ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

ΤΖΗΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων:

Κεραμυδάς Χρήστος

Αναπληρωτής καθηγητής

Κατερίνη, 2026

Τζήμας Γεώργιος

Συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Εξεταστική Επιτροπή:

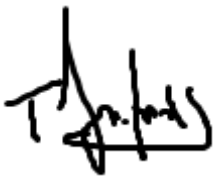
Επιβλέπων :	Κεραμυδάς Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Εξεταστής Α:	Αχίλλας Χαρίσιος, Καθηγητής
Εξεταστής Β:	Τσολάκης Ναούμ, Αναπληρωτής Καθηγητής

«ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας διατριβής και αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία στο σύνολό της ή μέρος της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ονοματεπώνυμο: *Τζήμας Γεώργιος*

Υπογραφή:



Ημερομηνία: *30/05/2026*

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Διοίκησης Εφοδιαστικής Αλυσίδας του ΔΙΠΑΕ δεν υποδηλώνει απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

© Τζήμας Γεώργιος, 2026

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στην ηλιαχτίδα της ζωής μου τη Σταυρούλα μου και στο πολύτιμο κόσμημα της ζωής μου το Νικόλα μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Σταυρούλα, η οποία στήριξε από την αρχή μέχρι το τέλος την επιλογή μου να συνεχίσω τις σπουδές μου στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας, όμως στην πορεία των σπουδών μου πρόσθετο κίνητρο αποτέλεσε ο γιος μου Νικόλας, ο οποίος παρόλη την μικρή και τρυφερή ηλικία του ζητούσε να είναι πλάι μου στις φυσικές παρουσίες του πανεπιστημίου με σκοπό να μαθαίνει ο ίδιος μιας νέα και πολύ ενδιαφέρουσα επιστήμη (κατά τον ίδιον «μαθαίνω να γεμίζω φορτηγά με χρήσιμα πράγματα, να τα οδηγώ και να τα μοιράζω στους πελάτες»).

Αξίζει όμως να σημειώσω ότι η επιλογή μου να σπουδάσω στο τμήμα της διοίκησης εφοδιαστικής αλυσίδας του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδας με οδήγησε να γνωρίσω αρχικά έναν υπέροχο καθηγητή και στη συνέχεια να διαπιστώσω ότι απέναντι μου και στο πλάι μου είχα και έχω έναν εξαιρετικό άνθρωπο, τον καθηγητή κύριο Χρήστο Κεραμυδά. Δεν μπορώ να μην επισημάνω και να μην αναγνωρίσω την συνεχή και άοκνη υποστήριξη του στο να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Η συνδρομή αυτών των δύο προσώπων ήταν καταλυτική και έπαιξε καθοριστικό ρόλο σε μια πολύ δύσκολη περίοδο που έλαβε χώρα στην προσωπική ζωή μου κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στις μεταπτυχιακές σπουδές. Εύχομαι η σοφία τους, σαν προσωπικό φως, να υπάρχει πάντα στη ζωή τους και να προσφέρουν την ίδια αμέριστη υποστήριξή τους σε όσους το χρειάζονται για να εξελίσσονται.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάζει τον συνδυασμένο σχεδιασμό δρομολογίων και διαδικασιών φόρτισης ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές. Αφετηρία της αποτελεί η αυξανόμενη ανάγκη περιορισμού των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές, σε συνδυασμό με τις επιχειρησιακές απαιτήσεις του τελευταίου μιλίου και τους περιορισμούς που επιβάλλουν η αυτονομία των οχημάτων, η χωρητικότητα φορτίου και η διαθεσιμότητα υποδομών φόρτισης. Αρχικά παρουσιάζονται η δομή των αστικών δικτύων διανομής, οι περιβαλλοντικές και λειτουργικές προκλήσεις του κλάδου, το ευρωπαϊκό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την ηλεκτροκίνηση, καθώς και οι βασικές παραλλαγές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων, με έμφαση στο Electric Vehicle Routing Problem. Στο εμπειρικό μέρος διατυπώνεται μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού για τη δρομολόγηση ηλεκτρικών οχημάτων σε δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση των πελατών, τη μεταφορική ικανότητα των οχημάτων, τις αποστάσεις, την κατανάλωση ενέργειας και περιορισμούς λειτουργίας του στόλου. Το μοντέλο υλοποιείται υπολογιστικά σε περιβάλλον R και LINDO και αξιολογείται μέσω εναλλακτικών σεναρίων χωρητικότητας οχήματος και μεγέθους δικτύου. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημαντική επίδραση της χωρητικότητας των οχημάτων στην εφικτότητα των δρομολογίων, στον απαιτούμενο αριθμό φορτηγών και στη συνολική διανυόμενη απόσταση. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι η ενσωμάτωση ενεργειακών και χρονικών περιορισμών είναι αναγκαία για τη ρεαλιστική υποστήριξη αποφάσεων ηλεκτρικών στόλων. Η εργασία καταλήγει σε προτάσεις για πληρέστερη μοντελοποίηση της φόρτισης, αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων και ανάπτυξη πιο αποδοτικών μεθόδων επίλυσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα αξιοποίησης του μοντέλου από επιχειρήσεις διανομής για τον σχεδιασμό στόλου, την επιλογή κατάλληλης χωρητικότητας οχημάτων και την αποδοτικότερη οργάνωση των καθημερινών λειτουργιών σε συνθήκες περιορισμένων ενεργειακών πόρων και υποδομών φόρτισης.

Λέξεις κλειδιά: Πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP), ηλεκτρικά οχήματα, χρήση μπαταρίας οχήματος, βελτιστοποίηση διαδρομών, αστικές εμπορευματικές μεταφορές, μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MILP).

ABSTRACT

This master's thesis examines the integrated planning of routing and charging operations for electric trucks in urban freight transport. It is motivated by the growing need to reduce emissions from road transport, together with the operational requirements of last-mile delivery and the constraints imposed by vehicle range, load capacity, and the availability of charging infrastructure. The study initially presents the structure of urban distribution networks, the environmental and operational challenges of the sector, the European and national regulatory framework for electromobility, and the main variants of the Vehicle Routing Problem, with particular emphasis on the Electric Vehicle Routing Problem. The empirical part formulates a Mixed-Integer Linear Programming model for routing electric vehicles within a distribution network, taking into account customer demand, vehicle carrying capacity, travel distances, energy consumption, and fleet operating constraints. The model is computationally implemented in R and LINDO and evaluated through alternative scenarios involving vehicle capacity and network size. The results highlight the substantial effect of vehicle capacity on route feasibility, the required number of trucks, and the total distance travelled. They also indicate that incorporating energy-related and time-related constraints is essential for the realistic support of electric fleet decisions. The thesis concludes with recommendations for more comprehensive charging modelling, the use of real-world data, and the development of more efficient solution methods. Particular emphasis is placed on the potential use of the model by distribution companies for fleet planning, the selection of appropriate vehicle capacity, and the more efficient organisation of daily operations under conditions of limited energy resources and charging infrastructure.

