



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Ευστάθιος Μπασέτας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΙΚΕΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ:

Ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε συρμό



Επιβλέπων: Αθανάσιος Μπαλλής, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος	6
Περίληψη	7
Abstract.....	7
1 Εισαγωγή.....	8
1.1 Ιστορική αναδρομή	8
1.2 Το γενικό πρόβλημα της φόρτωσης	11
1.3 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας.....	12
2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	14
3 Στοιχεία σιδηροδρομικής μεταφοράς	26
3.1 Γενικά	26
3.2 Η σιδηροδρομική γραμμή	26
3.2.1 Γενικά	26
3.2.2 Χαρακτηριστικά γραμμής που επηρεάζουν τη σιδηροδρομική μεταφορά.....	28
3.3 Ο σιδηροδρομικός συρμός	32
3.3.1 Γενικά	32
3.3.2 Οι μηχανές έλξης	33
3.3.3 Το ελκόμενο τροχαίο υλικό	44
3.3.4 Άλλα καθοριστικά στοιχεία του σιδηροδρομικού συρμού	47
3.4 Φθορές στους τροχούς και τη σιδηροδρομική γραμμή	49
3.5 Μεταφερόμενα φορτία με σιδηρόδρομο.....	50
3.5.1 Γενικά	50
3.5.2 Χύδην φορτία.....	54
3.5.3 Μοναδοποιημένα φορτία	55
3.5.4 Επικίνδυνα φορτία.....	58
3.6 Γενική μεθοδολογία σιδηροδρομικής εμπορευματικής μεταφοράς	58
4 Ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης σιδηροδρομικού συρμού	60
4.1 Περιγραφή του προβλήματος φόρτωσης μοναδοποιημένων φορτίων σε σιδηροδρομικό συρμό.....	60
4.2 Η μεθοδολογία της έρευνας	60
4.3 Στοιχεία του προς διερεύνηση συστήματος.....	62
4.4 Κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος	63

4.5	Ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης σιδηροδρομικών συρμών.....	72
5	Συμπεράσματα.....	76
6	Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα	78
7	Βιβλιογραφία	79
	Παραρτήματα	81
	Παράρτημα Α: Χαρακτηριστικά τετραξονικών φορταμαξών τυπικής κατασκευής	81
	Κλειστή φορτάμαξα τυπικής κατασκευής (κατηγορία G - τετραξονικά)	81
	Ανοιχτή φορτάμαξα υψηλών παρειών (Κατηγορία E)	83
	Επίπεδη φορτάμαξα (Κατηγορία R).....	85
	Παράρτημα Β: Κώδικες αλγορίθμων	87
	Next Fit.....	87
	First Fit	88
	Best Fit	89
	Worst Fit.....	91
	Συνδυασμός Best Fit – Worst Fit	93
	Συνδυασμός Next Fit – Best Fit.....	97
	Εναλλακτικός συνδυασμός Next Fit – Worst Fit.....	99
	Εναλλακτικός συνδυασμός Best Fit – Worst Fit	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η πρώτη ατμοκίνητη εμπορευματική εκμετάλλευση	9
Εικόνα 2: Η βιομηχανική επανάσταση οδήγησε στην αντικατάσταση των ζωικών από τα μηχανικά μέσα	9
Εικόνα 3: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων από την εφαρμογή εναλλακτικών αλγορίθμων φόρτωσης.....	15
Εικόνα 4: Η σιδηροδρομική γραμμή.....	27
Εικόνα 5: Διάφορα εύρη γραμμών που έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως (σε mm και πόδια)	27
Εικόνα 6: Αριστερά το περιτύπωμα ελευθέρως διατομής και δεξιά το περιτύπωμα φόρτωσης που χρησιμοποιούνται στους ελληνικούς σιδηροδρόμους, όπως δηλώνονται στη δήλωση δικτύου.	30
Εικόνα 7: Αποτελέσματα του ελέγχου διέλευσης ενός εμπορευματοκιβωτίου υψηλού περιτυπώματος από τις σήραγγες της Δομοκού. Παρατηρούμε οριακή διέλευση στην αριστερή περίπτωση, ενώ στη δεξιά περίπτωση έχουμε πιο άνετη διέλευση.	32
Εικόνα 8: Ειδική αντίσταση κύλισης σύμφωνα με τους γερμανικούς σιδηροδρόμους (στο: Profillidis, 2006)	36
Εικόνα 9: Ντιζελομηχανή ADtranz των ελληνικών σιδηροδρόμων (πηγή: www.amnizia.org).....	39
Εικόνα 10: Ντιζελομηχανή της σειράς 450 με ισχύ 1985 kW (πηγή: www.amnizia.org)	41
Εικόνα 11: Ντιζελομηχανή της σειράς 500 με ισχύ 2600 kW (πηγή: www.amnizia.org)	41
Εικόνα 12: Η ηλεκτράμαξα Hellas Sprinter σε εμπορευματική μεταφορά (πηγή: www.amnizia.org).....	41
Εικόνα 13: Διάγραμμα έλξης	43
Εικόνα 14: Το άγκιστρο μιας εμπορευματικής φορτάμαξας	47
Εικόνα 15: Απόσπασμα του κανονισμού κινήσεως που αναφέρεται στη διάταξη του τροχαίου υλικού	50
Εικόνα 16: Στιγμιότυπο από την προσομοίωση με το λογισμικό ARENA	66
Εικόνα 17: Ενδεικτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση	67
Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου next fit	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Αντικειμενικοί στόχοι, παραδοχές και τεχνική επίλυσης των εργασιών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης	24
Πίνακας 2: Συγκριτική παρουσίαση των εργασιών της βιβλιογραφίας.....	25
Πίνακας 3:Χαρακτηριστικά μηχανών έλξης	42
Πίνακας 4: Μέγιστο φορτίο ανά μηχανή έλξης.....	43

Πίνακας 5: Κατηγορίες φορταμαξών κατά UIC	45
Πίνακας 6: Κριτήρια επιλογής φορταμαξών	46
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά φορταμαξών κατάλληλων για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων	46
Πίνακας 8: Μέγιστος αριθμός μηχανών έλξης.....	48
Πίνακας 9: Μερίδιο σιδηροδρόμου στις εμπορευματικές μεταφορές στην Ευρώπη (πηγή: Eurostat)	51
Πίνακας 10: Μερίδιο του σιδηροδρόμου σε συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων	52
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων.....	56
Πίνακας 12: Αλγόριθμοι με την καλύτερη συμπεριφορά ανά κριτήριο	71
Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά νέων, σύνθετων αλγορίθμων.	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Υπολογισμός αντίστασης εκκίνησης για δεδομένη κλίση (Pachl, 2011)	42
Σχήμα 2: Σιδηροδρομικές εισαγωγές Ελλάδας από Βουλγαρία	52
Σχήμα 3: Σιδηροδρομικές εξαγωγές Ελλάδας προς Βουλγαρία.....	53
Σχήμα 4: Οδικές εισαγωγές Ελλάδας από Βουλγαρία	53
Σχήμα 5: Οδικές εξαγωγές Ελλάδας προς Βουλγαρία.....	54

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το ενδιαφέρον μου για τις συγκοινωνίες που είχα από μικρός και ιδιαιτέρως για το σιδηρόδρομο και τις μεταφορές προϊόντων με βάση αυτόν, με έκανε να διαπραγματευτώ στη διπλωματική μου εργασία το θέμα αυτό με τίτλο «Εμπορευματικές Σιδηροδρομικές Μεταφορές: Ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε συρμό». Το θέμα, βέβαια, αυτό το ανέλαβα ύστερα από την ενθάρρυνση του καθηγητή μου κ. Μπαλλή, ο οποίος με βοήθησε τα μέγιστα στο να το φέρω εις πέρας, τον οποίο και θερμώς ευχαριστώ για όλα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης και στον καθηγητή μου κ. Λυμπέρη, με τον οποίο μοιραζόμαστε και το ίδιο πάθος για το σιδηρόδρομο. Δεν θα μπορούσα επίσης να μην ευχαριστήσω τις κκ. Βήτου και Περιστέρα, για τα στοιχεία και τις γνώσεις που μου μεταβίβασαν.

Ελπίζω με αφετηρία την εργασία αυτή, να συνεχίσω να εργάζομαι επιστημονικά πάνω στο θέμα των συγκοινωνιών και κυρίως του σιδηροδρόμου για να διευρύνω όχι μόνο τις γνώσεις μου σ' αυτό, αλλά και να συνεισφέρω σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο στη βελτίωση του σιδηροδρόμου και του τομέα των μεταφορών γενικότερα.

Με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται το ταξίδι στα φοιτητικά μου χρόνια κατά τη διάρκεια των οποίων είχα την τύχη να γνωρίσω σπουδαίους καθηγητές, σπουδαίους ανθρώπους και να κάνω σπουδαίους φίλους.

Στάθης Μπασέτας

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τίτλος: Εμπορευματικές σιδηροδρομικές μεταφορές: Αλγόριθμοι φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικούς συρμούς

Συγγραφέας: Μπασέτας Ευστάθιος

Επιβλέπων καθηγητής: Μπαλλής Αθανάσιος

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αντιμετωπίσει το πραγματικό πρόβλημα της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό. Για το λόγο αυτό, αναλύεται το συνολικό σύστημα εμπορευματικής σιδηροδρομικής μεταφοράς και καθορίζονται τα στοιχεία εκείνα που επηρεάζουν τη διαδικασία φόρτωσης. Τα στοιχεία αυτά προσαρμόζονται στις ελληνικές συνθήκες. Το στοιχείο που διαφοροποιεί την εργασία αυτή σε σχέση με τις υπάρχουσες για το ίδιο θέμα είναι το γεγονός ότι θεωρεί ότι τα χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων γίνονται γνωστά, μόλις κατά την άφιξη ενός φορτηγού στον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό. Για αυτό το λόγο διατυπώνονται απλοί ευρετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι δεν απαιτούν τη γνώση των χαρακτηριστικών αυτών για την επίλυσή τους. Οι αλγόριθμοι αυτοί ικανοποιούν μόνο εν μέρει τις απαιτήσεις της σιδηροδρομικής μεταφοράς. Γι' αυτό συντάσσονται νέοι αλγόριθμοι που αποτελούνται από τη σύνθεση των απλών και εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά.

ABSTRACT

Title: Railway freight transport: Algorithms for the loading of containers onto railway freight wagons

Author: Basetas Efstathios

Supervisor Professor: Ballis Athanasios

The aim of this thesis is to face the loading problem of containers in a railway freight train under real circumstances. For this reason the whole system of the freight railway transport is analysed in order to specify the data that affect the procedure of loading. The data are tailored for the Greek conditions of railway. The characteristic that differentiates this thesis from other research works is that considers as unknown the features of the containers until the trucks reach the terminal. For this reason some simple heuristic algorithms are propound. These heuristics only satisfy in part the requirements of the railway freight transport and so new algorithms are created to meet these requirements. The results from the new developed algorithms seem to be better.

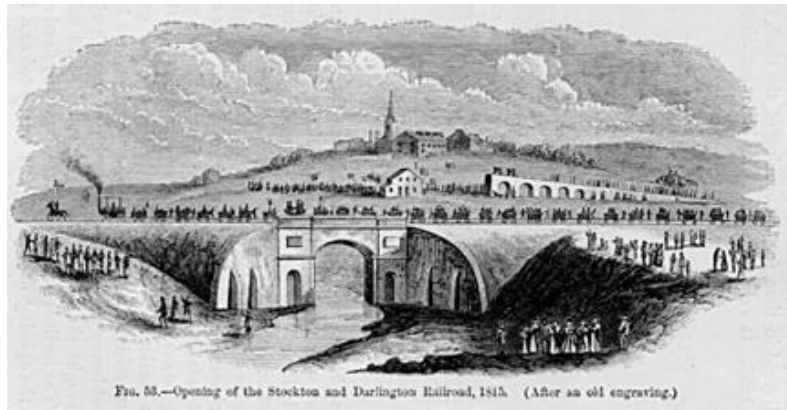
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Με τον όρο σιδηρόδρομο αναφερόμαστε στο χερσαίο αυτό μέσο μεταφοράς, στο οποίο οχήματα με χαλύβδινους τροχούς φέροντες όνυχες στην εσωτερική τους πλευρά κινούνται, είτε αυτοκινούμενα είτε ελκόμενα από κινητήρια μονάδα, μέσω ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας σε αποκλειστικά δικό τους διάδρομο κυκλοφορίας (σταθερή τροχιά), που ορίζεται από δύο παράλληλες μεταξύ τους χαλύβδινες τροχιές, με σκοπό την εκτέλεση εκτεταμένου έργου διακίνησης επιβατών και εμπορευμάτων (Λυμπέρης, 2009, σ. 3 και Πυργίδης, 2009, σ. 3).

Η γέννηση του σιδηροδρόμου δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί μονοσήμαντα, καθώς η ιδέα της μεταφοράς πάνω σε σταθερές τροχιές είναι πολύ παλιά και έχουν αναφερθεί ποικίλες μορφές της ακόμα και από την αρχαιότητα (π.χ. αρχαία δίολκος της Κορίνθου). Σε πρωτόλειο, ακόμα, στάδιο μπορεί να αναφερθεί η αρχική χρησιμοποίηση ξύλινων τροχιών σε ορυχεία από το 17ο αιώνα στη Β. Αγγλία και στη συνέχεια σιδηροτροχιών από τα μέσα του 18ου αιώνα. Η σύγχρονη ιστορία, όμως, του σιδηροδρόμου ταυτίζεται με τη Βιομηχανική Επανάσταση (τέλη 18ου - αρχές 19ου αιώνα) και την εφαρμογή της ατμοκίνησης και ατμομηχανής (Cugnot, Watt). Ως χαρακτηριστικότεροι σταθμοί της εξελικτικής πορείας του σιδηροδρόμου μπορούν να αναφερθούν οι παρακάτω:

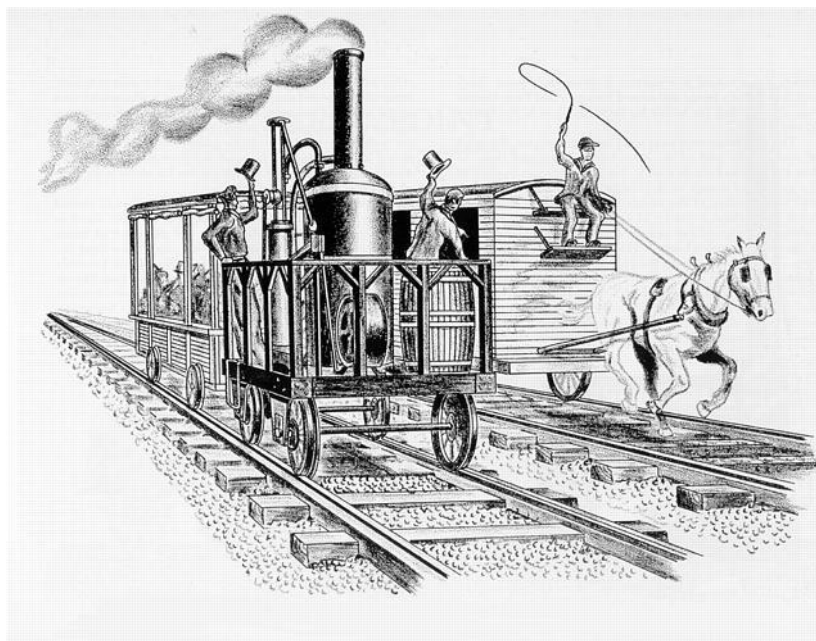
- Το 1804 ο Τρέβιθικ (Trevithick) κατάφερε να κατασκευάσει μια ατμομηχανή που είχε ικανότητα έλξης 5 βαγονιών σε απόσταση 15 χιλιομέτρων με μέση ταχύτητα 8 km/h. Αυτή θεωρείται ως η πρώτη χερσαία μεταφορά προσωπικού και αγαθών με ατμοκίνηση.
- Το 1825 έγινε η πρώτη δρομολόγηση ατμοκίνητου σιδηροδρόμου για εμπορευματική εκμετάλλευση στη γραμμή Stockton – Darlington, χρησιμοποιώντας μία ατμομηχανή 8 τόνων, κατασκευασμένη από τον Στίβενσον (Stevenson), που είχε δυνατότητα έλξης 90 τόνων άνθρακα με ταχύτητα 15 km/h. Ο Στίβενσον, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την πραγματοποίηση κάθε τμήματος αυτής της μεταφοράς, αφού κατασκεύασε τη μηχανή έλξης, τη γραμμή (με τις απαραίτητες αλλαγές και διασταυρώσεις) και τις γέφυρες, θεωρείται ως ο πρωτεργάτης στην εξελικτική πορεία του σιδηροδρόμου.



Εικόνα 1: Η πρώτη ατμοκίνητη εμπορευματική εκμετάλλευση

- Το 1830 δρομολογήθηκε η πρώτη γραμμή επιβατικής εκμετάλλευσης στη διαδρομή Λίβερπουλ – Μάντσεστερ, χρησιμοποιώντας την εξελιγμένη ατμομηχανή του Στίβενσον (με την ονομασία “Rocket”), που είχε μεταφορική ικανότητα 30 επιβατών με ταχύτητα 30 mph (=50 km/h).

Με αυτόν τον τρόπο άρχισε να συντελείται η αλλαγή από τα ζωικά στα μηχανικά μέσα εκτινάσσοντας, συγκριτικά, τις δυνατότητες των χερσαίων μεταφορών μέσω του σιδηροδρόμου. Ο σιδηρόδρομος αποτέλεσε τα χρόνια εκείνα σημαντικό πυλώνα ανάπτυξης, καθώς κλήθηκε να συνδέσει υπερτοπικώς τις πρώτες ύλες (π.χ. ορυχεία) με τα μέσα παραγωγής (π.χ. εργοστάσια) και στη συνέχεια να διανείμει τα παραγόμενα προϊόντα στα διάφορα καταναλωτικά σημεία (π.χ. διάφορες μεγάλες πόλεις). Η σημασία του κρίνεται ιδιαίτερα ευεργετική στις περιοχές χωρίς θαλάσσια ή ποτάμια σύνδεση, όπου αποτέλεσε το βασικό μέσο μαζικής μεταφοράς τόσο εμπορευμάτων όσο και επιβατών.



Εικόνα 2: Η βιομηχανική επανάσταση οδήγησε στην αντικατάσταση των ζωικών από τα μηχανικά μέσα

Στις χερσαίες μεταφορές, ο σιδηρόδρομος πρωταγωνίστησε για πάνω από 100 χρόνια (1830 – 1950). Στο διάστημα αυτό επιτέλεσε σπουδαίο μεταφορικό, αλλά και πολιτισμικό, έργο (Προφυλλίδης, 1993). Στις αρχές του 20ου αιώνα η εμφάνιση του αυτοκινήτου και του αεροπλάνου άρχισαν να αλλάζουν την κατάσταση στον τομέα των μεταφορών και να αυξάνουν την ανταγωνιστικότητα μεταξύ των μέσων. Μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο όμως, αρχίζει να περιορίζεται σημαντικά ο σιδηρόδρομος (κυρίως λόγω των κατεστραμμένων, από τους πολέμους, υποδομών) τόσο ώστε να συζητείται η σκοπιμότητα της διατήρησής του. Εισέρχεται έτσι με αυτόν τον τρόπο σε μια εποχή μεγάλης παρακμής. Ο σιδηρόδρομος, δηλαδή, κατά τη διάρκεια της εξελικτικής του πορείας γνώρισε αρχικά μια περίοδο μεγάλης ακμής και πέρασε στη συνέχεια μια περίοδο έντονης αμφισβήτησης. Παρόλα αυτά, την τελευταία δεκαετία έχει κατορθώσει όχι μόνο να ανακάμψει, αλλά να αποτελεί για πολλές χώρες τεχνολογία αιχμής (Πυργίδης, 2009).

Σήμερα, έχει αναγνωριστεί ότι ο σιδηρόδρομος δεν μπορεί να θεωρηθεί σε παρακμή, γιατί έχει πρωτεύουσα δράση στην οικονομία και συμπληρώνει τα άλλα μέσα μεταφοράς. Το πρόβλημα δεν συνίσταται επομένως, στην υποκατάστασή του, αλλά στην εναρμόνισή του με τα άλλα συστήματα μεταφορών, διατηρώντας τις λειτουργίες για τις οποίες κρίνεται καταλληλότερος (Νέα Δομή, 1996). Το γεγονός αυτό κατέστη σαφές στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα¹, η οποία με τη συμβολή και της ερευνητικής κοινότητας (μέσω της διερεύνησης θεμάτων στα πλαίσια ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων) προώθησε δέσμη μέτρων ώστε να βελτιωθεί η συνεργασία των μέσων μεταφοράς μεταξύ τους, προωθώντας με αυτό τον τρόπο τις συνδυασμένες ή πολυτροπικές μεταφορές (combined or multimodal transport), αξιοποιώντας ουσιαστικά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε μέσου μεταφοράς. Σ' αυτήν την περίπτωση ο σιδηρόδρομος χρησιμοποιείται για το κυρίως μέρος της διαδρομής (συνήθως αποστάσεις πάνω από 500 km) ως το αποδοτικότερο και φιλικότερο προς το περιβάλλον μέσο (Πυργίδης, 2009 σσ. 37-38), ενώ τα φορτηγά για την αρχική συλλογή ή την τελική διαλογή των εμπορευμάτων ως το πιο ευέλικτο μέσο μεταφοράς.

Ειδική περίπτωση των συνδυασμένων μεταφορών αποτελούν οι διατροπικές μεταφορές (intermodal transport), όπου γίνεται χρήση μοναδοποιημένων φορτίων (εμπορευματοκιβώτια, swap bodies, ημιρυμουλκούμενα), ούτως ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα κατά τη μεταφόρτωση των εμπορευμάτων από το ένα μέσο στο άλλο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη συνολική απόδοση του συστήματος, καθώς μειώνεται ο χρόνος και το συνολικό κόστος της μεταφοράς. Ως εκ τούτου οι συνδυασμένες μεταφορές σιδηροδρόμου και οδικών οχημάτων, μπορούν να αποτελέσουν μία αξιόπιστη λύση για τη χερσαία μεταφορά των

¹ Από τη δεκαετία του 1990 με την έκδοση της «Λευκής Βίβλου», όπου έδωσαν το πλαίσιο για την ανανέωση των σιδηροδρομικών μεταφορών, αλλά και γενικότερα το πλαίσιο στο οποίο θα πρέπει να εξελιχθούν οι μεταφορές στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

εμπορευμάτων από πόρτα σε πόρτα (door to door)² αξιοποιώντας τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα του κάθε μέσου.

1.2 Το γενικό πρόβλημα της φόρτωσης

Στις διατροπικές μεταφορές κρίσιμο στοιχείο αποτελεί η συνολική διαδικασία μεταφόρτωσης από το ένα μέσο στο άλλο. Η μεταφόρτωση των εμπορευμάτων γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένους εμπορευματικούς σιδηροδρομικούς σταθμούς (railway terminals). Κατά την πραγματοποίησή της, ανακύπτουν αρκετά ζητήματα, ένα από τα πλέον κρίσιμα αποτελεί η αποτελεσματική διαδικασία φορτοεκφόρτωσης των σιδηροδρομικών οχημάτων, η βελτιστοποίηση της οποίας μπορεί να επιφέρει μείωση του κόστους της συνολικής μεταφοράς. Η συνολική διαδικασία φορτοεκφόρτωσης αποτελεί μια αρκετά σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία, αφού εξαρτάται από την επίλυση τριών επιμέρους προβλημάτων: την τοποθέτηση – φόρτωση των μεταφερομένων μονάδων στο συρμό (ικανοποιώντας της απαιτήσεις της σιδηροδρομικής μεταφοράς), την εξυπηρέτηση των φορτηγών που καταφθάνουν (ώστε να περιορίζεται ο χρόνος αναμονής τους) και τη λειτουργία του εξοπλισμού φόρτωσης (ώστε να πραγματοποιήσουν τη μεταφόρτωση με το μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας).

Το γενικό πρόβλημα, επομένως, της φόρτωσης μοναδοποιημένων φορτίων σε σιδηροδρομικές φορτάμαξες περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές, καθώς υπάρχουν διαφορετικά είδη φορταμαξών (με διαφορετικά μήκη, διαφορετικά ύψη καταστρώματος και διαφορετικά επιτρεπόμενα ωφέλιμα φορτία), αλλά και διαφορετικοί τύποι μεταφερομένων μονάδων (π.χ. εμπορευματοκιβώτια μήκους 20', 40' και 45' με διάφορα πλάτη (8'6'', 2.5 μ pallet-wide) και ύψη (8', 8'6'', 9'6'' high cube)) με διαφορετικούς προορισμούς, ενώ η σύνθεση του συρμού πρέπει να ικανοποιεί περιορισμούς για το συνολικό μήκος του συρμού, το συνολικό αριθμό των αξόνων και το συνολικό ελκόμενο φορτίο. Άλλοι περιορισμοί επιβάλλονται από την κατάσταση της υποδομής (επιτρεπόμενα φορτία ανά άξονα και ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στο συρμό), τις διατομές των σηράγγων (περιορισμοί στο περιτύπωμα φόρτωσης) και την ασφάλεια (οδηγίες φόρτωσης, ώστε τα βαρύτερα φορτία να τοποθετούνται κοντά στη μηχανή έλξης για την καλύτερη απόκριση των συστημάτων πέδησης, οδηγίες φόρτωσης των επικίνδυνων φορτίων κ.λπ.). Επιπλέον, οι διαδικασίες της φόρτωσης φορταμαξών επηρεάζουν τη λειτουργία των μηχανημάτων φορτοεκφόρτωσης (αυτοκινούμενα ανυψωτικά, γερανογέφυρες) που θα πρέπει να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους μέχρι τον προγραμματισμένο χρόνο αναχώρησης του συρμού, καθώς και το χρόνο εξυπηρέτησης των φορτηγών (τόσο αυτών που παραδίδουν, όσο και αυτών που παραλαμβάνουν κάποιο εμπορευματοκιβώτιο).

² Οι χερσαίες, εμπορευματικές μεταφορές από πόρτα σε πόρτα πραγματοποιούνται, συνήθως, αποκλειστικά από φορτηγά για ολόκληρο το μήκος της διαδρομής και σπανιότερα από σιδηρόδρομο μέσω συμβατικού τρόπου μεταφοράς (βλ. κεφ. 3.1.4)

Απαιτείται συνεπώς, η εύρεση της βέλτιστης κατανομής των εμπορευματοκιβωτίων στις φορτάμαξες (ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που θα φορτωθούν), λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς σχετικά με το χρόνο αναμονής των φορτηγών, το χρόνο αναχώρησης του συρμού και την κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού. Η βελτιστοποίηση των ανωτέρω είναι αρκετά δυσχερής, καθώς απαιτεί την ικανοποίηση αντικρουόμενων κριτηρίων. Η σχετική βιβλιογραφία περιλαμβάνει εργασίες, όπου, είτε επιλύεται η βελτιστοποίηση ενός μέρους του προβλήματος (όπως για παράδειγμα η μεγιστοποίηση του αριθμού των μεταφερομένων μονάδων), είτε το συνολικό πρόβλημα, αλλά με απλοποιητικές παραδοχές (που απορρέουν από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής μεταφοράς που διερευνάται). Σε κάθε περίπτωση, όμως θεωρούνται γνωστά τα χαρακτηριστικά των μεταφερομένων μονάδων εκ των προτέρων, στοιχείο που δεν είναι απόλυτα αληθές, καθώς πολλές φορές τα χαρακτηριστικά αυτά, και κυρίως το βάρος, γίνονται γνωστά κατά την άφιξη του φορτηγού στο σιδηροδρομικό σταθμό.

1.3 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αντιμετωπίσει το πραγματικό πρόβλημα της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό θεωρώντας ότι τα χαρακτηριστικά τους γίνονται γνωστά, μόλις κατά την άφιξη ενός φορτηγού στον εμπορευματικό σιδηροδρομικό σταθμό. Τα στοιχεία της μεταφοράς που λήφθηκαν υπόψη, βασίστηκαν στα χαρακτηριστικά ελληνικών σιδηροδρόμων.

Οι στόχοι που τέθηκαν αφορούσαν α) στην κατανόηση του συνολικού συστήματος της σιδηροδρομικής μεταφοράς και πώς τα επιμέρους στοιχεία της την επηρεάζουν και β) στη διατύπωση απλών αλγορίθμων που θα μπορέσουν να επιλύσουν το πρόβλημα, ικανοποιώντας, παράλληλα, τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις της σιδηροδρομικής μεταφοράς.

Στη επόμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας θα παρουσιαστεί η βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος, παρουσιάζοντας τις εργασίες που έχουν ασχοληθεί με το θέμα της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό τα τελευταία χρόνια, ενώ θα παρουσιαστεί και το γενικό θεωρητικό πρόβλημα, στο οποίο βασίζονται οι περισσότερες των εργασιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των στοιχείων της σιδηροδρομικής μεταφοράς που την επηρεάζουν. Πιο συγκεκριμένα θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά της γραμμής και του συρμού που θέτουν τους περιορισμούς του προβλήματος. Επίσης, θα παρουσιαστούν τα φορτία και οι τρόποι μεταφοράς τους, ενώ το κεφάλαιο θα ολοκληρωθεί συνοψίζοντας τα στοιχεία αυτά σε μια γενική μεθοδολογία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία της έρευνας που εφαρμόστηκε τόσο για την κατανόηση του προβλήματος, όσο και στη συνέχεια για

τη διατύπωση των αλγορίθμων, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία οδήγησαν στη διατύπωση νέων αλγορίθμων.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται ορισμένα θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, όπως προέκυψαν από τη γενικότερη μελέτη του θέματος.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Το πρόβλημα της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε φορτάμαξες μπορεί να αναπαρασταθεί με το πρόβλημα των κυττών συσκευασίας (bin packing problem) που αποτελεί υποπερίπτωση του προβλήματος του σακιδίου (knapsack problem) που με τη σειρά του αποτελεί υποπερίπτωση του γενικού προβλήματος ανάθεσης ή αντιστοίχισης (generalized assignment problem). Το bin packing problem αποτελεί ένα NP hard πρόβλημα και εμφανίζεται σαν μονοδιάστατο (1D), δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D).

Η διατύπωση του 1D bin packing problem, για n αντικείμενα και n θέσεις όπου a_j είναι ένα χαρακτηριστικό του αντικειμένου j (για παράδειγμα το βάρος του εμπορευματοκιβωτίου) και c η χωρητικότητα κάθε θέσης σε αυτό το χαρακτηριστικό, είναι: τοποθέτησε κάθε αντικείμενο σε μία θέση, ούτως ώστε το σύνολο των χαρακτηριστικών των αντικειμένων που έχουν τοποθετηθεί σ' αυτή τη θέση, να μην ξεπερνάει τη χωρητικότητά της (π.χ. το συνολικό φορτίο των εμπορευματοκιβωτίων μιας φορτάμαξας να μην υπερβαίνει το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο της) και ο αριθμός των θέσεων που θα χρησιμοποιηθούν να είναι ο μικρότερος δυνατός. Μία πιθανή μαθηματική διατύπωση του απλού προβλήματος είναι η εξής (Martello S., Toth P., 1990, σσ. 221-222) :

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && z = \sum_{i=1}^n y_i \\
 & \text{υπό τους περιορισμούς:} && \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq c y_i, \quad i \in N = \{1, \dots, n\} \\
 & && \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j \in N \\
 & && y_i = 0 \text{ ή } 1, \quad i \in N \\
 & && x_{ij} = 0 \text{ ή } 1, \quad i \in N, j \in N
 \end{aligned}$$

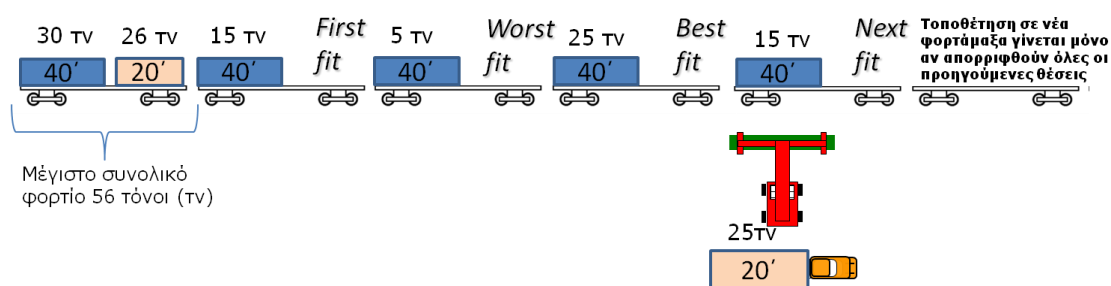
Όπου
$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{εάν η θέση } i \text{ χρησιμοποιείται} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{εάν το αντικείμενο } j \text{ έχει τοποθετηθεί στη θέση } i \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Για την επίλυση του μονοδιάστατου και δισδιάστατου προβλήματος έχουν προταθεί ακριβείς αλγόριθμοι, όπως αυτός των Martello και Vigo (1998). Παρόλα

αυτά, η φύση των προβλημάτων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλους χρόνους επίλυσης, οπότε η απαίτηση για λύση σε μικρό χρονικό διάστημα κρίνει επιβεβλημένη τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, όπως είναι οι ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristics). Οι Martello και Toth (1990) διατύπωσαν αναλυτικά το knapsack problem, το generalized assignment problem και το bin packing problem και παρουσίασαν διάφορους, ακριβείς και προσεγγιστικούς, αλγορίθμους επίλυσής τους, μεταξύ των οποίων και οι ευρετικοί αλγόριθμοι next fit, first fit, best fit και worst fit (Martello S., Toth P., 1990, σσ. 222-225).

