5G_{KA} + 4 \left\{ \frac{(V+15)}{10} \right\}^2 \quad (3)$$

Όπου:

$W_{MEΛ}$ η αντίσταση κύλισης της μηχανής έλξης [N]

G_{KA} το βάρος που αναλαμβάνουν οι κινητήριοι τροχοί [kN]

V η ταχύτητα κίνησης του συρμού [km/h]

$$W_{KYΛ,EMΠ} = c_0 + (0,007 + m) \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (4)$$

Όπου:

$W_{KYΛ,EMΠ}$ η ειδική αντίσταση κύλισης εμπορικών ελκόμενων οχημάτων [%o]

$c_0 = 1,4/2,0$ 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:

$$W_{KYΛ,Σ} = \frac{n * W_{MEΛ} + W_{KYΛ,EMΠ} * G_{EAK}}{G_{Σ}} \quad (5)$$

Όπου:

$W_{KYΛ,Σ}$ η ειδική αντίσταση κύλισης ολόκληρου του συρμού

n ο αριθμός των μηχανών έλξης

$W_{MEΛ}$ η αντίσταση κύλισης της μηχανής έλξης [N]

$W_{KYΛ,EMΠ}$ η ειδική αντίσταση κύλισης εμπορικών ελκόμενων οχημάτων [%o]

G_{EAK} το βάρος των ελκόμενων οχημάτων [kN]

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



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‰) 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‰, 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.

Η τιμή της τελικής κατανάλωσης της νηζελοκίνησης προκύπτει βάσει της μεθόδου του Ecotransit (IFEU Heidelberg, 2010) και οι προκύπτουσες Wh μετατρέπονται σε lt βιοντίζελ βάσει του ενεργειακού του περιεχομένου (35,7 MJ/lt), όπως αυτό δίνεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16258 (European Committee for Standardization, 2012). Στη συνέχεια, οι καταναλώσεις, και για τα δύο συστήματα έλξης, μετατρέπονται σε κιλά CO_{2e}, χρησιμοποιώντας, για την νηζελοκίνηση, τους συντελεστές εκπομπών που προτείνει το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16258 για το καύσιμο βιοντίζελ 5% κ.β., που χρησιμοποιεί ο ΟΣΕ (WTW: 3,17kg CO_{2e}/lt, TTW: 2,54 kgCO_{2e}/lt) ενώ για την ηλεκτροκίνηση το συντελεστή εκπομπών για την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικού ρεύματος, που καταναλώνει ο σιδηροδρομικός συρμός, από το EcotransIT World.

3. Εφαρμογή – Αποτελέσματα

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη γραμμή Αθηνών – Θεσσαλονίκης. Η συγκεκριμένη διαδρομή έχει συνολικό μήκος 510 km και χωρίζεται σε δύο τμήματα λόγω της αλλαγής του συστήματος έλξης: α) από Αθήνα έως Δομοκό, μήκους 277 km, μέγιστης κλίσης 22‰, στην οποία οι συρμοί κινούνται με νηζελοκίνηση και β) από Δομοκό έως Θεσσαλονίκη, μήκους 233 km, μέγιστης κλίσης 14 ‰, στην οποία οι συρμοί κινούνται με ηλεκτροκίνηση.

Στα διάφορα σενάρια που δημιουργήθηκαν κατωτέρω διερευνήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνδυασμένης σιδηροδρομικής μεταφοράς για διάφορες τιμές ωφέλιμων φορτίων εμπορευμάτων.