Keywords: EVRP, Electric vehicles, Vehicle battery usage, Route optimization, Urban freight transport, Mixed-integer linear programming (MILP).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΑΦΙΕΡΩΣΗ iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ vi
ABSTRACT vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ 5
1.1. Υφιστάμενη δομή και λειτουργία αστικών εμπορευματικών μεταφορών 5
1.1.1. Δομή και γεωγραφική κατανομή των δικτύων διανομής 5
1.1.2. Ο κατακερματισμός της αγοράς και η λειτουργική δυσκαμψία 11
1.1.3. Ηλικιακή διάρθρωση στόλου και περιβαλλοντικές επιπτώσεις 15
1.1.4. Λειτουργικές προκλήσεις στο «Τελευταίο μίλι» (Last-Mile Delivery) 21
1.1.5. Η κρίση του ανθρώπινου δυναμικού και οι εργασιακές συνθήκες 26
1.1.6. Τεχνολογική ενσωμάτωση, πληροφοριακά συστήματα και logistics 4.0 32
1.1.7. Θεσμικά εμπόδια και οικονομικά μεγέθη του κλάδου 37
1.1.7.1. Ρυθμιστικό πλαίσιο και θεσμικά εμπόδια στο αστικό περιβάλλον 37
1.1.7.2. Γραφειοκρατία, ψηφιακή μετάβαση και θεσμικές παρεμβάσεις 38
1.1.7.3. Οικονομικά μεγέθη: η ιστορική ανθεκτικότητα και η άνοδος των 3PL 40
1.1.7.4. Συγκέντρωση αγοράς, κερδοφορία και ανισότητες (2023-2024) 41
1.1.7.5. Συμπερασματική σύνθεση 43
1.1.8. Συμπεράσματα και προοπτικές βελτίωσης 44
1.1.8.1. Η αναγκαιότητα των αστικών κέντρων ενοποίησης εμπορευμάτων (Urban Consolidation Centers - UCCs) 44
1.1.8.2. Ανάπτυξη συνεργατικών σχημάτων (Transport Pooling) και οικονομίες κλίμακας 45
1.1.8.3. Ανανέωση στόλου, πράσινη μετάβαση και εναλλακτικά μέσα 46
1.1.8.4. Ψηφιακός μετασχηματισμός (Logistics 4.0) και έξυπνη δρομολόγηση ... 47
1.1.8.5. Αναβάθμιση ανθρώπινου δυναμικού και εργασιακών συνθηκών 48
1.1.8.6. Θεσμική θωράκιση και εθνικό στρατηγικό σχέδιο (Master Plan) 49
1.2. Βιβλιογραφική επισκόπησης του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP) 51
1.2.1. Το πρόβλημα διανομής φορτηγών (Truck Dispatching Problem) 51

1.2.1.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 51
1.2.1.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 52
1.2.1.3. Αντικειμενική συνάρτηση 52
1.2.1.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 53
1.2.1.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 54
1.2.1.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 54
1.2.2. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό χωρητικότητας (Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP).....55
1.2.2.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 55
1.2.2.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 55
1.2.2.3. Αντικειμενική συνάρτηση 56
1.2.2.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 57
1.2.2.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 58
1.2.2.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 59
1.2.3. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW) 59
1.2.3.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 59
1.2.3.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 60
1.2.3.3. Αντικειμενική συνάρτηση 60
1.2.3.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 61
1.2.3.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 62
1.2.3.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 62
1.2.4. Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με δυνατότητα κατάτμησης παραδόσεων (Split Delivery Vehicle Routing Problem - SDVRP).....63
1.2.4.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 63
1.2.4.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 63
1.2.4.3. Αντικειμενική συνάρτηση 64
1.2.4.4. 2.4.4 Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 64
1.2.4.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 66
1.2.4.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 66

1.2.5. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες (Multi-Depot Vehicle Routing Problem - MDVRP) 66
1.2.5.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 66
1.2.5.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 67
1.2.5.3. Αντικειμενική συνάρτηση 68
1.2.5.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 68
1.2.5.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 69
1.2.5.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 69
1.2.6. Στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Stochastic Vehicle Routing Problem - SVRP) 70
1.2.6.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 70
1.2.6.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 70
1.2.6.3. Αντικειμενική συνάρτηση 71
1.2.6.4. Περιορισμοί και Θεωρητικές Παραδοχές 71
1.2.6.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 72
1.2.6.6. Πεδία Εφαρμογής και Επιχειρησιακή Επίδραση 73
1.2.7. Το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Green Vehicle Routing Problem - G-VRP) 73
1.2.7.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 73
1.2.7.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 74
1.2.7.3. Αντικειμενική συνάρτηση 74
1.2.7.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 75
1.2.7.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 76
1.2.7.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 76
1.2.8. Το δυναμικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Dynamic Vehicle Routing Problem - DVRP) 77
1.2.8.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 77
1.2.8.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 77
1.2.8.3. Αντικειμενική συνάρτηση 78
1.2.8.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές 78
1.2.8.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 79

1.2.8.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 80
1.2.9. Το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP).....80
1.2.9.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου 80
1.2.9.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση 81
1.2.9.3. Αντικειμενική συνάρτηση 82
1.2.9.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές.....82
1.2.9.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης 83
1.2.9.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση 84
1.2.10. Συνοπτικός πίνακας προοδευτικής εξέλιξης των μοντέλων VRP 85
1.2.11. Συμπεράσματα.....90
1.3. Περιγραφή κλάδου αστικών μεταφορών στην Ελλάδα 91
1.3.1. Εισαγωγή στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές στην Ελλάδα 91
1.3.2. Περιβαλλοντικές προκλήσεις και η αναγκαιότητα μετάβασης στα ηλεκτρικά φορτηγά 96
1.3.3. Χαρακτηριστικά και περιορισμοί του στόλου ηλεκτρικών φορτηγών 100
1.3.4. Στατιστικά δεδομένα και παράμετροι του ημερήσιου μεταφορικού έργου.103
1.3.5. Συστήματα αυτόματης δρομολόγησης (Vehicle Routing Systems) στις αστικές διανομές 106
1.3.5.1. Εισαγωγή στα Συστήματα Αυτόματης Δρομολόγησης και η Σημασία τους 106
1.3.5.2. Το Μαθηματικό Υπόβαθρο 107
1.3.5.3. Παραλλαγές του VRP στις Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές 108
1.3.5.4. Δυναμική και Στοχαστική Δρομολόγηση 109
1.3.5.5. Πλατφόρμες ενορχήστρωσης τελευταίου μιλίου (Control Towers) και τηλεματική 110
1.3.5.6. Εμπορικά Λογισμικά Δρομολόγησης και η Ελληνική Πραγματικότητα..111
1.3.6. Συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης Ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές 112
1.3.6.1. Η μετάβαση από το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης στο E-VRP (Electric Vehicle Routing Problem) 112