Στην εικόνα 3 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των ανωτέρω ευρετικών αλγορίθμων για ένα παράδειγμα φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίου σε σιδηροδρομικό συρμό. Με τον αλγόριθμο next fit, το εμπορευματοκιβώτιο θα φορτωθεί στην επόμενη διαθέσιμη θέση, σε σχέση με την παρούσα θέση του μηχανήματος φόρτωσης. Με τον αλγόριθμο first fit, το εμπορευματοκιβώτιο θα φορτωθεί στην πρώτη διαθέσιμη θέση, απαριθμώντας τις φορτάμαξες από την αρχή. Με τον best fit, θα επιλεγεί η θέση που εκμεταλλεύεται περισσότερο τη χωρητικότητα της φορτάμαξας και αφήνει το ελάχιστο δυνατό υπόλοιπο, (για παράδειγμα, η τοποθέτηση του εμπορευματοκιβωτίου θα γίνει στην τέταρτη φορτάμαξα, καθώς $25+25=50$ τόνοι, οπότε και απομένουν μόνο 6 τόνοι από τη συνολική ωφέλιμη χωρητικότητα των 56 τόνων της φορτάμαξας). Αντίθετα, με τον αλγόριθμο worst fit, το εμπορευματοκιβώτιο θα τοποθετηθεί στη θέση με τη μεγαλύτερη εναπομένουσα χωρητικότητα (δηλαδή στο παράδειγμά μας, στην τρίτη φορτάμαξα που έχει εναπομένουσα χωρητικότητα 51 τόνων).



Εικόνα 3: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων από την εφαρμογή εναλλακτικών αλγορίθμων φόρτωσης

Η διατύπωση του προβλήματος φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικά οχήματα απαιτεί πιο σύνθετες μαθηματικές διατυπώσεις προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών μεταφορών. Η επίλυση των προβλημάτων αυτών γίνεται με χρήση ακέραιου προγραμματισμού και στην περίπτωση που ο αριθμός των μεταβλητών του προβλήματος είναι μικρός, μπορεί να συγκλίνει, στη βέλτιστη λύση, σε μικρό χρονικό διάστημα. Όταν οι μεταβλητές αυξάνονται, η επίλυση με ακριβείς μεθόδους καθίσταται υπερβολικά χρονοβόρα και η επίλυση γίνεται με ευρετικούς αλγορίθμους, όπως αυτοί που αναφέρθηκαν. Σε πολλές

περιπτώσεις σύνθετων προβλημάτων, απαιτείται επιπλέον και ο περιορισμός του προβλήματος, ώστε να καταστεί δυνατή η επίλυσή του, είτε με απλές παραδοχές, είτε αποφεύγοντας να ενταχθούν στο πρόβλημα παράμετροι που θα το καταστήσουν πρακτικά άλυτο. Μια βασική παραδοχή, η οποία εφαρμόζεται συχνά, αφορά στη θεώρηση των χαρακτηριστικών των μεταφερομένων μονάδων ως γνωστών εκ των προτέρων, ενώ επίσης, η σειρά άφιξης των φορτηγών θεωρείται γνωστή. Από την άλλη πλευρά, συνήθως, παραβλέπονται θέματα, όπως οι διαφορετικοί προορισμοί των εμπορευματοκιβωτίων, η ειδική μεταχείριση των επικίνδυνων φορτίων ή η ύπαρξη επί του συρμού εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να εκφορτωθούν.

Γι' αυτό το λόγο, παρόλο που τα σχετικά μαθηματικά προβλήματα (bin packing problem, knapsack problem, assignment problem³) έχουν επιλυθεί, το πραγματικό πρόβλημα της φόρτωσης των μεταφερομένων μονάδων με σιδηρόδρομο έχει αντιμετωπιστεί κυρίως τα τελευταία χρόνια. Εξάλλου, όπως επισημάνθηκε και από τους Botenkoning et al. (2004), τα θέματα που αφορούν στις συνδυασμένες μεταφορές μεταξύ σιδηροδρόμου και φορτηγού, λόγω και της μεγάλης αύξησης των διακινούμενων εμπορευμάτων, αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και χρήζουν διερεύνησης με τεχνικές επιχειρησιακής έρευνας.

Σημαντικός αριθμός σχετικών δημοσιεύσεων βρίσκεται στο ευρύτερο πεδίο της βελτίωσης των διαδικασιών μέσα στο χώρο των εμπορευματικών κέντρων (βλ. Steenken, et al., 2004). Σε άρθρο των Powell και Carvalho (1998), μελετάται η βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των φορταμαξών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των μοναδοποιημένων φορτίων ανάλογα με τους προορισμούς και τη ζήτηση που θα εξυπηρετήσουν. Οι Feo και Gonzáles – Velarde (1995) πραγματεύονται το θέμα της φόρτωσης ημιρυμουλκούμενων (trailers) σε φορτάμαξες με τη μέθοδο «καγκουρό» (piggyback) για τη μεταφορά τους μέσα στον εμπορευματικό σταθμό. Επίσης, οι Bostel και Dejax (1998), πρότειναν ένα μαθηματικό μοντέλο με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι κινήσεις ενός εμπορευματοκιβωτίου όταν μεταφορτώνεται από μία φορτάμαξα σε μία άλλη, άλλου συρμού. Μέσα από αυτή τη διαδικασία καθορίστηκε η θέση ενός εμπορευματοκιβωτίου στο σιδηροδρομικό συρμό προέλευσης και προορισμού, καθώς επίσης και στο χώρο προσωρινής εναπόθεσης. Για την επίλυση, ανέπτυξαν έναν ευρετικό αλγόριθμο, ο οποίος δίνει ικανοποιητικές λύσεις στο πρόβλημα.

Ένα από τα πρώτα ερευνητικά κείμενα που αντιμετωπίζει το συνολικό πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικά οχήματα αποτελεί η εργασία των Ernst & Pudney (2001) με τίτλο “Efficient loading of Intermodal Container Trains”. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται το συνολικό πρόβλημα της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων που πρέπει να αντιμετωπιστεί σ’

³ Κλασική, εναλλακτική, μέθοδος επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης αποτελεί ο ουγγρικός αλγόριθμος (Hungarian Algorithm) (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010, σσ. 173-179).

ένα σιδηροδρομικό συρμό και για το λόγο αυτόν, το συνολικό πρόβλημα, χωρίζεται σε τρία υποπροβλήματα που προσεγγίζονται ξεχωριστά.

Το πρώτο υποπρόβλημα (load planning problem) αφορά στην ανάπτυξη ενός πλάνου φόρτωσης, με βάση τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να φορτωθούν στο συρμό, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των φορταμαξών που θα χρειαστούν για τη φόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων, τηρώντας όλους τους απαραίτητους, λειτουργικούς και επιχειρησιακούς, περιορισμούς. Για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος, θεωρείται σαν δεδομένο ο τύπος των φορταμαξών με τα χαρακτηριστικά τους, ενώ τα εμπορευματοκιβώτια χωρίζονται σε δώδεκα κατηγορίες, τρεις όσον αφορά το μήκος (20', 40', 48') και τέσσερις όσον αφορά το βάρος (ελαφριά, μέτρια, βαριά, πολύ βαριά). Από την άλλη πλευρά αγνοείται η ύπαρξη εμπορευματοκιβωτίων που βρίσκονται σε διαδικασία εκφόρτωσης. Οι περιορισμοί που εισάγονται στο πρόβλημα αφορούν το βάρος, το μήκος, το ύψος και την αεροδυναμική (θεωρείται ότι πρέπει να μην υπάρχουν κενές φορτάμαξες στο συρμό, ότι πρέπει στην αρχή να βρίσκονται τα χαμηλά εμπορευματοκιβώτια, στη συνέχεια τα ψηλά και στο τέλος πάλι τα χαμηλότερα, καθώς επίσης και η κατανομή του βάρους του συρμού πρέπει να είναι προς τα εμπρός).

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ακέραιος προγραμματισμός, ώστε να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός φορταμαξών που απαιτούνται για τους πιθανούς συνδυασμούς φόρτωσης. Για να ληφθεί υπόψη στους περιορισμούς η καλή κατανομή του βάρους και η αεροδυναμική εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση συντελεστές κόστους, ώστε να δίνεται μια «ποινή» στα ανεπιθύμητα πρότυπα φόρτωσης⁴. Οι συντελεστές αυτοί περιλαμβάνουν παραμέτρους, ώστε να αποθαρρύνουν την ύπαρξη βαριών φορταμαξών στο πίσω μέρος του συρμού. Το θετικό με αυτή την προσέγγιση είναι ότι το τελικό πλάνο φόρτωσης που θα προκύψει δίνει σημαντική ελευθερία στην τελική επιλογή διαμόρφωσης του συρμού, αφού δεν αντιστοιχεί συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια σε φορτάμαξες, αλλά κατηγορία εμπορευματοκιβωτίων (μία από τις 12). Η τελική τους πρόταση είναι να βρεθεί μια αρχική λύση του προβλήματος με ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης (χρησιμοποιήθηκε το OASIS), όπου σαν δεδομένα δεν θα εισάγονται τα ακριβή χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων, αλλά κατηγορίες χαρακτηριστικών, και στη συνέχεια θα προσαρμόζονται σε αυτή τη λύση τα αληθινά δεδομένα, καθώς επίσης και οι λειτουργικοί περιορισμοί του προβλήματος (π.χ. καλή κατανομή του φορτίου στο συρμό).

⁴ Η εισαγωγή συντελεστών ή ακόμα και ολόκληρων συναρτήσεων ποινής (penalty functions) αποτελεί μια τεχνική διαχείρισης των περιορισμών σε ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010, σ. 340).

Το δεύτερο υποπρόβλημα (truck dispatch problem) αφορά στην κατανομή των φορτηγών που καταφθάνουν, στις φορτάμαξες, στις οποίες πρόκειται να εκφορτώσουν τα εμπορευματοκιβώτια που μεταφέρουν. Στόχος στην επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η καλύτερη δυνατή εφαρμογή του πλάνου φόρτωσης που έχει ήδη συνταχθεί, ώστε να επιτευχθούν τα επιδιωκόμενα οφέλη από την επιθυμητή φόρτωση. Επομένως, όταν καταφθάνει ένα εμπορευματοκιβώτιο ορίζονται οι πιθανές θέσεις στις οποίες μπορεί να φορτωθεί, ενώ με βάση το συνταχθέν πλάνο φόρτωσης, οι θέσεις αυτές περιορίζονται σε αυτές που ταιριάζουν καλύτερα με το εμπορευματοκιβώτιο. Για να γίνει αυτή η επιλογή εφαρμόζουν ευρετικούς αλγόριθμους, το αρνητικό των οποίων συνίσταται στο γεγονός ότι αγνοούν τις μελλοντικές αφίξεις. Παρόλα αυτά όμως, στους ευρετικούς αλγόριθμους μπορούν να εισαχθούν χαρακτηριστικά, όπως η ευελιξία στη φόρτωση των επόμενων εμπορευματοκιβωτίων (για παράδειγμα να αφήνονται τα μεγαλύτερα δυνατά κενά μεταξύ δύο εμπορευματοκιβωτίων ούτως ώστε να μην καλύπτονται οι πρώτες θέσεις με τα πρώτα εμπορευματοκιβώτια), η παράλληλη φόρτωση και εκφόρτωση εμπορευματοκιβωτίων, καθώς επίσης και ο περιορισμός του χρόνου λειτουργίας του εξοπλισμού μεταφόρτωσης. Το ποιος αλγόριθμος συμπεριφέρεται καλύτερα εξαρτάται αποκλειστικά από τα δεδομένα.

Το τρίτο υποπρόβλημα (stacker dispatch problem) αφορά στον καθορισμό της σειράς, με την οποία ο εξοπλισμός μεταφόρτωσης (stackers) θα εξυπηρετήσει τα αναμένοντα φορτηγά, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος αναμονής τους, ενώ επίσης ζητούμενο είναι και η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του εξοπλισμού μεταφοράς. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού παρουσιάζονται διάφορες πολιτικές εξυπηρέτησης (κανόνες εξυπηρέτησης), όπως είναι η FIFO (First in First Out, δηλαδή ο πρώτος που μπαίνει, εξυπηρετείται), η nearest-longest (κάθε φορά εξυπηρετείται αυτός που βρίσκεται πιο κοντά στον εξοπλισμό μεταφόρτωσης ή αυτός που περιμένει την πιο πολύ ώρα), η loopy (εξυπηρετεί προς μία κατεύθυνση και μετά πάλι από την αρχή), η sweep (εξυπηρετεί προς μία κατεύθυνση και μετά, όταν δεν υπάρχει άλλος να εξυπηρετηθεί προς την ίδια κατεύθυνση, αλλάζει κατεύθυνση), κ.ά..

Οι πολιτικές αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους με βάση το χρόνο αναμονής των φορτηγών και τις κινήσεις του εξοπλισμού μεταφόρτωσης. Στη συνέχεια λύνεται το ακριβές πρόβλημα με χρήση βελτιστοποίησης με ακέραιο προγραμματισμό, το οποίο όμως δεν προτείνεται, καθώς απαιτείται σημαντικός χρόνος σύγκλισης. Ένας άλλος ακριβής τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος, είναι προσαρμόζοντας τον αλγόριθμο της βέλτιστης προσγείωσης αεροσκάφους σε ένα διάδρομο (optimally landing aircraft on a single runway) στα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Η λύση αυτή είναι που προτείνεται από τους συγγραφείς του άρθρου, καθώς εμφανίζει πολύ γρήγορα κάποιες πρώτες λύσεις (για τη βέλτιστη αργεί), οι οποίες όμως είναι αρκετά κοντά στη βέλτιστη. Μάλιστα για μικρά προβλήματα συγκλίνει γρήγορα ακόμα και στη βέλτιστη λύση.

Μια άλλη εργασία που αντιμετωπίζει το πρόβλημα της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικούς συρμούς είναι αυτή των Kozan & Corry (2006) με τίτλο “An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains”. Η πρωτοτυπία της έγκειται στο γεγονός ότι προσπαθεί να αντιμετωπίσει μια δυναμική κατάσταση, όπου συνεχώς καταφθάνουν νέα εμπορευματοκιβώτια και όχι μια στατική, όπου τα εμπορευματοκιβώτια είναι δεδομένα στο σταθμό. Επίσης, αντιμετωπίζει παράλληλα τη διαδικασία φόρτωσης με τη διαδικασία εκφόρτωσης, ενώ οι αφίξεις των φορτηγών στο σταθμό θεωρούνται τυχαίες. Μια βασική παραδοχή της μεθόδου επίλυσης ήταν ότι τα εμπορευματοκιβώτια είχαν όλα ίσο μήκος, ενώ κάθε φορτάμαξα χωρούσε μόνο ένα εμπορευματοκιβώτιο. Η παραδοχή αυτή απλοποίησε σημαντικά την όλη διαδικασία κι έτσι κατέστη δυνατή η ακριβής επίλυση με την αλγοριθμική μέθοδο «κλάδου και φράγματος» (branch and bound). Επίσης θεωρήθηκε γνωστή η μίξη των εμπορευματοκιβωτίων, αλλά όχι ο χρόνος άφιξής τους στο σταθμό. Αντικειμενικός στόχος της εργασίας ήταν να παραχθεί ένα δυναμικό μοντέλο το οποίο θα ανανεώνει κάθε φορά το πλάνο φόρτωσης με στόχο την ελαχιστοποίηση των κινήσεων ενός εμπορευματοκιβωτίου μέχρι τη φόρτωσή του. Έτσι κάθε φορά που θα φτάνει ένα φορτηγό στην πύλη (για να φορτωθεί στο συρμό) ή θα εκφορτώνεται ένα εμπορευματοκιβώτιο από το συρμό το μοντέλο αυτό ξανατρέχει, ώστε να βελτιώσει το πλάνο φόρτωσης. Επίσης, προσπαθεί να πετύχει μια καλή κατανομή του βάρους ελαχιστοποιώντας το κέντρο βάρους προς τα εμπρός.

Σε επόμενη εργασία τους οι ίδιοι ερευνητές (2008) προσπάθησαν να επιτύχουν μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του θέματος. Γι’ αυτό το λόγο, θεωρούν αυτή τη φορά, διάφορους πιθανούς συνδυασμούς μήκους των εμπορευματοκιβωτίων, που μπορούν να φορτωθούν σε μια φορτάμαξα, και προσπαθούν να επιτύχουν την ελαχιστοποίηση του αριθμού των φορταμαξών που θα χρησιμοποιηθούν, ενώ παράλληλα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας των μηχανημάτων.

Ως δεδομένα, θεωρήθηκαν τα στοιχεία των εμπορευματοκιβωτίων (μήκος και βάρος), ενώ η άφιξη των φορτηγών θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται τυχαία. Ο συρμός που εξετάζεται, φορτώνεται και εκφορτώνεται παράλληλα. Τα φορτηγά, είτε πρόκειται να παραλάβουν κάποιο εμπορευματοκιβώτιο είτε να παραδώσουν (ή και τα δύο). Γι’ αυτό το λόγο, το πρόβλημα επανεπιλύεται κάθε φορά που καταφθάνει ένα εμπορευματοκιβώτιο ή εκφορτώνεται κάποιο από το συρμό, καθώς αλλάζουν τα δεδομένα κάθε φορά που γίνεται κάτι τέτοιο.

Ο χρόνος χειρισμού των μηχανημάτων και συνολικότερα της διαδικασίας μεταφόρτωσης θεωρείται ότι αποτελείται από τα εξής στοιχεία: α) τους διπλούς χειρισμούς, δηλαδή ένα εμπορευματοκιβώτιο να μετακινείται πάνω από μία φορά μέχρι να τοποθετηθεί τελικά στη φορτάμαξα, β) τους χρόνους μετακίνησης των εμπορευματοκιβωτίων από τη θέση στην οποία έχουν τοποθετηθεί προσωρινά στην

τελική τους θέση. Επίσης, για την επίλυση του προβλήματος συνεξετάζεται και η ειδική μεταχείριση που πρέπει να έχουν τα επικίνδυνα φορτία, καθώς πρέπει να βρίσκονται απομακρυσμένα μεταξύ τους.

Η επίλυση έγινε με χρήση μικτού ακέραιου προγραμματισμού, αλλά η ακριβής επίλυση απαίτησε πολύ μεγάλο χρόνο (μία ώρα) για να καταλήξει στη βέλτιστη λύση, κι έτσι κρίθηκε ότι δεν είναι πρακτική μία επίλυση κατ' αυτόν τον τρόπο. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν μετευρετικοί αλγόριθμοι (metaheuristics algorithms)⁵. Για να επιτευχθεί μία καλή λύση, ο μετευρετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε έβρισκε καταρχήν μια βέλτιστη λύση, αλλά για περιορισμένα δεδομένα, με χρήση μαθηματικού προγραμματισμού και στην συνέχεια έψαχνε σε μια γειτονική περιοχή αυτής της λύσης, για όλους τους περιορισμούς τώρα και προσπαθούσε να βρει καλύτερες τιμές. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται local search, καθώς αναζητά τη βέλτιστη λύση σε μια περιοχή της αρχικής τιμής. Η μέθοδος αυτή δεν εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης τιμής, καθώς αυτή μπορεί να είναι συνδυασμός οποιονδήποτε τιμών. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κι ένας άλλος μετευρετικός, πιθανοτικός αλγόριθμος με τη μέθοδο της προσομοίωσης ανόπτησης (simulated annealing).

Οι Bruns και Knust (2010) έθεσαν δύο αντικειμενικούς στόχους για το πρόβλημα της αντιστοίχισης (assignment) των εμπορευματοκιβωτίων σε φορτάμαξες. Ο πρώτος αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης της συνολικής διαθέσιμης ικανότητας του συρμού, όσον αφορά στη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, δηλαδή στη μεταφορά του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού εμπορευματοκιβωτίων με το μεγαλύτερο δυνατό φορτίο. Ως δεύτερος στόχος τέθηκε η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του τερματικού σταθμού που οφείλεται στις διαδικασίες που συντελούνται εντός αυτού για την πραγματοποίηση της μεταφοράς. Για να ικανοποιηθούν οι δύο αυτοί αντικειμενικοί στόχοι μορφώθηκε μία αντικειμενική συνάρτηση, με τη μέθοδο της στάθμισης⁶. Η νέα, αυτή, αντικειμενική συνάρτηση ορίστηκε με βάση τη μεγιστοποίηση του κέρδους, το οποίο καθοριζόταν, αφενός, από τον αριθμό των διακινουμένων μονάδων και του βάρους τους (με αυτόν τον τρόπο, λήφθηκε υπόψη ο αρχικός αντικειμενικός στόχος της μεγιστοποίησης του αριθμού των διακινουμένων μονάδων με το μεγαλύτερο δυνατό βάρος) και αφετέρου από τα στοιχεία του κόστους της μεταφοράς, όπως για παράδειγμα, την απόσταση που θα διανύσει ο εξοπλισμός

⁵ Οι μετευρετικοί αλγόριθμοι, σε αντίθεση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους, διαχειρίζονται έναν πληθυσμό από λύσεις ταυτόχρονα. Το βασικό πλεονέκτημά τους, είναι ότι λόγω του τυχαματικού τους χαρακτήρα δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ελάχιστα κι επομένως έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να εντοπίζουν την περιοχή της καθολικά βέλτιστης λύσης. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν μεγάλο πλήθος υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010, σσ. 310-311).

⁶ Στη μέθοδο της στάθμισης (weighted sum), οι αντικειμενικοί στόχοι σταθμίζονται με συντελεστές ανάλογα με τη βαρύτητα που έχουν για την επίτευξη του ενοποιημένου αντικειμενικού στόχου της νέας αντικειμενικής συνάρτησης.

φόρτωσης από το χώρο προσωρινής εναπόθεσης των διακινούμενων μονάδων μέχρι τη φόρτωσή τους σε κάποια φορτάμαξα (με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη ο αρχικός αντικειμενικός στόχος της ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας του εμπορευματικού σταθμού). Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι συντελεστές βαρύτητας που αφορούσαν στον αριθμό των μετακινούμενων μονάδων ήταν κρισιμότεροι σε σχέση με αυτούς που αφορούσαν στο κόστος (δινόταν με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη βαρύτητα στην ικανοποίηση αυτού του στόχου). Επίσης, είναι σαφές, ότι οι συντελεστές βαρύτητας των στοιχείων του κόστους είχαν αρνητικό πρόσημο.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόβλημα ήταν ο αριθμός των διακινούμενων μονάδων, οι τύποι τους (εμπορευματοκιβώτια, ημιρυμουλκούμενα ή swap bodies) με γνωστό το βάρος και το μήκος καθενός από αυτά. Όλα τα διακινούμενα φορτία θεωρήθηκαν ότι τοποθετούνται πρώτα σε χώρο αναμονής – προσωρινής αποθήκευσης. Επίσης, οι φορτάμαξες μπορεί να ήταν διαφορετικού τύπου η μία από την άλλη, αλλά τα χαρακτηριστικά τους θεωρούνταν γνωστά. Σ' αυτήν την εργασία λαμβάνονται, για πρώτη φορά υπόψη, αναλυτικά, οι περιορισμοί βάρους που πρέπει να ικανοποιούνται. Γι' αυτό επιβάλλεται το συνολικό φορτίο που ασκείται σε μια φορτάμαξα να κατανέμεται κατά τέτοιον τρόπο στα φορεία και τους άξονες της φορτάμαξας, ώστε να μην παραβιάζονται οι αντοχές, είτε των φορείων είτε της γραμμής. Επίσης, περιορίζεται ο λόγος του φορτίου που αναλαμβάνεται από τα δύο φορεία, ώστε να μην είναι μεγαλύτερος από 3, καθώς σε αντίθετη περίπτωση παρουσιάζεται αυξημένος κίνδυνος εκτροχιασμού. Ένας ακόμα περιορισμός αφορά στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε θέση της φορτάμαξας (slot) για λόγους ευστάθειας.

Επιπλέον αναφέρονται ορισμένοι περιορισμοί που ίσως να πρέπει να ληφθούν υπόψη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εμπορευματικής μεταφοράς που πραγματοποιείται. Αυτοί είναι: η ύπαρξη διαφορετικών προορισμών μεταξύ των φορταμαξών, οι περιορισμοί ύψους, καθώς και η ξεχωριστή αντιμετώπιση των επικίνδυνων φορτίων.

Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με χρήση ακέραιου προγραμματισμού, ενώ εκτελέστηκαν τρεις διαφορετικές επιλύσεις ανάλογα με τη μορφή των χαρακτηριστικών των διακινούμενων μονάδων που λήφθηκαν υπόψη. Κατά την πρώτη επίλυση, τα διακινούμενα φορτία επιλέχτηκαν με βάση το μήκος τους, ενώ θεωρήθηκαν συγκεκριμένοι συνδυασμοί βάρους. Στη δεύτερη, χαρακτηριστικό επιλογής δεν ήταν το μήκος, αλλά ο τρόπος σύνδεσης στη φορτάμαξα. Έτσι επιτεύχθηκε περιορισμός των μεταβλητών, ενώ το βάρος λήφθηκε και πάλι υπόψη μέσω συγκεκριμένων συνδυασμών. Τέλος, κατά την τρίτη περίπτωση ήταν δεδομένα τα ακριβή χαρακτηριστικά μήκους και βάρους, οπότε λήφθηκαν υπόψη και οι περιορισμοί βάρους, αναλυτικά. Σε όλες τις περιπτώσεις, το βέλτιστο αποτέλεσμα βρέθηκε, σχετικά γρήγορα, ακόμα και μέσω χρήσης

ελεύθερων λογισμικών. Ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές επιλύσεις, την καλύτερη συμπεριφορά εμφάνισε η τρίτη, καθώς μπορούσε να επιλυθεί εντός ολίγων δευτερολέπτων.

Οι Aggoun, Rhiat και Grassien (2011) εφάρμοσαν τη μέθοδο του προγραμματισμού με περιορισμούς (constraint programming). Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των εμπορευματοκιβωτίων σε διαφορετικού μεγέθους φορτάμαξες (ελαχιστοποίηση των εμπορευματοκιβωτίων που δεν θα εξυπηρετηθούν), ούτως ώστε να γίνονται σεβαστοί οι περιορισμοί του προβλήματος. Οι περιορισμοί που λήφθηκαν υπόψη ήταν το μέγιστο βάρος ανά φορτάμαξα, ο μέγιστος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων ανά φορτάμαξα, ο μέγιστος αριθμός φορταμαξών σε έναν συρμό και το μέγιστο συνολικό φορτίο του συρμού. Επίσης, λήφθηκε υπόψη και ο ειδικός χειρισμός που απαιτείται για τη φόρτωση των επικίνδυνων φορτίων.

Όλα αυτά τα στοιχεία εισήχθησαν σε μία εφαρμογή, η οποία θα μπορεί να προσφέρει μια ζωντανή (online) καθοδήγηση για την επίλυση του προβλήματος της φόρτωσης ενός συρμού, καθώς μέσα από την επίλυση του προβλήματος αυτού με τη χρήση του προγραμματισμού με περιορισμούς, θα δίνεται μια πρώτη λύση, την οποία ο χρήστης της εφαρμογής θα μπορεί να προσαρμόζει ανάλογα με τα νέα δεδομένα (έκτακτη άφιξη εμπορευματοκιβωτίων ή έκτακτες αλλαγές στην τοποθέτησή τους).

Οι Anghinolfi, et al. (2011) προσπάθησαν να συνδυάσουν τα προβλήματα δρομολόγησης και φόρτωσης των μεταφερομένων μονάδων με σιδηρόδρομο και να τα αντιμετωπίσουν σαν ένα πρόβλημα. Η λογική τους ήταν να αποφασιστεί ποια είναι η βέλτιστη κατανομή των μεταφερομένων μονάδων στους συρμούς, ώστε όλα τα μεταφερόμενα εμπορεύματα να φτάσουν στον προορισμό τους μέσα στην καθορισμένη προθεσμία. Έπρεπε, λοιπόν, να αποφασιστεί για κάθε μεταφερόμενη μονάδα, ποια θα είναι η ακολουθία των συρμών που θα ακολουθήσει για να φτάσει από το σταθμό προέλευσής του στο σταθμό προορισμού και σε ποια φορτάμαξα κάθε συρμού θα τοποθετηθεί. Αντικειμενικός στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων. Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, χρησιμοποιήθηκε μία μίξη μετευρετικών αλγορίθμων με μαθηματικό προγραμματισμό. Η τεχνική αυτή ονομάζεται “matheuristics” και ουσιαστικά αναφέρεται στο συνδυασμό μετευρετικών τεχνικών με το μαθηματικό προγραμματισμό για την επίλυση του προβλήματος. Στην εργασία αυτή προτάθηκαν δύο τέτοιοι αλγόριθμοι. Ο πρώτος (ad hoc) χρησιμοποιεί τα δεδομένα από την επίλυση με μαθηματικό προγραμματισμό για να προσδιορίσει το χώρο που θα βρίσκεται η βέλτιστη λύση και στη συνέχεια ψάχνει σε αυτό το χώρο, ενώ ο δεύτερος (RANS⁷) επιλέγει εντελώς τυχαία μια περιοχή λύσεων και λύνει σ’ αυτήν

⁷ Randomized Neighborhood Search

την περιοχή το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Με βάση αυτές τις τεχνικές επίλυσαν διάφορα σενάρια και κατέληξαν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σχεδόν η ίδια ερευνητική ομάδα (Anghinolfi, et al., 2012) χρησιμοποίησε γραμμικό προγραμματισμό 0-1, ούτως ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης φόρτωσης του συρμού. Σε αυτό το πρόβλημα τέθηκαν δύο αντικειμενικοί στόχοι: α) η μεγιστοποίηση του αριθμού των μεταφερομένων εμπορευματοκιβωτίων και των αξιών τους και β) η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς και φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων. Γι' αυτό το λόγο μορφώθηκε μία αντικειμενική συνάρτηση κόστους, όπου αποτελούνταν από όρους (διαφορετικά σταθμισμένους) που αντιπροσώπευαν τους αρχικούς αντικειμενικούς στόχους.

Συγκεντρωτικά, έχουμε καταγράψει τη βιβλιογραφία στον παρακάτω πίνακα (1), ενώ στον πίνακα 2 γίνεται μία συγκριτική παρουσίαση των εργασιών με βάση τα βασικά τους χαρακτηριστικά (μεταβλητές και περιορισμοί που λήφθηκαν υπόψη).

Πίνακας 1: Αντικειμενικοί στόχοι, παραδοχές και τεχνική επίλυσης των εργασιών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Χρονιά	Συγγραφείς	Αντικειμενικοί στόχοι	Παραδοχές	Τεχνική επίλυσης
2001	Ernst & Pudey	- Ελαχιστοποίηση του αριθμού των φορταμαξών. - Ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής των φορτηγών και του λειτουργικού κόστους εξοπλισμού μεταφόρτωσης. - Καλή κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού.	Τα ε/κ ομαδοποιούνται με κριτήριο το μήκος και το βάρος σε 12 κατηγορίες. Ο αριθμός των ε/κ ανά κάθε κατηγορία θεωρείται γνωστός.	Βελτιστοποίηση με ακέραιο προγραμματισμό.
2006	Corry & Kozan	- Ελαχιστοποίηση των κινήσεων ενός ε/κ* μέχρι την τελική φόρτωσή του. - Ελαχιστοποίηση της απόστασης του κέντρου βάρους του συρμού από τη μηχανή έλξης (τα βαρύτερα προς τα εμπρός).	- Ένας τύπος ε/κ. - Κάθε φορτάμαξα χωράει μόνο ένα ε/κ. - Δεν λήφθηκε υπόψη ο περιορισμός σε σχέση με τα μέγιστα αξονικά φορτία.	Χρησιμοποιήθηκαν τρεις αλγόριθμοι: Shortest path algorithm Hungarian algorithm Cost scaling algorithm (ο αποτελεσματικότερος).
2008	Corry & Kozan	- Ελαχιστοποίηση αριθμού βαγονιών. - Ελαχιστοποίηση χρόνου λειτουργίας εξοπλισμού μεταφόρτωσης. - Κατάλληλη τοποθέτηση των επικίνδυνων φορτίων.	- Χαρακτηριστικά ε/κ γνωστά. - Πιθανοί συνδυασμοί φόρτωσης. - Ταυτόχρονη εκφόρτωση του συρμού. - Δεν λήφθηκε υπόψη ο περιορισμός σε σχέση με τα μέγιστα αξονικά φορτία.	Με χρήση μικτού ακέραιου προγραμματισμού βρίσκει μια αρχική λύση για ένα κριτήριο και στη συνέχεια ψάχνει, για όλα τα κριτήρια και τους περιορισμούς, σε μια γειτονική περιοχή της αρχικής λύσης, να βρει μια καλύτερη λύση με χρήση ευρετικών αλγορίθμων
2010	Bruns & Knust	- Μεγιστοποίηση του αριθμού των βαγονιών και του φορτίου που αυτά φέρουν. - Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους του εμπορευματοκιβωτίου σταθμού.	- Όλα τα ε/κ τοποθετούνται αρχικά σε ένα χώρο προσωρινής στοίβασης. - Ύπαρξη διαφορετικών τύπων μοναδοποιημένων φορτίων με γνωστά μήκη και βάρη. - Ύπαρξη διαφορετικών τύπων φορταμαξών - Λήφθηκαν υπόψη οι περιορισμοί του φορτίου (ανά άξονα, ανά θέση φορτάμαξας και σχέση μεταξύ φορτίων διπλανών θέσεων).	Βελτιστοποίηση με ακέραιο προγραμματισμό.
2011	Aggoun, Rhiat & Grassien	Ελαχιστοποίηση των ε/κ που δεν θα εξυπηρετηθούν.	- Αριθμός και χαρακτηριστικά των ε/κ γνωστά. - Περιορισμός μέγιστου φορτίου ανά φορτάμαξα. - Ειδική μεταχείριση των επικίνδυνων φορτίων.	Προγραμματισμός με περιορισμούς (Constraint programming)
2011	Anghinolfi, Paolucci, Sacone & Siri	- Ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μέσω: - Επιλογή κατάλληλης διαδρομής ενός μεμονωμένου ε/κ. - Βέλτιστη αντιστοίχιση των ε/κ στα βαγόνια.	- Αριθμός και χαρακτηριστικά των ε/κ γνωστά. - Διαφορετικοί περιορισμοί ε/κ. - Ύπαρξη περιορισμού προθεσμίας αποστολής.	Matheuristics (συνδυασμός μετευρετικών αλγορίθμων με βελτιστοποίηση).
2012	Anghinolfi, Foti, Maratea, Paolucci & Siri	- Μεγιστοποίηση του αριθμού των μεταφερομένων ε/κ και των αξιών τους. - Ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφόρτωσης.	- Αριθμός και χαρακτηριστικά (μήκος, βάρος, αξία) των ε/κ γνωστά. - Θέση των ε/κ στο χώρο εναπόθεσης γνωστός. - Συγκεκριμένες διατάξεις ε/κ στις φορτάμαξες.	Βελτιστοποίηση με χρήση γραμμικού προγραμματισμού

*Χρησιμοποιείται η συντομογραφία ε/κ, αντί του πλήρους όρου εμπορευματοκιβώτιο (container).