Στη διερεύνηση εξετάστηκαν τρεις τύποι φορταμαξών (Rgss, Lgns, Sgnss). Η εμπορευματική φορτάμαξα Rgss έχει μήκος 60 ποδών και αποτελεί το βασικό τύπο του στόλου φορταμαξών του ΟΣΕ. Πρόκειται για μία τετραξονική επίπεδη φορτάμαξα κατάλληλη για μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων με απόβαρο 23,5 t, ικανή να μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο μέχρι και 66,5 t. Για τη διαδρομή Αθηνών- Θεσσαλονίκης το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο λαμβάνεται ίσο με 56,5 t λόγω του περιορισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου ανά άξονα στο τμήμα αυτό, που είναι 20 t /άξονα (ΟΣΕ, 2014). Η φορτάμαξα Lgns είναι διαξονική, 45 ποδών, με απόβαρο 11,5 t και μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 28,5t στην εξεταζόμενη διαδρομή. Η φορτάμαξα Sgnss είναι τετραξονική, 60 ποδών με απόβαρο 20t και μέγιστο ωφέλιμο φορτίο 60t.

Για τη συνδυασμένη μεταφορά έγιναν οι εξής παραδοχές:

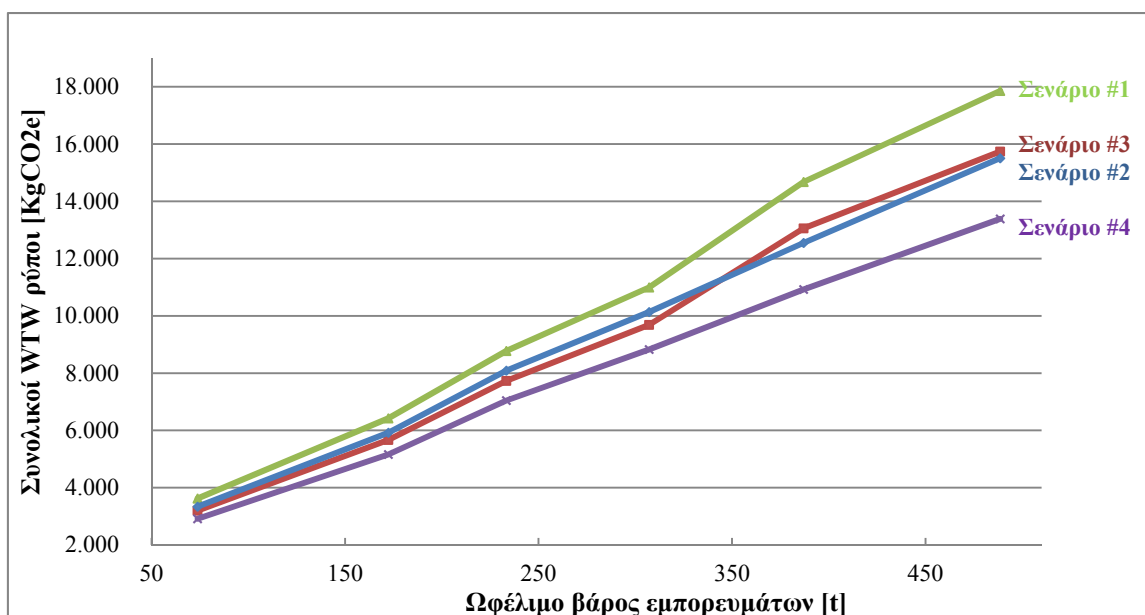
- Η μέση ταχύτητα κίνησης του συρμού στο σιδηροδρομικό τμήμα μπορεί να κυμανθεί από 40 έως 80 km/h. Στα περισσότερα σενάρια η μέση ταχύτητα λαμβάνεται ίση με 60 km/h.



- Η κατανομή των φορτίων σε ελαφριά, μεσαίου βάρους και βαριά έγινε σύμφωνα με τα ποσοστά που έχουν προκύψει από μία ευρωπαϊκή έρευνα σχετική με τη σιδηροδρομική διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων (Carrillo Zanuy et al, 2011) με αποτέλεσμα μία μίξη ελαφριών, μεσαίου βάρους και βαριών φορτίων (σε ποσοστά 43%, 30% και 27% αντίστοιχα).
- Το οδικό τμήμα της συνδυασμένης μεταφοράς έχει συνολικό μήκος 30km και λαμβάνει χώρα 100% εντός αστικού δικτύου σε έδαφος επίπεδο, δεδομένου ότι τα φορτηγά κινούνται κατά αποκλειστικότητα εντός πόλεων.