1.3.6.2. Χωρητικότητα ηλεκτρ. μπαταρίας και ημερήσια διανυόμενη απόσταση 113
1.3.6.3. Χρόνος φόρτισης ηλεκτρ. μπαταρίας και ημερήσιος χρόνος ταξιδιού ..114
1.3.6.4. Επίδραση στο πλήθος ημερήσιων διανομών και τα χρονικά παράθυρα (Time Windows) 115
1.3.6.5. Οικονομικές επιπτώσεις και η βελτιστοποίηση του μεγέθους του ατόλου ηλεκτρικών φορτηγών (Fleet Size) 116
1.3.6.6. Η συμβολή των τεχνολογιών πληροφορικής (ITS) στις συνδυασμένες αποφάσεις 117
1.3.7. Συμπεράσματα - προοπτικές για την αειφόρο εφοδιαστική στην Ελλάδα ...118
1.4. Νομοθεσία και στόχοι Ε.Ε. και Ελλάδας για τη βιώσιμη χρήση φορτηγών με ηλεκτρικές μπαταρίες στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές 121
1.4.1. Το Ευρωπαϊκό Στρατηγικό Πλαίσιο και οι στόχοι μείωσης εκπομπών για τα εμπορευματικά οχήματα 121
1.4.2. Ο Κανονισμός AFIR και οι υποδομές φόρτισης σε αστικούς κόμβους.....127
1.4.3. Οι Εθνικοί Στόχοι της Ελλάδας (ΕΣΕΚ) για τις Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές.....134
1.4.4. Εθνική νομοθεσία για την πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα και τη διανομή "Last-Mile" 139
1.4.5. Εθνικά οικονομικά κίνητρα και προγράμματα επιδότησης εμπορευματικών στόλων 143
1.4.6. Νομοθετικά πρότυπα και τεχνολογικές προδιαγραφές φόρτισης στα αμαξοστάσια (Depots) 149
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....154
2.1. Εισαγωγή στο πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) 154
2.2. Ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου και των επιχειρησιακών παραδοχών 156
2.3. Μαθηματικό μοντέλο: σύνολα, δείκτες και παράμετροι 158
2.3.1. Σύνολα και Δείκτες 159
2.3.1.1. Δείκτες:.....159
2.3.1.2. Σύνολα:.....159
2.3.2. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου 160

2.3.2.1. Δεδομένα δικτύου & ζήτησης 160
2.3.2.2. Τεχνικές προδιαγραφές φορτηγών & ενέργειας 160
2.3.2.3. Περιορισμοί χρόνου & μαθηματικές σταθερές 160
2.3.3. Μεταβλητές απόφασης....160
2.3.3.1. Δυαδικές Μεταβλητές (Binary) 160
2.3.3.2. Συνεχείς μεταβλητές (Continuous)....160
2.3.4. Αντικειμενική συνάρτηση....161
2.3.5. Μαθηματικοί περιορισμοί και ανάλυση....161
2.3.5.1. Περιορισμοί δρομολόγησης, ροής & δομής EVRP....161
2.3.5.2. Περιορισμοί χωρητικότητας φορτίου & απάλειψης υποκυκλωμάτων (MTZ) 162
2.3.5.3. Περιορισμοί ενέργειας & μπαταρίας (κυκλικοί)....163
2.3.5.4. Περιορισμοί χρονικών ορίων (κυκλικοί)....163
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ....165
3.1. Υποθέσεις και απλοποιήσεις μοντέλου δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) με σταθμούς φόρτισης....165
3.2. Μοντέλο επίλυσης μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού....169
3.3. Δεδομένα δικτύου διανομής, ηλεκτρικών φορτηγών, ζήτησης ανά πόλη....169
3.4. Αποτελέσματα μοντέλου 171
3.5. Περιγραφή μοντέλου στο R Studio....179
3.6. Περιγραφή μοντέλου στο Lindo 183
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ....201
4.1. Εισαγωγή 201
4.2. Θεωρητικό και Ερευνητικό Πλαίσιο: Ανάλυση Ευρημάτων 201
4.3. Πρακτικές Εφαρμογές στον Πραγματικό Κόσμο (Logistics & Supply Chain) 202
4.4. Περιορισμοί του Μοντέλου και Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας....203
4.5. Ενδεδειγμένες ενέργειες/μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση πολυπλοκότητας σε πρακτικά μοντέλα....204
4.6. Υπολογιστική πολυπλοκότητα και στρατηγικές επίλυσης 207
4.7. Επιχειρησιακές προεκτάσεις (Managerial Insights) 208

4.8. Πρόταση χρήσης εργαλείων AI για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων διανομών και δρομολόγησης ηλεκτρικών φορτηγών 209
4.8.1. Τα κύρια οφέλη χρήσης του συστήματος ΤΝ (AI).....210
4.8.2. Γιατί προκρίνεται η λύση ΤΝ 211
4.8.3. Δημιουργία περιβάλλοντος ΤΝ για επίλυση 212
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 217
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 220
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι 234

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.10: πίνακας προοδευτικής εξέλιξης των μοντέλων VRP 150

Πίνακας 6.3.1: κόστος μεταφοράς μεταξύ των πόλεων 172

Πίνακας 6.3.2: ζήτηση για κάθε μια πόλη 172

Πίνακας 6.4.1: σενάριο για χωρητικότητα φορτηγού 35 κιβώτια 173

Πίνακας 6.4.2: σενάριο για χωρητικότητα φορτηγού 45 κιβώτια 176

Πίνακας 6.10.3.1: παράμετροι μοντέλου και τύπος δεδομένων 203

Πίνακας 6.10.3.2: δεδομένα πελατών και ζήτησης και τύποι δεδομένων 203

Πίνακας 6.10.3.3: μήτρα αποστάσεων 204

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΕΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΗΓΩΝ
ΣΤΙΣ ΑΣΤΙΚΕΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ
COMBINED ROUTING AND CHARGING DECISIONS
FOR ELECTRIC TRUCKS IN URBAN FREIGHT TRANSPORT
ΤΖΗΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριοι στόχοι της Ε.Ε. και κατ' επέκταση της Ελλάδας είναι η προστασία του περιβάλλοντος, η εξοικονόμηση ενέργειας και η μετάβαση σε δίκτυο μεταφορών με ελάχιστο ή μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα έως το 2030. Η απόφαση προμήθειας επαγγελματικών ηλεκτρικών φορτηγών αναγκάζει τις επιχειρήσεις να λάβουν υπόψη τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που τίθενται από τη χρήση τους εξαιτίας των ηλεκτρικών μπαταριών και να προγραμματίζουν τις διανομές τους ικανοποιώντας τα ίδια ποιοτικά κριτήρια της εφοδιαστικής αλυσίδας όπως είναι: η σωστή ποσότητα, τα σωστά προϊόντα, στον σωστό χρόνο, στον σωστό πελάτη.