Πίνακας 2: Συγκριτική παρουσίαση των εργασιών της βιβλιογραφίας

		Ernst, et al. (2001)	Corry, et al. (2006)	Corry, et al. (2008)	Bruns, et al. (2010)	Aggoun, et al. (2011)	Anghinolfi, et al. (2011)	Anghinolfi, et al. (2012)
ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ	Γνωστά μήκη	+	+	+	+	+	+	+
	Γνωστά βάρη	+			+	+	+	+
	Διαφορετικές κατηγορίες μήκους	+		+	+	+	+	+
	Διαφορετικά είδη φορταμαξών				+	+		
	Διαφορετικοί προορισμοί						+	
ΣΤΟΧΟΙ – ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	Ελαχιστοποίηση των φορταμαξών ή μεγιστοποίηση των διακινούμενων μονάδων	+		+	+	+	+	+
	Κινήσεις εξοπλισμού φόρτωσης	+	+	+	+			+
	Επικίνδυνα φορτία			+		+		
	Παράλληλη εκφόρτωση του συρμού			+				
	Κέντρο βάρους		+					
	Κατανομή του βάρους κατά μήκος του συρμού	+						

3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.1 Γενικά

Η σιδηροδρομική μεταφορά αποσκοπεί στην ασφαλή και έγκαιρη μεταφορά ανθρώπων και εμπορευμάτων μεταξύ δύο σιδηροδρομικών σταθμών και αποτελεί το ουσιαστικό έργο του σιδηροδρόμου. Το συνολικό σύστημα, δηλαδή, του σιδηροδρόμου (γραμμές, τροχαίο υλικό, σταθμοί, προσωπικό, κ.λπ.) υπάρχει προκειμένου να λειτουργήσει και να πραγματοποιηθεί απρόσκοπτα η σιδηροδρομική μεταφορά. Τα διάφορα όμως χαρακτηριστικά του συστήματος που, κατά τ' άλλα, υποστηρίζουν την πραγματοποίηση της μεταφοράς αυτής, θέτουν και τους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να τηρηθούν για την ασφαλή και απρόσκοπτη πραγματοποίησή της.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, θα γίνει μια προσπάθεια περιγραφής των διαφόρων στοιχείων του συστήματος που επηρεάζουν την εμπορευματική σιδηροδρομική μεταφορά και ουσιαστικά θέτουν τους περιορισμούς που πρέπει να τεθούν καθ' όλη τη φάση της μεταφοράς. Με αυτόν τον τρόπο θα καθοριστούν τα στοιχεία αυτά που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κατά την πραγματοποίηση της φόρτωσης ενός σιδηροδρομικού συρμού. Τα στοιχεία αυτά βασίζονται στα δεδομένα των ελληνικών σιδηροδρόμων (ΟΣΕ).

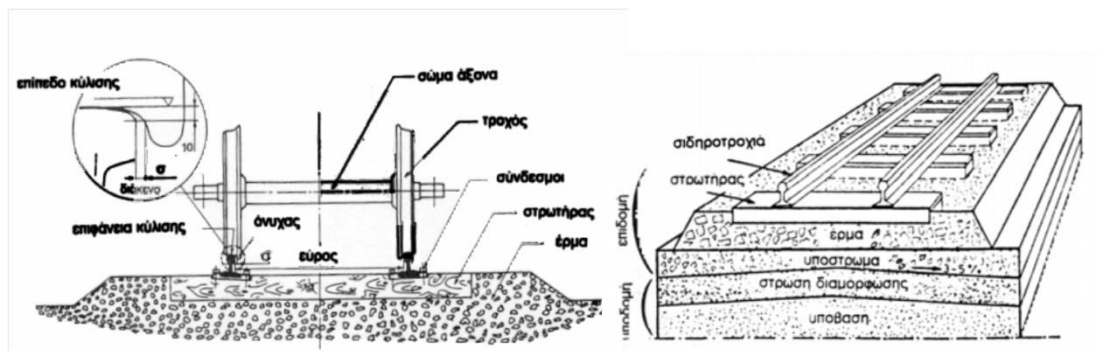
3.2 Η σιδηροδρομική γραμμή

3.2.1 Γενικά

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελεί την οδό της σιδηροδρομικής μεταφοράς και ο ρόλος της είναι διττός, καθώς καλείται να καθοδηγήσει τους τροχούς και να τους προσφέρει μια επίπεδη επιφάνεια κύλισης (μέσω των σιδηροτροχιών), ενώ επίσης αναλαμβάνει να μεταβιβάσει, με ασφάλεια, τις δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται στη γραμμή, στην υποδομή⁸ της σιδηροδρομικής γραμμής μέσω της επιδομής της (σιδηροτροχιές, στρωτήρες, στρώση έδρασης⁹, μικρό υλικό). Οι δυνάμεις αυτές που ασκούνται στην επιδομή διακρίνονται σε εξωτερικές (είτε από την παρουσία κάποιου σιδηροδρομικού οχήματος, είτε από τα χαρακτηριστικά της γραμμής) και εσωτερικές (λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών) (Λυμπέρης, 2009 σ. 85).

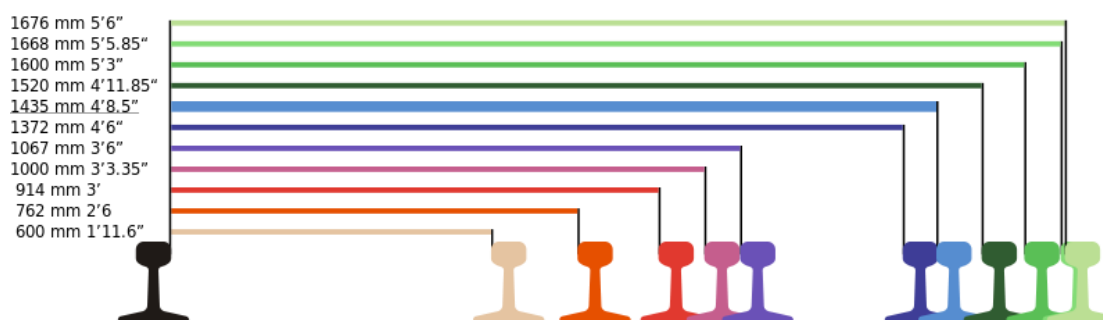
⁸ Με τον όρο υποδομή νοείται το στρώμα εδάφους επάνω στο οποίο κατασκευάζεται η επιδομή της γραμμής και περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις: τη στρώση διαμόρφωσης (κατεργασμένο εδαφικό υλικό) και την υπόβαση (έδαφος θεμελίωσης) (Πυργίδης, 2009).

⁹ Η στρώση έδρασης μπορεί να είναι είτε συμβατική, δηλαδή με έρμα, είτε σταθερή (slab track), δηλαδή με μια πλάκα σκυροδέματος.



Εικόνα 4: Η σιδηροδρομική γραμμή

Βασικό χαρακτηριστικό της γραμμής αποτελεί το εύρος της, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα στις σιδηροτροχιές και μετράται 14mm κάτω από την ανώτατη στάθμη κεφαλής σιδηροτροχιάς. Αποτελεί κρίσιμο χαρακτηριστικό, καθώς επηρεάζει την αντοχή της γραμμής, καθώς επίσης και το κόστος κατασκευής της. Αμφότερα τα στοιχεία αυτά αυξάνονται, αυξανόμενου του εύρους της γραμμής. Διεθνώς έχει επικρατήσει, και ονομάζεται κανονικό εύρος (standard gauge), το εύρος των 1.435mm, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως και στην Ελλάδα. Επίσης, να αναφερθεί ότι το κανονικό εύρος εμπεριέχεται στους κανονισμούς διαλειτουργικότητας που έχει ορίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την απρόσκοπτη μεταφορά μεταξύ των ευρωπαϊκών δικτύων. Στην Ελλάδα, επίσης χρησιμοποιείται το μετρικό εύρος (1.000mm), κυρίως στο δίκτυο της Πελοποννήσου. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί το εύρος του οδοντωτού με απόσταση 750mm και το εύρος στο «τρενάκι» του Πηλίου με εύρος 600mm, τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα σαν τουριστικές γραμμές. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται, συγκριτικά, ορισμένα εύρη γραμμών που έχουν χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 5: Διάφορα εύρη γραμμών που έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως (σε mm και πόδια)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά αυτά της γραμμής που καθορίζουν ορισμένες από τις παραμέτρους για την πραγματοποίηση της εμπορευματικής σιδηροδρομικής μεταφοράς.

3.2.2 Χαρακτηριστικά γραμμής που επηρεάζουν τη σιδηροδρομική μεταφορά

3.2.2.1 Οριζοντιογραφία και μηκοτομή της γραμμής

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελεί, πάνω απ' όλα, την οδό στην οποία θα κινηθεί ο συρμός, βασικά χαρακτηριστικά της οποίας αποτελούν η οριζοντιογραφία και η μηκοτομή της που απορρέουν από τη χάραξη της σιδηροδρομικής γραμμής στο χώρο. Η οριζοντιογραφία αποτελείται από ευθυγραμμίες και καμπύλες. Η ακτίνα των καμπυλών είναι το στοιχείο αυτό της οριζοντιογραφίας που επηρεάζει τη σιδηροδρομική μεταφορά, καθώς θα καθορίσει την ταχύτητα με την οποία θα κινηθεί ο συρμός στο τμήμα αυτό της γραμμής. Επίσης, κατά την κίνηση ενός συρμού επί μιας καμπύλης δημιουργούνται πρόσθετες αντιστάσεις¹⁰ οι οποίες πρέπει να υπερνικηθούν πλέον των υπολοίπων. Για παράδειγμα, στο τμήμα Αθήνα – Θεσσαλονίκη, οι ελάχιστες τιμές των ακτινών των καμπυλών είναι 270 μέτρα στο τμήμα Τιθορέα – Δομοκός.

Όσον αφορά στη μηκοτομή της γραμμής, αυτή θα μας καταδείξει τις κλίσεις που θα εμφανιστούν στη γραμμή μας. Οι μέγιστες κλίσεις αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη σιδηροδρομική μεταφορά, αφού είναι πολύ πιθανό να καθορίσουν το μέγιστο δυνατό ελκόμενο φορτίο ή τον απαιτούμενο αριθμό μηχανών έλξης για την πραγματοποίηση ενός δρομολογίου εμπορευματικών μεταφορών. Αυτό συμβαίνει, διότι οι αντιστάσεις λόγω της κλίσης είναι σημαντικές και πολλές φορές το κρίσιμο στοιχείο για τον καθορισμό του μέγιστου ελκόμενου φορτίου ή του απαιτούμενου αριθμού των μηχανών έλξης, είναι η εκκίνηση του συρμού σε ανωφέρεια. Η μέγιστη κλίση που συναντάται στο ελληνικό δίκτυο είναι 28,08 ‰, ενώ στο τμήμα Αθήνα – Θεσσαλονίκη είναι 22‰ (στο τμήμα Τιθορέα – Δομοκός).

3.2.2.2 Αντοχή γραμμής

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, η σιδηροδρομική γραμμή αποτελεί, επίσης, το φορέα που αναλαμβάνει τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν και καλείται να τις μεταβιβάσει με ασφάλεια στην υποδομή της. Από τις δυνάμεις αυτές που ασκούνται στη γραμμή, κρίσιμες, όσον αφορά στη σιδηροδρομική μεταφορά, αποτελούν οι κατακόρυφες δυνάμεις, οι οποίες οφείλονται στη μάζα των σιδηροδρομικών οχημάτων που κινούνται επί αυτής.

Οι δυνάμεις αυτές, όμως, περιορίζονται από την αντοχή της γραμμής που χαρακτηρίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ανά άξονα, καθώς επίσης και από το μέγιστο φορτίο ανά τρέχον μέτρο, καθορίζοντας έτσι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί μέσω σιδηροδρόμου.

¹⁰ Βλ. αναλυτικότερα παρακάτω, κεφ. 3.3.2.1

Με τον όρο φορτίο ανά άξονα εννοούμε το στατικό φορτίο που μεταβιβάζεται μεμονωμένα από κάθε άξονα ενός σιδηροδρομικού οχήματος στις δύο σιδηροτροχιές, κατά την επαφή των τροχών του συρμού με τις σιδηροτροχιές. Εάν θεωρήσουμε ότι το συνολικό φορτίο του σιδηροδρομικού οχήματος είναι συμμετρικά κατανεμημένο, τότε το φορτίο ανά άξονα υπολογίζεται άμεσα από τη διαίρεση του συνολικού φορτίου του οχήματος με τον αριθμό των αξόνων του.

Η αντοχή της γραμμής, που όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, χαρακτηρίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ανά άξονα και το μέγιστο φορτίο ανά τρέχον μέτρο, καθορίζεται από την κατηγορία στην οποία ανήκει με βάση την κατηγοριοποίηση της UIC. Για την περίπτωση του κανονικού εύρους¹¹ ορίζονται 4 κατηγορίες:

- A: με μέγιστο φορτίο ανά άξονα τους 16 τόνους (t)
- B: με μέγιστο φορτίο ανά άξονα τους 18 τόνους
- C: με μέγιστο φορτίο ανά άξονα τους 20 τόνους
- D: με μέγιστο φορτίο ανά άξονα τους 22,5 τόνους

Κάθε κατηγορία από αυτές χωρίζονται σε επιμέρους υποκατηγορίες ανάλογα με το μέγιστο φορτίο ανά τρέχον μέτρο που επιτρέπουν, το οποίο υπολογίζεται από το πηλίκο του συνολικού φορτίου ενός σιδηροδρομικού οχήματος προς το ελεύθερο μήκος μεταξύ των προσκρουστήρων του. Οι δύο συνηθέστερες υποκατηγορίες είναι 6 τόνοι ανά τρέχον μήκος και 8 τόνοι ανά μέτρο μήκους.

Για την περίπτωση της Ελλάδας, όπως καθορίζεται στη δήλωση δικτύου του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ), το μέγιστο φορτίο ανά μέτρο μήκους είναι 8 τόνοι για όλο το δίκτυο. Το μέγιστο φορτίο ανά άξονα ποικίλλει από 20 – 22,5 τόνους ανά άξονα για την περίπτωση κανονικού εύρους γραμμής, ενώ διαφοροποιείται σημαντικά για την περίπτωση του μετρικού εύρους (14 τόνους). Καθότι το δίκτυο στο οποίο κινούνται οι εμπορευματικές μεταφορές είναι αυτό με το κανονικό εύρος θα θεωρηθεί ως δεδομένο μέγιστο φορτίο ανά άξονα η δυσμενέστερη περίπτωση που εμφανίζεται στο κανονικό εύρος, δηλαδή θα θεωρηθεί ως μέγιστο φορτίο ανά άξονα οι 20 τόνοι.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο θα είναι ουσιαστικά ο παράγοντας που θα καθορίσει το μέγιστο φορτίο – εμπορεύμα που θα μπορεί να μεταφερθεί με σιδηρόδρομο. Από τα μέγιστα επιτρεπόμενα φορτία που αναπτύχθηκαν παραπάνω κρισιμότερο για την επιλογή του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου ενός μεταφερομένου προϊόντος είναι το μέγιστο φορτίο ανά άξονα. Αυτό γιατί, από τις διαθέσιμες φορτάμαξες που έχει στην ιδιοκτησία του ο ΟΣΕ, το μικρότερο μήκος που συναντάται, σε μια τετραξονική φορτάμαξα – βυτίο, ανέρχεται στα 12 περίπου

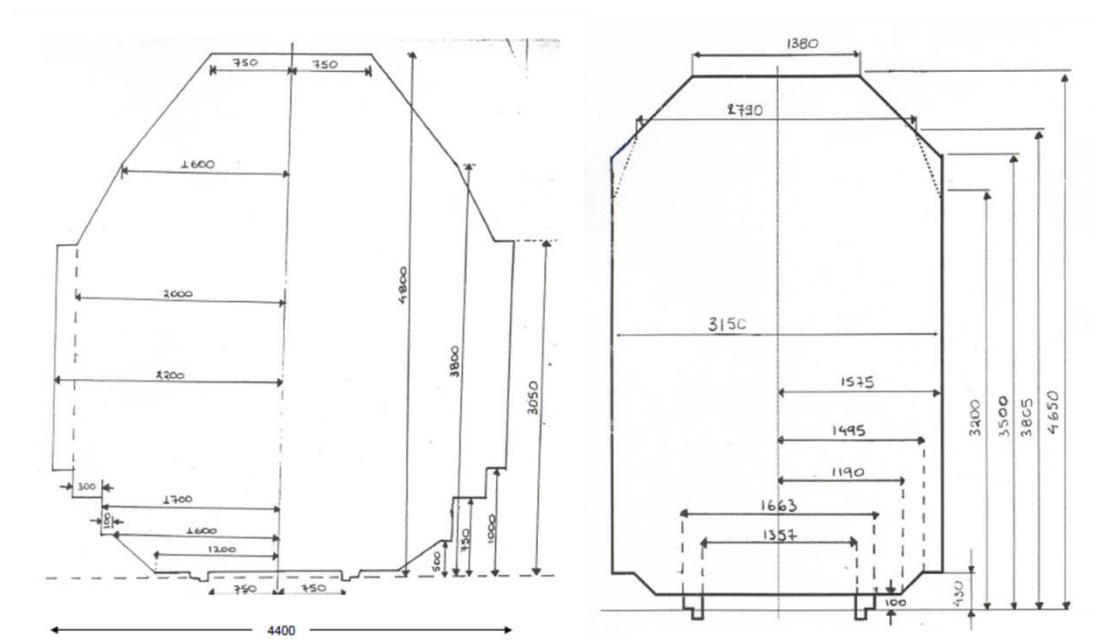
¹¹ Η γραμμή μετρικού εύρους εμφανίζει άλλα όρια. Για παράδειγμα, γραμμή μετρικού εύρους, κατηγορίας C αντέχει μέγιστο φορτίο ανά άξονα 14 τόνους. Γίνεται έτσι εμφανές, η επιρροή του εύρους της γραμμής στην αντοχή της.

μέτρα, γεγονός που θα μας οδηγούσε σε μέγιστο συνολικό φορτίο 96 τόνων (12 x 8). Από την άλλη πλευρά, ακόμα κι αν είχαμε αντοχή γραμμής 22,5 τόνους ανά άξονα, το μέγιστο συνολικό φορτίο μιας τετραζωνικής φορτάμαξας θα ανερχόταν σε $22,5 \times 4 = 90$ τόνους.

Επομένως, συμπεραίνεται ότι κρίσιμος παράγοντας για τον καθορισμό του μέγιστου συνολικού φορτίου μιας φορτάμαξας είναι το δυσμενέστερο μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ανά άξονα που θα εμφανιστεί στη διαδρομή της φορτάμαξας.

3.2.2.3 Το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής και φόρτωσης (structure and loading gauge)

Η γραμμή σε όλο το μήκος της πρέπει να εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία κίνησης ενός συρμού. Γι' αυτό το λόγο ορίζεται το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής (ή περιτύπωμα σταθερών εμποδίων) με το οποίο ορίζεται ο χώρος, ο οποίος πρέπει να παραμένει ελεύθερος απ' οτιδήποτε γύρω από τη γραμμή, ώστε να πραγματοποιείται απρόσκοπτα η κίνηση του σιδηροδρομικού συρμού. Είναι ουσιαστικά το στοιχείο που θα καθορίσει τη διατομή των σηράγγων μιας γραμμής. Από την άλλη πλευρά, ορίζεται το περιτύπωμα φόρτωσης (ή περιτύπωμα οχήματος), όπου ορίζονται οι διαστάσεις της μέγιστης διατομής των οχημάτων που επιτρέπεται να κινηθούν επί της γραμμής. Το περιτύπωμα φόρτωσης λαμβάνει υπόψη και τη δυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος, δηλαδή την κίνησή του στις καμπύλες και τις ταλαντώσεις του κατά την κίνησή του. Είναι σαφές ότι το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής περιβάλλει πάντα το περιτύπωμα φόρτωσης κατά μία σταθερή απόσταση που καθορίζεται από τις ανάγκες και τους κανονισμούς κάθε Σιδηροδρομικού Οργανισμού (Λυμπέρης, 2009).



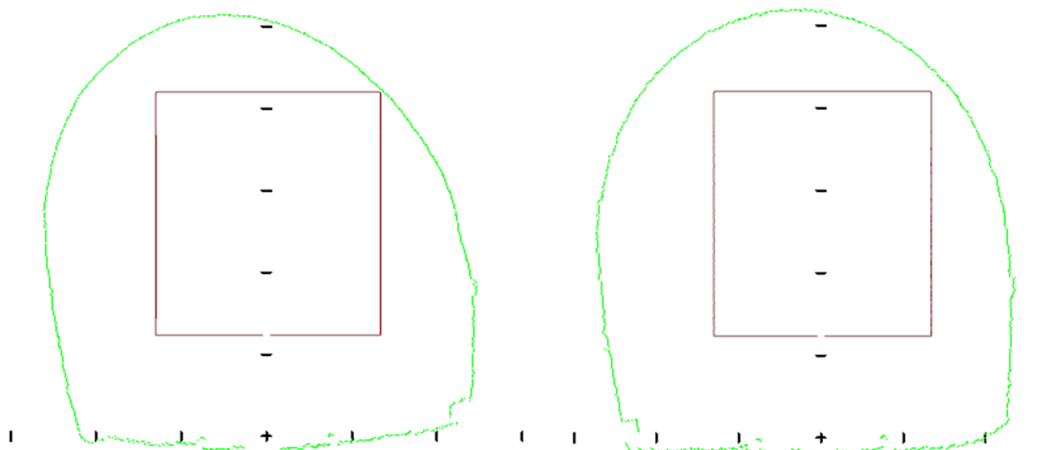
Εικόνα 6: Αριστερά το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής και δεξιά το περιτύπωμα φόρτωσης που χρησιμοποιούνται στους ελληνικούς σιδηροδρόμους, όπως δηλώνονται στη δήλωση δικτύου.

Ουσιαστικά κάθε όχημα έχει ένα στατικό περιτύπωμα, που προκύπτει από τις διαστάσεις του εν στάσει, και ένα κινηματικό περιτύπωμα που προκύπτει από τη δυναμική του συμπεριφορά, το οποίο είναι, προφανώς δυσμενέστερο από το στατικό. Το κινηματικό περιτύπωμα κάθε οχήματος που θα κυκλοφορήσει στη γραμμή, θα συγκριθεί με το περιτύπωμα φόρτωσης, ώστε να αποφασιστεί αν θα επιτραπεί η διέλευσή του από τη γραμμή. Σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπεται η μικρή υπέρβασή του με το χαρακτηρισμό της μεταφοράς ως «εξαιρετική».

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι το περιτύπωμα φόρτωσης των ελληνικών σιδηροδρόμων είναι σχετικά συντηρητικό και γίνονται συχνά υπερβάσεις του. Τέτοιες υπερβάσεις απαιτούνται, για παράδειγμα, για να μετακινηθούν με το σιδηρόδρομο εμπορευματοκιβώτια υψηλού περιτυπώματος (high cube), όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο.

Προκειμένου να καταστεί γνωστό το ακριβές περιτύπωμα ελευθέρας διατομής, ώστε να εξακριβωθεί το πραγματικό περιτύπωμα φόρτωσης που μπορεί να διέλθει από τη γραμμή γίνονται καταγραφές με ειδικά καταγραφικά μηχανήματα. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας καταγραφής, μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα και να εισαχθούν σαν δεδομένα σε ένα λογισμικό, ώστε να εξακριβωθεί αν ένα περιτύπωμα (υποψήφιο για διέλευση) θα αντιμετωπίσει πρόβλημα. Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα από μια τέτοια επεξεργασία για τον έλεγχο διέλευσης ενός εμπορευματοκιβωτίου υψηλού περιτυπώματος (high cube), όπως έγιναν από τον κ. Καλογερόπουλο (του τμήματος καταγραφών γραμμής του ΟΣΕ). Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε οριακή διέλευση στην αριστερή περίπτωση, ενώ στη δεξιά περίπτωση έχουμε πιο άνετη διέλευση.

Προκειμένου το λογισμικό αυτό να πραγματοποιήσει τον έλεγχο εισάγονται τα δεδομένα του στατικού περιτυπώματος του υποψηφίου προς διέλευση αντικειμένου και «τρέχει» όλη η διαδρομή (το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής, ουσιαστικά) με βάση τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την καταγραφή.



Εικόνα 7: Αποτελέσματα του ελέγχου διέλευσης ενός εμπορευματοκιβωτίου υψηλού περιτυπώματος από τις σήραγγες της Δομοκού.

Το περιτύπωμα θα κρίνει ουσιαστικά και θα αποτελέσει αιτία αποκλεισμού των μεταφερομένων εκείνων μονάδων που υπερβαίνουν το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής, ενώ για εκείνα που υπερβαίνουν ελαφρώς το περιτύπωμα φόρτωσης και όχι το περιτύπωμα ελευθέρας διατομής θα χρειαστεί περαιτέρω μελέτη για τα δυσμενέστερα σημεία του δικτύου (σήραγγες με τα μικρότερα περιτυπώματα ελευθέρας διατομής).

3.3 Ο σιδηροδρομικός συρμός

3.3.1 Γενικά

Ο σιδηροδρομικός συρμός αποτελείται, συνήθως¹², από δυο στοιχεία, ένα ελκτικό και ένα ελκόμενο. Το ελκτικό στοιχείο του συρμού είναι η μηχανή έλξης (μία ή και περισσότερες), που αποτελεί ουσιαστικά την κινητήρια δύναμη του συρμού. Ανάλογα δηλαδή με την ισχύ της, η μηχανή έλξης δίνει την αντίστοιχη ελκτική δύναμη, ώστε να κινηθεί ο συρμός υπερνικώντας όλες τις δημιουργούμενες αντιστάσεις, η σημαντικότερη όλων αφορά στο φορτίο του ελκόμενου τροχαίου υλικού.

Από την άλλη πλευρά, το ελκόμενο στοιχείο είναι το πιο ουσιαστικό, καθώς είναι αυτό που πραγματοποιεί τον ρόλο του σιδηροδρόμου, δηλαδή να μεταφέρει ανθρώπους ή εμπορεύματα κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Το ζήτημα καταλληλότητας του ελκόμενου τροχαίου υλικού για τη βέλτιστη επιλογή του, ανάλογα με τα μεταφερόμενα προϊόντα και τις συνθήκες μεταφοράς, αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στις εμπορευματικές σιδηροδρομικές μεταφορές.

¹² Στις επιβατικές μεταφορές είναι συνήθης ο τύπος των αυτοκινηταμαξών (multiple units), όπου το κινητήριο όχημα δεν είναι ξεχωριστό από τα ελκόμενα οχήματα, αλλά ολόκληρος ο συρμός έχει δική του μηχανή.

Τα κύρια ζητήματα, επομένως, που μπορούν να τεθούν για την πραγματοποίηση μιας σιδηροδρομικής, και κυρίως εμπορευματικής, μεταφοράς είναι:

- Πόσο φορτίο μπορεί να μεταφέρει μία συγκεκριμένη μηχανή έλξης.
- Πόσες (και ποιες) μηχανές έλξης απαιτούνται για τη μεταφορά ενός συγκεκριμένου φορτίου.
- Ποια είδη φορταμαξών ανταποκρίνονται καλύτερα στην επιζητούμενη μεταφορά.

3.3.2 Οι μηχανές έλξης

3.3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Όσον αφορά τα ελκτικά στοιχεία των συρμών, ανεξαρτήτως τύπου κίνησης, πρέπει να ικανοποιούν πάντα τη συνθήκη κίνησης του συρμού, δηλαδή η δύναμη έλξης που μας δίνει η μηχανή έλξης ανάλογα με την ισχύ της, πρέπει να υπερβαίνει το σύνολο των αντιστάσεων που προκαλούνται στο συρμό, κατά τη διάρκεια του δρομολογίου του. Την ίδια στιγμή όμως, η δύναμη έλξης πρέπει να είναι μικρότερη από τη δύναμη πρόσφυσης, ώστε οι κινητήριοι τροχοί να κυλίσουν και όχι να ολισθαίνουν. Η δύναμη πρόσφυσης είναι δηλαδή η αντίσταση που προβάλλεται στην ελκτική δύναμη ώστε να έχουμε συνθήκη κίνησης και να μπορεί να παραχθεί μεταφορικό έργο.

Δηλαδή πρέπει: $\Sigma F_{αντ} < F_E < \Pi$, όπου

$\Sigma F_{αντ}$ είναι το σύνολο των αντιστάσεων

F_E είναι η δύναμη έλξης του συρμού και

Π είναι η δύναμη πρόσφυσης ή δύναμη τριβής

Η δύναμη πρόσφυσης, δηλαδή, είναι αυτή που βάζει το άνω όριο στην εκμεταλλεύσιμη ελκτική δύναμη (tractive effort ή tractive force) που παρέχεται από τον κινητήρα. Δύο είναι τα στοιχεία που την καθορίζουν εξ ορισμού, το κατακόρυφο βάρος που πέφτει στους κινητήριους τροχούς και ο συντελεστής πρόσφυσης (ή συντελεστής τριβής) μ . Δηλαδή:

$$\Pi = \mu \cdot M_{KT} \cdot g$$

Όπου:

Π η δύναμη πρόσφυσης

μ ο συντελεστής πρόσφυσης

M_{KT} η μάζα που αναλαμβάνουν οι κινητήριοι τροχοί

g η επιτάχυνση της βαρύτητας =9,81 m/s²

Επομένως, η μεγαλύτερη ελκτική ικανότητα (maximum tractive force) που θα απαιτηθεί για μια μεταφορά δεν εξαρτάται μόνο από τη μεγαλύτερη ισχύ της μηχανής, αλλά και από το μεγαλύτερο βάρος της μηχανής έλξης (που αντιστοιχεί στους κινητήριους τροχούς) και τις συνθήκες κύλισης στη σιδηροτροχιά (συντελεστής πρόσφυσης).

Ο συντελεστής πρόσφυσης (ή συντελεστής τριβής) εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων και οι (πρακτικές) τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0,05 (π.χ. παγετός ή πεσμένα φύλλα) έως 0,6 για πολύ καλή ποιότητα σιδηροτροχιάς.

Ειδικότερα, ο συντελεστής πρόσφυσης (Πυργίδης, 2009, σ. 61) διαφοροποιείται ανάλογα με:

- Την ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας και μάλιστα ιδιαίτερα έντονα για ταχύτητες μικρότερες των 20km/h.
- Τα κατακόρυφα φορτία των τροχών, καθώς αυξάνεται όταν αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο των τροχών.
- Το υλικό των επισώτρων των τροχών, την επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών και γενικότερα την κατάσταση επαφής τροχών και σιδηροτροχιάς.
- Τις κλιματολογικές συνθήκες. Ο συντελεστής πρόσφυσης μειώνεται σημαντικά με την υγρασία, την ομίχλη, τις πρώτες σταγόνες βροχής, με την πτώση φύλλων στις γραμμές και τη λίπανση των σιδηροτροχιών.
- Την περιοχή. Έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές μεταξύ βιομηχανικών και αγροτικών περιοχών διαφέρουν, καθώς επικάθονται χημικά στοιχεία πάνω στις σιδηροτροχιές.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο υπολογισμός του συντελεστή πρόσφυσης είναι πολύπλοκος, ενώ υπεισέρχονται και πολλές αβεβαιότητες με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολος ο υπολογισμός του και κατά συνέπεια και ο υπολογισμός της δύναμης πρόσφυσης. Για αυτό συνήθως υπολογίζεται είτε πειραματικά είτε με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων όπως των Curtius – Kniffler. Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο, ο οποίος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ταχύτητες μέχρι 160 km/h και ηλεκτροκίνητες μηχανές, ο συντελεστής πρόσφυσης είναι:

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

όπου u σε m/s.