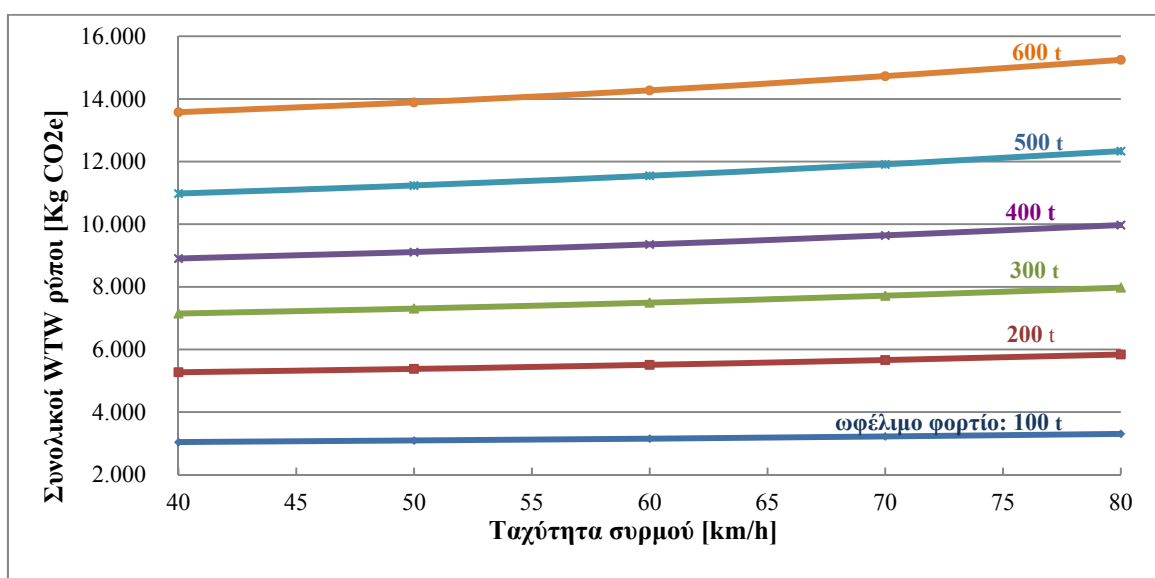
Για να διερευνηθεί η επιρροή του συντελεστή εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και του προφίλ κλίσεων της σιδηροδρομικής διαδρομής, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση με τέσσερα σενάρια:

- Το Σενάριο #1 αφορά συνδυασμένη μεταφορά με σιδηροδρομικό συρμό με μέση ταχύτητα 60 km/h, αποτελούμενο από φορτάμαξες τύπου Rgss, που μεταφέρει ελαφριά, μεσαίου βάρους και βαριά φορτία με ωφέλιμο βάρος εμπορευμάτων έως 500t. Χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος της Ελλάδας (0,98 Kg CO₂e/kWh). Χρησιμοποιήθηκε, ακόμη, το υφιστάμενο προφίλ κλίσεων της σιδηροδρομικής διαδρομής που ελήφθη από στοιχεία του ΟΣΕ.
- Στο Σενάριο #2 στο σιδηροδρομικό τμήμα χρησιμοποιήθηκε συρμός με όμοια χαρακτηριστικά με το προηγούμενο σενάριο. Όπως και στο Σενάριο #1, ως συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος θεωρήθηκε αυτός της Ελλάδας (0,98 Kg CO₂e/kWh), όμως, υιοθετήθηκε ένα ευνοϊκότερο προφίλ κλίσεων (με θεώρηση μέγιστης κλίσης 14‰ που είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση σύμφωνα με τον νέο κανονισμό ΕΛΟΤ (2009)).
- Στο Σενάριο #3 ο σιδηροδρομικός συρμός έχει τα ίδια ως ανωτέρω χαρακτηριστικά ενώ ο συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι αυτός της Γερμανίας (0,527 Kg CO₂e/kWh) και το προφίλ κλίσεων της εξεταζόμενης διαδρομής το υφιστάμενο. Η χρησιμοποίηση του συντελεστή εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος της Γερμανίας αντί του αντίστοιχου της Ελλάδας τέθηκε για να εξεταστεί και η περίπτωση που η Ελλάδα θα αντικαταστήσει τα λιγνιτικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οδηγώντας τον συντελεστή εκπομπών στα επίπεδα χωρών όπως η Γερμανία. Η μείωση των ρύπων στην περίπτωση αυτή μπορεί να φθάσει το 12% (**Εικόνα 3**).
- Στο Σενάριο #4 χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος της Γερμανίας σε συνδυασμό με ένα ευνοϊκό προφίλ κλίσεων με μέγιστη τιμή 14‰ ώστε να εξεταστεί και η περίπτωση στην οποία στο μέλλον βελτιωθεί η χάραξη. Μια τέτοια βελτίωση μπορεί να αποφέρει πρόσθετη μείωση των ρύπων έως και 13% (**Εικόνα 3**).