Θέμα της εργασίας είναι: "Συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές βάσει κριτηρίων όπως: μέγεθος του στόλου ηλεκτρικών φορτηγών, πλήθος ημερήσιων διανομών, ημερήσια διανυόμενη απόσταση, ημερήσιος χρόνος ταξιδιού διανομής, χωρητικότητα ηλεκτρικής μπαταρίας, χρόνος φόρτισης ηλεκτρικής μπαταρία".

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται ο κλάδος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών (City Logistics) αποτελεί τον ζωτικό κρίκο της εφοδιαστικής αλυσίδας για την τροφοδοσία των πόλεων, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην εμπορική δραστηριότητα και την οικονομική ανάπτυξη. Το πιο απαιτητικό, πολύπλοκο και δαπανηρό τμήμα τους είναι η παράδοση του "τελευταίου μιλίου" (last-mile delivery), η ζήτηση της οποίας έχει εκτοξευθεί τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ραγδαίας αστικοποίησης και της μεγάλης ανόδου του ηλεκτρονικού εμπορίου.

Ωστόσο, το υφιστάμενο μοντέλο λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως έντονα ενεργοβόρο και μη βιώσιμο, προκαλώντας σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις (externalities) στο αστικό περιβάλλον, όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, ηχορύπανση, έλλειψη χώρων στάθμευσης (που οδηγεί στο διπλοπαρκάρισμα) και υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Είναι ενδεικτικό ότι, στην Περιφέρεια Αττικής, τα φορτηγά διανομής κινούνται άδεια στο 60% των διαδρομών τους και, ενώ αποτελούν μόλις το 15% της αστικής κυκλοφορίας, ευθύνονται για το 30%-50% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, διαθέτοντας έναν ιδιαίτερα γερασμένο στόλο. Σε εθνικό επίπεδο, σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ (2024), το συνολικό βάρος των οδικών εμπορευματικών μεταφορών

μειώθηκε κατά 6%, ωστόσο τα εμπορεύματα που μεταφέρονται σε παλέτες αυξήθηκαν κατά 27,6%.

Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών και την εναρμόνιση με τους ευρωπαϊκούς στόχους για κλιματικά ουδέτερες πόλεις έως το 2050, απαιτείται ριζική αναδιάρθρωση μέσω -έξυπνων και αειφόρων στρατηγικών-. Οι βασικοί πυλώνες αυτών των στρατηγικών περιλαμβάνουν:

- Υποδομές: Τη δημιουργία Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (ΑΚΕΕ) στις παρυφές των πόλεων για τη συγκέντρωση φορτίων και την εγκατάσταση έξυπνων θυρίδων (smart lockers) για διευκόλυνση των παραλαβών.
- Πράσινα Οχήματα: Την υιοθέτηση ηλεκτροκίνητων βαν και τρίκυκλων ποδηλάτων (cargo bikes), τα οποία προσφέρουν ευελιξία με μηδενικούς ρύπους.
- Ρυθμιστικό Πλαίσιο: Την εφαρμογή Ζωνών Χαμηλών Εκπομπών (LEZ), νυχτερινών παραδόσεων για μείωση της συμφόρησης, και λωρίδων πολλαπλών χρήσεων.
- Ψηφιοποίηση: Την ευρεία χρήση πληροφοριακών συστημάτων διαχείρισης στόλου, πύργων ελέγχου (control towers) και αλγορίθμων αυτόματης δρομολόγησης (VRP) που βελτιστοποιούν τις διαδρομές σε πραγματικό χρόνο και αυξάνουν τις πληρότητες των οχημάτων.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Πλαίσιο και οι Στόχοι που έχουν τεθεί για τις ηλεκτρικές μπαταρίες των φορτηγών. Η ευρωπαϊκή στρατηγική βασίζεται στο πακέτο "Fit for 55" και τον Κανονισμό (ΕΕ) 2024/1610, ο οποίος επιβάλλει νομικά δεσμευτική μείωση των εκπομπών CO2 στα νέα βαρέα οχήματα κατά 45% έως το 2030 και 90% έως το 2040, καθιστώντας τα ηλεκτρικά φορτηγά μπαταρίας την κύρια τεχνολογική λύση. Παράλληλα, ο Κανονισμός υποδομών εναλλακτικών καυσίμων (AFIR 2023/1804) επιβάλλει την υποχρεωτική εγκατάσταση σταθμών υπερταχείας φόρτισης τόσο στους ευρωπαϊκούς αυτοκινητόδρομους (ΤΕΝ-Τ) όσο και στους "αστικούς κόμβους", απαιτώντας συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ εξόδου ανά εγγεγραμμένο ηλεκτρικό όχημα στη χώρα.

- Εθνική Στρατηγική (ΕΣΕΚ):

  Στην Ελλάδα, οι μεταφορές είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή αερίων του θερμοκηπίου. Το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)

θέτει ως προτεραιότητα τον πλήρη εξηλεκτρισμό των εμπορευματικών μεταφορών μικρών αποστάσεων (short-haul) και της αστικής διανομής. Για τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (LCVs) έως 3,5 τόνους, οι στόχοι είναι εξαιρετικά φιλόδοξοι, με την προσδοκία τα νέα ηλεκτρικά βαν να καταλάβουν το 40%-50% των συνολικών ετήσιων πωλήσεων έως το 2030, με συντριπτική υπεροχή των αμιγώς ηλεκτρικών έναντι των υβριδικών.

- Εθνική Νομοθεσία και Κίνητρα:

  Βάσει του Εθνικού Κλιματικού Νόμου (ν. 4936/2022), επιβάλλονται αυστηρές ποσοστώσεις στους εταιρικούς στόλους, υποχρεώνοντας το ένα τρίτο των νέων εταιρικών οχημάτων να είναι μηδενικών ή χαμηλών ρύπων από το 2026. Η μετάβαση υποστηρίζεται οικονομικά από προγράμματα όπως το «Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ'», το οποίο παρέχει σταθερή επιδότηση για ηλεκτρικά βαν (με ανώτατο όριο τιμής) και e-cargo bikes, καθώς και από τη δράση «Φορτίζω Παντού» για τη δημιουργία δημόσιων υποδομών.

- Τεχνολογικές Προδιαγραφές:

  Για να καταστεί βιώσιμη η φόρτιση στα αμαξοστάσια των logistics, η νομοθεσία επιβάλλει πρότυπα «έξυπνης φόρτισης» (ISO 15118) με δυνατότητες Vehicle-to-Grid (V2G). Για την υπερταχεία φόρτιση των βαρέων οχημάτων, προωθείται το νέο σύστημα Megawatt Charging System (MCS), το οποίο συνοδεύεται υποχρεωτικά από λογισμικό δυναμικής εξισορρόπησης φορτίου (DLB) για την αποφυγή υπερφόρτωσης των τοπικών ηλεκτρικών δικτύων.

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα μοντέλα δρομολόγησης και αναδεικνύει τρεις κύριες κατηγορίες: τα μοντέλα CVRP, EVRP και MDVRP (ή MDRP), τα οποία επεκτείνουν το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (VRP) για να καλύψουν σύγχρονες ανάγκες εφοδιαστικής και βιωσιμότητας.