Βέβαια σε συνθήκες παγετού ο συντελεστής πρόσφυσης μπορεί να πέσει και κάτω από 0,1 ανάλογα βέβαια και με την ταχύτητα (Λυμπέρης, 2010).

Εκτός από τη δύναμη πρόσφυσης του συρμού, αυτό που πρέπει να υπολογιστεί είναι και οι αντιστάσεις που θα πρέπει να υπερνικήσει ο συρμός. Οι αντιστάσεις είναι ουσιαστικά τριών κατηγοριών:

- Αντίσταση κύλισης (ή κίνησης)
- Αντίσταση γραμμής και
- Αντίσταση επιτάχυνσης (αδρανειακή αντίσταση)

Η αντίσταση κύλισης ορίζεται σαν την αντίσταση που προβάλλεται κατά την ευθύγραμμη κίνηση ενός συρμού με σταθερή ταχύτητα σε οριζόντιο έδαφος και οφείλεται κυρίως στην τριβή και την αεροδυναμική. Γενικά εκφράζεται από σχέσεις της μορφής: $a + \beta v + \gamma v^2$, όπου ο πρώτος όρος εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού και παρουσιάζει τη βασική αντίσταση κύλισης του συρμού. Ο δεύτερος όρος εκφράζει τις μηχανικές αντιστάσεις που εξαρτώνται από την ταχύτητα, όπως είναι η περιστροφή των αξόνων, η μετάδοση της κίνησης κ.λπ., ενώ ο τρίτος όρος αφορά στις αεροδυναμικές αντιστάσεις. Όπως είναι αντιληπτό, εφόσον ο τρίτος όρος εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας, για μεγάλες ταχύτητες (π.χ. 200km/h) η αεροδυναμική ταχύτητα είναι το μεγαλύτερο ποσοστό της αντίστασης κύλισης. Από την άλλη, όμως, για συμβατικές ταχύτητες και οι τρεις όροι είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της αντίστασης κύλισης μέσω του υπολογισμού των επιμέρους τριών όρων, απαιτείται ακριβής γνώση του τροχαίου υλικού για τον προσδιορισμό των συντελεστών, ενώ ειδικά για τον τρίτο όρο οι λεπτομέρειες που υπεισέρχονται είναι πολλές (μορφή μετωπικής και οπίσθιας επιφάνειας, εμβαδό μετωπικής επιφάνειας, κ.τ.λ.). Επειδή μια αναλυτικότερη παρουσίαση δεν είναι σκοπός της εργασίας αυτής, θα παρουσιαστούν μόνο κάποιοι εμπειρικοί τύποι, οι οποίοι και θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς. Έτσι για την περίπτωση μηχανών έλξης έχουμε:

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

όπου:

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

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

V η ταχύτητα κίνησης του συρμού (km/h)

Όσον αφορά στο ελκόμενο τροχαίο υλικό θα γίνει μια περαιτέρω διαφοροποίηση ανάμεσα σε επιβατικά και εμπορευματικά. Έτσι, όσον αφορά στα επιβατικά θα αναφερθεί ο προσεγγιστικός τύπος του Sauthoff (Καρλαύτης και Λυμπέρης, 2009, σ. 440):

$$w_{EAK,EP} = 1,9 + 0,0024 \cdot V + 0,048 \cdot \frac{n + 2,7}{m_{EAK}} \cdot A \cdot \left(\frac{V + 15}{10} \right)^2 [\%],$$

όπου

$A = 1,45 \text{ m}^2$, η μετωπική επιφάνεια επιρροής της αντίστασης αέρα

M_{EAK} η μάζα των ελκομένων οχημάτων (t)

n το πλήθος των ελκομένων οχημάτων

V η ταχύτητα του συρμού σε km/h.

Όσον αφορά στα εμπορευματικά, ένας προτεινόμενος τύπος υπολογισμού είναι του Strahl (Profillidis, 2006):

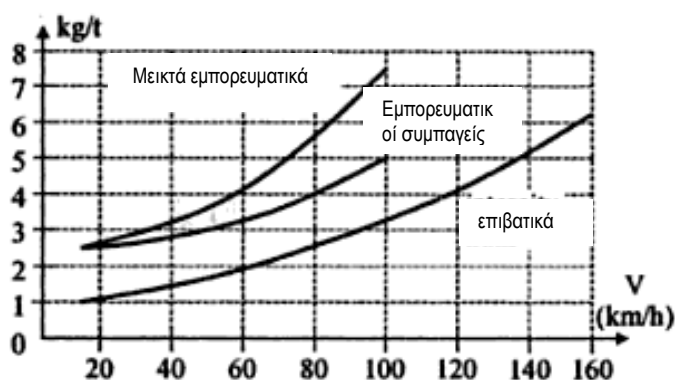
$$w_{EAK,EM\Pi} = \frac{1}{10} \cdot \left[25 + k \cdot \left(\frac{V + \Delta V}{10} \right)^2 \right] [\%],$$

όπου

V η ταχύτητα σε km/m

$\Delta V = 15 \text{ km/h}$

$k = 0,5$ για μεικτής μορφής οχήματα (ανοικτά και κλειστά) και $0,25$ για τα συμπαγή (block trains)



Εικόνα 8: Ειδική αντίσταση κύλισης σύμφωνα με τους γερμανικούς σιδηροδρόμους (στο: Profillidis, 2006)

Χάριν παραδείγματος, μπορεί να θεωρηθεί ένας εμπορευματικός συρμός που μεταφέρει εμπορευματοκιβώτια (άρα $k = 0,25$). Μια τυπική ταχύτητα κίνησης των εμπορευματικών συρμών είναι ίση με 80 km/h , επομένως η αντίσταση κύλισης θα ήταν:

$$w_{ΕΛΚ,ΕΜΠ} = \frac{1}{10} \cdot \left[25 + 0,25 \cdot \left(\frac{80+15}{10} \right)^2 \right] = 4,7 \text{ ‰} ,$$

Ενώ για μεικτής μορφής οχήματα θα ήταν:

$$w_{ΕΛΚ,ΕΜΠ} = \frac{1}{10} \cdot \left[25 + 0,5 \cdot \left(\frac{80+15}{10} \right)^2 \right] = 7 \text{ ‰} .$$

Για την πληρότητα του θέματος, να αναφερθεί ότι, όταν ο συρμός επιταχύνει, προκαλεί τη δημιουργία μιας αδρανειακής δύναμης¹³ αντίθετης στη φορά κίνησής του. Αυτή ονομάζεται αντίσταση επιτάχυνσης και είναι ουσιαστικά η επιπλέον δύναμη που απαιτείται για τη μεταβολή της ταχύτητας του συρμού. Είναι σημαντική, όταν η επιτάχυνση του συρμού είναι μεγάλη, δηλαδή στους επιβατικούς ηλεκτροκίνητους συρμούς και ισούται με:

$$w_{\alpha} = 1000 \cdot \frac{a}{g} \cdot \rho \quad [\text{‰}],$$

όπου:

α η επιτάχυνση του συρμού

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ συντελεστής των περιστρεφόμενων μαζών, συνήθως = 1,06

Επομένως, αν ληφθεί υπόψη ότι η επιτάχυνση ενός εμπορευματικού συρμού κυμαίνεται στα 0,2 – 0,4 m/s² (Profillidis, 2006, p. 365), η ειδική αντίσταση επιτάχυνσης θα είναι:

$$w_{\alpha} = 1000 \cdot \frac{0,3}{9,81} \cdot 1,06 = 32,4 \text{ ‰}$$

Η αντίσταση κύλισης, όπως ορίστηκε σε ευθύγραμμη γραμμή επί οριζοντίου επιπέδου. Κατά την κίνηση του συρμού, όμως σε οριζοντιογραφικές καμπύλες ή ανωφέρειες, ασκούνται στο συρμό πρόσθετες δυνάμεις αντίθετες στην κίνηση του, οι οποίες ονομάζονται αντιστάσεις γραμμής, καθώς οφείλονται στα χαρακτηριστικά της γραμμής και όχι του συρμού.

Η αντίσταση που προβάλλεται στο συρμό όταν κινείται σε ανωφέρεια ονομάζεται αντίσταση κλίσης και εξ ορισμού είναι ίση με την προβολή του βάρους του συρμού στο κεκλιμένο επίπεδο, δηλαδή

$$W_i = G \cdot \sin \varphi$$

όπου W_i η αντίσταση κλίσης (N)

¹³ Αδρανειακή δύναμη ή δύναμη D' Alembert ή ψευδοδύναμη (στα αγγλικά συναντούνται οι όροι fictitious force, inertial force, pseudoforce και D' Alembert force) είναι μία πρόσθετη δύναμη που δεν προκαλείται από κάποιο φυσικό αίτιο, αλλά από την επιτάχυνση ενός μη αδρανειακού συστήματος.

φ η γωνία που σχηματίζει το κεκλιμένο επίπεδο

G το βάρος του συρμού (N)

Καθώς οι μέγιστες κλίσεις που συναντούνται στο σιδηρόδρομο είναι μικρές (της τάξης του 25-30‰), μπορεί στον τύπο αυτόν να αντικατασταθεί το ημίτονο της γωνίας με την εφαπτομένη της γωνίας, αφού είναι περίπου ίσα μεταξύ τους. Έτσι, εφόσον η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει το κεκλιμένο επίπεδο είναι η κλίση του επιπέδου αυτού, ο τύπος μπορεί να γίνει:

$$W_i = G \cdot i$$

όπου W_i η αντίσταση κλίσης (N)

G το βάρος του συρμού (N)

i η κλίση της γραμμής

Είναι σαφές πως στις κατωφέρεις η δύναμη αυτή, δηλαδή η προβολή του βάρους του συρμού στο κεκλιμένο επίπεδο θα βοηθάει την κίνηση του συρμού, εφόσον θα είναι ομόφορη της ελκτικής δύναμης της μηχανής έλξης κι επομένως θα πρέπει να αφαιρείται από τις υπόλοιπες αντιστάσεις του συρμού.

Για παράδειγμα, η μέγιστη κλίση για το τμήμα της σιδηροδρομικής γραμμής Αθήνα – Θεσσαλονίκη είναι $i = 22 \text{ ‰}$. Επομένως, η ειδική αντίσταση κλίσης θα είναι:

$$w_i = 22 \text{ ‰}$$

Τέλος, όταν ο συρμός εγγράφεται σε μια καμπύλη δημιουργούνται πρόσθετες τριβές, οι οποίες αποτελούν την αντίσταση καμπύλης (W_R). Και γι' αυτή την περίπτωση έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους διάφορους σιδηροδρομικούς οργανισμούς. Ενδεικτικά, αναφέρεται ο τύπος του Röckl, σύμφωνα με τον οποίο η ειδική αντίσταση καμπύλης w_k είναι:

$$w_k = \begin{cases} \frac{650}{R - 55}, & \text{για } R \geq 300 \\ \frac{500}{R - 30}, & \text{για } R < 300 \end{cases},$$

όπου R η ακτίνα της καμπύλης σε μέτρα.

Για παράδειγμα, η μέγιστη ειδική αντίσταση καμπύλης που συναντάται στο τμήμα Αθήνα – Θεσσαλονίκη είναι:

$$w_k = \frac{500}{270 - 30} = 2,08 \text{ ‰}$$

3.3.2.2 Είδη μηχανών έλξης

Οι μηχανές έλξης (locomotives) είναι αυτές που θα προσδώσουν στο συρμό την απαιτούμενη ισχύ, ώστε να υπερκεραστούν όλες οι εμφανιζόμενες αντιστάσεις. Τα κρίσιμα χαρακτηριστικά μιας μηχανής έλξης αφορούν στη μέγιστη ισχύ της και την ελκτική της δύναμη, για τον καθορισμό της οποίας ουσιαστικό ρόλο παίζει η πρόσφυση μεταξύ συρμού και σιδηροτροχιάς.

Η μηχανή έλξης μπορεί είτε να παράγει η ίδια την ισχύ της (ντιζελομηχανή ή, παλαιότερα, ατμομηχανή), είτε να την λαμβάνει από εξωτερική πηγή (ηλεκτρομηχανές). Οι ντιζελομηχανές παράγουν την ισχύ τους μέσω ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης (diesel) (με κάποιο βαθμό απόδοσης). Η μετάδοση της κίνησης στη συνέχεια μπορεί να γίνει με τρεις, κυρίως, τρόπους. Πρώτον, μηχανικά, χρησιμοποιώντας συμπλέκτη και κιβώτιο ταχυτήτων. Δεύτερον, υδραυλικά, καθώς ο κινητήρας προκαλεί τη λειτουργία στροβίλου με τη βοήθεια λαδιού και τρίτον ηλεκτρικά. Με αυτόν τον τρόπο, ο κινητήρας θέτει σε λειτουργία μία ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί τους ηλεκτροκινητήρες που είναι συνδεδεμένοι με τους κινητήριους άξονες. Ο τρόπος αυτός αποτελεί τον πλέον συνηθισμένο.



Εικόνα 9: Ντιζελομηχανή ADtranz των ελληνικών σιδηροδρόμων (πηγή: www.amnizia.org)

Οι ηλεκτρομηχανές λαμβάνουν κατευθείαν ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω κατάλληλης υποδομής (τρίτη τροχιά ή παντογράφος) και τη μετασχηματίζουν στη μορφή που απαιτούν οι ηλεκτροκινητήρες που είναι συνδεδεμένοι με τους κινητήριους άξονες. Το γεγονός ότι οι ηλεκτρομηχανές λαμβάνουν όση ισχύ χρειάζονται, χωρίς να περιορίζονται από την ικανότητά τους (όπως οι ντιζελομηχανές) τις καθιστά καλύτερες στις περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ισχύς (υψηλές ταχύτητες, υπέρβαση κλίσεων, απαίτηση για μεγάλες επιταχύνσεις).

Οι μηχανές έλξης διακρίνονται επίσης με βάση τη σύνδεση των τροχών τους. Η επίσημη ταξινόμηση γίνεται με βάση την UIC (φύλλο 650). Σύμφωνα με αυτό συμβολίζονται με:

- Κεφαλαίο λατινικό γράμμα, οι κινητήριοι άξονες, με το γράμμα να δηλώνει τον αριθμό των αξόνων, δηλαδή Α ένας κινητήριος άξονας, Β δύο, κ.ο.κ..
- Αριθμό, οι άξονες που δεν είναι κινητήριοι, αλλά απλά μεταβιβάζουν το βάρος τους, με 1 για έναν άξονα κ.τ.λ..
- «'», οι άξονες που είναι συνδεδεμένοι σε ένα φορείο (bogie).
- «ο», οι άξονες, οι οποίοι διαθέτουν ξεχωριστούς κινητήρες.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, η σύνδεση Co'Co', που αποτελεί και τον πιο συνηθισμένο τρόπο σύνδεσης εξαξονικών μηχανών (ο αντίστοιχος Bo'Bo' για τις τετραξονικές (π.χ. εικόνα 9), είναι επίσης ο συνηθέστερος), σημαίνει ότι έχουμε δύο φορές (δηλώνεται με την επανάληψη) από τρεις άξονες (C) συνδεδεμένους σε φορείο (') με τον καθένα να διαθέτει ξεχωριστό κινητήρα (ο).

3.3.2.3 Οι εμπορευματικές μηχανές έλξης

Για τις εμπορευματικές μηχανές έλξης το βασικότερο χαρακτηριστικό αποτελεί η μέγιστη ελκτική δύναμη, η οποία καθορίζεται από την πρόσφυση της μηχανής έλξης, η οποία εξαρτάται από το βάρος των κινητήριων αξόνων της μηχανής και το συντελεστή τριβής μεταξύ συρμού και σιδηροτροχιάς (πρόσφυση). Το χαρακτηριστικό αυτό, θα καθορίσει το μέγιστο φορτίο που μπορεί να έλξει μια μηχανή έλξης (η δυσμενέστερη περίπτωση αφορά στην εκκίνηση του συρμού στη μεγαλύτερη ανωφέρεια της διαδρομής). Η ισχύς, αντίθετα, δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο για έναν εμπορευματικό συρμό, ο οποίος μπορεί να επιβραδύνει σε μια ανωφέρεια για να ξεπεράσει τις αντιστάσεις. Επομένως, για τους εμπορευματικούς συρμούς θα προτιμηθούν βαριές φορτάμαξες, συνήθως εξαξονικές (Co'Co'), ώστε να έχουν μεγάλη δύναμη πρόσφυσης, προκειμένου να υπερκεραστούν οι αντιστάσεις εκκίνησης και κλίσης, που είναι και οι καθοριστικές.

Οι μηχανές αυτές είναι συνήθως ντιζελοκίνητες και το βάρος τους είναι στα όρια αντοχής της γραμμής. Δηλαδή, μια εξαξονική ζυγίζει συνήθως 120 τόνους, δηλαδή το φορτίο ανά άξονα είναι $\frac{120}{6} = 20$ τόνοι ανά άξονα (όσο και η αντοχή της γραμμής).

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται πλέον, κυρίως δύο ντιζελομηχανές της εταιρείας MLW, σειρές 450 και 500 (εικόνες 8 και 9 αντίστοιχα) για τις εμπορευματικές μεταφορές, συνολικού βάρους 120 τόνων (εξαξονικές).



Εικόνα 10: Ντιζελομηχανή της σειράς 450 με ισχύ 1985 kW (πηγή: www.amnizia.org)



Εικόνα 11: Ντιζελομηχανή της σειράς 500 με ισχύ 2600 kW (πηγή: www.amnizia.org)

Επίσης, όποτε είναι δυνατόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η τετραξονική ηλεκτράμαξα της Siemens “Hellas Sprinter” με ωριαία ισχύ τα 5000 kW (εικόνα 12).



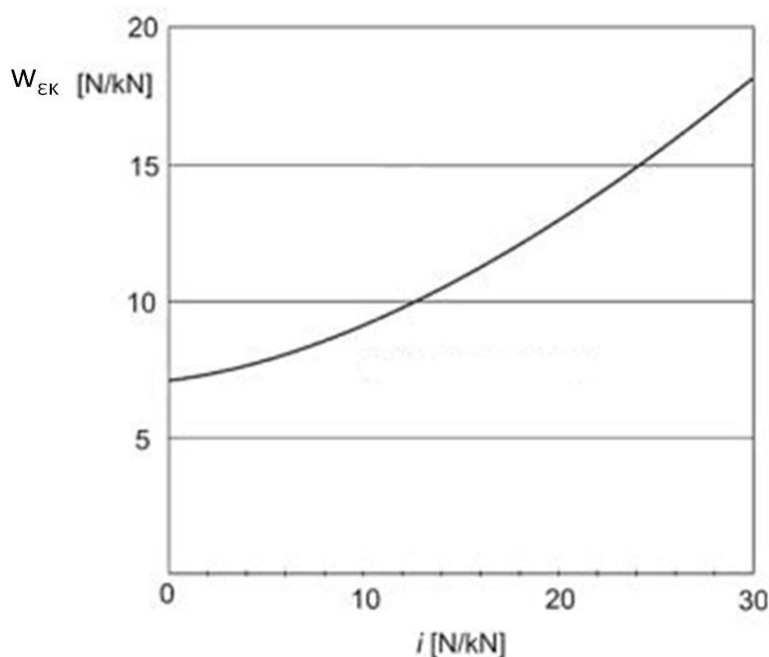
Εικόνα 12: Η ηλεκτράμαξα Hellas Sprinter σε εμπορευματική μεταφορά (πηγή: www.amnizia.org)

Συνοπτικά, τα χαρακτηριστικά των μηχανών έλξης που χρησιμοποιούνται για τις εμπορευματικές μεταφορές από τους ελληνικούς σιδηροδρόμους είναι:

Πίνακας 3:Χαρακτηριστικά μηχανών έλξης

Μηχανές έλξης	Μάζα (τόνους)	Μέγιστη ελκτική δύναμη (πρόσφυση με $\mu = 0,35$) (kN)	Μέγιστη ελκτική δύναμη (πρόσφυση με $\mu = 0,15$) (kN)	Ισχύς (kW)
MLW 450	120	412	177	1985
MLW 500	120	412	177	2600
Hellas Sprinter	80	275	118	5000

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δύναμη πρόσφυσης θα καθορίσει το μέγιστο ελκόμενο φορτίο. Αυτό θα υπολογιστεί για τη δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή για την εκκίνηση του συρμού σε ανωφέρεια. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αντιστάσεις που πρέπει να υπερνικηθούν είναι η μέγιστη αντίσταση κλίσης και η αντίσταση εκκίνησης. Η αντίσταση εκκίνησης προκύπτει από την αντίσταση κύλισης για $V = 0$ ($w_0 = 2,5\%$). Επειδή όμως, η αντίσταση κύλισης ορίζεται επί οριζοντίου επιπέδου, η αντίσταση εκκίνησης σε ανωφέρεια θα είναι αυξημένη, και θα υπολογιστεί από το σχήμα 1.



Σχήμα 1: Υπολογισμός αντίστασης εκκίνησης για δεδομένη κλίση (Pachl, 2011)

Για τη μέγιστη κλίση που παρατηρείται στο τμήμα Αθήνα – Θεσσαλονίκη η υπολογισθείσα ειδική αντίσταση εκκίνησης προκύπτει, από το σχήμα 1, ίση με 13,5‰. Επίσης, η ειδική αντίσταση κλίσης είναι $w_i = 22\%$. Το οριακό (μέγιστο) φορτίο, θα προκύψει για $\Pi = \Sigma W$. Λύνοντας ως προς το βάρος των ελκόμενων οχημάτων θα προκύψει η σχέση:

$$G_{EAK} = \frac{\Pi - w_i \cdot G_{ME\Lambda}}{w_o + w_i} [\%] \quad , \acute{o}που$$

$G_{ME\Lambda}$ το βάρος της μηχανής έλξη σε kN

Π η πρόσφυσης της μηχανής έλξης σε kN

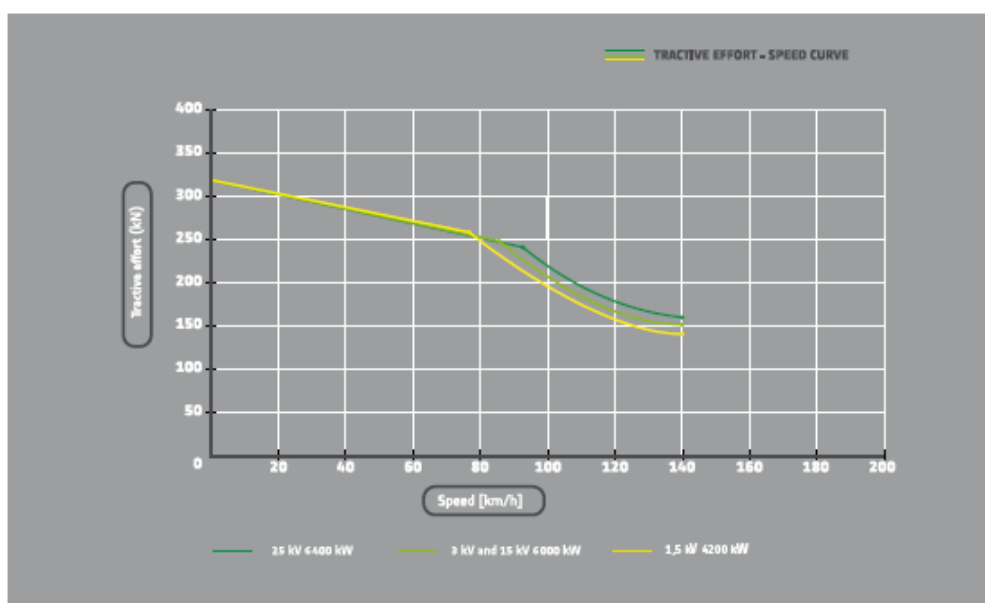
G_{EAK} το βάρος των ελκομένων οχημάτων σε N

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες θα παίξουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του μέγιστου φορτίου μέσω του συντελεστή πρόσφυσης. Στον παρακάτω πίνακα (3) παρουσιάζεται συνοπτικά το μέγιστο φορτίο που μπορεί να έλξει κάθε μία από τις τρεις μηχανές έλξης που παρουσιάστηκαν ανωτέρω για δύο ενδεικτικές περιπτώσεις του συντελεστή τριβής.

Πίνακας 4: Μέγιστο φορτίο ανά μηχανή έλξης

Μηχανές έλξης	Μέγιστο φορτίο (σε τόνους)	
	Καλές περιβαλλοντικές συνθήκες ($\mu=0,35$)	Κακές περιβαλλοντικές συνθήκες ($\mu=0,15$)
MLW 450	1109	433
MLW 500	1109	433
Hellas Sprinter	739	288

Η MLW 450 και η MLW 500 διαφέρουν στη ισχύ που μπορούν να προσφέρουν. Η ισχύς συνδέεται με την ταχύτητα και τη δύναμη μέσω της σχέσης $P = F \cdot v$. Μέσω της ισχύος, επομένως, θα καθοριστεί η ταχύτητα που θα μπορεί να κινηθεί ο συρμός για κάθε τμήμα της γραμμής. Για κάθε μηχανή, αυτή η σχέση παρουσιάζεται στο διάγραμμα έλξης συρμού. Ένα παράδειγμα διαγράμματος έλξης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 13: Διάγραμμα έλξης (πηγή: www.alstom.com/transport)

3.3.3 Το ελκόμενο τροχαίο υλικό

3.3.3.1 Γενικά

Η επιλογή του κατάλληλου τροχαίου υλικού για την πραγματοποίηση μιας σιδηροδρομικής μεταφοράς αποτελεί σημαντικό παράγοντα τόσο για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της μεταφοράς, όσο και για την καλύτερη αξιοποίηση του τροχαίου υλικού. Η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τροχαίου υλικού είναι σαφώς πιο κρίσιμη στις εμπορευματικές μεταφορές, όπου οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά μιας μεταφοράς μπορεί να αλλάζουν κάθε φορά. Αντίθετα, στις επιβατικές γίνεται εξαρχής η επιλογή του τροχαίου υλικού που θα εξυπηρετήσει ένα συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής με βάση τα χαρακτηριστικά τόσο της γραμμής (π.χ. δυνατότητα ηλεκτροκίνησης), όσο και της προσφερόμενης υπηρεσίας (π.χ. υπεραστική, προαστιακή).

3.3.3.2 Εμπορευματικές φορτάμαξες

Κατά τη σύνθεση ενός εμπορευματικού συρμού, επομένως, κρίνεται σκόπιμο, να επιλέγεται κάθε φορά η καλύτερη φορτάμαξα που ικανοποιεί τις συνθήκες και τις απαιτήσεις τις μεταφοράς. Στην περίπτωση συνδυασμού διαφορετικών κατηγοριών φορταμαξών στον ίδιο συρμό πρέπει να ελέγχεται και η δυνατότητα ασφαλούς συνδυασμού τους, καθώς πρέπει να αποφεύγεται ο συνδυασμός φορταμαξών με διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ τους (π.χ. να αποφεύγεται ο συνδυασμός διαξονικών φορταμαξών με αυτές με φορεία) (ΟΣΕ, 2009 σ. 80).

Οι κατηγορίες των εμπορευματικών φορταμαξών είναι συγκεκριμένες κι έχουν τυποποιηθεί και κωδικοποιηθεί από την UIC (Διεθνής Ένωση Σιδηροδρόμων), όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (5). Σε κάθε κατηγορία αντιστοιχούν αρκετοί τύποι σιδηροδρομικών οχημάτων με διάφορα χαρακτηριστικά το καθένα. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν είτε από τις οδηγίες της UIC στα αντίστοιχα φύλλα της (571-1, 571-2, 571-3, 571-4), είτε από διαφοροποιήσεις στις οποίες έχουν προβεί οι κατασκευές για να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Ενδεικτικά, στο παράρτημα Α παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τετραξονικών φορταμαξών τυπικής κατασκευής, όπως περιγράφονται στα αντίστοιχα φύλλα της UIC (571-2).

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά συντάχθηκε ο πίνακας 6 που αφορά στα πιθανά κριτήρια για την καλύτερη επιλογή φορτάμαξας για μια σιδηροδρομική μεταφορά.

Πίνακας 5: Κατηγορίες φορταμαξών κατά UIC

Κατηγορία φορταμαξών με κωδικοποίηση κατά UIC		Χρησιμοποιούμενοι όροι στην ελληνική βιβλιογραφία			Χρησιμοποιούμενος όρος
		Επίσημη μετάφραση ΕΕ	ΟΣΕ	Πυργίδης (2009, σσ. 514-520)	
E	Ordinary open high-sided wagon	Ανοιχτό όχημα με υψηλά πλευρικά τοιχώματα	Βαγόνι με υψηλές παρειές ή ανοιχτή ανατρεπόμενη φορτάμαξα υψηλών παρειών	Όχημα χωρίς στέγη με υψηλές παρειές κοινής (ή γενικής) χρήσης	Ανοιχτή φορτάμαξα με υψηλά πλευρικά τοιχώματα, τυπικής κατασκευής
F	Special open high-sided wagon			Όχημα χωρίς στέγη με υψηλές παρειές ειδικής χρήσης	Ανοιχτή φορτάμαξα με υψηλά πλευρικά τοιχώματα, ειδικής κατασκευής
G	Ordinary covered wagon	Σκεπαστό βαγόνι	Κλειστό βαγόνι	Κλειστό όχημα ή όχημα με στέγη κοινής (ή γενικής) χρήσης	Κλειστή φορτάμαξα, τυπικής κατασκευής
H	Special covered wagon	Σκεπαστό βαγόνι	Κλειστό βαγόνι	Κλειστό όχημα ή όχημα με στέγη	Κλειστή φορτάμαξα, ειδικής κατασκευής
I	Temperature-controlled wagons		Βαγόνι ψυγείο	Ψυγείο όχημα	Φορτάμαξα με ελεγχόμενη θερμοκρασία (περιλαμβάνει και την φορτάμαξα με μονωμένα τοιχώματα)
K	Ordinary flat wagon with separate axles	Επίπεδο όχημα	Βαγόνι πλατφόρμας ή επίπεδη φορτάμαξα	Επίπεδο όχημα ή όχημα χωρίς στέγη και χωρίς παρειές κοινής (ή γενικής) χρήσης	Επίπεδη, διαξονική φορτάμαξα τυπικής κατασκευής
L	Special flat wagon with separate axles		Βαγόνι πλατφόρμα	Επίπεδο όχημα ή όχημα χωρίς στέγη και χωρίς παρειές ειδικής χρήσης	Επίπεδη φορτάμαξα με ανεξάρτητους άξονες, ειδικής κατασκευής
O	Open multi-purpose wagon (open high-sided/flat composite wagon)	Ανοιχτό όχημα με σύνθετα επίπεδα / υψηλά τοιχώματα	Βαγόνι πλατφόρμα ή επίπεδη φορτάμαξα χαμηλών παρειών	Όχημα χωρίς στέγη με χαμηλές παρειές	Ανοιχτή φορτάμαξα χαμηλών παρειών
R	Ordinary flat wagon with bogies	Επίπεδο όχημα με ή χωρίς αναδιπλούμενα πλευρικά τοιχώματα	Βαγόνι πλατφόρμα ή επίπεδη φορτάμαξα	Επίπεδο όχημα ή όχημα χωρίς στέγη και χωρίς παρειές κοινής (ή γενικής) χρήσης	Επίπεδη φορτάμαξα με φορεία, τυπικής κατασκευής
S*	Special flat wagon with bogies	Επίπεδο όχημα	Βαγόνι πλατφόρμα	Επίπεδο όχημα ή όχημα χωρίς στέγη και χωρίς παρειές ειδικής χρήσης	Επίπεδη φορτάμαξα με φορεία, ειδικής κατασκευής
T	Goods wagon with opening roof	Όχημα με οροφή που ανοίγει	Βαγόνι με υψηλές παρειές		Φορτάμαξα με ανοιγόμενη στέγη
U	Special wagons		Ειδικό βαγόνι	Όχημα ειδικής χρήσης	Φορτάμαξα ειδικής χρήσης
Z	Tank wagon		Βαγόνι βυτίο ή βυτιοφόρα φορτάμαξα	Βυτιοφόρο όχημα	Βυτιοφόρα φορτάμαξα

* Η φορτάμαξες κατηγορίας S (UIC 571-4) είναι ειδικά κατασκευασμένες για τη χρησιμοποίησή τους σε συνδυασμένες μεταφορές και μπορεί να είναι, πέραν της κλασικής μορφής, βαθυδάπεδες (για τη μείωση του περιτυπώματος) ή αρθρωτές (για την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου).