Εικόνα 3: Επιπτώσεις των χαρακτηριστικών της γραμμής και των συντελεστών παραγωγής ενέργειας στους εκπεμπόμενους ρύπους

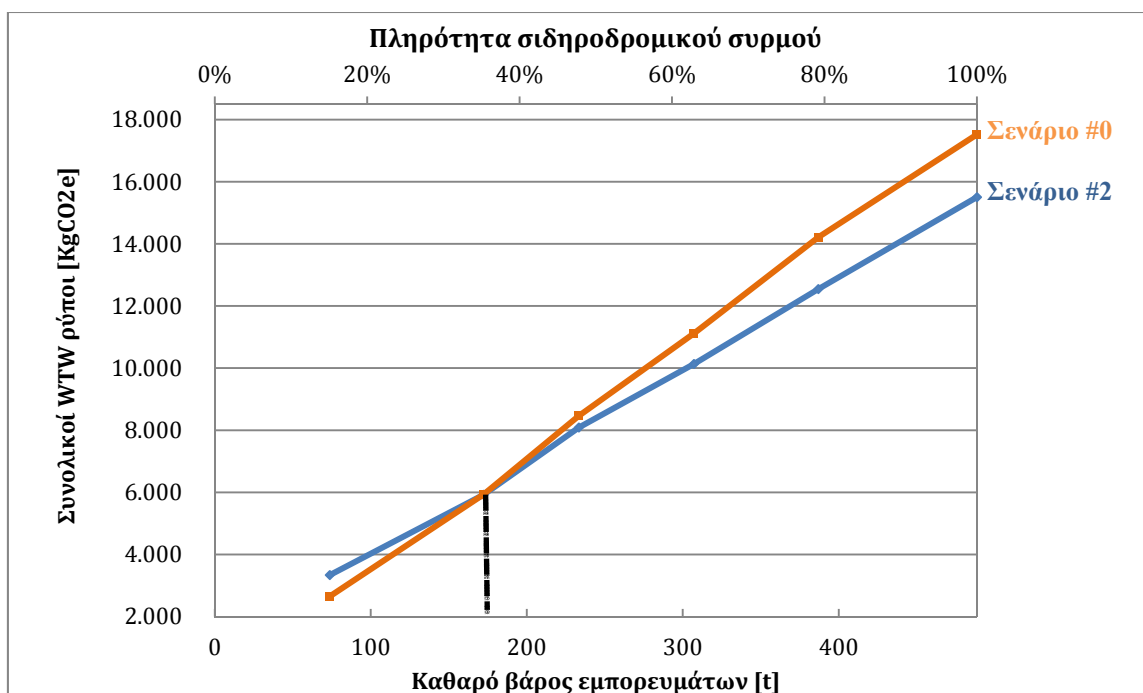
Η **Εικόνα 4** παρουσιάζει την επίπτωση της μέσης ταχύτητας του συρμού στους εκπεμπόμενους ρύπους. Εξετάστηκε ένα εύρος ταχυτήτων μεταξύ 40 και 80 km/h με τις εξής παραδοχές: σιδηροδρομικός συρμός αποτελούμενος από φορτάμαξες Rgss φορτωμένες με ελαφριά, μεσαίου βάρους και βαριά φορτία, συντελεστής εκπομπών ρύπων Ελλάδας, υφιστάμενο προφίλ κλίσεων γραμμής. Παρατηρείται ότι οι ρύποι αυξάνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα λόγω της αύξησης της αεροδυναμικής αντίστασης που έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την κίνηση του συρμού.