- Μοντέλα CVRP (Capacitated VRP)

  Το πρόβλημα δρομολόγησης με περιορισμούς χωρητικότητας αποτελεί τον πυρήνα για πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπως η βελτιστοποίηση προγραμμάτων εργασίας και παρεμβάσεων στο πεδίο. Συχνά, το κλασικό μοντέλο επεκτείνεται σε πιο

πολύπλοκα συστήματα, όπως ο διαμοιρασμός παραδόσεων με πολλαπλά χρονικά παράθυρα (SDVRPTW) στο λιανικό εμπόριο, ή ενσωματώνεται σε πολυκριτηριακά «πράσινα» μοντέλα (MOGVRP) υπό συνθήκες αβεβαιότητας ως προς τη ζήτηση.

- Μοντέλα EVRP (Electric VRP)

  Λόγω των περιορισμών αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων, τα μοντέλα EVRP εστιάζουν στη διαχείριση της ενέργειας και τη φόρτιση. Προηγμένες παραλλαγές ενσωματώνουν -ρεαλιστικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας- βάσει του φορτίου και της ταχύτητας, -μη-γραμμικές συναρτήσεις φόρτισης-, και στρατηγικές μερικής επαναφόρτισης. Για την αντιμετώπιση του «άγχους αυτονομίας» (range anxiety) των οδηγών, ορισμένα μοντέλα προτείνουν την κινητή ανταλλαγή μπαταριών καθ' οδόν (mobile battery swapping) ή την ενσωμάτωση σταθμών ανταλλαγής μπαταριών σε προβλήματα χωροθέτησης-δρομολόγησης (ELRP). Μαθηματικά, τα προβλήματα αυτά συνήθως διατυπώνονται μέσω μοντέλων Μεικτού-Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP), χρησιμοποιώντας "cloneless" ή προσεγγίσεις βάσει διαδρομών (path-based) για τη μείωση της πολυπλοκότητας όταν ένας σταθμός φόρτισης χρησιμοποιείται πολλαπλές φορές.

- Μοντέλα MDVRP (Multi-Depot VRP)

  Τα προβλήματα πολλαπλών αμαξοστασίων βελτιστοποιούν δίκτυα διανομής με διάφορα σημεία εκκίνησης. Σύγχρονες μορφές του MDVRP συνδυάζουν -ετερογενείς στόλους οχημάτων και λειτουργίες cross-docking- σε δίκτυα διανομής εμπορευμάτων. Επιπλέον, το MDVRP ενσωματώνεται συχνά σε «πράσινες» στρατηγικές (όπως το MDGVRPTW), περιλαμβάνοντας τον κοινόχρηστο διαμοιρασμό αμαξοστασίων και αυστηρούς περιορισμούς στο μέγιστο χρόνο εργασίας των οδηγών, καθώς και σε ολοκληρωμένα ηλεκτρικά συστήματα μεταφορών που ανταποκρίνονται στη ζήτηση (E-IDARP-TT) αξιοποιώντας πολλαπλά αμαξοστάσια.

1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1.1. Υφιστάμενη δομή και λειτουργία αστικών εμπορευματικών μεταφορών

Η ανάλυσή μας αναδεικνύει την Ελλάδα ως έναν κομβικό διεθνή σταθμό εμπορευμάτων, τονίζοντας τη στρατηγική σημασία του κλάδου των μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας για την εθνική οικονομία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ηγετικό ρόλο της ελληνικής ναυτιλίας και στις προοπτικές του λιμένα του Πειραιά ως ταχύτερης πύλης εισόδου προϊόντων από την Ασία προς την Κεντρική Ευρώπη. Παράλληλα, αναλύεται η αναγκαιότητα του ψηφιακού μετασχηματισμού μέσω της υιοθέτησης τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτίωση της αποδοτικότητας. Τα κείμενα καταγράφουν επίσης τις προσπάθειες επαγγελματικών φορέων, όπως το Π.Σ.Χ.Ε.Μ. και η EELBE, για την επίλυση προβλημάτων στις χερσαίες μεταφορές και την αναβάθμιση των υποδομών στη Βόρεια Ελλάδα. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η συνεχή εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού και η κρατική υποστήριξη αποτελούν θεμέλια για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας του κλάδου σε ένα μεταβαλλόμενο παγκόσμιο περιβάλλον.

1.1.1. Δομή και γεωγραφική κατανομή των δικτύων διανομής

Η δομή των δικτύων αστικής διανομής στην Ελλάδα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη γεωγραφική και πολεοδομική ιδιαιτερότητα των δύο μεγαλύτερων αστικών κέντρων της χώρας, της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η εφοδιαστική αλυσίδα που αναπτύσσεται εντός αυτών των μητροπολιτικών περιοχών καλείται καθημερινά να λειτουργήσει ως ένας εξαιρετικά πολύπλοκος μηχανισμός, ο οποίος πρέπει να ισορροπήσει ανάμεσα στη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για ταχύτητα και αξιοπιστία στις παραδόσεις, καθώς και στους αυστηρούς περιορισμούς που επιβάλλει το σύγχρονο, πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές (City Logistics) αποτελούν ένα από τα πιο κρίσιμα τμήματα της αλυσίδας εφοδιασμού, καθώς η πλειονότητα των μεταφορικών ροών, ανεξάρτητα από το μεταφορικό μέσο που χρησιμοποιείται ή την απόσταση που διανύεται αρχικά, καταλήγει ως φυσική διανομή μέσα στον αστικό ιστό (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Συνολικά, το δίκτυο των εγκαταστάσεων logistics στην Ελλάδα έχει αναπτυχθεί και διαμορφωθεί γύρω από επτά κυρίως περιφερειακές αγορές, ωστόσο η

μεγάλη βαρύτητα πέφτει σε αυτές που βρίσκονται σε άμεση γεωγραφική και λειτουργική εγγύτητα με τα δύο μεγαλύτερα λιμάνια της χώρας, τον Πειραιά και τη Θεσσαλονίκη (ΕΥ, 2017).