Πίνακας 6: Κριτήρια επιλογής φορταμαξών

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Αριθμός αξόνων
	Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων
	Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως
	Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως
	Ύψος δαπέδου από κεφαλή σιδηροτροχιάς
	Ύψος μετωπικών παρειών
	Μέγιστο ύψος φορτάμαξας
	Μέγιστο ανεμπόδιστο ύψος
	Ωφέλιμη επιφάνεια φορτώσεως
	Ωφέλιμο φορτίο
	Ωφέλιμος όγκος (m ³)
	Απόβαρο
	Μέγιστη ταχύτητα οχήματος
	Απόσταση μεταξύ των αξόνων των φορείων
	Αντοχή αγκίστρου-κορσέ
Λειτουργικά χαρακτηριστικά	Στοιχεία φορτώσεως-ταχύτητας
	Δυνατότητα ανατροπής κιβωτίου
	Ύπαρξη πλευρικών θυρών
	Ύπαρξη πτυσσόμενων μετωπικών παρειών ή άλλων μέσων που επιτρέπουν την κίνηση των οχημάτων
	Δυνατότητα εισόδου περονοφόρου
	Ύπαρξη θέρμανσης
	Δυνατότητα αερισμού
	Ύπαρξη ανεξάρτητων χωρισμάτων (εντός βαγονιού)
Περιορισμοί	Ύπαρξη καταπακτών και αντίστοιχου εξοπλισμού φόρτωσης (για χύδην εμπορεύματα)
	Απαίτηση καθαρισμού λόγω προηγούμενης μεταφοράς
	Διαθεσιμότητα

Για παράδειγμα, εάν το φορτίο μας αποτελούνταν από εμπορευματοκιβώτια, ορισμένες φορτάμαξες που θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν αυτήν την απαίτηση θα ήταν αυτές του πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά φορταμαξών κατάλληλων για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων

Χαρακτηριστικά φορταμαξών				
	Αριθμός αξόνων	Ωφέλιμο μήκος (m)	Ύψος δαπέδου από κεφαλή σιδηροτροχιάς (m)	Απόβαρο (kg) Σχόλια
Επίπεδη τετραξονική φορτάμαξα τύπου Rgss	4	18520	1,235	23500
Επίπεδη διαξονική φορτάμαξα τύπου Kgss	2	12500	1,235	13400
Επίπεδη τετραξονική φορτάμαξα τύπου Sgnss	4	18400	1,155	20000
Επίπεδη οχταξονική φορτάμαξα τύπου Sffggmrss	4	16105	0,825	19500 *
Επίπεδη εξαξονική φορτάμαξα τύπου Sggmrs	3	13820	1,155	14500 *
* Η φορτάμαξες αυτές είναι διπλές (αρθρωτές) και τα μεγέθη τους έχουν προκύψει από αναγωγή για λόγους σύγκρισης. Τα ακριβή τους χαρακτηριστικά είναι:				
Επίπεδη οχταξονική φορτάμαξα τύπου Sffggmrss	8	2 x 16105	0,825	39000
Επίπεδη εξαξονική φορτάμαξα τύπου Sggmrs	6	2 x 13820	1,155	29000

Η τελική επιλογή της καταλληλότερης θα εξαρτιόταν από τα χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων.

3.3.4 Άλλα καθοριστικά στοιχεία του σιδηροδρομικού συρμού

3.3.4.1 Η ζεύξη



Εικόνα 14: Διάταξη ζεύξης μιας εμπορευματικής φορτάμαξας

Η σύνδεση των σιδηροδρομικών οχημάτων, μεταξύ τους, γίνεται με ειδικές διατάξεις ζεύξης που αποτελούνται από το άγκιστρο και τον κορσέ. Όπως είναι προφανές, η διάταξη ζεύξης πρέπει να έχει επαρκή αντοχή προκειμένου να παρέχει ασφαλή σύνδεση μεταξύ των οχημάτων και να μεταβιβάζει με ασφάλεια τα φορτία που αναπτύσσονται. Η μέγιστη ένταση που αναπτύσσεται στο άγκιστρο και τον κορσέ οφείλεται στην ελκτική δύναμη των μηχανών έλξης (μία ή περισσότερες) κι επομένως η αντοχή τους θα είναι το στοιχείο αυτό που θα καθορίσει τη μέγιστη, συνολική δυνατή ελκτική δύναμη του συρμού. Θα καθορίσει, δηλαδή, το μέγιστο αριθμό μηχανών έλξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την έλξη ενός συρμού. Στον παρακάτω πίνακα (4) παρουσιάζεται συνοπτικά ο μέγιστος αριθμός μηχανών έλξης των ελληνικών σιδηροδρόμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα και με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η αντοχή αγκίστρου των φορταμαξών των ελληνικών σιδηροδρόμων, όπως αναγράφεται στα χαρακτηριστικά τους, είναι 1000 kN, ενώ του κορσέ 850 kN. Λαμβάνεται, επομένως, ότι η μέγιστη αντοχή των διατάξεων ζεύξης ανέρχεται σε 850 kN.

Πίνακας 8: Μέγιστος αριθμός μηχανών έλξης

Μηχανές έλξης	Μέγιστος αριθμός μηχανών έλξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν	
	Καλές περιβαλλοντικές συνθήκες ($\mu=0,35$)	Κακές περιβαλλοντικές συνθήκες ($\mu=0,15$)
MLW 450	2	4
MLW 500	2	4
Hellas Sprinter	3	7

Συνδυάζοντας τους πίνακες 3 και 4, με το μέγιστο φορτίο που μπορεί να έλξει κάθε μηχανή έλξης και το μέγιστο αριθμό μηχανών έλξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καταλήγουμε στο συνολικό μέγιστο δυνατό φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί, το οποίο ανέρχεται περίπου στους 2200 τόνους.

3.3.4.2 Η πέδηση

Η πέδηση αποτελεί κρίσιμο χαρακτηριστικό για τη λειτουργία του συρμού, καθώς διασφαλίζει την έγκαιρη στάση του συρμού (είτε σε συνήθειες είτε σε έκτακτες συνθήκες), καθώς επίσης και την ασφαλή πορεία του στις κατωφέρειες. Ο τύπος της πέδησης που χρησιμοποιείται είναι η αυτόματη πέδη πεπιεσμένου αέρα (ταχείας ή βραδείας ενέργειας) και η χειροτροχοπέδη, ενώ τα κινητήρια οχήματα διαθέτουν και πρόσθετη πέδη, όπως είναι η δυναμική (ΟΣΕ, 2009).

Ο τρόπος λειτουργίας της πέδησης (μέσω αγωγού πεπιεσμένου αέρα) θα καθορίσει το μέγιστο μήκος του συρμού (μέγιστος αριθμός αξόνων) σε συνδυασμό και με την ταχύτητά του. Όπως καθορίζεται και στο «Γενικό Κανονισμό Κινήσεως» του ΟΣΕ (2009, σ. 76), ο μέγιστος αριθμός αξόνων ενός εμπορευματικού συρμού ανέρχεται στους 120 άξονες με μέγιστη ταχύτητα τα 80 km/h. Στις διεθνείς εμπορικές αμαξοστοιχίες επιτρέπεται ταχύτητα έως 85 km/h, ενώ όταν οι φορτάμαξες είναι κατηγορίας S ή SS¹⁴ ως μέγιστος αριθμός αξόνων ορίζονται οι 100 άξονες με μέγιστη ταχύτητα που δεν θα υπερβαίνει, όμως, τα 100 km/h.

Τέλος, να αναφερθεί ότι πέδηση δεν εφαρμόζεται σε όλα τα οχήματα του συρμού. Μάλιστα, σε ορισμένα απαγορεύεται κιόλας, όπως είναι τα οχήματα που μεταφέρουν εκρηκτικά ή εύφλεκτα υλικά. Γι' αυτό το λόγο καθορίζεται το ελάχιστο απαιτούμενο πεδούμενο βάρος που απαιτείται για την ομαλή κίνηση του συρμού και η ομοιόμορφη κατανομή του κατά μήκος του συρμού (ΟΣΕ, 2009, σσ. 84-93).

¹⁴ Η κατηγορία S χαρακτηρίζει μία φορτάμαξα και δηλώνει την ικανότητά της να κινηθεί με ταχύτητα έως 100 km/h. Αντίστοιχα η SS δηλώνει την ικανότητα μιας φορτάμαξας να κινηθεί με 120 km/h.

3.4 Φθορές στους τροχούς και τη σιδηροδρομική γραμμή

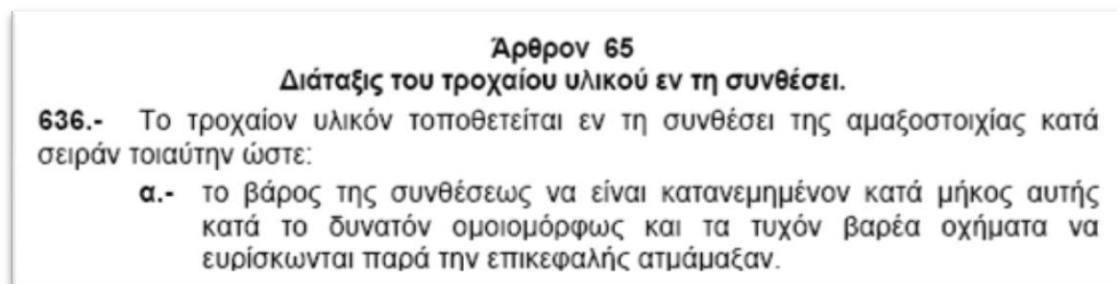
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σιδηροδρομική γραμμή αποτελεί τον φορέα που αναλαμβάνει, εκτός των άλλων, το φορτίο του συρμού (μέσω των αξόνων του). Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσω αυτού του αξονικού φορτίου, στην επιφάνεια επαφής τροχού και σιδηροτροχιάς επηρεάζει τη συμπεριφορά τόσο του τροχαίου υλικού, όσο και της γραμμής.

Για τον υπολογισμό του αξονικού φορτίου θεωρούμε στατική φόρτιση, καθώς σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από τα γνωστά φορτία του σιδηροδρομικού οχήματος. Βασική παραδοχή βέβαια αποτελεί η ομοιόμορφη φόρτιση ενός οχήματος. Η κατά πλάτος ομοιόμορφη φόρτιση δεν ισχύει κατά την κίνηση του συρμού στις καμπύλες, ενώ η κατά μήκος ομοιόμορφη φόρτιση είναι δύσκολο να επιτευχθεί, κυρίως, κατά τη φόρτωση εμπορευματοκιβωτίων διαφορετικού τύπου στην ίδια φορτάμαξα. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, δυσμενέστερη φόρτιση προκαλεί η μηχανή έλξης, καθώς το βάρος ανά άξονα πλησιάζει το οριακό φορτίο ανά άξονα που δέχεται η γραμμή. Επίσης μπορεί να διαθέτει πολλούς άξονες σ' ένα φορείο (π.χ. εξαξονικές εμπορευματικές), οπότε αυξάνει ακόμα περισσότερο το φορτίο, λόγω της επιρροής των φορτίων από τους γειτονικούς άξονες. Όσον αφορά στα δυναμικά φορτία που ασκούνται επί της σιδηροδρομικής γραμμής λόγω της αλληλεπίδρασης με το τροχαίο υλικό, αυτά έχουν τυχαίο χαρακτήρα (Πυργίδης, 2009 σ. 123) και δεν μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια.

Στις γραμμές, κυρίως, όπου κυκλοφορούν βαριά σιδηροδρομικά οχήματα (βαριά εμπορευματικά) έχει παρατηρηθεί αύξηση του αριθμού και του μεγέθους των σφαλμάτων γραμμής, καθώς επίσης και της κόπωσης των υλικών της επιδομής με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ανάγκες για έξοδα συντήρησης της γραμμής. Αυτό συμβαίνει, διότι η αναπτυσσόμενη τάση στη σιδηροτροχιά αυξάνεται ανάλογα με την ποσότητα Q_0^n , όπου Q_0 είναι το βάρος ανά τροχό και n εκθέτης με τιμές μεταξύ 3 και 4 (Προφυλλίδης, 1993 στο: Πυργίδης, 2009, σ. 118). Κατά συνέπεια, αύξηση της τιμής του φορτίου κατ' άξονα συνεπιφέρει ακόμα μεγαλύτερη επιπόνηση της σιδηροτροχιάς και γενικότερα της επιδομής. Για το λόγο αυτό προτείνεται η μείωση των φορτίων των σιδηροδρομικών οχημάτων σαν μέτρο μείωσης των εξόδων συντήρησης της γραμμής, καθώς αυτό συνεπιφέρει πολλαπλά οφέλη (Rail Safety and Standard Board, 2010).

Γι' αυτό το λόγο, κατά τη διάρκεια φόρτωσης ενός σιδηροδρομικού συρμού με εμπορευματοκιβώτια πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια, ώστε να γίνουν οι κατάλληλοι συνδυασμοί φόρτωσης και να επιτευχθούν τα μικρότερα δυνατά αθροίσματα φορτίων (για παράδειγμα, θα πρέπει να αποφευχθούν συνδυασμοί μεταξύ βαριών, έμφορτων εμπορευματοκιβωτίων). Αυτό θα επιτευχθεί με την καλή κατανομή των φορτίων καθ' όλο το μήκος του συρμού.

Εξάλλου, ο κανονισμός κίνησης του ΟΣΕ (εικόνα 15) αναφέρει ρητώς ότι το φορτίο της σύνθεσης του συρμού πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος του συρμού, ενώ τα τυχόν βαρέα οχήματα πρέπει να τοποθετούνται στο εμπρόσθιο μέρος του, αμέσως μετά τη μηχανή έλξης. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερη συμπεριφορά του συρμού εν γένει, αφού επιτυγχάνεται βελτιωμένη απόκριση της πέδησης (και κατά συνέπεια ασφαλέστερη κίνηση του συρμού), καθώς επίσης και καλύτερη αλληλεπίδραση με τη γραμμή (μειωμένα φορτία).



Εικόνα 15: Απόσπασμα του κανονισμού κινήσεως που αναφέρεται στη διάταξη του τροχαίου υλικού

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ζητούμενο είναι και η ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου σε κάθε φορτάμαξα ξεχωριστά, καθώς σε αντίθετη περίπτωση προκαλούνται σημαντικές διαφορές στο μοίρασμα του φορτίου, τόσο ανά φορείο, όσο και ανά άξονα. Με αυτόν τον τρόπο, το φορτίο ενός άξονα (ή ενός τροχού) μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που, όπως προαναφέραμε, έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην επιδομή της γραμμής (De Lucca Silva, et al., 1978).

3.5 Μεταφερόμενα φορτία με σιδηρόδρομο

3.5.1 Γενικά

Ο σιδηρόδρομος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα χρόνια της ακμής του, αποτέλεσε τον κυρίαρχο τρόπο χερσαίας μεταφοράς. Η εξέλιξη, όμως των οδικών και αεροπορικών μεταφορών παράλληλα με τη μη ανανέωση των σιδηροδρομικών υποδομών και τη σταδιακή εγκατάλειψή τους, έχει οδηγήσει σήμερα στον περιορισμό του μεριδίου του σιδηροδρόμου στις εμπορευματικές μεταφορές. Παρόλα αυτά, ο σιδηρόδρομος μπορεί να αποτελέσει την καταλληλότερη επιλογή για τη μεταφορά ενός εμπορεύματος, αφού δεν παύει να αποτελεί το αποδοτικότερο και φιλικότερο προς το περιβάλλον χερσαίο μέσο (Πυργίδης, 2009 σσ. 37-38). Ωστόσο, παρουσιάζει ορισμένες εγγενείς αδυναμίες, όπως είναι α) το περιορισμένο δίκτυο (σε σχέση με το οδικό), β) ο περιορισμός του στους σιδηροδρομικούς σταθμούς (όσον αφορά στην αφετηρία και το τέρμα μιας μεταφοράς), γ) οι συνθήκες διαλειτουργικότητας των δικτύων μεταξύ τους και δ) οι χρονοβόρες τελωνειακές διαδικασίες.

Με αυτόν τον τρόπο, τα υπόλοιπα μέσα εμφανίζονται αποτελεσματικότερα κατά περίπτωση. Συνεπώς, μπορεί να λεχθεί ότι κάθε μεταφορικό μέσο διαθέτει το

δικό του πεδίο δράσης, όσον αφορά στις μεταφορές εμπορευμάτων. Για παράδειγμα το αεροπλάνο προσφέρει τον ελάχιστο δυνατό χρόνο μεταφοράς με το αντίστοιχο όμως οικονομικό κόστος. Κρίνεται επομένως κατάλληλο για τις μεταφορές φορτίων μεγάλης αξίας. Τα φορτηγά οχήματα προσφέρουν ευελιξία και ταχύτητα, ιδιαίτερα για τις μεταφορές μικρής απόστασης προσφέροντας υπηρεσίες από πόρτα σε πόρτα (door to door). Επιπλέον, με τα δίκτυα σωληνωτών αγωγών μπορούν να μεταφερθούν υγρά (κυρίως καύσιμα) σε μεγάλες αποστάσεις με μεγάλη οικονομία.

Επομένως, συμπεραίνεται ότι, όπως και τα λοιπά μεταφορικά μέσα, ο σιδηρόδρομος πρέπει να εστιάσει τη μεταφορική του υπηρεσία, εκεί όπου αποκτά συγκριτικά πλεονεκτήματα. Οι τομείς αυτοί αφορούν κυρίως στη μεταφορά χύδην φορτίων, μοναδοποιημένων φορτίων και επικίνδυνων φορτίων για μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις. Στον παρακάτω πίνακα 8 παρουσιάζεται το μερίδιο που κατέχει ο σιδηρόδρομος στις εμπορευματικές μεταφορές της Ευρώπης.

Πίνακας 9: Μερίδιο σιδηροδρόμου στις εμπορευματικές μεταφορές στην Ευρώπη (πηγή: Eurostat)

GEO/TIME	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Latvia	73,5	72,6	70,8	72,5	71,6	70,2	61	58,1	61,3	69,8
Estonia	62,7	68,8	69,7	70,9	67,3	64,6	65,3	56,8	44,7	52,7
Lithuania	53,4	48,3	47,7	50	48,7	43,9	41,6	41,5	41,9	40,1
Netherlands	3,7	3,4	3,3	3,8	4,2	4,4	4,8	5,5	5,4	4,9
Austria	30,6	29,6	29,3	28,7	31,4	32,8	33,8	34,8	37,4	36,4
Sweden	36,1	36,4	34,4	35,5	36,1	36	35,8	36,4	35,3	37,5
Germany	19,2	18,6	18,8	19,6	20,0	20,3	21,4	21,9	22,2	20,9
Belgium	11,6	10,4	10,7	11	12	13,4	14,2	15,9	12,8	15,1
Bulgaria	45,2	36,7	33,1	34,3	29,2	25,4	27,1	25,1	20,5	11,9
Romania	49,1	43,1	34,4	30,4	27,8	21,7	19,4	18,9	19,0	19,4
Slovakia	41,7	42,4	40,9	37,5	34,3	29,5	30,9	25,5	23,4	19,6
Poland	42,2	37,9	37	35,3	33,7	30,8	29,4	26,4	24,0	19,4
Finland	24	24,4	23,2	24,5	23,8	23,3	27,1	25,9	26,5	24,1
Croatia	:	23,2	22,7	23	21,7	23,1	24,3	25,2	21,8	20,6
Hungary	28,8	28,1	28,4	27,9	28,0	25,0	23,9	20,9	20,6	:
Czech Republic	31,9	30,1	26,5	25,4	24,7	25,5	23,8	25,3	23,3	22,1
European Union (27 countries)	19,7	18,8	18,2	18,5	18,1	17,7	18,1	18,0	17,9	16,5
European Union (25 countries)	19,1	18,2	17,8	18,1	17,8	17,5	18,0	17,9	17,9	16,5
European Union (15 countries)	15,1	14,5	14,1	14,3	14,2	14,1	15,0	15,2	15,5	14,4
Slovenia	28,1	27,0	30,0	30,0	25,9	22,7	21,8	20,8	17,8	16,0
France	20,6	19	19	18,1	17	16	15,7	15,7	15,9	:
Norway	16,5	16	14,9	13,7	14,0	14,8	14,7	15,3	15,0	16,6
United Kingdom	9,8	10,6	10,2	10,1	12,2	12,1	14,2	13,4	13,4	13,2
Italy	11	10,6	9,6	10,4	10,1	9,7	11,4	12,3	11,7	9,0
FYROM	13,1	12,9	7,7	6,4	7,4	8,7	6,9	11,6	15,7	:
Denmark	7,9	8,2	7,9	7,9	9,1	7,8	8,2	7,8	8,7	9,2
Luxembourg	7,9	6,5	5,6	5	5,3	4,1	4,6	2,8	2,5	2,3
Portugal	7,5	6,7	6,9	7	5,3	5,4	5,1	5,3	6,1	5,7
Turkey	5,7	4,7	4,5	5,4	5,6	5,2	5,1	5,1	:	:
Spain	7,2	6,8	5,9	5,7	5,1	4,8	4,6	4,1	4,1	3,4
Greece	:	:	:	2,3	:	2,5	1,9	2,9	2,7	2,2
Ireland	3,8	4	2,9	2,5	2,3	1,7	1,2	0,7	0,6	0,6

Στη συνέχεια, στον πίνακα 9 εμφανίζονται (ενδεικτικά στοιχεία από παλαιότερο έτος) τα μερίδια που εμφανίζει ο σιδηρόδρομος σε ορισμένες κατηγορίες εμπορευμάτων. Σε αυτόν τον πίνακα παρατηρούμε πως το υψηλότερο ποσοστό εμφανίζεται στην κατηγορία «διάφορα», όπου ανήκουν κυρίως τα μοναδοποιημένα φορτία.

Επίσης, στα σχήματα 2-5 παρουσιάζονται οι σιδηροδρομικές και οδικές μεταφορές μεταξύ Ελλάδας και Βουλγαρίας.

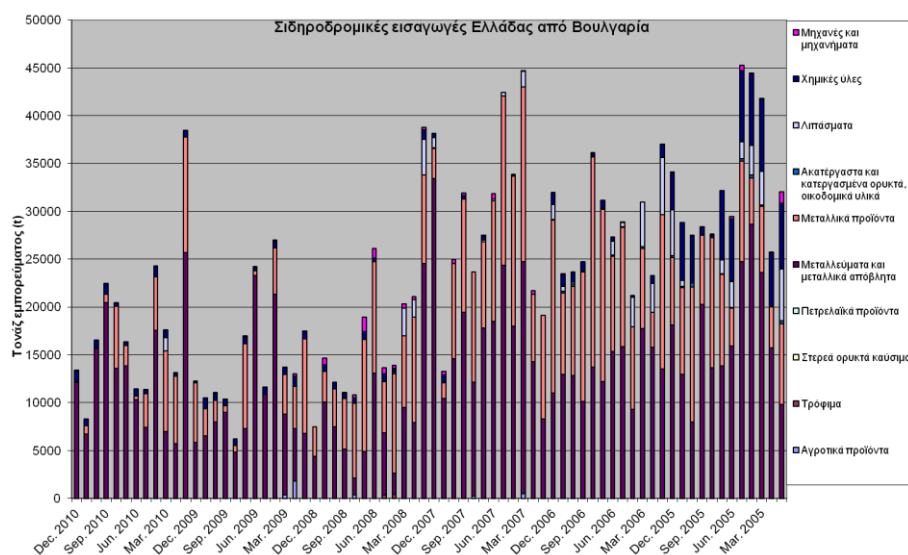
Πίνακας 10: Μεριδίο του σιδηροδρόμου σε συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων

	Γεωργικά/ κτηνοτροφικά	Τρόφιμα	Ορυκτά καύσιμα	Πετρέλαιο	Σιδηρομεταλλεύματα	Μεταλλουργικά	Οικοδομικά υλικά	Λιπάσματα	Χημικά	Διάφορα		
	NST/R chapters											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total	% share
Road	76	78	5	10	10	47	76	7	69	238	616	61%
Rail**	13	3	15	5	16	28	10	2	10	54	154	15%
Inland waterways	9	13	31	36	44	12	48	7	20	27	247	24%
Total	98	94	52	51	70	87	134	16	98	320	1 018	100.0%
% share	10%	9%	5%	5%	7%	9%	13%	2%	10%	31%	100%	

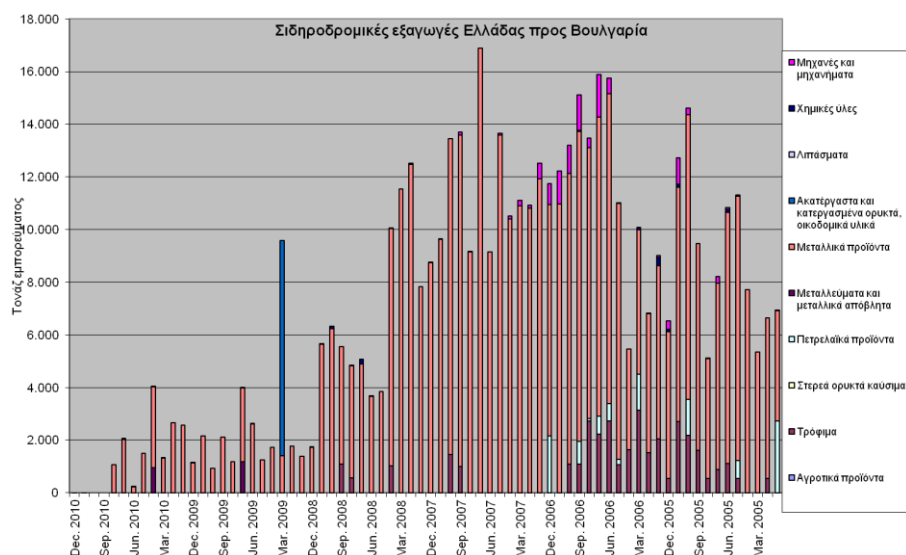
Source: Eurostat (Transport)

*Aggregate covers the following countries: BE, DK, DE, ES, FR, IT, LU, NL, AT and PT.

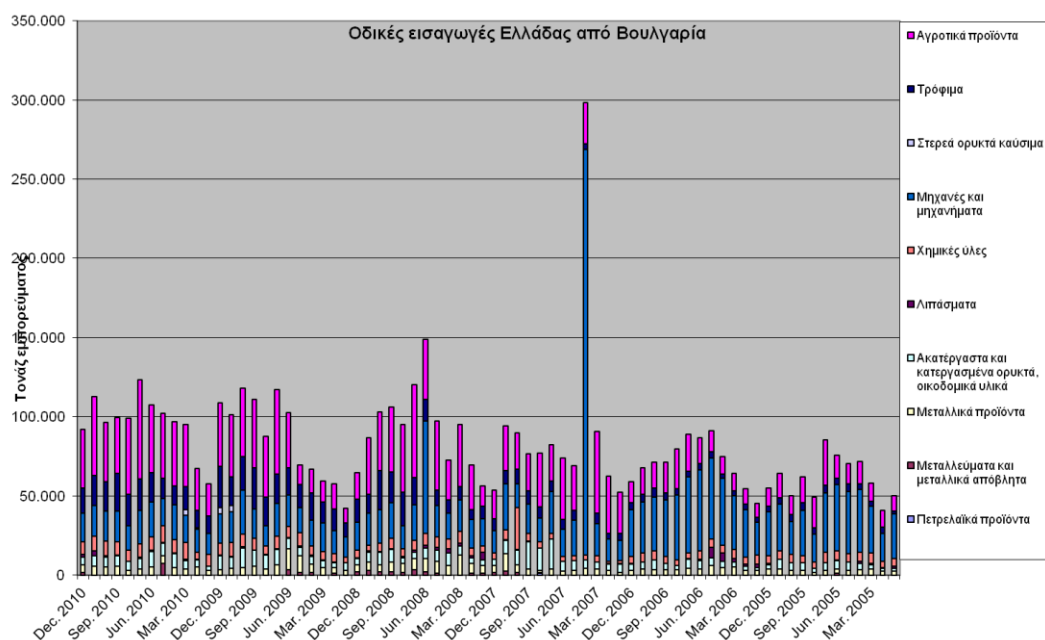
**2002 data.



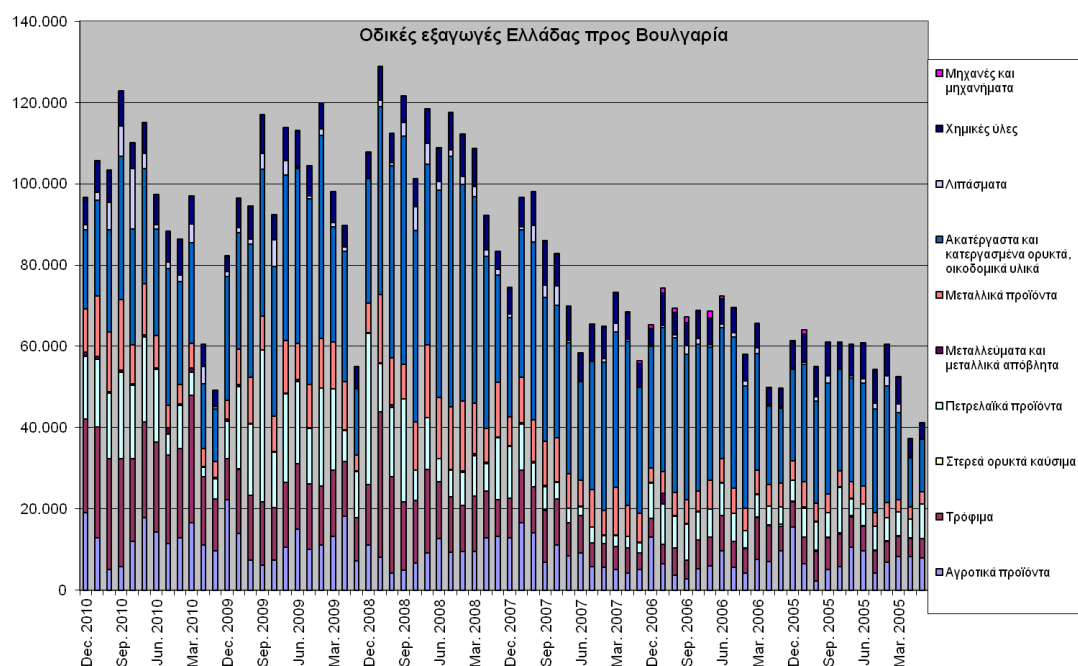
Σχήμα 2: Σιδηροδρομικές εισαγωγές Ελλάδας από Βουλγαρία



Σχήμα 3: Σιδηροδρομικές εξαγωγές Ελλάδας προς Βουλγαρία



Σχήμα 4: Οδικές εισαγωγές Ελλάδας από Βουλγαρία



Σχήμα 5: Οδικές εξαγωγές Ελλάδας προς Βουλγαρία

Μέσω αυτών των σχημάτων καταδεικνύεται το χαμηλό μερίδιο των σιδηροδρομικών μεταφορών και η αυξητική τάση των οδικών μεταφορών.

3.5.2 Χύδην φορτία



Εικόνα 16: Φόρτωση σιδηροδρομικού οχήματος με χύδην φορτίο (πηγή: Σπυράκος)

Ο σιδηρόδρομος αναλαμβάνει συνήθως τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων χύδην φορτίων , όπως είναι το κάρβουνο, ο λιγνίτης, τα μεταλλεύματα, τα χημικά προϊόντα (π.χ. πετρέλαιο) και τα δημητριακά. Η μεταφορά αυτών των προϊόντων γίνεται πολύ πιο ανταγωνιστική, όταν οι αφετηρίες ή οι προορισμοί των εμπορευμάτων (π.χ. κάποιο εργοστάσιο, κάποιο κέντρο διανομής) περιλαμβάνει ιδιωτικές γραμμές που επιτρέπει στο σιδηρόδρομο να πραγματοποιήσει όλη τη διαδρομή χωρίς ενδιάμεσες μεταφορτώσεις.

Οι μεταφορτώσεις που απαιτούνται για τη μεταφορά ενός εμπορεύματος στον τελικό του προορισμό, αποτελεί το βασικότερο μειονέκτημα του σιδηροδρόμου. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να επιταχυνθούν με τη χρήση των μοναδοποιημένων φορτίων και ιδιαίτερα των μεταφερομένων μονάδων που απλοποιούν σημαντικά τη διαδικασία.

3.5.3 Μοναδοποιημένα φορτία

Τα μοναδοποιημένα φορτία χρησιμοποιούνται ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία μεταφοράς (συσκευασία, μετακίνηση, φορτοεκφόρτωση) και άρα η ελάττωση του κόστους μεταφοράς ιδιαίτερα στους σταθμούς μεταφόρτωσης (Αμπακούμκιν, 1990). Τα κυριότερα είδη μοναδοποιημένων φορτίων είναι:

- Οι παλλέτες
- Τα εμπορευματοκιβώτια (containers)
- Τα ημιρυμουλκούμενα (semi – trailers) και
- Τα κινητά αμαξώματα (swap bodies)



Εικόνα 17: Μεταφορά ημιρυμουλκούμενου και δύο κινητών αμαξωμάτων με σιδηρόδρομο



Εικόνα 18: Μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων με σιδηρόδρομο

Οι παλλέτες μεταφέρονται μέσω σιδηροδρόμου με κλειστές φορτάμαξες (κατηγορίες G,H), αλλά πλεονεκτούν μόνο στην περίπτωση ιδιωτικών γραμμών στην αφετηρία και τον προορισμό της μεταφοράς, καθώς η μεταφόρτωση απαιτεί αρκετό χρόνο και γίνεται με χρήση περionoφόρων οχημάτων.

Η χρήση των ημιρυμουλκούμενων απαιτεί βαθυδάπεδες φορτάμαξες για να διέλθει από τις σιδηροδρομικές σήραγγες (έλεγχος περιτυπώματος), αλλά στην Ελλάδα δεν ικανοποιείται ο έλεγχος λόγω του περιορισμένου περιτυπώματος του δικτύου, ενώ τα κινητά αμαξώματα δεν είναι διαδεδομένα στην Ελλάδα.