Εικόνα 4: Επιπτώσεις της μέσης ταχύτητας κίνησης και του ωφέλιμου φορτίου του συρμού στους εκπεμπόμενους ρύπους



Για να εντοπιστεί το όριο του καθαρού βάρους εμπορευμάτων πάνω από το οποίο η συνδυασμένη σιδηροδρομική μεταφορά είναι περιβαλλοντικά φιλικότερη σε σχέση με την ισοδύναμή της οδική μεταφορά πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση των εκπεμπόμενων ρύπων των δύο αυτών τρόπων μεταφοράς. Όσον αφορά την αμιγώς οδική μεταφορά (Σενάριο #0), αυτή υπολογίστηκε για διαδρομή μήκους 510 km εκ της οποίας το 10% λαμβάνει χώρα εντός αστικού δικτύου, σε λοφώδες έδαφος. Επειδή το μοντέλο οδικής μεταφοράς δεν δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής των μεγάλων κλίσεων που παρατηρούνται σε ορισμένα τμήματα της διαδρομής Αθήνας-Θεσσαλονίκης θεωρήθηκε δίκαιο η σύγκριση να γίνει με το Σενάριο #2 (συντελεστής εκπομπών ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος της Ελλάδας, ευνοϊκότερο προφίλ κλίσεων (με θεώρηση μέγιστης κλίσης 14%) & μέση ταχύτητα 60 km/h). Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 5**, για καθαρά βάρη εμπορευμάτων μεγαλύτερα από 170 τόνους, η οδική μεταφορά παράγει περισσότερους ρύπους από την αντίστοιχη συνδυασμένη σιδηροδρομική μεταφορά.