Ειδικότερα, στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας, η πιο σημαντική συγκέντρωση εγκαταστάσεων logistics εντοπίζεται στη Δυτική Αττική και συγκεκριμένα στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου (ΕΥ, 2017). Η συγκεκριμένη γεωγραφική ζώνη εκτείνεται βορειοδυτικά του κέντρου της Αθήνας, σε απόσταση περίπου 10 χιλιομέτρων, περιλαμβάνοντας τις πόλεις του Ασπροπύργου, της Μαγούλας, της Μάνδρας και της Ελευσίνας (ΕΥ, 2017). Η περιοχή αυτή λειτουργεί αδιαμφισβήτητα ως ο βασικός «πνεύμονας» των αστικών εμπορευματικών μεταφορών για ολόκληρη την περιφέρεια της Αττικής (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η τοποθεσία του Θριασίου θεωρείται η βέλτιστη δυνατή επιλογή για την ανάπτυξη δραστηριοτήτων εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς παρέχει άμεση διασύνδεση με κρίσιμες συγκοινωνιακές υποδομές, όπως ο αυτοκινητόδρομος της Αττικής Οδού, η Λεωφόρος ΝΑΤΟ, και διαθέτει κρίσιμη σιδηροδρομική σύνδεση τόσο με τον εμπορευματικό σταθμό του λιμανιού του Πειραιά (Νέο Ικόνιο) όσο και με το αεροδρόμιο «Ελευθέριος Βενιζέλος» (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020; ΕΥ, 2017). Εκεί σχεδιάστηκε και αναπτύσσεται το μεγαλύτερο πολυτροπικό πάρκο logistics (Freight Village) στη Νοτιοανατολική Ευρώπη, σε μία συνολική έκταση περίπου 1.500.000 τετραγωνικών μέτρων, η οποία περιλαμβάνει και έναν διατροπικό τερματικό σταθμό 145 εκταρίων με σιδηροδρομικές υποδομές και εγκαταστάσεις cross-docking (ΕΥ, 2017; Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Σε αυτό το πλαίσιο, έπειτα από σύμβαση παραχώρησης οικοπέδου 58,8 εκταρίων ιδιοκτησίας της ΓΑΙΑΟΣΕ, προγραμματίζεται η κατασκευή νέων, υπερσύγχρονων αποθηκευτικών κτιρίων συνολικού εμβαδού 235.000 τετραγωνικών μέτρων, ικανών να μετατρέψουν την περιοχή σε παγκόσμιο πρότυπο λειτουργίας (ΕΥ, 2017).

Η έντονη συγκέντρωση των δραστηριοτήτων των μεγάλων παρόχων 3PL (Third-Party Logistics) στο Θριάσιο Πεδίο έχει δημιουργήσει ένα εξαιρετικά συγκεντρωτικό μοντέλο διανομής, στο οποίο τα εμπορεύματα φθάνουν αρχικά σε πολύ μεγάλους όγκους, ομαδοποιούνται ή διασπώνται και, στη συνέχεια, προωθούνται για την τελική τους παράδοση στους καταναλωτές (last-mile) (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Σε λειτουργικό και στρατηγικό επίπεδο, οι πάροχοι 3PL και οι κολοσσοί του λιανεμπορίου

προτιμούν σαφώς να αναπτύσσουν και να διαχειρίζονται τις κεντρικές αποθήκες τους σε αυτόν τον κόμβο (ΕΥ, 2017). Για την εξυπηρέτηση πιο απομακρυσμένων περιοχών ή της νησιωτικής Ελλάδας, οι εταιρείες 3PL συνήθως δεν επενδύουν σε ιδιόκτητες εγκαταστάσεις, αλλά προτιμούν τη λύση της υπεργολαβίας, αναθέτοντας το έργο σε τοπικά πρακτορεία ή μικρότερες μεταφορικές εταιρείες (ΕΥ, 2017).

Πέραν του Θριάσιου, το γεωγραφικό δίκτυο της Αττικής και της Στερεάς Ελλάδας υποστηρίζεται και από δευτερεύοντες, εξίσου ζωτικούς κόμβους. Η δεύτερη μεγαλύτερη συγκέντρωση εγκαταστάσεων logistics εντοπίζεται λίγο έξω από τα βόρεια σύνορα της Αττικής, στον νομό Βοιωτίας, και πιο συγκεκριμένα στη βιομηχανική ζώνη των Οινοφύτων, η οποία βρίσκεται σε απόσταση περίπου 50 χιλιομέτρων βόρεια της Αθήνας (ΕΥ, 2017). Η περιοχή φιλοξενεί παραδοσιακά ορισμένες από τις πιο μεγάλες βιομηχανικές και παραγωγικές εγκαταστάσεις της χώρας, ενώ διασχίζεται από τον κεντρικό αυτοκινητόδρομο (ΠΑΘΕ) και τη σιδηροδρομική γραμμή, συνδέοντας στρατηγικά την πρωτεύουσα με τη Βόρεια Ελλάδα (ΕΥ, 2017). Αυτή η συσσωμάτωση υποδομών εφοδιαστικής έχει επεκταθεί περαιτέρω προς τον βορρά κατά μήκος του οδικού άξονα, με επίκεντρο δύο βασικές υπο-περιοχές: την πόλη του Σχηματαρίου και τα περίχωρα της Θήβας (ΕΥ, 2017). Υπολογίζεται πως οι υφιστάμενες στεγασμένες αποθηκευτικές υποδομές αποκλειστικά σε αυτές τις δύο μεγάλες ζώνες (Δυτική Αττική και Βοιωτία) προσφέρουν χωρητικότητα που ξεπερνά συνολικά τα 2 εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα (ΕΥ, 2017). Συμπληρωματικά στο παραπάνω δίκτυο, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ένας μικρότερος αλλά ταχέως αναπτυσσόμενος κόμβος αποθηκευτικών εγκαταστάσεων στην Ανατολική Αττική, κατά μήκος της Αττικής Οδού, κοντά στις πόλεις της Παιανίας, του Κορωπίου και του Μαρκόπουλου (ΕΥ, 2017). Οι εγκαταστάσεις αυτές επωφελούνται από τη μικρή τους απόσταση από το Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών και τα εμπορικά κέντρα της πόλης, ωστόσο εξυπηρετούν πρωτίστως μεμονωμένες εταιρείες χονδρικής και λιανικής, καταγράφοντας αισθητά μικρότερη παρουσία παρόχων 3PL συγκριτικά με τη Δυτική Αττική (ΕΥ, 2017).

Αντίστοιχη με το πρότυπο της Αθήνας είναι και η γεωγραφική συγκέντρωση των δικτύων διανομής στη Βόρεια Ελλάδα. Η μεγάλη πλειονότητα των ελληνικών εταιρειών 3PL, ειδικά όσων αναλαμβάνουν έντονη δραστηριότητα στις διεθνείς οδικές μεταφορές (freight forwarding), λειτουργούν τεράστιες εγκαταστάσεις στα περίχωρα της Θεσσαλονίκης,