Επομένως, από το σύνολο των μοναδοποιημένων φορτίων, στην Ελλάδα το πιο σημαντικό θεωρείται το εμπορευματοκιβώτιο οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων

Χαρακτηριστικά τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων					
Τύπος	Μήκος (m)	Ύψος (m)	Μέγιστο συνολικό φορτίο (kg)	Απόβαρο (kg)	Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (kg)
20'	6058	2591	30500	2200	28300
20' HC	6058	2896	30500	2500	28000
40'	12192	2591	30500	3800	26700
40' HC	12192	2896	30500	3900	26600
45' HC	13716	2896	30500	4800	25700

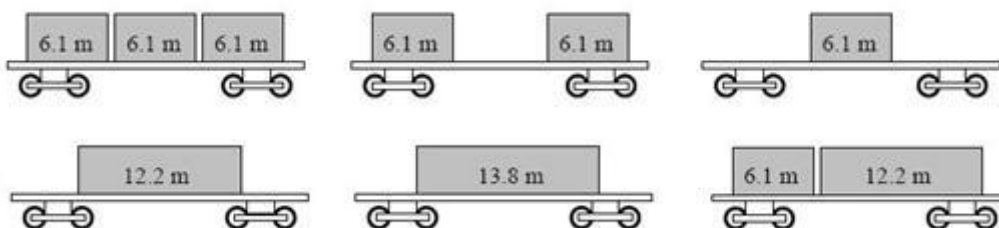
Το εμπορευματοκιβώτιο, δηλαδή αποτελεί την μεταφερόμενη μονάδα που αντικαθιστά τις χρονοβόρες διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης με μία μόνο κίνηση, τη

μεταφορά του από το φορτηγό όχημα σε μια επίπεδη φορτάμαξα μέσω ενός ανυψωτικού οχήματος.



Εικόνα 19: Ανυψωτικό όχημα τύπου Reach Stacker

Η διαδικασία φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικά οχήματα εμφανίζει, ωστόσο, άλλα θέματα προς επίλυση. Βασικότερο όλων αποτελεί η βέλτιστη τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων στο σιδηροδρομικό συρμό, ώστε να μεταφερθούν όσο το δυνατόν περισσότερα εμπορευματοκιβώτια στον προορισμό τους. Αυτό το πρόβλημα συνδυάζεται και με το γεγονός ότι υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί φόρτωσης για κάθε φορτάμαξα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της. Για παράδειγμα, εάν επιλεγθεί για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων η φορτάμαξα Rgss που διαθέτουν οι ελληνικοί σιδηρόδρομοι (βλ. παράρτημα Β), τότε βάσει του συνδυασμού των χαρακτηριστικών των εμπορευματοκιβωτίων (πίνακας 10) με τα χαρακτηριστικά της φορτάμαξας (ωφέλιμο μήκος) προκύπτουν οι ακόλουθοι συνδυασμοί:



Εικόνα 20: Συνδυασμοί φόρτωσης επίπεδης φορτάμαξας

Οι πιθανοί συνδυασμοί φόρτωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων στο συρμό, ώστε να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της χωρητικότητας της φορτάμαξας, ώστε να απαιτηθεί ο ελάχιστος αριθμός αυτών για την πραγματοποίηση της φόρτωσης.

3.5.4 Επικίνδυνα φορτία

Ο σιδηρόδρομος αναλαμβάνει πολλές φορές τη μεταφορά επικίνδυνων φορτίων, καθώς δεν τίθεται περιορισμός σε σχέση με το τι μπορεί να μεταφερθεί με το σιδηρόδρομο. Ο περιορισμός που τίθεται ωστόσο αφορά στην τοποθέτηση των επικίνδυνων φορτίων στο συρμό, όπου πρέπει να διαταχθούν σε κάποια, ορισμένη από τον κανονισμό, απόσταση μεταξύ τους.

3.6 Γενική μεθοδολογία σιδηροδρομικής εμπορευματικής μεταφοράς

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν έγινε η παρουσίαση των στοιχείων της σιδηροδρομικής μεταφοράς και των χαρακτηριστικών τους που την επηρεάζουν. Ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών μεταξύ τους, μπορεί να οδηγήσει στη διατύπωση μιας γενικής μεθοδολογίας για την πραγματοποίηση της σιδηροδρομικής εμπορευματικής μεταφοράς, η οποία μπορεί να διατυπωθεί με τα εξής βήματα¹⁵:

1. Προσδιορισμός των στοιχείων του μεταφερομένου φορτίου που επηρεάζουν τη μεταφορά.
2. Προσδιορισμός των φορταμαξών που είναι κατάλληλες για τη μεταφορά του φορτίου.
3. Έλεγχος περιτυπώματος και αποκλεισμός των φορταμαξών που δεν ικανοποιούν τον έλεγχο αυτόν.
4. Στην περίπτωση που το φορτίο αφορά σε μεταφερόμενες μονάδες: εύρεση και καθορισμός των εναλλακτικών συνδυασμών τοποθέτησης, περισσότερων του ενός, εμπορευματοκιβωτίων στην ίδια φορτάμαξα βάσει του μήκους τους και του ωφέλιμου μήκους της φορτάμαξας.
5. Επιλογή της καταλληλότερης φορτάμαξας βάσει της καλύτερης αξιοποίησης των χαρακτηριστικών της και της ικανοποίησης των ιδιαίτερων απαιτήσεων της μεταφοράς.
6. Έλεγχος για διαθεσιμότητά της, αλλιώς επιλογή της δεύτερης καλύτερης κ.ο.κ..
7. Εύρεση του μέγιστου ωφέλιμου φορτίου της φορτάμαξας, λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο της γραμμής στο δυσμενέστερο τμήμα της και το απόβαρο της φορτάμαξας.

¹⁵ Η σειρά των βημάτων είναι ενδεικτική, καθώς η έλλειψη ορισμένων δεδομένων, όπως για παράδειγμα των ακριβών χαρακτηριστικών του φορτίου, μπορεί να μην

8. Εύρεση του απαιτούμενου αριθμού φορταμαξών βάσει της συνολικής ποσότητας του φορτίου και της ωφέλιμης χωρητικότητας της φορτάμαξας.
9. Έλεγχος, ώστε ο απαιτούμενος αριθμός φορταμαξών να μην υπερβαίνει το μέγιστο δυνατό αριθμό αξόνων του συρμού.
10. Υπολογισμός του συνολικού φορτίου του συρμού και καθορισμός του απαιτούμενου αριθμού μηχανών έλξης με βάση τα χαρακτηριστικά της γραμμής (κυρίως κλίση), τα χαρακτηριστικά των μηχανών έλξης (ισχύς, μέγιστη ελκτική ικανότητα) και του περιβάλλοντος (συντελεστής πρόσφυσης).
11. Έλεγχος αντοχής των διατάξεων ζεύξης του συρμού, αλλιώς περιορισμός του φορτίου.
12. Φόρτωση του φορτίου στις φορτάμαξες, ώστε: α) να μην απαιτηθούν επιπλέον, των απαιτούμενων, φορτάμαξες (λόγω μη αξιοποίησης της πλήρους χωρητικότητάς τους κατά τη διαδικασία φόρτωσης) και β) να τηρηθούν όλοι οι περιορισμοί (μέγιστο φορτίο ανά φορτάμαξα, κατάλληλη τοποθέτηση των επικίνδυνων φορτίων) και οι απαιτήσεις της φόρτωσης (μέγιστος διαθέσιμος χρόνος φόρτωσης, καλή κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού).

Η διαδικασία αυτή μπορεί να τηρηθεί και για τη φόρτωση διαφορετικών τύπων φορτίων σε διαφορετικές φορτάμαξες προσέχοντας, όμως, να μην παραβιαστούν οι έλεγχοι στα βήματα 8 και 10.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του φορτίου δεν είναι, πολλές φορές, εκ των προτέρων γνωστά, γεγονός που δυσχεραίνει την πραγματική διαδικασία φόρτωσης του σιδηροδρομικού συρμού. Το χαρακτηριστικό αυτό θα ληφθεί υπόψη στη συνέχεια της εργασίας αυτής, όπου θα διερευνηθεί το πρόβλημα της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό, μέσα από την ανάπτυξη διαφόρων αλγορίθμων, προσπαθώντας να τηρηθούν οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις της συνολικής διαδικασίας.

4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΡΜΟΥ

4.1 Περιγραφή του προβλήματος φόρτωσης μοναδοποιημένων φορτίων σε σιδηροδρομικό συρμό

Το γενικό πρόβλημα της φόρτωσης μοναδοποιημένων φορτίων σε σιδηροδρομικές φορτάμαξες περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές, καθώς υπάρχουν διαφορετικά είδη φορταμαξών (με διαφορετικά μήκη, διαφορετικά ύψη καταστρώματος και διαφορετικά επιτρεπόμενα ωφέλιμα φορτία), αλλά και διαφορετικοί τύποι μεταφερομένων μονάδων (π.χ. εμπορευματοκιβώτια μήκους 20', 40' και 45' με διάφορα πλάτη (8'6'', 2.5 μ pallet-wide) και ύψη (8', 8'6'', 9'6'' high cube)) με διαφορετικούς προορισμούς, ενώ η σύνθεση του συρμού πρέπει να ικανοποιεί περιορισμούς για το συνολικό μήκος του συρμού, το συνολικό αριθμό των αξόνων και το συνολικό ελκόμενο φορτίο. Άλλοι περιορισμοί επιβάλλονται από την κατάσταση της υποδομής (επιτρεπόμενα φορτία ανά άξονα και ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στο συρμό), τις διατομές των σηράγγων (περιορισμοί στο περιτύπωμα φόρτωσης) και την ασφάλεια (οδηγίες φόρτωσης, ώστε τα βαρύτερα φορτία να τοποθετούνται κοντά στη μηχανή έλξης για την καλύτερη απόκριση των συστημάτων πέδησης, οδηγίες φόρτωσης των επικίνδυνων φορτίων κ.λπ.). Επιπλέον, οι διαδικασίες της φόρτωσης φορταμαξών επηρεάζουν τη λειτουργία των μηχανημάτων φορτοεκφόρτωσης (αυτοκινούμενα ανυψωτικά, γερανογέφυρες) που θα πρέπει να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους μέχρι τον προγραμματισμένο χρόνο αναχώρησης του συρμού, καθώς και το χρόνο εξυπηρέτησης των φορτηγών (τόσο αυτών που παραδίδουν, όσο και αυτών που παραλαμβάνουν κάποιο εμπορευματοκιβώτιο). Απαιτείται συνεπώς, η εύρεση της βέλτιστης κατανομής των εμπορευματοκιβωτίων στις φορτάμαξες (ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που θα φορτωθούν), λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς σχετικά με το χρόνο αναμονής των φορτηγών, το χρόνο αναχώρησης του συρμού και την κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού. Η βελτιστοποίηση των ανωτέρω είναι αρκετά δυσχερής, καθώς απαιτεί την ικανοποίηση αντικρουόμενων κριτηρίων.

4.2 Η μεθοδολογία της έρευνας

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση και οι τεχνικές διερεύνησης και επίλυσης του προβλήματος φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της μεταφορικής υπηρεσίας που προσφέρουν οι ελληνικοί σιδηρόδρομοι, όσον αφορά στις μεταφερόμενες μονάδες, τις διαθέσιμες φορτάμαξες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής γραμμής, καθώς επίσης και τη συνήθη πρακτική εξυπηρέτησης των φορτηγών.

Το πρόβλημα αυτό, έχει προσεγγισθεί στη βιβλιογραφία, κυρίως τα τελευταία χρόνια κι έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι επίλυσής του με κυριότερη μέθοδο τη μαθηματική βελτιστοποίηση με χρήση ακέραιου προγραμματισμού. Παρόλο που στις επιλύσεις έχουν ληφθεί διάφοροι περιορισμοί υπόψη, σε όλες τις περιπτώσεις έχουν θεωρηθεί γνωστά εκ των προτέρων τα χαρακτηριστικά των μεταφερομένων μονάδων, αγνοώντας το γεγονός ότι πολλές φορές τα χαρακτηριστικά αυτά καθίστανται γνωστά κατά την άφιξη του φορτηγού στο σταθμό. Το στοιχείο αυτό, που έλειπε από τη βιβλιογραφία, προσπάθησε να καλύψει η εργασία αυτή.

Σκοπό της εργασίας αυτής αποτελεί η πραγματική προσέγγιση του προβλήματος της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό με τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς της, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα στοιχεία των μεταφερομένων μονάδων δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων. Πιο συγκεκριμένα, ως βασικοί στόχοι τέθηκαν α) η κατανόηση του συνολικού συστήματος της σιδηροδρομικής μεταφοράς και των χαρακτηριστικών που την επηρεάζουν και β) η διατύπωση αλγορίθμων που θα επιλύουν το πρόβλημα ικανοποιώντας τις απαιτήσεις της μεταφοράς και σεβόμενοι τους περιορισμούς της.

Γι' αυτό το λόγο, στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού με απλούς, κλασικούς αλγορίθμους, οι οποίοι δεν απαιτούν για τη συνολική επίλυσή του, την πρότερη γνώση όλων των χαρακτηριστικών του συστήματος. Αντίθετα, παρέχουν ουσιαστικά κανόνες βάσει των οποίων θα πραγματοποιηθεί η φόρτωση και ελέγχονται τα αποτελέσματά τους για να αποδειχθεί εάν ικανοποιούν τα κριτήρια που απαιτούνται για τη συνολική φόρτωση του συρμού.

Η στρατηγική που ακολουθήθηκε για την προσέγγιση και την τελική επίλυση του προβλήματος, αποτελείται από επί μέρους διακριτά στάδια. Σε αρχική φάση έγινε η προσπάθεια κατανόησης του προβλήματος και των χαρακτηριστικών του με τη μέθοδο της δια χειρός προσομοίωσης, ώστε να παρατηρηθούν τα βασικά στοιχεία που πρέπει να προσεχθούν. Το πρόβλημα, όμως, είναι από τη φύση του δυναμικό και ως εκ τούτου έπρεπε να μελετηθεί το στοιχείο του χρόνου και πώς αυτό επηρεάζει το συνολικό σύστημα. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με χρήση του λογισμικού ARENA, όπου παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος στον άξονα του χρόνου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, έγιναν αντιληπτά τα στοιχεία εκείνα που έπρεπε να ληφθούν υπόψη κατά την επεξεργασία των αλγορίθμων.

Στη συνέχεια οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι προγραμματίστηκαν με τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic for Applications στο περιβάλλον του EXCEL και παρατηρήθηκαν τα αποτελέσματά τους με βάση τα στοιχεία και των προηγούμενων βημάτων. Τα αποτελέσματα αυτά αποτέλεσαν τη βάση για τη σύνθεση νέων αλγορίθμων, οι οποίοι θα ικανοποιούσαν καλύτερα τις απαιτήσεις της

σιδηροδρομικής μεταφοράς και θα εμφάνιζαν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους απλούς αλγορίθμους από τους οποίους προήλθαν.

4.3 Στοιχεία του προς διερεύνηση συστήματος

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του συστήματος της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικούς συρμούς προσαρμόστηκαν στα χαρακτηριστικά των ελληνικών σιδηροδρόμων. Γι' αυτό, στις μεταφερόμενες μονάδες, θεωρείται ότι η μίξη περιλαμβάνει εμπορευματοκιβώτια των 20 ποδών ($20' = 6,058\text{m}$), των 40 ποδών ($40' = 12,192\text{m}$) και των 45 ποδών ($45' = 13,716\text{m}$). Τα εμπορευματοκιβώτια των 20' και 40' είναι συνήθη στις συνδυασμένες μεταφορές θαλάσσιων και χερσαίων μεταφορικών μέσων, ενώ τα εμπορευματοκιβώτια των 45' χρησιμοποιούνται στις συνδυασμένες σιδηροδρομικές μεταφορές, καθώς προσφέρουν ισοδύναμη χωρητικότητα με τα μεγάλα φορτηγά (ελκυστήρας με συρόμενο όχημα). Να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι θεωρήσαμε μόνο τα εμπορευματοκιβώτια σαν πιθανή μεταφερόμενη μονάδα, αφού, όπως έχει αναφερθεί, τα κινητά αμαξώματα δεν είναι διαδεδομένα στην Ελλάδα και δεν χρησιμοποιούνται στις εθνικές μεταφορές, ενώ τα ημιρυμουλκούμενα δεν μεταφέρονται σιδηροδρομικώς, καθώς το μεγάλο περιτύπωμα φόρτωσης που εμφανίζουν κατά την τοποθέτησή τους, ακόμη και σε βαθυδάπεδες φορτάμαξες, δεν επιτρέπει τη διέλευσή τους από τις σήραγγες του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου. Συμπερασματικά, οι τύποι των μεταφερομένων μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν στα σενάρια αφίξεων είναι τα εμπορευματοκιβώτια των 20', 40' και 45'.

Από το σύνολο του στόλου των φορταμαξών που διαθέτουν οι ελληνικοί σιδηρόδρομοι, ελάχιστοι τύποι είναι κατάλληλοι για μεταφορά έμφορτων εμπορευματοκιβωτίων. Μεταξύ αυτών, η τετραζονική επίπεδη φορτάμαξα, τύπου Rgss (σειρά 362 των ελληνικών σιδηροδρόμων), η οποία προορίζεται για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, αλλά και προϊόντων χάλυβα, καθώς και άλλων προϊόντων μη ευπαθών στις καιρικές συνθήκες, αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή δεδομένου και της διαθεσιμότητάς της (οι ελληνικοί σιδηρόδρομοι έχουν στο δυναμικό τους 250 φορτάμαξες αυτού του τύπου). Η φορτάμαξα αυτή έχει ωφέλιμο μήκος φόρτωσης/πλατφόρμας 18,52 m που επιτρέπει την εν σειρά τοποθέτηση τριών εμπορευματοκιβωτίων των 20' ή εναλλακτικά ενός εμπορευματοκιβωτίου των 40' και ενός των 20'. Επιτρέπει, επίσης, την τοποθέτηση ενός εμπορευματοκιβωτίου των 45'. Με απόβαρο 23,5 τόνους και επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο τους 20 τόνους, το ωφέλιμο φορτίο της φορτάμαξας αυτής ανέρχεται στους 56 τόνους. Όσον αφορά στο περιτύπωμα φόρτωσης, επί τόπου δοκιμές των ελληνικών σιδηροδρόμων¹⁶, επιβεβαίωσαν ότι η διέλευση από τις σιδηροδρομικές σήραγγες των εμπορευματοκιβωτίων υψηλού περιτυπώματος (high cube) επί φορταμαξών της σειράς 362, είναι εφικτή και επομένως το ύψος των

¹⁶ Πρβλ. κεφ. 3.2.2.3

εμπορευματοκιβωτίων δεν συμπεριελήφθη στις μεταβλητές του προβλήματος που εξετάζουμε. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι ο μέγιστος αριθμός φορταμαξιών σε ένα συρμό είναι 30, καθώς ο κανονισμός ορίζει ως μέγιστο αριθμό αξόνων που μπορεί να έλκει μία μηχανή, τους 120 άξονες.

Τέλος, όσον αφορά τον κανόνα προτεραιότητας στην εξυπηρέτηση των φορτηγών, εξετάστηκαν δύο κανόνες (α) ο FIFO (First In First Out), δηλαδή ο πρώτος που εισέρχεται, εξυπηρετείται και πρώτος, που στην περίπτωση μας σημαίνει ότι τα φορτηγά εξυπηρετούνται σύμφωνα με τη σειρά άφιξής τους στον εμπορευματικό σταθμό και (β) εξυπηρέτηση με βάση κάποιο νόμο προτεραιότητας (priority selection rule), σύμφωνα με τον οποίο, επιλέγεται το φορτηγό που μεταφέρει το εμπορευματοκιβώτιο που ικανοποιεί αυτόν το νόμο προτεραιότητας. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που ο νόμος προτεραιότητας καθορίζεται από το μεγαλύτερο βάρος, επιλέγεται να εξυπηρετηθεί το φορτηγό που μεταφέρει το βαρύτερο εμπορευματοκιβώτιο, σε σχέση με αυτά που αναμένουν να εξυπηρετηθούν.

4.4 Κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικούς συρμούς, όπως αναφέρθηκε, αρχικά, διεξήχθη δια χειρός προσομοίωση (manual simulation), ώστε να παρατηρηθεί η λειτουργία του συστήματος σε απλές περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα καθορισμένο μίγμα εμπορευματοκιβωτίων με καθορισμένα βάρη, ώστε να παρατηρηθούν οι διαφορές ανάμεσα στις διάφορες περιπτώσεις που σχεδιάστηκαν. Η μίξη αυτή αποτελούνταν από εμπορευματοκιβώτια 20', 40' και 45', με ίδιο ποσοστό για κάθε κατηγορία εμπορευματοκιβωτίων (15 εμπορευματοκιβώτια από κάθε κατηγορία). Θωρήθηκαν ότι υπήρχαν και έμφορτα και κενά, με αναλογία 1:3 για όλες τις κατηγορίες. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι: next fit, first fit, best fit και worst fit, όπως παρουσιάστηκαν και στη βιβλιογραφική επισκόπηση. Τα σενάρια διαφοροποιούνταν, εκτός από τη διαφοροποίηση των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων, στους κανόνες εξυπηρέτησης. Οι κανόνες εξυπηρέτησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι First In First Out, καθώς και κανόνας εξυπηρέτησης βάσει κάποιου νόμου προτεραιότητας. Ο νόμος που χρησιμοποιήθηκε αφορούσε στην εξυπηρέτηση με βάση το βάρος των εμπορευματοκιβωτίων. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε κι ένας νόμος συνδυασμού φόρτωσης, ώστε να έχουμε αποκλειστικό συνδυασμό 40' και 20'. Οι δοκιμές έγιναν τόσο με κάθε νόμο ξεχωριστά, όσο και συνδυαστικά, δηλαδή και να επιλέγονται π.χ. τα βαρύτερα και να πρέπει να συνδυαστούν μόνο 40' και 20'.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί, ότι ο νόμος φόρτωσης με αποκλειστικό συνδυασμό 20' και 40' προέκυψε ως επιλογή κατά τη διεξαγωγή των πρώτων δοκιμαστικών σεναρίων. Κατά την προπαρασκευαστική αυτή φάση, παρατηρήθηκε

ότι η μίξη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιλογής στρατηγικής, καθώς στην περίπτωση που τα 20' είναι λιγότερα από τα 40', η επιβολή ενός νόμου φόρτωσης για αποκλειστικό συνδυασμό 20' και 40' οδηγεί σχεδόν πάντα στο βέλτιστο (ελάχιστο) αριθμό χρησιμοποιούμενων φορταμαξών (ο βέλτιστος αριθμός προέκυψε για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης των αλγορίθμων first fit, best fit και worst fit). Να σημειωθεί εδώ ότι, συνήθως, ο συνδυασμός ενός έμφορτου 20' κι ενός έμφορτου 40' δεν εξαντλεί την αντοχή της γραμμής, καθώς τα περισσότερα 20' έχουν μέγιστο συνολικό βάρος τους 24 τόνους¹⁷ και τα 40' τους 30 τόνους. Αυτό σημαίνει ότι σε μια φορτάμαξα του τύπου Rgss (όπως αυτή που θεωρείται ότι χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων στους ελληνικούς σιδηροδρόμους) με ωφέλιμο φορτίο, όπως έχει αναφερθεί, τους 56 τόνους, μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη μεταφορά δύο τέτοιων εμπορευματοκιβωτίων.

Από την άλλη πλευρά, όταν ο αριθμός των 20' είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των 40', θα αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα το μέγιστο φορτίο, καθώς δεν μπορούν να συνδυαστούν τρία έμφορτα 20' στην ίδια φορτάμαξα ($3 \times 24 = 72 > 56$). Σε αυτήν την περίπτωση, επομένως, προκειμένου να καταλήξουμε στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, όσον αφορά τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων φορταμαξών, επιβάλλεται να εφαρμοστεί παράλληλα και νόμος προτεραιότητας με βάση το βάρος (να επιλέγονται δηλαδή πρώτα τα βαρύτερα), ώστε τα 20' που πλεονάζουν να μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους ανά τρία.

Παρατηρήθηκε, λοιπόν, όσον αφορά τη μίξη των εμπορευματοκιβωτίων, ότι γνωρίζοντας τον αριθμό τους, κάθε κατηγορίας, μπορεί να υπολογιστεί ο ελάχιστος (βέλτιστος) αριθμός φορταμαξών που απαιτούνται για τη μεταφορά αυτών των εμπορευματοκιβωτίων. Εάν τεθεί α ο αριθμός των 20', β ο αριθμός των 40' και γ ο αριθμός των 45', τότε ο ελάχιστος αριθμός φορταμαξών, w , είναι:

$$w = \begin{cases} \beta + \gamma, & \text{όταν } \alpha \leq \beta \\ \beta + \frac{(\alpha - \beta)}{3} + \gamma, & \text{όταν } \alpha > \beta \end{cases}$$

Η ύπαρξη δεκαδικού μέρους φανερώνει την ύπαρξη κενών θέσεων σε κάποια φορτάμαξα. Είναι όμως εμφανές, ότι ο ελάχιστος αριθμός φορταμαξών θα είναι η τιμή w , στρογγυλοποιημένη στο μεγαλύτερο ακέραιο. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή μια άμεση σύγκριση του αποτελέσματος με τη βέλτιστη λύση, ως προς τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων φορταμαξών.

Για την περίπτωση των σεναρίων που εφαρμόσαμε, με τη συγκεκριμένη μίξη που αναφέραμε, κατά την πραγματοποίηση της δια χειρός προσομοίωσης, παρατηρήθηκε ότι εφαρμόζοντας τον κανόνα εξυπηρέτησης με νόμο φόρτωσης τον

¹⁷ Υπάρχουν και 20' που το συνολικό τους βάρος ανέρχεται στους 30 τόνους, οπότε κατά τους συνδυασμούς με τα αντίστοιχα βαριά 40' θα πρέπει να προσεχθεί η ικανοποίηση του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου ανά άξονα.

αποκλειστικό συνδυασμό 20' με 40' επιτεύχθηκε σε όλες τις περιπτώσεις, πλην του αλγορίθμου next fit, ο ελάχιστος αριθμός φορταμαξών.

Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι, λόγω της τυχαίας άφιξης των φορτηγών, οι κινήσεις που απαιτούνταν από τον εξοπλισμό φόρτωσης μπορεί να ήταν πάνω από τέσσερις φορές περισσότερες σε σχέση με την ελάχιστη δυνατή (την ιδανική αυτή περίπτωση, δηλαδή, κατά την οποία όλα τα εμπορευματοκιβώτια που θα εξυπηρετούνταν θα εξαντλούσαν με τη σειρά τη χωρητικότητα όλων των φορταμαξών μία προς μία).

Ζητούμενο κατά τη φόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων σε ένα σιδηροδρομικό συρμό, αποτελεί επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Ο αλγόριθμος που παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς αυτό το κριτήριο, ήταν ο worst fit, η εφαρμογή του οποίου οδηγούσε σε μειωμένα αθροίσματα κι επομένως σε μειωμένα μέγιστα, γεγονός που κρίνεται ευνοϊκό για την επιδομή και την υποδομή της σιδηροδρομικής γραμμής. Όμως και σε αυτή την περίπτωση έχουμε αυξημένες κινήσεις του εξοπλισμού φόρτωσης, ενώ επίσης καταλήγουμε και σε συνδυασμούς μεταξύ κενών εμπορευματοκιβωτίων που αφήνουν ανεκμετάλλευτη τη χωρητικότητα της φορτάμαξας.

Για τη μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των φορταμαξών, κι επομένως για τη δυνατότητα εξυπηρέτησης των εμπορευματοκιβωτίων που θα αφιχθούν την τελευταία στιγμή, χωρίς να επηρεάσει το βάρος τους, κρίθηκε κατάλληλος ο αλγόριθμος best fit¹⁸. Ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλα αθροίσματα βάρους, ενώ και οι κινήσεις του εξοπλισμού φόρτωσης ήταν αυξημένες.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι οι αυξημένες κινήσεις του εξοπλισμού φόρτωσης δεν επιβαρύνουν το κόστος της σιδηροδρομικής μεταφοράς, αλλά το κόστος του εμπορευματικού σταθμού, καθώς αυξημένες κινήσεις ισοδυναμούν με αυξημένο χρόνο κίνησης, δηλαδή αυξημένο λειτουργικό κόστος του εξοπλισμού. Ωστόσο, ο χρόνος κίνησης που απαιτείται από τον εξοπλισμό για την ολοκλήρωση της φόρτωσης ενός συρμού, περιορίζεται από το χρόνο αναχώρησης του συρμού. Πρέπει, δηλαδή, όλη η διαδικασία φόρτωσης να έχει ολοκληρωθεί πριν από τον προβλεπόμενο (από το δρομολόγιο) χρόνο αναχώρησης του συρμού.

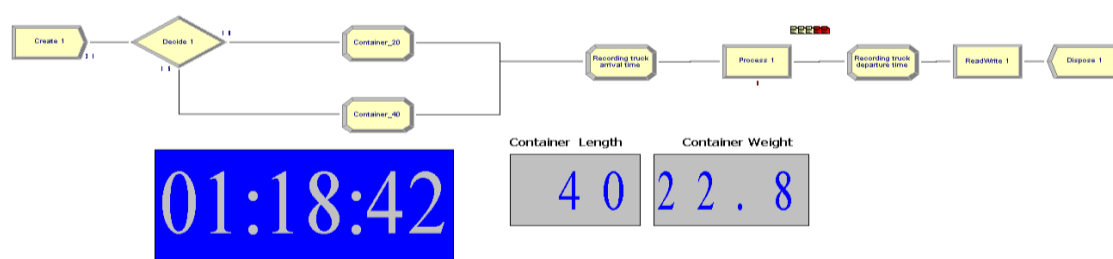
Επίσης, ζητούμενο αποτελεί και η τοποθέτηση των βαρύτερων φορταμαξών στο εμπρόσθιο μέρος του συρμού, κοντά στη μηχανή έλξης. Γι' αυτό το λόγο, εξετάσθηκε η περίπτωση εξυπηρέτησης με νόμο προτεραιότητας (priority selection rule) το βάρος, να εξυπηρετείται δηλαδή κάθε φορά το βαρύτερο. Αυτό, οδήγησε

¹⁸ Σύμφωνα με τον αλγόριθμο best fit το εμπορευματοκιβώτιο θα φορτωθεί στη θέση που αφήνει το ελάχιστο υπόλοιπο (βλ. κεφ. 2, εικ. 3) κι επομένως οι «ελεύθερες θέσεις» θα είναι αυτές με τη μεγαλύτερη διαθέσιμη χωρητικότητα, πιο ικανές να εξυπηρετήσουν κάποιο βαρύτερο εμπορευματοκιβώτιο που θα καταφθάσει, σε σχέση με τις «ελεύθερες θέσεις» των υπολοίπων αλγορίθμων..

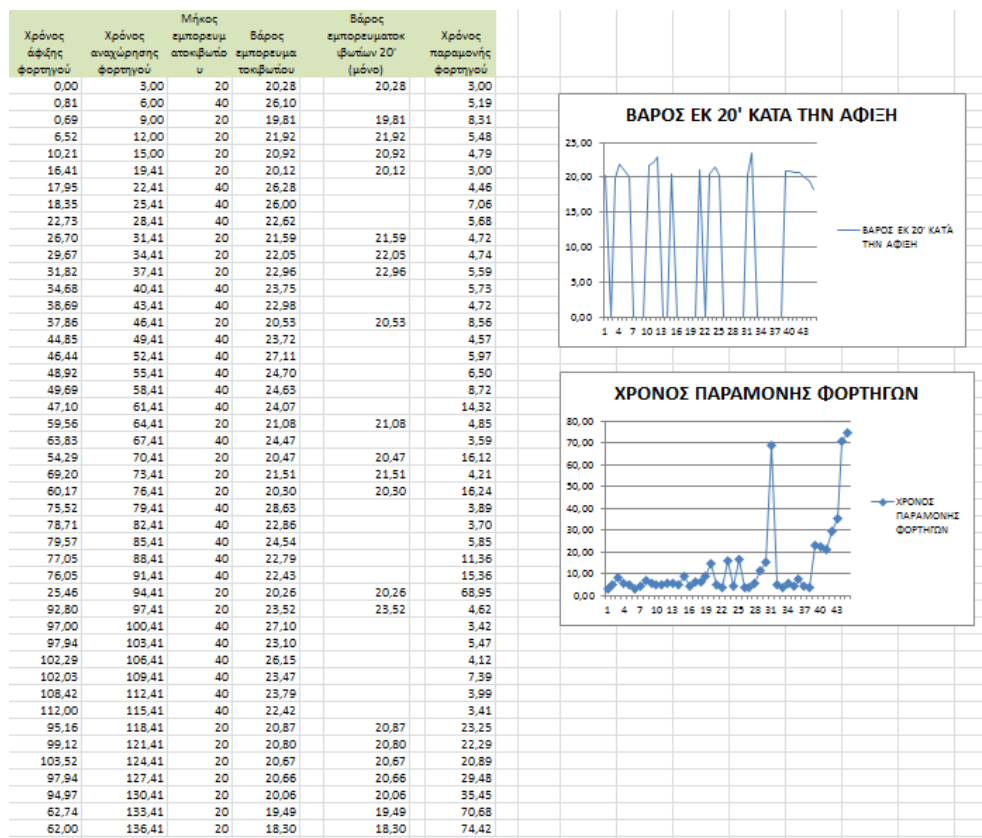
όμως σε μεγάλη ανισοκατανομή του βάρους, αφού στο τέλος είχαμε ουσιαστικά μόνο κενά εμπορευματοκιβώτια, καθώς επίσης και σε μεγάλα αθροίσματα βάρους, αφού αθροίζαμε τα βαρύτερα μεταξύ τους.