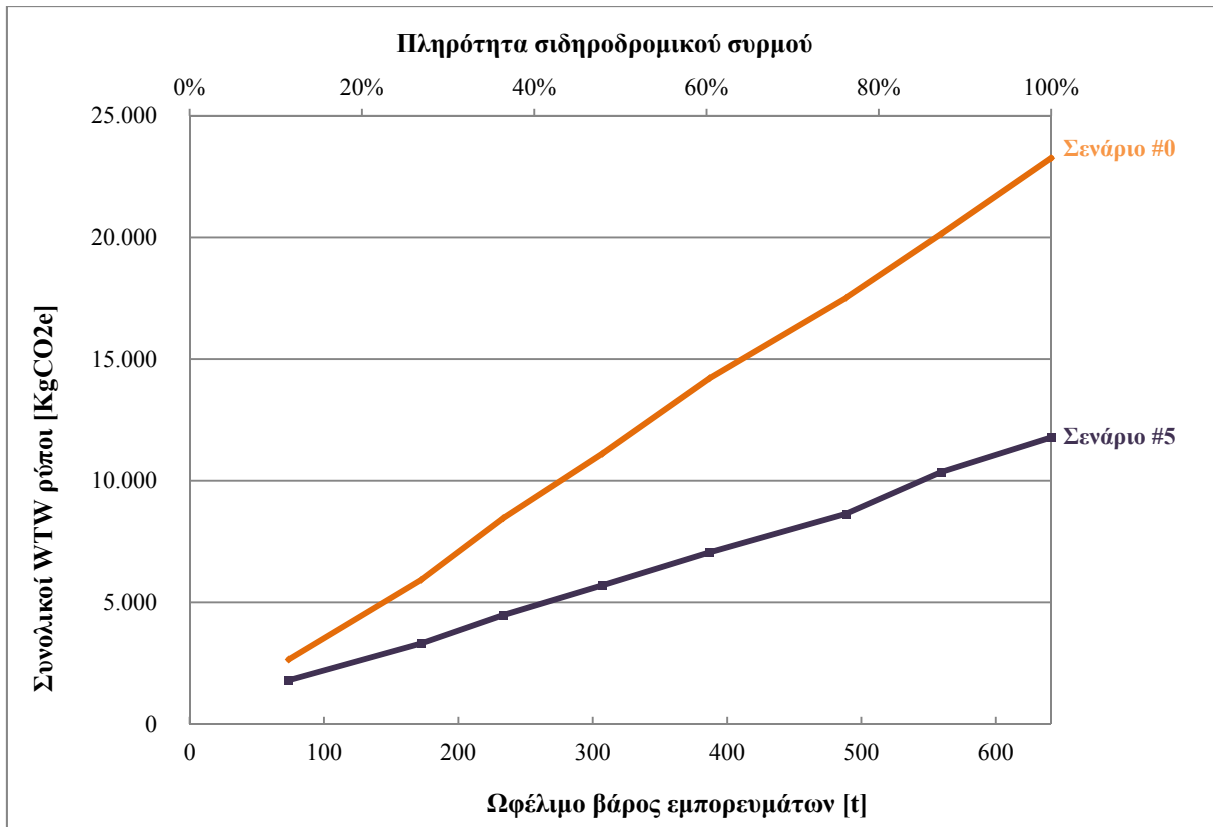


Εικόνα 5: Σύγκριση των παραγόμενων ρύπων συνδυασμένης σιδηροδρομικής μεταφοράς (Σενάριο #2: μέγιστη κλίση 14%, συντελεστής εκπομπών ρύπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ελλάδος, μέση ταχύτητα 60 km/h) και ισοδύναμης οδικής μεταφοράς (Σενάριο #0)

Πραγματοποιήθηκε, τέλος, μία ανάλυση για να διερευνηθεί η προσαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης στα ευρωπαϊκά δεδομένα (**Εικόνα 6**). Για το λόγο αυτό, συγκρίθηκαν οι συνολικοί WTW ρύποι της αμιγώς οδικής μεταφοράς (Σενάριο #0) με τους αντίστοιχους ενός ευνοϊκού σεναρίου που αντικατοπτρίζει τα ευρωπαϊκά δεδομένα (Σενάριο #5). Για το σενάριο #5 έγιναν οι εξής παραδοχές: ο συντελεστής εκπομπής ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίσος με τον αντίστοιχο της Γερμανίας, το προφίλ κλίσεων διαδρομής έχει μέγιστη κλίση 14 %, στο σύνολο της διαδρομής (510km) ο συρμός κινείται με ηλεκτροκίνηση και μέση ταχύτητα κίνησης 60 km/h αποτελούμενος από



βελτιστοποιημένη σύνθεση τροχαίου υλικού (μίξη φορταμαξών Sgnss και Lgns) μεταφέροντας ελαφριά, μεσαίου βάρους και βαριά εμπορεύματα. Τόσο για το οδικό τμήμα της συνδυασμένης μεταφοράς όσο και για την ισοδύναμη αμιγώς οδική μεταφορά έγιναν οι ίδιες παραδοχές με τα προηγούμενα.



Εικόνα 6: Σύγκριση των παραγόμενων ρύπων συνδυασμένης σιδηροδρομικής μεταφοράς (Σενάριο #5: μέγιστη κλίση 14 %, χαμηλός συντελεστής ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) και ισοδύναμης οδικής μεταφοράς (Σενάριο #0)

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 1) παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή των ρύπων για τις οριακές τιμές των παραμέτρων που μελετήθηκαν για έναν τυπικό συρμό της εξεταζόμενης διαδρομής μικτής ελκόμενης μάζας περίπου 1000 t, μικτού φορτίου 500 t και καθαρού βάρους εμπορευμάτων περίπου 400t.