εστιάζοντας το επενδυτικό τους ενδιαφέρον στη Σίνδο και το Καλοχώρι (ΕΥ, 2017). Η Σίνδος, ευρισκόμενη στη δυτική πλευρά της πόλης, έχει αναπτυχθεί ως μια υπερσύγχρονη και εξαιρετικά οργανωμένη βιομηχανική ζώνη 10.000 στρεμμάτων, συγκεντρώνοντας τις σημαντικότερες υποδομές logistics σε ολόκληρη τη Βόρεια Ελλάδα (ΕΥ, 2017). Η περιοχή διαθέτει στο βόρειο και νότιο όριό της άμεσες σιδηροδρομικές συνδέσεις, άψογη πρόσβαση στο βασικό εθνικό οδικό δίκτυο (Εγνατία Οδός, ΠΑΘΕ) και απέχει περίπου 15 χιλιόμετρα από το λιμάνι της Θεσσαλονίκης, γεγονός που την καθιστά μια γεωστρατηγική πύλη εμπορίου (gateway) για όλες τις Βαλκανικές χώρες (ΕΥ, 2017). Ένας δεύτερος, άκρως καθοριστικός πόλος, είναι το Καλοχώρι, το οποίο λόγω της άμεσης εγγύτητάς του με τον Οργανισμό Λιμένος Θεσσαλονίκης, λειτουργεί κυρίως ως περιφερειακό κέντρο εφοδιασμού και συγκέντρωσης αποθεμάτων για μεγάλες επιχειρήσεις του λιανεμπορίου (ΕΥ, 2017). Πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι η αγορά των logistics στη Θεσσαλονίκη καταγράφει ραγδαία δυναμική, καθώς τα Κέντρα Αποθήκευσης και Διανομής τετραπλασιάστηκαν σε μία πενταετία, αυξανόμενα από περίπου 40 το 2018 σε 160 το 2024, καλύπτοντας κρίσιμες ανάγκες αποθήκευσης σε τρόφιμα, φάρμακα και άλλα βασικά αγαθά (Σύγχρονες υποδομές, αξιόπιστη συνδεσιμότητα, πλήρης υποστήριξη των Logistics, 2024). Ειδικά στο Καλοχώρι, υπολογίζεται ότι δραστηριοποιούνται συνολικά περίπου 800 διαφορετικές επιχειρήσεις (Σύγχρονες υποδομές, αξιόπιστη συνδεσιμότητα, πλήρης υποστήριξη των Logistics, 2024). Σε αυτό το πλαίσιο, το σχεδιαζόμενο Εμπορευματικό Κέντρο στο πρώην στρατόπεδο Γκόνου, το οποίο καταλαμβάνει έκταση 672.000 τετραγωνικών μέτρων κοντά στο λιμάνι και τη Σίνδο, αναμένεται να αναβαθμίσει σε τεράστιο βαθμό τον διαμετακομιστικό ρόλο της Θεσσαλονίκης, παρέχοντας τεράστια επιπρόσθετη χωρητικότητα για την προσωρινή αποθήκευση και επεξεργασία εμπορευμάτων με τελικό προορισμό τα Βαλκάνια (ΕΥ, 2017). Ωστόσο, η ολοκλήρωση και πλήρης αξιοποίηση αυτών των κόμβων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επίλυση σημαντικών ελλείψεων σε υποδομές, με ιδιαίτερη έμφαση στα κυκλοφοριακά προβλήματα της οδού Πόντου και στις καθυστερήσεις των σιδηροδρομικών συνδέσεων (Σύγχρονες υποδομές, αξιόπιστη συνδεσιμότητα, πλήρης υποστήριξη των Logistics, 2024).

Το δίκτυο των οδικών αξόνων αποτελεί τη ραχοκοκαλιά αυτού του συστήματος, διασυνδέοντας τους κόμβους παραγωγής και αποθήκευσης με τα αστικά κέντρα. Ο Αυτοκινητόδρομος ΠΑΘΕ παραμένει ο σημαντικότερος οδικός διάδρομος της χώρας,

συνδέοντας κάθετα την Αθήνα με τη Θεσσαλονίκη και τα σύνορα με την ΠΓΔΜ (Εύζωνοι), ενώ διέρχεται από κρίσιμες υποδομές του διευρωπαϊκού δικτύου μεταφορών (ΤΕΝ-Τ) (ΕΥ, 2017). Η Εγνατία Οδός, ως ένα από τα σπουδαιότερα κατασκευαστικά επιτεύγματα, με μήκος 670 χιλιομέτρων, διατρέχει από άκρη σε άκρη τη Βόρεια Ελλάδα (ΕΥ, 2017). Ο άξονας αυτός συνδέει τα ανατολικά σύνορα της χώρας με το λιμάνι της Ηγουμενίτσας και κατ' επέκταση αποτελεί τον κύριο εμπορευματικό διάδρομο προς τις ευρωπαϊκές αγορές μέσω της θαλάσσιας διασύνδεσης με την Ιταλία, ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετεί τα σημαντικά περιφερειακά λιμάνια της Καβάλας και της Αλεξανδρούπολης (ΕΥ, 2017). Η Ιονία Οδός (196 χλμ.) διατρέχει τη Δυτική Ελλάδα ενώνοντας ζωτικά λιμάνια (Πάτρα, Αστακός, Ηγουμενίτσα), και η Ολυμπία Οδός, εκτεινόμενη σε 201,5 χιλιόμετρα, αναλαμβάνει το βαρύ φορτίο των διεθνών οδικών μεταφορών προς την κεντρική Ευρώπη μέσω των υπηρεσιών Ro-Ro που διεξάγονται από το λιμάνι της Πάτρας (ΕΥ, 2017). Παρ' όλες τις θεαματικές αναβαθμίσεις του αυτοκινητοδρομικού δικτύου την τελευταία δεκαετία, καταγράφονται σοβαρές εκκρεμότητες διασύνδεσης. Για παράδειγμα, στο λιμάνι της Θεσσαλονίκης η απευθείας οδική σύνδεση με την ΠΑΘΕ παραμένει ακόμη ημιτελής λόγω μη λειτουργίας του κόμβου 16, ενώ καταγράφονται παρατεταμένες καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση του σιδηροδρομικού δικτύου (Σύγχρονες υποδομές, αξιόπιστη συνδεσιμότητα, πλήρης υποστήριξη των Logistics, 2024).

Παρά τη γεωγραφική συγκέντρωση και τη δημιουργία ισχυρών πόλων εφοδιαστικής, ο κλάδος ταλανίζεται από σημαντικές λειτουργικές ασυμμετρίες κατά τη σύνδεσή του με τον αστικό ιστό (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ενώ τα κέντρα διανομής σε κόμβους όπως το Θριάσιο είναι σύγχρονα, η τροφοδοσία των πόλεων, το λεγόμενο "τελευταίο μίλι" (last-mile delivery), συναντά δυσυπέρβλητα εμπόδια λόγω του απαρχαιωμένου εσωτερικού οδικού δικτύου των δήμων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η ουσιαστική αποτελεσματικότητα του Θριάσιου ως κέντρου εκκίνησης διανομών μειώνεται δραματικά από την παντελή απουσία Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (Urban Consolidation Centers - UCCs) εντός των πόλεων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Χωρίς τέτοια κέντρα, τα οχήματα αστικής διανομής αναγκάζονται καθημερινά να εισέρχονται και να εξέρχονται στο κέντρο των πόλεων διανύοντας τεράστιες αποστάσεις με πολύ χαμηλά ποσοστά πλήρωσης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αυτή η πρακτική όχι μόνο αυξάνει κατακόρυφα το κόστος λειτουργίας ανά διακινούμενη παλέτα, αλλά εκτοξεύει και