Στη συνέχεια της διερεύνησης, εξετάστηκε η συμπεριφορά αυτών των περιπτώσεων από την πλευρά του χρόνου εξυπηρέτησης. Για το λόγο αυτό, μορφώθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα στο λογισμικό ARENA, προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος και να εξεταστεί πως επηρεάζει η παράμετρος του χρόνου. Μέσω αυτού παρατηρήθηκε ότι κατά την εφαρμογή των κανόνων εξυπηρέτησης με νόμο προτεραιότητας το βάρος (π.χ. τα βαρύτερα προηγούνται), τότε τα εμπορευματοκιβώτια που δεν εμφάνιζαν αυτό το χαρακτηριστικό (π.χ. τα κενά) εμφάνιζαν πολύ μεγάλους χρόνους αναμονής.

Επιπλέον, μεγάλοι χρόνοι αναμονής παρουσιάστηκαν και κατά την εφαρμογή του κανόνα εξυπηρέτησης FIFO, όταν εφαρμόζονταν οι αλγόριθμοι που επέλεγαν τις θέσεις που θα τοποθετηθεί το εμπορευματοκιβώτιο με βάση κάποιο κριτήριο (πρβλ. αλγορίθμους best fit, worst fit), αφού, στις περιπτώσεις αυτές, ο εξοπλισμός μεταφόρτωσης πραγματοποιούσε πολλές κινήσεις. Οι χρόνοι αναμονής αυτοί ωστόσο περιορίζονταν, όταν αυξανόταν το χρονικό εύρος άφιξης των φορτηγών (αφού με αυτόν τον τρόπο επερχόταν η μείωση του ρυθμού αφίξεων), ενώ εντεινόνταν στην περίπτωση που περιοριζόταν το εύρος του χρόνου άφιξης των φορτηγών (κι οπότε είχαμε αύξηση του ρυθμού των αφίξεων). Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το αποτέλεσμα μιας προσομοίωσης με το λογισμικό ARENA, όπου παρατηρήθηκαν μεγάλοι χρόνοι αναμονής στα εμπορευματοκιβώτια που δεν τηρούσαν το κριτήριο προτεραιότητας.



Εικόνα 21: Στιγμιότυπο από την προσομοίωση με το λογισμικό ARENA



Εικόνα 22: Ενδεικτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, τόσο τη δια χειρός προσομοίωση, όσο και την προσομοίωση με το λογισμικό ARENA, κατέστη δυνατή η βαθύτερη κατανόηση του προβλήματος, καθώς επίσης και ο καθορισμός των στοιχείων και παραμέτρων του προβλήματος που θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη για την καλύτερη αντιμετώπισή του. Έτσι, τα κριτήρια με τα οποία αξιολογήθηκαν στη συνέχεια οι αλγόριθμοι ήταν:

- Ο αριθμός των φορταμαξών που απαιτήθηκαν για τη μεταφορά
- Ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που εξυπηρετήθηκαν
- Ο χρόνος αναμονής των φορτηγών
- Ο αριθμός των μετακινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης
- Η κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού.

Ουσιαστικά, επιζητήθηκε η ελαχιστοποίηση του αριθμού των απαιτούμενων φορταμαξών (για την περίπτωση που τα εμπορευματοκιβώτια ήταν λιγότερα από αυτά που θα μπορούσε να μεταφέρει ο συρμός) ή η μεγιστοποίηση του αριθμού των μεταφερομένων εμπορευματοκιβωτίων (για την περίπτωση που τα εμπορευματοκιβώτια ήταν περισσότερα από τις διαθέσιμες θέσεις που θα μπορούσε να προσφέρει ο συρμός) με περιορισμούς ως προς το χρόνο αναμονής των φορτηγών, το χρόνο αναχώρησης του συρμού (αφορά στον περιορισμό του αριθμού των μετακινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης) και την κατανομή του φορτίου στις φορτάμαξες κατά μήκος του συρμού.

Για την τεκμηρίωση του θέματος αυτού οι αλγόριθμοι προγραμματίστηκαν με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού VBA σε περιβάλλον EXCEL. Ενδεικτικά παρουσιάζεται, στο τέλος του κεφαλαίου, το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου next fit (εικόνα 29), ενώ αναλυτικά οι κώδικες, όπως ακριβώς γράφτηκαν, παρουσιάζονται στο παράρτημα Β, ενώ στην εικόνα 31 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από το φύλλο εργασίας του EXCEL, όπου είχαν προσαρτηθεί όλοι οι αλγόριθμοι.

Wagon	Status	L ₁	W ₁	L ₂	W ₂	L ₃	W ₃	RemainingWeight	RemainingLength	TotalWeight	Αριθμός Βαγονών	Συνολικό Βάρος Συρμού	Κινήσεις εξοπλισμού μεταφόρτωσης
1		6058	10	12192	16			30,5	270	26	30	1427	19
2		6058	13	12192	4			39,5	270	17			
3		6058	11	12192	19			26,5	270	30	Αριθμός containers που εξυπηρετήθηκαν		
4		6058	12	12192	18			26,5	270	30	50		
5		6058	25	6058	5	6058	4	22,5	346	34			
6		6058	11	12192	22			23,5	270	33			
7		6058	16	12192	5			35,5	270	21			
8		6058	26	12192	4			26,5	270	30			
9		6058	15	12192	7			34,5	270	22			
10		12192	21					35,5	6328	21	Φόρτωση Εμπορευματοκιβωτίων με Next Fit Algorithm		
11		12192	26	6058	5			25,5	270	31			
12		12192	16					40,5	6328	16			
13		12192	15					41,5	6328	15			
14		12192	11	6058	11			34,5	270	22	Φόρτωση Εμπορευματοκιβωτίων στο συρμό (First Fit Algorithm)		
15		12192	16					40,5	6328	16			
16		6058	12	12192	29			15,5	270	41			
17		6058	24	12192	9			23,5	270	33			
18		6058	12	12192	13			31,5	270	25	Φόρτωση Εμπορευματοκιβωτίων με Best Fit Algorithm		
19		12192	22					34,5	6328	22			
20		6058	12					44,5	12462	12			
21		6058	26	12192	8			22,5	270	34			
22		6058	18					38,5	12462	18	Με συνδυασμό αλγορίθμων Best Fit - Worst Fit		
23		6058	15					41,5	12462	15			
24		6058	21	12192	4			31,5	270	25			
25		6058	15					41,5	12462	15			
26		12192	24	6058	9			23,5	270	33	Next Fit - First Fit		
27		12192	10	6058	12			34,5	270	22			
28		6058	17					39,5	12462	17			
29		6058	21	12192	5			30,5	270	26			
30		12192	20					36,5	6328	20	Worst Fit		
							min	15,5					
							max	44,5	max	41			
				Εκκαθάριση									

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των απλών αλγορίθμων σε 10 τυχαίες δοκιμές (για κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι αλγόριθμοι).

	Χαρακτηριστικά δοκιμής				
ΔΟΚΙΜΕΣ	20'	40'	45'	Σβάρους ΕΚ	min αριθμός φορταμαξών
1η	18	17	15		33
2η	15	14	21		36
3η	11	21	18	950	39
4η	19	18	13	870	32
5η	16	15	19	845	35
6η	12	24	14	902	38
7η	15	20	15	818	35
8η	16	18	16	849	34
9η	17	20	13	865	33
10η	15	20	15	833	35
11η	23	27	0	762	27
12η	20	30	0	921	30
13η	24	26	0	877	26
14η	20	30	0	823	30
15η	27	23	0	926	25
16η	25	25	0	941	25
17η	27	23	0	726	25
18η	23	27	0	880	27
19η	20	30	0	792	30
20η	26	24	0	722	25

Εικόνα 24:Στοιχεία δοκιμών

	Next Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	38	29	55	1421
2η	30	36	29	40	1314
3η	30	34	29	40	1378
4η	30	42	29	50	1444
5η	30	35	29	48	1308
6η	30	37	29	48	1350
7η	30	37	29	49	1330
8η	30	39	29	47	1336
9η	30	39	29	56	1411
10η	30	38	29	46	1351
min	30	34	29	40	1308
max	30	42	29	56	1444
ΜΟ	30	37,5	29	47,9	1364,3
τυπ. Αποκλ.	0	2,1563859	0	5,008991915	44,71476266
11η	30	45	29	51	1390
12η	30	46	29	51	1537
13η	30	48	29	50	1563
14η	30	45	29	46	1465
15η	29	50	28	56	1607,5
16η	29	50	28	55	1622,5
17η	29	50	28	53	1407,5
18η	30	50	29	56	1585
19η	30	47	29	55	1452
20η	30	50	29	56	1427
min	29	45	28	46	1390
max	30	50	29	56	1622,5
ΜΟ	29,7	48,1	28,7	52,9	1505,65
τυπ. Αποκλ	0,458257569	2,0712315	0,458257569	3,176476035	82,65623086
Ολικό min	29	34	28	40	1308
Ολικό max	30	50	29	56	1622,5
Ολικός ΜΟ	29,85	42,8	28,85	50,4	1434,975
Ολική τυπ. Αποκλ.	0,357071421	5,706137	0,357071421	4,882622246	97,00869484

Εικόνα 25: Επίλυση με Next Fit

	First Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξιών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	45	139	55	1568
2η	30	43	75	54	1443
3η	30	41	154	50	1511
4η	30	47	111	56	1546
5η	30	44	144	55	1442
6η	30	42	107	56	1434
7η	30	45	153	52	1457
8η	30	45	112	53	1445
9η	30	47	96	56	1518
10η	30	45	114	49	1450
min	30	41	75	49	1434
max	30	47	154	56	1568
ΜΟ	30	44,4	120,5	53,6	1481,4
τυπ. Αποκλ.	0	1,8547237	24,75984653	2,416609195	46,97701566
11η	30	50	150	46	1467
12η	30	50	189	53	1626
13η	28	50	143	55	1535
14η	30	50	101	53	1528
15η	25	50	68	56	1513,5
16η	26	50	85	52	1552
17η	25	50	90	56	1313,5
18η	27	50	82	55	1514,5
19η	30	49	165	53	1469
20η	27	50	92	48	1356,5
min	25	49	68	46	1313,5
max	30	50	189	56	1626
ΜΟ	27,8	49,9	116,5	52,7	1487,5
τυπ. Αποκλ.	1,989974874	0,3	39,38337213	3,163858404	87,66042437
Ολικό min	25	41	68	46	1313,5
Ολικό max	30	50	189	56	1626
Ολικός ΜΟ	28,9	47,15	118,5	53,15	1484,45
Ολική τυπ. Αποκλ.	1,78605711	3,0540956	32,95527272	2,850877058	70,39103281

Εικόνα 26: Επίλυση με First Fit

	Best Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξιών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	45	145	55	1568
2η	30	43	65	54	1443
3η	30	41	117	45	1511
4η	30	47	113	56	1546
5η	30	44	118	55	1442
6η	30	42	92	53	1434
7η	30	45	149	52	1457
8η	30	45	81	53	1445
9η	30	47	95	56	1518
10η	30	45	111	53	1450
min	30	41	65	45	1434
max	30	47	149	56	1568
ΜΟ	30	44,4	108,6	53,2	1481,4
τυπ. Αποκλ.	0	1,8547237	25,02878343	3,02654919	46,97701566
11η	30	50	91	46	1467
12η	30	50	100	51	1626
13η	28	50	119	56	1535
14η	30	50	83	46	1528
15η	25	50	82	56	1513,5
16η	26	50	81	55	1552
17η	25	50	90	56	1313,5
18η	27	50	80	55	1514,5
19η	30	49	93	54	1469
20η	27	50	88	48	1356,5
min	25	49	80	46	1313,5
max	30	50	119	56	1626
ΜΟ	27,8	49,9	90,7	52,3	1487,5
τυπ. Αποκλ.	1,989974874	0,3	11,15392308	3,97617907	87,66042437
Ολικό min	25	41	65	45	1313,5
Ολικό max	30	50	149	56	1626
Ολικός ΜΟ	28,9	47,15	99,65	52,75	1484,45
Ολική τυπ. Αποκλ.	1,78605711	3,0540956	21,34309022	3,561951712	70,39103281

Εικόνα 27: Επίλυση με Best Fit

	Worst Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξιών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	45	160	46	1499
2η	30	40	115	38	1388
3η	30	40	190	48	1485
4η	30	44	153	49	1455
5η	30	44	178	54	1457
6η	30	42	189	53	1445
7η	30	43	125	35	1403
8η	30	43	127	50	1435
9η	30	45	157	46	1495
10η	30	44	206	46	1407
min	30	40	115	35	1388
max	30	45	206	54	1499
ΜΟ	30	43	160	46,5	1446,9
τυπ. Αποκλ.	0	1,7320508	29,28822289	5,696490147	37,1226346
11η	30	50	272	39	1467
12η	30	50	237	49	1626
13η	30	50	244	49	1582
14η	30	49	226	54	1524
15η	30	50	214	49	1631
16η	30	50	273	51	1646
17η	30	50	221	42	1431
18η	30	50	215	46	1585
19η	30	49	206	47	1469
20η	30	50	253	42	1427
min	30	49	206	39	1427
max	30	50	273	54	1646
ΜΟ	30	49,8	236,1	46,8	1538,8
τυπ. Αποκλ.	0	0,4	22,73521498	4,377213726	81,21797831
Ολικό min	30	40	115	35	1388
Ολικό max	30	50	273	54	1646
Ολικός ΜΟ	30	46,4	198,05	46,65	1492,85
Ολική τυπ. Αποκλ.	0	3,6249138	46,20765629	5,082076347	78,09370973

Εικόνα 28: Επίλυση με Worst Fit

Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιβεβαιώθηκαν οι εκτιμήσεις για μεμονωμένη καλή συμπεριφορά αυτών των αλγορίθμων. Συνοπτικά, τα καλύτερα αποτελέσματα, ανά κριτήριο παρουσιάζονται στον πίνακα 12:

Πίνακας 12: Αλγόριθμοι με την καλύτερη συμπεριφορά ανά κριτήριο

<u>Κριτήρια</u> (όπως υπολογίστηκαν)	<u>Αλγόριθμοι με την καλύτερη συμπεριφορά</u>
Αριθμός των φορταμαξιών	First Fit, Best Fit
Αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων	First Fit, Best Fit
Αριθμός των μετακινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης	Next Fit
Κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού	Worst Fit

Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης νέων αλγορίθμων, οι οποίοι θα προκύψουν ως σύνθεση των απλών και θα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματά τους. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκαν δύο, νέοι, σύνθετοι αλγόριθμοι, οι Best Fit – Worst Fit και Next Fit – First Fit, που παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

4.5 Ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτωσης σιδηροδρομικών συρμών

Τα συμπεράσματα της προηγούμενης διερεύνησης μας οδήγησαν στη διατύπωση νέων αλγορίθμων, των Best Fit – Worst Fit και Next Fit – First Fit, οι οποίοι προσάρμοσαν τα χαρακτηριστικά των απλών αλγορίθμων από τους οποίους προήλθαν. Πιο συγκεκριμένα, ο Best Fit – Worst Fit, εφάρμοζε τον αλγόριθμο Best Fit, όταν το εμπορευματοκιβώτιο ήταν ελαφρύ (συνήθως κενό), ενώ εφάρμοζε τον Worst Fit κατά τη φόρτωση των βαρύτερων εμπορευματοκιβωτίων. Ο συνδυασμός αυτός είχε δύο σκοπούς. Πρώτον, την καλύτερη κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού, ώστε να επιτευχθούν μικρότερες τιμές μεγίστων φορτίων, ούτως ώστε να περιοριστεί η καταπόνηση του συστήματος τροχού – σιδηροτροχιάς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής του worst fit για τα έμφορτα εμπορευματοκιβώτια. Δεύτερον, τον περιορισμό των απαιτούμενων φορταμαξών ή την εξυπηρέτηση των, όσο το δυνατόν, περισσότερων εμπορευματοκιβωτίων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της χωρητικότητας των φορταμαξών μέσω της αποφυγής του συνδυασμού κενών εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ τους που θα οδηγούσε σε σπατάλη της διαθέσιμης χωρητικότητας της φορτάμαξας. Το χαρακτηριστικό αυτό προσφέρεται μέσω της απαίτησης τα ελαφριά (π.χ. <10 kgr.) εμπορευματοκιβώτια να φορτώνονται με χρήση του αλγορίθμου best fit.

Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος Next Fit – First Fit, εφάρμοζε τον Next Fit μέχρι να φορτωθεί για πρώτη φορά και η τελευταία φορτάμαξα, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούσε τον αλγόριθμο First Fit. Η βασική λογική με την οποία αναπτύχθηκε αυτός ο αλγόριθμος, ήταν ο περιορισμός των κινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης, χαρακτηριστικό που προσέφερε η αρχική χρησιμοποίηση του next fit. Η εφαρμογή, στη συνέχεια, του first fit, επιτρέπει την εκμετάλλευση του υπολειπόμενου διαθέσιμου χώρου της φορτάμαξας. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί και με τον αλγόριθμο best fit, χωρίς ουσιαστικές διαφορές (ο best fit, για παράδειγμα, θα εμφάνιζε μεγαλύτερες τιμές μεγίστου φορτίου). Τα χαρακτηριστικά των σύνθετων αυτών αλγορίθμων μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω πίνακα (13).

Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά νέων, σύνθετων αλγορίθμων.

<u>Σύνθετοι αλγόριθμοι</u>	<u>Βασικά χαρακτηριστικά τους</u>
Best Fit – Worst Fit	• Ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων φορταμαξών ή μεγιστοποίηση του αριθμού των εμπορευματοκιβωτίων που εξυπηρετήθηκαν. • Καλή κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού (μείωση των μεγίστων τιμών).
Next Fit – First Fit	• Ελαχιστοποίηση των κινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης • Φόρτωση σε όλο το μήκος του συρμού.

Για την περαιτέρω τεκμηρίωση του θέματος, αλλά και την παραγωγή πιο ακριβών συγκριτικών συμπερασμάτων και οι σύνθετοι αυτοί αλγόριθμοι προγραμματίστηκαν, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic for Applications (VBA) μέσα στο περιβάλλον του EXCEL. Κατά την εφαρμογή των αλγορίθμων αυτών, όπως άλλωστε και των απλών, δεν θεωρήθηκε παράλληλα και κάποιος ιδιαίτερος κανόνας εξυπηρέτησης (όπως είχε θεωρηθεί, κατά την αρχική φάση, κανόνας εξυπηρέτησης με νόμο προτεραιότητας το βάρος ή νόμο φόρτωσης με αποκλειστικό συνδυασμό 40' και 20'). Επομένως, όλες οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν θεωρούν ότι εφαρμόζεται ο κανόνας εξυπηρέτησης FIFO. Το γεγονός, όμως, ότι θεωρήθηκε ότι δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων τα στοιχεία, θα επέτρεπε, ούτως ή άλλως, περιορισμένη χρήση αυτών των κανόνων εξυπηρέτησης μόνο στα εμπορευματοκιβώτια που ανέμεναν να εξυπηρετηθούν. Είναι πολύ ενδιαφέρον, ωστόσο να αναφέρουμε, ότι ο Next Fit – First Fit, αφήνει κατά τον πρώτο γύρο φόρτωσης που εκτελεί, πολλές κενές θέσεις. Αν λοιπόν ο First – Fit, που εκτελείται στο δεύτερο γύρο φόρτωσης, εξυπηρετούσε τα εμπορευματοκιβώτια με νόμο προτεραιότητας τα βαρύτερα από τα αναμένοντα εμπορευματοκιβώτια¹⁹, τότε θα επιτυγχανόταν ακόμα καλύτερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας των φορταμαξών, ενώ επίσης οι περισσότερες βαριές φορτάμαξες θα ήταν τοποθετημένες προς το εμπρόσθιο μέρος του συρμού. Αυτός είναι και ο ενδεδειγμένος τρόπος χρήσης του αλγορίθμου, ο συνδυασμός του, δηλαδή, με κανόνα εξυπηρέτησης το νόμο προτεραιότητας «πρώτα τα βαρύτερα».

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τους σύνθετους αυτούς αλγορίθμους παρουσιάζονται παρακάτω. Για λόγους σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τυχαίες δοκιμές, που χρησιμοποιήθηκαν στους απλούς.

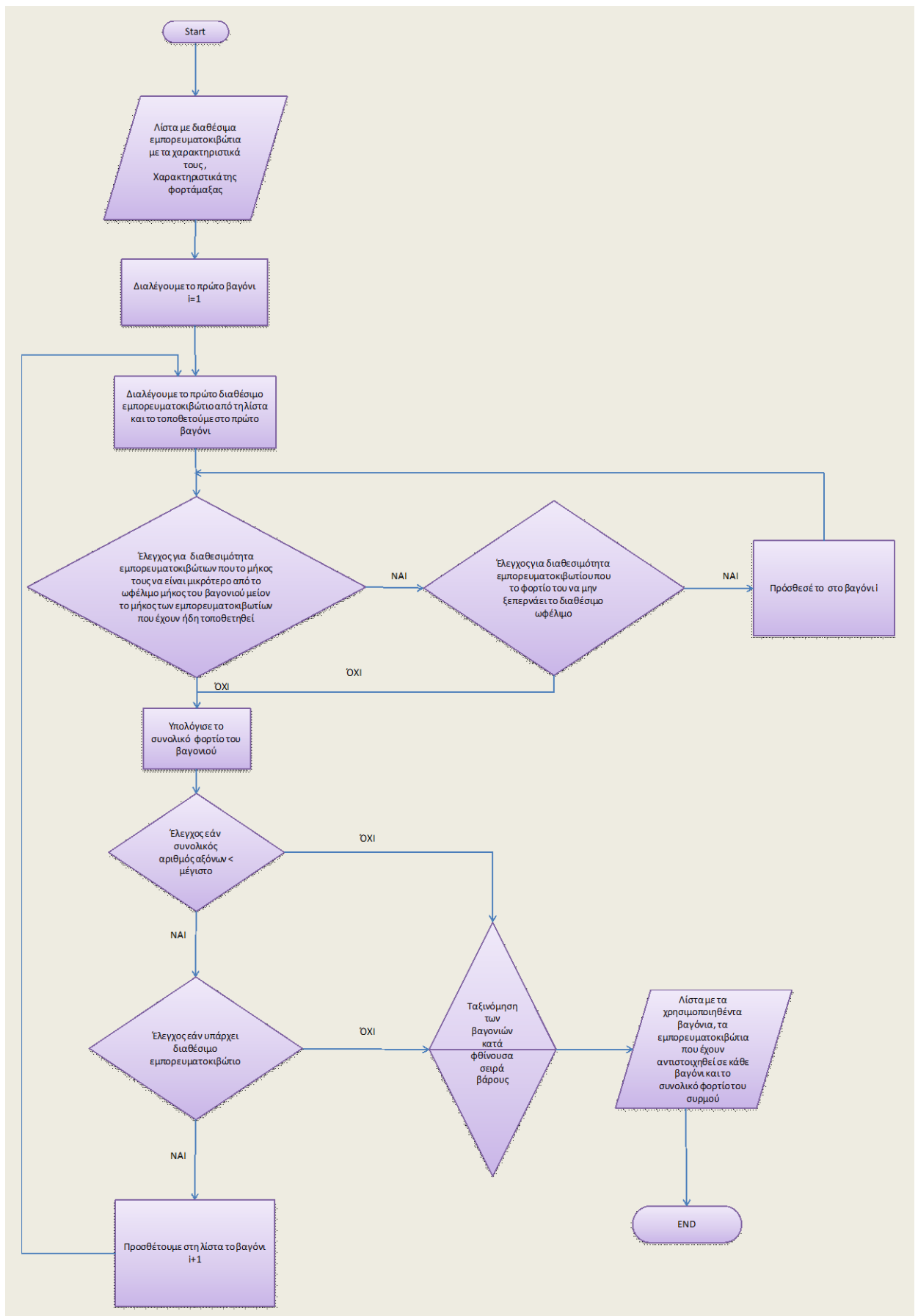
¹⁹ Όταν ο αλγόριθμος First Fit επιλέγει τα δεδομένα του κατά φθίνουσα σειρά (από το μεγαλύτερο στο μικρότερο) ονομάζεται First Fit Decreasing ή Descending (FFD). Ανάλογες ονομασίες έχουν και οι υπόλοιποι αλγόριθμοι (π.χ. Best Fit Decreasing) (Martello, et al., 1990).

	Next Fit - First Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξιών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	47	72	55	1563
2η	30	40	65	50	1384
3η	30	40	107	49	1507
4η	30	46	80	50	1529
5η	30	44	98	50	1446
6η	30	42	81	54	1447
7η	30	44	70	50	1435
8η	30	44	64	55	1422
9η	30	44	64	56	1498
10η	30	42	65	50	1391
min	30	40	64	49	1384
max	30	47	107	56	1563
ΜΟ	30	43,3	76,6	51,9	1462,2
τυπ. Αποκλ.	0	2,1931712	14,36802004	2,586503431	56,52043878
11η	30	48	61	51	1451
12η	30	48	59	52	1588
13η	30	50	76	50	1582
14η	30	47	56	46	1489
15η	29	50	28	56	1607,5
16η	29	50	28	55	1622,5
17η	29	50	28	53	1407,5
18η	30	50	29	56	1585
19η	30	48	57	55	1462
20η	30	50	29	56	1427
min	29	47	28	46	1407,5
max	30	50	76	56	1622,5
ΜΟ	29,7	49,1	45,1	53	1522,15
τυπ. Αποκλ	0,458257569	1,1357817	17,48399268	3,130495168	78,23076441
Ολικό min	29	40	28	46	1384
Ολικό max	30	50	107	56	1622,5
Ολικός ΜΟ	29,85	46,2	60,85	52,45	1492,175
Ολική τυπ. Αποκλ.	0,357071421	3,3852622	22,45278379	2,923610781	74,53728513

Εικόνα 29: Επίλυση με Next Fit - First Fit

	Best Fit - Worst Fit				
ΔΟΚΙΜΕΣ	Αριθμός φορταμαξιών	Αριθμό ΕΚ	Κινήσεις εξοπλισμού	max φορτίο σε μία φορτάμαξα	Συνολικό φορτίο συρμού
1η	30	45	157	56	1568
2η	30	43	70	43	1443
3η	30	41	117	49	1511
4η	30	47	127	56	1546
5η	30	44	122	55	1442
6η	30	42	83	48	1434
7η	30	45	141	39	1457
8η	30	45	119	54	1445
9η	30	47	89	56	1518
10η	30	45	117	49	1450
min	30	41	70	39	1434
max	30	47	157	56	1568
ΜΟ	30	44,4	114,2	50,5	1481,4
τυπ. Αποκλ.	0	1,8547237	25,2499505	5,678908346	46,97701566
11η	30	50	79	46	1467
12η	30	50	163	49	1626
13η	28	50	115	55	1535
14η	30	50	77	46	1528
15η	25	50	82	56	1513,5
16η	26	50	97	54	1552
17η	25	50	93	56	1313,5
18η	27	50	88	55	1514,5
19η	30	49	115	45	1469
20η	27	50	82	48	1356,5
min	25	49	77	45	1313,5
max	30	50	163	56	1626
ΜΟ	27,8	49,9	99,1	51	1487,5
τυπ. Αποκλ	1,989974874	0,3	24,96177077	4,358898944	87,66042437
Ολικό min	25	41	70	39	1313,5
Ολικό max	30	50	163	56	1626
Ολικός ΜΟ	28,9	47,15	106,65	50,75	1484,45
Ολική τυπ. Αποκλ.	1,78605711	3,0540956	26,21693155	5,068283733	70,39103281

Εικόνα 30: Επίλυση με Best Fit - Worst Fit



Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου next fit

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή στοχεύει στην αντιμετώπιση του πραγματικού προβλήματος της φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων σε σιδηροδρομικό συρμό λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της εμπορευματικής μεταφοράς των ελληνικών σιδηροδρόμων [εμπορευματοκιβώτια των 20', 40' και 45', φορτάμαξες με μέγιστη ικανότητα μεταφοράς 56 τόνων και δυνατότητα τοποθέτησης εμπορευματοκιβωτίων με τρεις εναλλακτικούς συνδυασμούς φόρτωσης (3X20' ή 1X40'+1X20' ή 1X45')]. Για το λόγο αυτό, διατυπώθηκαν αλγόριθμοι, βασικό χαρακτηριστικό των οποίων είναι ότι δεν θεωρούν γνωστά τα μήκη και βάρη των εμπορευματοκιβωτίων πριν την άφιξή τους στο σιδηροδρομικό σταθμό. Το χαρακτηριστικό αυτό διαφοροποιεί το πρόβλημα σε σχέση με αντίστοιχα προβλήματα που έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία αναφορικά με τεχνικές και μεθοδολογίες επίλυσης της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων σε συρμό.

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι αξιολογήθηκαν με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αριθμού των φορταμαξών με περιορισμούς ως προς το χρόνο αναμονής των φορτηγών, το χρόνο αναχώρησης του συρμού και την κατανομή του φορτίου στις φορτάμαξες κατά μήκος του συρμού.

Η συνολική διερεύνηση του προβλήματος έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, επιχειρήθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με κανόνες που βασίζονται σε απλούς ευρετικούς αλγόριθμους, οι οποίοι εφαρμόζονται για την επίλυση του bin packing problem. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι next fit, first fit, best fit και worst fit, οι οποίοι εφαρμόστηκαν και για τους δύο κανόνες εξυπηρέτησης, η προσομοίωση των οποίων έγινε με το λογισμικό ARENA, μέσω του οποίου υπολογίστηκε ο χρόνος αναμονής των φορτηγών. Μερικά από τα συμπεράσματα, από την πρώτη αυτή διερευνητική φάση, ήταν:

- Η μίξη των εμπορευματοκιβωτίων, και κυρίως, η σχέση του αριθμού μεταξύ των 20' και 40' αποτελεί κρίσιμο παράγοντα όσον αφορά τον τελικό αριθμό των φορταμαξών.
- Η εξυπηρέτηση με βάση τον κανόνα FIFO οδηγεί σε τυχαία κατανομή των βαρύτερων εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο συρμό.
- Η εξυπηρέτηση με βάση κάποιο νόμο προτεραιότητας (π.χ. σύμφωνα με το μεγαλύτερο βάρος), έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αναμονή των εμπορευματοκιβωτίων εκείνων, που δεν εμφανίζουν αυτό το χαρακτηριστικό (π.χ. των κενών).
- Η βελτιστοποίηση της κατανομής του φορτίου κατά μήκος του συρμού, οδηγούσε, στις περισσότερες περιπτώσεις, σε αύξηση των μετακινήσεων των μηχανημάτων φόρτωσης με κίνδυνο, η ολοκλήρωση της φόρτωσης να μην πραγματοποιηθεί εντός του προβλεπόμενου χρόνου

(προγραμματισμένος χρόνος αναχώρησης συρμού). Η ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων του εξοπλισμού φόρτωσης μπορούσε να επιτευχθεί (με χρήση του αλγορίθμου next fit), όμως, στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός των απαιτούμενων φορταμαξών απείχε σημαντικά από το βέλτιστο.

Εκ των ανωτέρω γίνεται αντιληπτή η ανάγκη σύνθεσης των απλών αλγορίθμων, με τρόπο, ώστε να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματά τους. Για το λόγο αυτόν, αναπτύχθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι, οι οποίοι βασίστηκαν σε συνδυασμούς των αλγορίθμων next fit, first fit, best fit και worst fit. Οι συνδυασμοί αυτοί ήταν οι: α) best fit για τα κενά – worst fit για τα έμφορτα και β) next fit, στον πρώτο κύκλο φόρτωσης, μέχρι να χρησιμοποιηθεί και η τελευταία φορτάμαξα και στη συνέχεια first fit, ξεκινώντας τη φόρτωση πάλι από την αρχή.

Ο σύνθετος αλγόριθμος best fit – worst fit οδήγησε σε πολύ καλύτερη κατανομή του φορτίου κατά μήκος του συρμού, με σαφώς μειωμένες μέγιστες τιμές, με συνεπακόλουθες θετικές επιπτώσεις για τις φθορές και την καταπόνηση τόσο της γραμμής, όσο και των τροχών του συρμού. Αντίθετα, δεν ήταν αποτελεσματικός σε σχέση με τον κανόνα «τα βαρύτερα εμπορευματοκιβώτια να τοποθετούνται στο εμπρόσθιο μέρος του συρμού». Ένα ακόμα αρνητικό στοιχείο του αλγορίθμου αυτού είναι το ότι οδηγεί σε αυξημένες κινήσεις του εξοπλισμού φόρτωσης. Αντίθετα, ο συνδυασμός next fit – first fit, οδήγησε σε μειωμένες κινήσεις του εξοπλισμού φόρτωσης, ενώ επίσης έδωσε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην τοποθέτηση των βαρύτερων εμπορευματοκιβωτίων προς το εμπρόσθιο μέρος του συρμού. Αυτό συμβαίνει, επειδή αφήνει ελεύθερες θέσεις στο εμπρόσθιο μέρος του συρμού, οι οποίες μπορούν να καλυφθούν από τα βαρύτερα εμπορευματοκιβώτια που θα καταφτάσουν αργότερα.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους σύνθετους αλγορίθμους ήταν σημαντικά καλύτερα από αυτά των μεμονωμένων απλών αλγορίθμων από τους οποίους προέκυψαν. Ο αλγόριθμος next fit – first fit, έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, όταν ο αριθμός των φορταμαξών του συρμού ήταν από την αρχή δεδομένος, όπως, για παράδειγμα, είναι στην περίπτωση συρμών που ταξιδεύουν με σταθερή σύνθεση φορταμαξών, εξυπηρετώντας τακτικές συνδέσεις μικρών, συνήθως, αποστάσεων (shuttle services). Αντίθετα, ο αλγόριθμος best fit – worst fit φαίνεται αποδοτικότερος για τις περιπτώσεις που υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της σύνθεσης του συρμού με προσθαφαίρεση φορταμαξών, όπως, για παράδειγμα, στις συνήθεις περιπτώσεις σύνθεσης συρμών που εξυπηρετούν δρομολόγια μεγάλων αποστάσεων.