Πίνακας 1: Ανάλυση ευαισθησίας των συνολικών WTW ρύπων της συνδυασμένης σιδηροδρομικής μεταφοράς

Παράμετρος	Τιμές αναφοράς	Οριακές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση	Ποσοστιαία μεταβολή των εκπεμπόμενων ρύπων ανά τόνο ωφέλιμου φορτίου
#1 Καθαρό βάρος μεταφερόμενων εμπορευμάτων	400 t ωφέλιμο φορτίο (1000 t μικτό)	100t - 500t	+28,1% (100t) -3,6% (500t)
#2 Σενάριο φορτίων	Μίξη (Μέσο φορτίο: 7,5 t/TEU)	Ελαφριά-Βαριά (4 t/TEU - 23 t/TEU)	+58,1% (Ελαφριά) -36,3% (Βαριά)
#3 Τροχαίο υλικό (μήκος φόρτωσης, βάρος φορτάμαξας)	Rgss (60', 23,5t)	Σύνθεση που περιλαμβάνει φορτάμαξες Lgns και Sgnss (45', 11,5t και 60', 20t αντίστοιχα)	-21,6%
#4 Τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Συντελεστής εκπομπών ρύπων της Ελλάδας	Συντελεστής εκπομπών ρύπων της Γερμανίας	-10,6%
#5 Μέση ταχύτητα κίνησης συρμού	60 km/h	40 km/h – 80 km/h	-3,6% (40 km/h) +5,2% (80 km/h)
#6 Σύστημα έλξης*	277 km ντηζελοκίνηση, 233 km ηλεκτροκίνηση	510 km ντηζελοκίνηση*	-1,8%
		510 km ηλεκτροκίνηση*	+3,7%
#7 Προφίλ κλίσεων	Υφιστάμενες κλίσεις	Κλίση 0‰ σε όλη τη διαδρομή	-47,9%
		Κλίση 14‰ στα τμήματα με κλίση άνω του 14‰ (μήκους 113 km)	-13,9%

*Αθήνα – Δομοκός (277km): 2 μηχανές έλξης, Δομοκός-Θεσσαλονίκη (233 km): 1 μηχανή έλξης.
Εκπεμπόμενοι ρύποι ανά τόνο ωφέλιμου φορτίου, υπολογισμένοι για τις τιμές αναφοράς: 39,7 kg CO₂e/t

4. Συμπεράσματα

Το ζήτημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του προσδιορισμού του αποτυπώματος άνθρακα απασχολεί σημαντικά την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Η γενική σύσταση είναι υπέρ της μεταβολής των μεριδίων της αγοράς των μεταφορών υπέρ των φιλικών προς το περιβάλλον μέσων, όπως είναι ο σιδηρόδρομος και η συνδυασμένη σιδηροδρομική μεταφορά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας σιδηροδρομικού συρμού που υπολογίζει τις αντιστάσεις που πρέπει να υπερνικήσει ο συρμός κατά την κίνησή του. Επιτρέπει τον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού των μηχανών έλξης καθώς και της κατανάλωσης ενέργειας και των ρύπων

σιδηροδρομικού συρμού για διαφορετικούς τύπους μεταφερόμενων μονάδων και φορταμαξών και για διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη της περιορισμούς που τίθενται στη φόρτωση των φορταμαξών και οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα να μην εξαντλείται η μεταφορική τους ικανότητα επειδή σε έναν εκ των αξόνων υπερβαίνεται το επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο.

Η σχετική ανάλυση ανέδειξε και ποσοτικοποίησε τη συμβολή των παραμέτρων που υπεισέρχονται και προσδιορίζουν την απαιτούμενη ενέργεια και τους εκπεμπόμενους ρύπους και οι οποίες είναι ο βαθμός πληρότητας του συρμού (ωφέλιμο βάρος μεταφερόμενων εμπορευμάτων), η ταχύτητά του και το σύστημα έλξης, το προφίλ κλίσεων της διαδρομής, το μέσο βάρος των μεταφερόμενων φορτίων, το κατάλληλο τροχαίο υλικό και ο τρόπος φόρτωσης των φορταμαξών. Τέλος, πολύ σημαντική επίδραση για την περίπτωση της ηλεκτροκίνησης έχει και ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα.

5. Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ballis A., F. Karapetis and Th. Ballis, (2014), Towards the implementation of optimal train loading plan in the Athens – Thessaloniki freight services, 3rd International symposium & 25th National conference on operational research, 26-28 June 2014, Volos, Greece.

Bauer J., T. Bektaş and T. G. Crainic, (2010), Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: an application to rail service design, Part 2: Transportation, Logistics and the Environment, *Journal of the Operational Research Society*, 61, 530-542.

Bert Van Wee, Pieter Janse & Robert Van Den Brink, (2005), Comparing energy use and environmental performance of land transport modes, *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, Volume 25, Issue 1.

Carrillo Zanuy A., M. Kendra, J. Čamaj, J. Mašek, S. Stolz, P. Márton, (2011), Intermodal application of VEL-Wagon (Versatile, Efficient and Longer Wagon for European Transportation), Deliverable report.

CEFIC (2011), Guidelines for measuring and managing CO₂ Emission from freight transport operations, Issue 1.

Cristea, A., D. Hummels, L. Puzzello and M. Avetisyan, (2013), Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 65, No. 1, 2013, pp. 153-173.

European Committee for Standardization, (2012). Methodology for calculation and declaration on energy consumptions and GHG emissions in transport services (freight and passengers transport). Working Draft. Brussels.

GIFT Project, (2014a), *Desktop & ground pilot testing, (Corridor IV-selected stretches)*, Deliverable 5.1.2, TRAINOSE S.A.

GIFT Project, (2014b), *GIFT Monitoring, Τα προτεινόμενα σιδηροδρομικά έργα για τον Διάδρομο IV με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους καθώς και το εκτιμώμενο κόστος παρουσιάζονται σε ιστότοπο, μέσα από το κεντρικό ιστότοπο του έργου www.gift-project.eu/*

Helms, H., U., Lambrecht, U. Höpfner, (2003). Energy savings by light-weighting, Final report. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/f10000125.pdf

Hickman, J., D. Hassel, R. Joumard, Z. Samaras and S. Sorenson, (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, Deliverable 22 for the project MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport).

IFEU Heidelberg, Öko-Institut, IVE & RMCN, (2010). EcoTransIT World. Ecological transport information tool for worldwide transports. Methodology and data. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.ecotransit.org/download/ecotransit_background_report.pdf

International Energy Agency, (2012). Railway Handbook 2012: Energy Consumption and CO₂ Emissions. Διαθέσιμο στη σελίδα: http://www.uic.org/com/IMG/pdf/iea-uic_2012final-lr.pdf

ITF/OECD, (2014), L. Martinez, J. Kauppila, and M. Castaing — Discussion Paper 2014-21, International freight and related CO₂ emissions by 2050: A new modelling tool.

Stathopoulos, A., G. Argyrakos, (1993). Control strategies for reducing environmental pollution from road traffic, *The science of the Total Environment* (134): 315-324.

US Environmental Protection Agency, (2014). Glossary of climate change terms. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.epa.gov/climatechange/glossary.html>

ΕΛΟΤ, (2009), Χάραξη σιδηροδρομικής γραμμής, ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-07-01-01-10:2009

Μπαλλής Α., Τ. Μοσχόβου, (2014), Πανερωπαϊκός Διάδρομος IV: Η προοπτική των σιδηροδρομικών μεταφορών, στο www.metaforesspress.gr

ΟΣΕ, (2014), Δήλωση δικτύου 2014.

Τουρνάκη Ε. (2014), Το αποτύπωμα άνθρακα στις σιδηροδρομικές συνδυασμένες μεταφορές: Εφαρμογή στη γραμμή Αθηνών – Θεσσαλονίκης, *Διπλωματική εργασία*, ΕΜΠ.