6 ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

- Σαν συνέχεια αυτής της εργασίας μπορούν να συγκριθούν οι νέοι αυτοί αλγόριθμοι με τις λύσεις που προσφέρουν οι ακριβείς μαθηματικές επιλύσεις μέσω ακέραιου προγραμματισμού.
- Επίσης, θα μπορούσαν να συγκριθούν δύο τρόποι μεταφόρτωσης: α) απευθείας, αγνοώντας τις επόμενες αφίξεις και β) μέσω προσωρινής εναπόθεσης, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα καλύτερου σχεδιασμού της φόρτωσης.
- Άλλα ζητήματα που προέκυψαν αφορούν στην αλληλεπίδραση του τροχού με τη σιδηροδρομική γραμμή και πώς εξελίσσονται οι φθορές ανάλογα με τα φορτία.
- Τέλος θα μπορούσε να παραχθεί ένα γενικό μοντέλο κόστους της σιδηροδρομικής μεταφοράς που θα λαμβάνει υπόψη του όλα τα επιμέρους στοιχεία, ώστε να ελεγχθεί ο βαθμός επιρροής κάθε τμήματος της μεταφοράς στο κόστος.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aggoun A., Rhiat A. & Grassien J.P., 2011. *Online Assignments of Containers to Trains Using Constraint Programming.* Proceedings of the 5th International Workshop on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence. Hyderabad, India, December 7-9, 2011, pp. 395-405.

Anghinolfi D., Foti L., Maratea M., Paolucci M., Siri S., 2012. *Optimal loading plan for multiple trains in container terminals.* 5th International Workshop on Freight Transportation and Logistics. Mykonos, Greece.

Anghinolfi D., Paolucci M., Sacone S., Siri S., 2011. *Freight transportation in railway networks with automated terminals: A mathematical model and MIP heuristic approaches.* European Journal of Operational Research, Volume 214, Issue 3, pp. 588-594.

Bostel, N. & Dejax, P. 1998. Models and algorithms for container allocation problems on trains in a rapid transshipment shunting yard. *Transportation Science.* 1998, 32:370-9.

Botenkoming, M., Macharis, C. & Tripp, J. 2004. Is a new applied transportation research field emerging?—a review of intermodal rail-truck freight transport literature. *Transportation Research.* 2004, 38:1-34.

Bruns F., Knust S., 2010. *Optimized load planning of trains in intermodal transportation.* OR Spectrum, Published online

Corry P., Kozan E., 2006. *An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains.* Computers and Operations Research, Volume 33 Issue 1, pp 1 – 17.

Corry P., Kozan E., 2008. *Optimised loading patterns for intermodal trains.* OR Spectrum, 30(4), pp. 721-750.

De Lucca Silva, L. & Nobrega, M. L. 1978. A research trip for the Study of Axle Load. *Heavy Haul Conference.* 1978.

Ernst A. & Pudney P., 2001. *Efficient loading of intermodal container trains.* Study Group Report.

Feo, A. & Gonzalez-Velarde, L. 1995. The intermodal trailer assignment problem. *Transportation Scienc. Transportation Science.* 1995, 29:330-41.

Martello, S. & Toth, P. 1990. *Knapsack problems: Algorithms and Computer Implementations.* Chichester : John Wiley & Sons, 1990.

Martello S., Vigo D., 1998. *Exact Solution of the Two-Dimensional Finite Bin Packing Problem*. Management Science, Vol. 44, No. 3, pp. 388-399.

Pachl, J. 2011. *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. s.l. : Vieweg + Teubner, 2011.

Powell, B. & Carvalho, A. 1998. Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations. *Transportation Science*. 1998, 32:110-26.

Profillidis, V. 2006. *Railway Management and Engineering*. Hampshire : Ashgate Publishing Limited, 2006.

Rail Safety and Standard Board. 2010. *Research into trains with lower mass in Britain*. 2010.

Steenken, D., Voss, S. & Stahlbock, R. 2004. Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*. 2004, 26.

Αμπακούμκιν, Κ. 1990. *Μοναδοποιημένα Φορτία - Συνδυασμένες Μεταφορές Εμπορευμάτων*. Αθήνα : Συμμετρία, 1990.

Ε.Ε. 2011. *Λευκή Βίβλος: Χάρτης πορείας για έναν Ενιαίο Ευρωπαϊκό Χώρο μεταφορών*. 2011.

Ε.Ε. 1996. *White Paper: A strategy for revitalising the community's railways*. 1996.

Καρλαύτης, Μ. & Λαγαρός, Ν. 2010. *Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς*. Αθήνα : Συμμετρία, 2010.

Καρλαύτης, Μ. & Λυμπέρης, Κ. 2009. *Συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών*. Αθήνα : Συμμετρία, 2009.

Λυμπέρης, Κ. 2009. *Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές*. Αθήνα : Συμμετρία, 2009.

Νέα Δομή. 1996. Εγκυκλοπαίδεια. Αθήνα : Δομή, 1996. Τόμ. 31.

ΟΣΕ. 2009. Γενικός Κανονισμός Κινήσεως. Αθήνα : s.n., 2009. Τόμ. Β.

Προφυλλίδης, Βασίλης. 1993. Σιδηροδρομική. Ξάνθη : ΔΠΘ, 1993. Τόμ. 1.

Πυργίδης, Χρίστος. 2009. *Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών*. Θεσσαλονίκη : Ζήτη, 2009.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

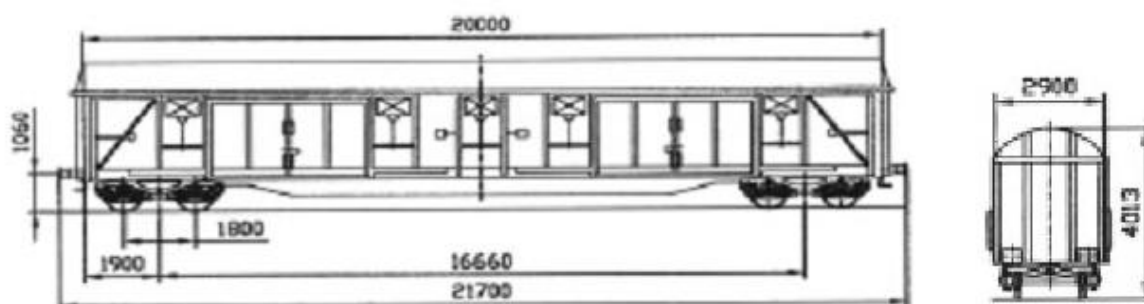
Παράρτημα Α: Χαρακτηριστικά τετραξονικών φορταμαξών τυπικής κατασκευής

Κλειστή φορτάμαξα τυπικής κατασκευής (κατηγορία G - τετραξονικά)

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Κατά UIC		Παρατηρήσεις
	Τύπος 1 (Gas/Gass)	Τύπος 2 (Gabs/Gabss)	
Αριθμός αξόνων	4	4	
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	16.520 mm	21.700 mm	
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως (κατ ελάχιστον)	15.200 mm	20.410 mm	
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	2.600 mm	2.590 mm	
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	40 m ²	53 m ²	
Ωφέλιμος όγκος	105 m ³	137 m ³	
Ύπαρξη θυρών	2 πλευρικές, ανοίγματος 2.150 mm x 2.500 mm ή 1 πλευρική ανοίγματος 2.150 mm x 4000 mm	2 πλευρικές, ανοίγματος 2.150 mm x 4000 mm	Μπορεί να επιτρέψει την είσοδο περνοφόρου οχήματος
Εσωτερικό ύψος φορτάμαξας	Εξασφαλίζει 2.400 mm σε πλάτος 2.000 mm	Εξασφαλίζει 2.400 mm σε πλάτος 2.000 mm	Οροφή μορφής θόλου. Το μέγιστο ύψος εξαρτάται από τον κατασκευαστή (π.χ. Gabss της ganeystrans, 4013mm)
Απόβαρο	23 t	29 t	
Άνοιγμα εξαερισμού	4 ανά πλευρά με δυνατότητα σφράγισης	5 ανά πλευρά με δυνατότητα σφράγισης	
Ελάχιστη ακτίνα	60 m	60 m	
Απόσταση μεταξύ των αξόνων των φορείων	11.480 mm	16.660 mm	
Μέγιστη ταχύτητα	120km/h	120 km/h	
Χρήσεις – ιδιαίτερα χαρακτηριστικά	• Προορίζεται κυρίως για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων στις καιρικές συνθήκες και δεμάτων. • Για τη μεταφορά δημητριακών και χύδην προϊόντων, μπορεί να διαθέτει ανοίγματα στην οροφή, απ' όπου θα φορτώνεται, ενώ το πάτωμα θα διαθέτει χοάνες για την αποθήκευσή τους • Σε συγκεκριμένους τύπους (Gbqss) διαθέτει θέρμανση για την προστασία των προϊόντων.		



Εικόνα 32: Κλειστή φορτάμαξα τύπου Gabss (Πηγή: germanrail.8.forumer.com)



Εικόνα 33: Γραμμικό σχέδιο κλειστής φορτάμαξας τύπου Gabss (Πηγή: www.guneytrans.com)

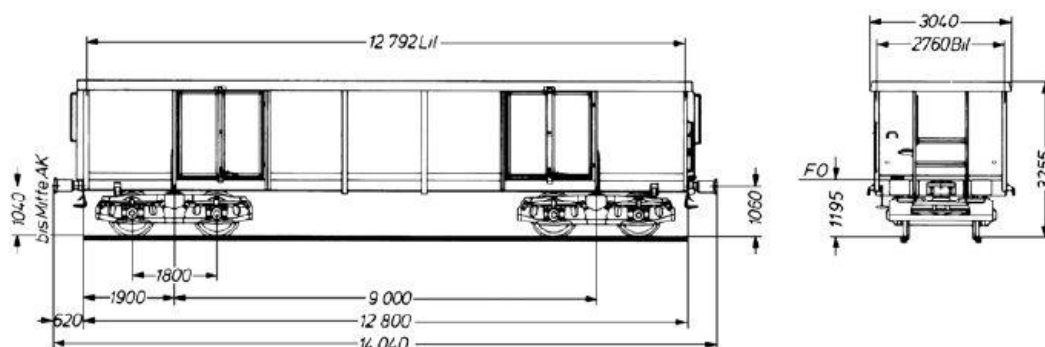
Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτάμαξας Gags που διαθέτει ο ΟΣΕ	
Αριθμός αξόνων	4
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	16.450 mm
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως	15.200 mm
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	2.600 mm
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	40 m ²
Ωφέλιμος όγκος	95 m ³
Ύπαρξη θυρών	2 πλευρικές, 2.500 mm x 2.500 mm (επιτρέπει την είσοδο περονοφόρου)
Εσωτερικό ύψος φορτάμαξας	2.670
Απόβαρο	23,5 t
Απόσταση μεταξύ των αξόνων των φορέων	11.480 mm
Μέγιστη ταχύτητα	100km/h
Χρήσεις – ιδιαίτερα χαρακτηριστικά:	
- Είναι κατάλληλη για μεταφορά εμπορευμάτων ευπαθών στις καιρικές συνθήκες σε μορφή δεμάτων ή κιβωτίων, ογκωδών και μεγάλου μήκους αντικειμένων και χύμα φορτίου συσκευασμένου σε σάκους. - Επιτρέπει την είσοδο περονοφόρου για διακίνηση εμπορευμάτων τοποθετημένων σε παλέτες. - Προσφέρεται και για τη μεταφορά φορτίων χύδην σιτηρών και δημητριακών	

Ανοιχτή φορτάμαξα υψηλών παρειών (Κατηγορία Ε)

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Κατά UIC		Παρατηρήσεις
	Τύπος 1 (Eas/Eaos)	Τύπος 2 (Eanos)	
Αριθμός αξόνων	4	4	
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	14.040 mm	15.740 mm	
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως	12.710 mm	14.490 mm	
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	2.760 mm	2.720 mm	
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	35 m ²	39,4 m ²	
Ωφέλιμος όγκος	71 m ³	82,5 m ³	
Ύπαρξη θυρών	• 2 πλευρικές θύρες με καθαρό άνοιγμα 1800 x 1800 mm • πιθανή ύπαρξη καταπακτής • Μετωπικές θύρες		
Μέγιστο ύψος φορτάμαξας	3.340 mm	3.340 m	
Μέγιστο πλάτος φορτάμαξας	3.040 mm		
Ελάχιστη ακτίνα	35 m	60 m	
Απόβαρο	22 t	25 t	
Μέγιστη ταχύτητα	100 km/h έμφορτο	100 km/h έμφορτο	
Δυνατότητα ανατροπής κιβωτίου	Προτείνεται	Οπωσδήποτε	
Πάτωμα	Ξύλινο, μεταλλικό ή συνθετικό	Μεταλλικό με δυνατότητα απορροής υδάτων	
Χρήσεις – ιδιαίτερα χαρακτηριστικά	• Προορίζονται για μεταφορά παντός είδους χύδην φορτίου (άνθρακες, λιγνίτη, μεταλλευμάτων κ.λπ.), και γενικά προϊόντων μη ευπαθών στις καιρικές συνθήκες, καθώς επίσης και για μεταφορά ογκωδών εμπορευμάτων. • Υπάρχει δυνατότητα προσδέσεως για μεταφορά με Ferry - Boat		



Εικόνα 34:Φορτάμαξα Eaos των τσέχικων σιδηροδρόμων (Πηγή: www.lokotrans.cz)



Εικόνα 35:Γραμμικό σχέδιο τυπικής φορτάμαξας Eaos των γερμανικών σιδηροδρόμων (Πηγή: Railion DB)

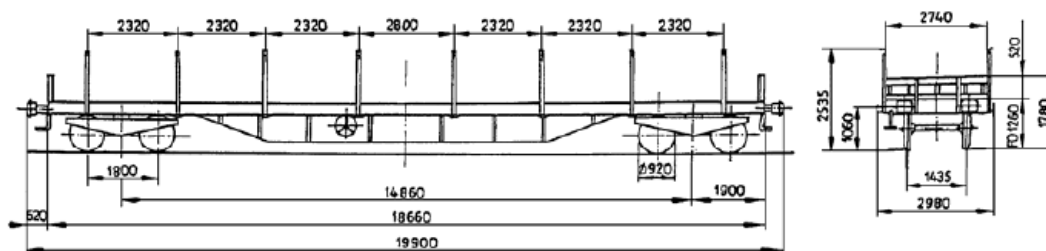
Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτάμαξας τύπου Eaos-x που διαθέτει ο ΟΣΕ	
Αριθμός αξόνων	4
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	14.540 mm
Ύψος δαπέδου από σιδηροτροχιά	1.410 mm
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως	12.452 mm
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	2.760 mm
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	34 m ²
Μέγιστο πλάτος φορτάμαξας	3.010 mm
Μέγιστο ύψος φορτάμαξας	3.405 mm
Ωφέλιμος όγκος φορτώσεως	71 m ³
Απόβαρο	30 t
Μέγιστη ταχύτητα φορτάμαξας	120 km/h κενό
	100 km/h έμφορτο
Ύπαρξη θυρών	2 πλευρικές θύρες με καθαρό άνοιγμα 1.800 x 1.800 mm.
Δυνατότητα ανατροπής κιβωτίου	Με υδραυλικό σύστημα ανατροπής του κιβωτίου προς τη δεξιά ή την αριστερή πλευρά με ταυτόχρονο άνοιγμα ολόκληρων των πλευρικών τοιχωμάτων.
Πάτωμα	Χαλύβδινο

Επίπεδη φορτάμαξα (Κατηγορία R)

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Κατά UIC		Παρατηρήσεις
	Τύπος 1(Rs/Res, Rns/Rens)	Τύπος 2 (Rmms/Remms, Rmmns/Remmns)	
Αριθμός αξόνων	4	4	
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	19.900 mm	14.040 mm	
Ύψος δαπέδου από σιδηροτροχιά	1.235 mm		
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως	18.500 mm	12.640 mm	
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	• 2.740 mm χωρίς πλευρικές παρειές • 2.640 mm με πλευρικές παρειές	• 2.900 mm χωρίς πλευρικές παρειές • 2.750 mm με πλευρικές παρειές	
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	51 m ²	35 m ²	
Μέγιστο ύψος μετωπικών παρειών (και πλευρικών, εφόσον υπάρχουν)	520 mm	520 mm	Οι μετωπικές παρειές μπορούν να πέφτουν ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση οχημάτων.
Απόβαρο	25 t	23 t	
Ύπαρξη πλευρικών ανακλινόμενων ορθοσταστών	Τουλάχιστον 8	Τουλάχιστον 6	Παρέχει τη δυνατότητα πλευρικής στήριξης του εμπορεύματος που μεταφέρεται.
Ελάχιστη ακτίνα	35 m	35 m	
Απόσταση μεταξύ των αξόνων των φορέων	14.860 mm	9.000 mm	
Μέγιστη ταχύτητα φορτάμαξας	120 km/h κενό		
	100 km/h έμφορτο		
Χρήσεις	• Μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, γενικά προϊόντων μη ευπαθών στις καιρικές συνθήκες και οχημάτων (όχι επιβατικών).		



Εικόνα 36: Επίπεδη φορτάμαξα τύπου 1 κατά UIC (Rns) (Πηγή www.legios.eu)



Εικόνα 37: Επίπεδη φορτάμαξα τύπου 1 κατά UIC (RS) (Πηγή: Railion DB)

Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτάμαξας Rgss που χρησιμοποιεί ο ΟΣΕ	
Αριθμός αξόνων	4
Μήκος μεταξύ προσκρουστήρων	19.900 mm
Ύψος δαπέδου από σιδηροτροχιά	1.235 mm
Ωφέλιμο μήκος φορτώσεως	18.520 mm
Ωφέλιμο πλάτος φορτώσεως	2.740 mm
Ωφέλιμη επιφάνεια φόρτωσης	51 m ³
Μέγιστο ύψος μετωπικών παρειών (και πλευρικών, εφόσον υπάρχουν)	520 mm
Απόβαρο	23.500 kg
Ωφέλιμο φορτίο	56 τόνοι (66 τόνοι, όταν το επιτρέπει η γραμμή)
Απόσταση μεταξύ των αξόνων των φορείων	14.860 mm
Μέγιστη ταχύτητα φορτάμαξας	120 km/h (έμφορτο ή κενό)
Αντοχή αγκίστρου - κορσέ	1000 kN – 850 kN
Χρήσεις – ιδιαίτερα χαρακτηριστικά	- Μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων 10', 20', 30' και 40', προϊόντων χάλυβα (ως δοκοί, προφίλ, σωλήνες, ελάσματα) και άλλων προϊόντων μη ευπαθών στις καιρικές συνθήκες. - Διαθέτει διατάξεις προσδέσεως για μεταφορά με Ferry boat.

Παράρτημα Β: Κώδικες αλγορίθμων

Next Fit

```
Sub NextFit()  
Dim Length As Variant  
Dim Weight As Variant  
Dim Status As String  
Dim CMax As Integer  
Dim WMax As Integer  
Dim c As Integer  
Dim i As Integer  
Dim m As Integer  
Dim t As Integer  
Dim p As Integer  
Dim RemainingLength As Variant  
Dim RemainingWeight As Variant  
Dim L1 As Variant  
Dim W1 As Variant  
Dim L2 As Variant  
Dim W2 As Variant  
Dim L3 As Variant  
Dim W3 As Variant  
CMax = 50  
WMax = 30  
  
    With ThisWorkbook  
  
        i = 1  
        t = 1  
        m = 0  
        p = 1  
  
        For c = 1 To CMax  
line1:      RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value  
            RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value  
  
            Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value  
            Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value  
  
            L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value  
            W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value  
            L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value  
            W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value  
            L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value  
            W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value  
  
            If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then  
                If L1 = 0 Then  
                    L1 = L1 + Length  
                    W1 = W1 + Weight  
                ElseIf L2 = 0 Then  
                    L2 = L2 + Length  
                    W2 = W2 + Weight  
                ElseIf L3 = 0 Then  
                    L3 = L3 + Length  
                    W3 = W3 + Weight  
                End If  
  
                GoTo line2  
  
            Else: i = i + 1  
            End If  
  
            If i > WMax Then  
                GoTo lastline  
            Else: GoTo line1  
        End For  
    End With  
End Sub
```

```

                End If
line2:
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

    t = i
    m = m + Abs(t - p)
    p = i

    .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

Next
lastline:
    End With
End Sub

```

First Fit

```

Sub FirstFit()
Dim Length As Variant
Dim Weight As Variant
Dim Status As String
Dim CMax As Integer
Dim WMax As Integer
Dim c As Integer
Dim i As Integer
Dim m As Integer
Dim t As Integer
Dim p As Integer
Dim RemainingLength As Variant
Dim RemainingWeight As Variant
Dim L1 As Variant
Dim W1 As Variant
Dim L2 As Variant
Dim W2 As Variant
Dim L3 As Variant
Dim W3 As Variant
CMax = 50
WMax = 30

With ThisWorkbook

t = 1
m = 0
p = 1

    For c = 1 To CMax

        Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
        Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

        For i = 1 To WMax

            RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
            RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

            L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
            W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
            L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
            W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
            L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
            W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

```



```

        If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then
            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If

            GoTo lastline

        End If

    Next

lastline:

    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

Next

End With

End Sub

```

Best Fit

```

Sub BestFit()
    Dim Length As Variant
    Dim Weight As Variant
    Dim Status As String
    Dim CMax As Integer
    Dim WMax As Integer
    Dim c As Integer
    Dim i As Integer
    Dim t As Integer
    Dim m As Integer
    Dim p As Integer
    Dim RemainingLength As Variant
    Dim RemainingWeight As Variant
    Dim MinRemainingWeight As Variant
    Dim L1 As Variant
    Dim W1 As Variant
    Dim L2 As Variant
    Dim W2 As Variant
    Dim L3 As Variant
    Dim W3 As Variant
    CMax = 50
    WMax = 30

```

With ThisWorkbook

t = 1
m = 0
p = 1

For c = 1 To CMax

Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

MinRemainingWeight = 1000
For i = 1 To WMax

RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then
If RemainingWeight < MinRemainingWeight Then
MinRemainingWeight = RemainingWeight
Else: MinRemainingWeight = MinRemainingWeight

End If

End If

Next

For i = 1 To WMax

RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

If RemainingWeight <> MinRemainingWeight Then
GoTo line1
Else

If L1 = 0 Then
L1 = L1 + Length
W1 = W1 + Weight
ElseIf L2 = 0 Then
L2 = L2 + Length
W2 = W2 + Weight
ElseIf L3 = 0 Then
L3 = L3 + Length
W3 = W3 + Weight
End If
GoTo lastline

End If

```

                End If
line1:
    Next
lastline:
    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

    Next

    End With
End Sub

```

Worst Fit

```

Sub WorstFit()
Dim Length As Variant
Dim Weight As Variant
Dim Status As String
Dim CMax As Integer
Dim WMax As Integer
Dim c As Integer
Dim i As Integer
Dim t As Integer
Dim m As Integer
Dim p As Integer
Dim RemainingLength As Variant
Dim RemainingWeight As Variant
Dim MaxRemainingWeight As Variant
Dim L1 As Variant
Dim W1 As Variant
Dim L2 As Variant
Dim W2 As Variant
Dim L3 As Variant
Dim W3 As Variant
CMax = 50
WMax = 30

    With ThisWorkbook

        t = 1
        m = 0
        p = 1

        For c = 1 To CMax

            Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
            Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

            MaxRemainingWeight = 0

            For i = 1 To WMax

```

```

RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight > MaxRemainingWeight Then
            MaxRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MaxRemainingWeight = MaxRemainingWeight

        End If

    End If

Next

For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight <> MaxRemainingWeight Then
            GoTo line1
        Else

            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If
            GoTo lastline

        End If

    End If

line1:    Next
lastline:

    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

```

```

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

Next

End With
End Sub

```

Συνδυασμός Best Fit – Worst Fit

```

Sub BestFitWorstFit()
Dim Length As Variant
Dim Weight As Variant
Dim Status As String
Dim CMax As Integer
Dim WMax As Integer
Dim c As Integer
Dim i As Integer
Dim t As Integer
Dim m As Integer
Dim p As Integer
Dim RemainingLength As Variant
Dim RemainingWeight As Variant
Dim MinRemainingWeight As Variant
Dim MaxRemainingWeight As Variant
Dim L1 As Variant
Dim W1 As Variant
Dim L2 As Variant
Dim W2 As Variant
Dim L3 As Variant
Dim W3 As Variant
CMax = 50
WMax = 30

    With ThisWorkbook

        t = 1
        m = 0
        p = 1

        For c = 1 To CMax

            Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
            Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

            If Weight < 10 Then

                MinRemainingWeight = 1000

                For i = 1 To WMax

                    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
                    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
                    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
                    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
                    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
                    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
                    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
                    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

                    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

```

```

        If RemainingWeight < MinRemainingWeight Then
            MinRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MinRemainingWeight = MinRemainingWeight

        End If

    End If

Next

    For i = 1 To WMax

        RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
        RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
        L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
        W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
        L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
        W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
        L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
        W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

        If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

            If RemainingWeight <> MinRemainingWeight Then
                GoTo line1
            Else

                If L1 = 0 Then
                    L1 = L1 + Length
                    W1 = W1 + Weight
                ElseIf L2 = 0 Then
                    L2 = L2 + Length
                    W2 = W2 + Weight
                ElseIf L3 = 0 Then
                    L3 = L3 + Length
                    W3 = W3 + Weight
                End If
                GoTo line2

            End If

        End If

        line1:
            Next
        line2:
            If i <= WMax Then

                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
                .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

                t = i
                m = m + Abs(t - p)
                p = i

                .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

            End If

        Else

            MaxRemainingWeight = 0

        End If

    For i = 1 To WMax

```

```

RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

If L1 <> 0 Then

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight > MaxRemainingWeight Then
            MaxRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MaxRemainingWeight = MaxRemainingWeight

        End If

    End If

Else
    End If

Next
For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If L1 <> 0 Then

        If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

            If RemainingWeight <> MaxRemainingWeight Then
                GoTo line3
            Else
                If L1 = 0 Then
                    L1 = L1 + Length
                    W1 = W1 + Weight
                ElseIf L2 = 0 Then
                    L2 = L2 + Length
                    W2 = W2 + Weight
                ElseIf L3 = 0 Then
                    L3 = L3 + Length
                    W3 = W3 + Weight
                End If
                GoTo lastline
            End If
        End If
    Else
        End If
line3:
Next
    'L1=0
    For i = 1 To WMax

        RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
        RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
        L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value

```



```

W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight > MaxRemainingWeight Then
            MaxRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MaxRemainingWeight = MaxRemainingWeight

        End If

    End If

Next

For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight <> MaxRemainingWeight Then
            GoTo line4
        Else

            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If
            GoTo lastline

        End If

    End If

line4:
    Next

lastline:

    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i
    
```

```

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

End If

Next

End With

End Sub

```

Συνδυασμός Next Fit – Best Fit

```

Sub NextFit_FirstFit()
Dim Length As Variant
Dim Weight As Variant
Dim Status As String
Dim CMax As Integer
Dim WMax As Integer
Dim c As Integer
Dim i As Integer
Dim m As Integer
Dim t As Integer
Dim p As Integer
Dim RemainingLength As Variant
Dim RemainingWeight As Variant
Dim L1 As Variant
Dim W1 As Variant
Dim L2 As Variant
Dim W2 As Variant
Dim L3 As Variant
Dim W3 As Variant
Dim x As Integer
CMax = 50
WMax = 30

    With ThisWorkbook

        i = 1
        t = 1
        m = 0

        For c = 1 To CMax

line1:

            RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
            RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

            Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
            Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

            L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
            W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
            L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
            W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
            L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
            W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

            If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then
                If L1 = 0 Then
                    L1 = L1 + Length
                    W1 = W1 + Weight
                ElseIf L2 = 0 Then
                    L2 = L2 + Length

```

```

        W2 = W2 + Weight
    ElseIf L3 = 0 Then
        L3 = L3 + Length
        W3 = W3 + Weight
    End If

    GoTo line2

Else: i = i + 1
End If

    If i > WMax Then
        x = c

        GoTo line3

    Else: GoTo line1
    End If
line2:
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
    .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

    t = i
    m = m + Abs(t - p)
    p = i

    .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

Next

GoTo lastline
line3:
For c = x To CMax

    Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
    Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

    For i = 1 To WMax

        RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
        RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

        L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
        W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
        L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
        W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
        L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
        W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

        If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then
            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If

            GoTo line4
        End If
    Next i
Next c

```

```

        End If

    Next

line4:

    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

Next

lastline:

    End With

End Sub

```

Εναλλακτικός συνδυασμός Next Fit – Worst Fit

```

Sub NextFit_WorstFit()
Dim Length As Variant
Dim Weight As Variant
Dim Status As String
Dim CMax As Integer
Dim WMax As Integer
Dim c As Integer
Dim i As Integer
Dim m As Integer
Dim t As Integer
Dim p As Integer
Dim x As Integer
Dim RemainingLength As Variant
Dim RemainingWeight As Variant
Dim MaxRemainingWeight As Variant
Dim L1 As Variant
Dim W1 As Variant
Dim L2 As Variant
Dim W2 As Variant
Dim L3 As Variant
Dim W3 As Variant
CMax = 50
WMax = 30

    With ThisWorkbook
        i = 1
        t = 1
        m = 0
        p = 1

        For c = 1 To CMax

line1:

```

```

RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value
L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If L1 = 0 Then
            L1 = L1 + Length
            W1 = W1 + Weight
        ElseIf L2 = 0 Then
            L2 = L2 + Length
            W2 = W2 + Weight
        ElseIf L3 = 0 Then
            L3 = L3 + Length
            W3 = W3 + Weight
        End If

        GoTo line2

    Else: i = i + 1

End If

    If i > WMax Then
        x = c
        GoTo line3

    Else: GoTo line1

End If

line2:
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
.Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

t = i
m = m + Abs(t - p)
p = i
.Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

Next

GoTo lastline
line3:

For c = x To CMax

    Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value
    Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value

    MaxRemainingWeight = 0

    For i = 1 To WMax

        RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
        RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
        L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
        W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value

```

```

L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight > MaxRemainingWeight Then
            MaxRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MaxRemainingWeight = MaxRemainingWeight

        End If

    End If

Next

For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight <> MaxRemainingWeight Then
            GoTo line4
        Else

            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If
            GoTo line5

        End If

    End If

line4:
Next
line5:
    If i <= WMax Then
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If
Next

```

```
lastline:  
End With  
End Sub
```

Εναλλακτικός συνδυασμός Best Fit – Worst Fit

```
Sub BestFitWorstFit() 'alternative  
Dim Length As Variant  
Dim Weight As Variant  
Dim Status As String  
Dim CMax As Integer  
Dim WMax As Integer  
Dim c As Integer  
Dim i As Integer  
Dim t As Integer  
Dim m As Integer  
Dim p As Integer  
Dim RemainingLength As Variant  
Dim RemainingWeight As Variant  
Dim MinRemainingWeight As Variant  
Dim MaxRemainingWeight As Variant  
Dim L1 As Variant  
Dim W1 As Variant  
Dim L2 As Variant  
Dim W2 As Variant  
Dim L3 As Variant  
Dim W3 As Variant  
CMax = 50  
WMax = 30  
  
With ThisWorkbook  
t = 1  
m = 0  
p = 1  
  
For c = 1 To CMax  
  
Length = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 3).Value  
Weight = .Sheets("Containers").Cells(1 + c, 4).Value  
  
If Weight < 10 Then  
  
MinRemainingWeight = 1000  
  
For i = 1 To WMax  
  
RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value  
RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value  
L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value  
W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value  
L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value  
W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value  
L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value  
W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value  
  
If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then  
  
If RemainingWeight < MinRemainingWeight Then  
MinRemainingWeight = RemainingWeight  
Else: MinRemainingWeight = MinRemainingWeight  
  
End If  
  
End If  
  
Next
```

```

For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight <> MinRemainingWeight Then
            GoTo line1
        Else

            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If
            GoTo line2

        End If

    End If

line1:
    Next

line2:
    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m

    End If

Else
    MaxRemainingWeight = 0

    For i = 1 To WMax

        RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
        RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value
        L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
        W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
        L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
        W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
        L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
        W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

        If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

```



```

        If RemainingWeight > MaxRemainingWeight Then
            MaxRemainingWeight = RemainingWeight
        Else: MaxRemainingWeight = MaxRemainingWeight

        End If

    End If

Next

For i = 1 To WMax

    RemainingLength = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 10).Value
    RemainingWeight = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 9).Value

    L1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value
    W1 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value
    L2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value
    W2 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value
    L3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value
    W3 = .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value

    If Length <= RemainingLength And Weight <= RemainingWeight Then

        If RemainingWeight <> MaxRemainingWeight Then
            GoTo line3
        Else
            If L1 = 0 Then
                L1 = L1 + Length
                W1 = W1 + Weight
            ElseIf L2 = 0 Then
                L2 = L2 + Length
                W2 = W2 + Weight
            ElseIf L3 = 0 Then
                L3 = L3 + Length
                W3 = W3 + Weight
            End If
            GoTo lastline
        End If

    End If

line3:
    Next
lastline:
    If i <= WMax Then

        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 3).Value = L1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 4).Value = W1
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 5).Value = L2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 6).Value = W2
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 7).Value = L3
        .Sheets("Wagons").Cells(1 + i, 8).Value = W3

        t = i
        m = m + Abs(t - p)
        p = i

        .Sheets("Wagons").Cells(2, 14).Value = m
    End If
End If

Next

End With
End Sub

```