την περιβαλλοντική επιβάρυνση μέσω άσκοπων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Υπό το πρίσμα της σύγχρονης θεωρίας των City Logistics, ένα αποτελεσματικό εμπορευματικό κέντρο όπως του Θριάσιου θα μπορούσε να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην παροχή ομαδοποιημένων υπηρεσιών παράδοσης, λειτουργώντας ως κεντρικός μηχανισμός (UCC) για 16 βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες της Αττικής (π.χ. Μεταμόρφωση, Κηφισιά, Αχαρνές, Άγιος Στέφανος) (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Η δημιουργία αποτελεσματικών μοντέλων "transport pooling", τα οποία θα ενοποιούν τις ροές διαφορετικών παραγωγών μέσω συνεργατικών σχημάτων, είναι αναγκαία, δεδομένου ότι το μεταφορικό κόστος αντιστοιχεί συχνά στο 50% του συνολικού κόστους των logistics (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Αναλυτικές προσομοιώσεις δρομολόγησης στην περιοχή της Αττικής υπογραμμίζουν ότι η χρήση οχημάτων βαρέως τύπου υψηλής χωρητικότητας, για διανομές σε διεσπαρμένες βιομηχανικές περιοχές και μακριά από τα στενά κέντρα, καταλήγει σε μειωμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τη χρήση πολλαπλών, μικρότερων και πιο ευέλικτων φορτηγών (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022).

Επιπλέον, όσον αφορά τα κτηριακά χαρακτηριστικά, η ποιότητα των υποδομών αποθήκευσης έχει βελτιωθεί λόγω των επενδύσεων των κορυφαίων εταιρειών σε αυτοματισμό και ασφάλεια (EY, 2017). Εντούτοις, το μεγαλύτερο μέρος του αποθέματος ακινήτων logistics στην Ελλάδα συνίσταται σε μικρές, κατακερματισμένες αποθήκες (EY, 2017). Σύμφωνα με έρευνα του Πανεπιστημίου Αιγαίου, μόνο το 14% των εγχώριων αποθηκών ξεπερνά σε μέγεθος τα 45.000 τετραγωνικά μέτρα, ενώ πάνω από το 62% παραμένει σε εμβαδόν μικρότερο των 10.000 τετραγωνικών μέτρων (EY, 2017). Οι μισθωτικές αξίες αυτών των χώρων, μετά την οικονομική κρίση, συμπιέστηκαν αισθητά δημιουργώντας ιδιαίτερα ανταγωνιστικά ενοίκια (EY, 2017). Για παράδειγμα, το μέσο κόστος ενοικίασης στη ζώνη του Θριάσιου Πεδίου ανέρχεται μεταξύ 3 και 3,5 ευρώ ανά τετραγωνικό μέτρο, ενώ στη βιομηχανική περιοχή της Βοιωτίας οι τιμές είναι έως και 40% χαμηλότερες (EY, 2017). Αντίστοιχα, στη Θεσσαλονίκη τα ενοίκια κυμαίνονται γύρω στα 3 ευρώ για τη Σίνδο και μεταξύ 2 έως 2,5 ευρώ ανά τετραγωνικό μέτρο για την περιοχή του Καλοχωρίου (EY, 2017).

Καταλήγοντας, η χωροταξική οργάνωση των δικτύων διανομής επιδρά άμεσα στην οικονομική βιωσιμότητα των ίδιων των επιχειρήσεων. Πρωτογενείς έρευνες σε εταιρείες που

είναι ήδη εγκατεστημένες στην περιοχή του Θριασίου επιβεβαιώνουν ότι η τοποθεσία τους έχει συμβάλει ριζικά στην αύξηση του κύκλου εργασιών τους, βελτιώνοντας τους χρόνους απόκρισης και εξασφαλίζοντάς τους ισχυρό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Η επίλυση των δομικών προβλημάτων της γεωγραφικής ασυμμετρίας απαιτεί πλέον, όχι μόνο την ολοκλήρωση των μεγάλων διαμετακομιστικών κέντρων, αλλά και την υιοθέτηση ενός εθνικού νομοθετικού πλαισίου για τα urban logistics, το οποίο θα προωθήσει τα αστικά κέντρα ενοποίησης, τις νυχτερινές διανομές και τις στοχευμένες λωρίδες κυκλοφορίας επαγγελματικών οχημάτων (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022; Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020).

1.1.2. Ο κατακερματισμός της αγοράς και η λειτουργική δυσκαμψία

Η εγχώρια αγορά των αστικών εμπορευματικών μεταφορών και ευρύτερα της εφοδιαστικής αλυσίδας χαρακτηρίζεται από μια βαθιά δομική αντίφαση, η οποία αποτυπώνεται στον ακραίο κατακερματισμό του στόλου και των επιχειρήσεων που αναλαμβάνουν το φυσικό μεταφορικό έργο. Ενώ η ζήτηση για σύγχρονες υπηρεσίες logistics αυξάνεται και οι απαιτήσεις του «τελευταίου μιλίου» (last-mile) γίνονται όλο και πιο σύνθετες, ο κλάδος ταλανίζεται από μια κατάσταση που έχει χαρακτηριστεί ως «δομική αναρχία» (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η συγκεκριμένη παθογένεια πηγάζει από την κυριαρχία χιλιάδων μικροϊδιοκτητών έναντι μιας μικρής, αλλά εξαιρετικά ισχυρής, ελίτ εταιρειών παροχής υπηρεσιών 3PL (Third-Party Logistics), δημιουργώντας μια αγορά δύο ταχυτήτων με σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργική ευελιξία, το κόστος και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των διανομών.

Για να γίνει κατανοητό το μέγεθος του κατακερματισμού, αρκεί να αναλυθούν τα δημογραφικά στοιχεία των επιχειρήσεων του κλάδου. Ο τομέας των οδικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα αποτελείται από περισσότερες από 19.000 επιχειρήσεις, αριθμός που αντιστοιχεί περίπου στο 30% του συνόλου των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον ευρύτερο τομέα της μεταφοράς και αποθήκευσης (ΕΥ, 2017). Ωστόσο, η συνεισφορά αυτού του τεράστιου αριθμού επιχειρήσεων στην παραγόμενη προστιθέμενη αξία του

κλάδου περιορίζεται μόλις στο 13%, υποδεικνύοντας ότι το μέσο μέγεθος αυτών των εταιρειών, τόσο σε όρους απασχόλησης όσο και σε όρους οικονομικών μεγεθών, υπολείπεται δραματικά του ευρωπαϊκού μέσου όρου (EY, 2017). Στην πράξη, η συντριπτική πλειονότητα των μεταφορικών εταιρειών που εκτελούν το φυσικό έργο της διανομής είναι πολύ μικρές επιχειρήσεις, οι οποίες απασχολούν από 2 έως 5 εργαζομένους (συχνά μέλη της ίδιας οικογένειας) ή είναι μεμονωμένοι ιδιοκτήτες-οδηγοί, διαθέτοντας κατά μέσο όρο μόλις 1,5 βαρέα οχήματα ανά επιχείρηση (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022; EY, 2017).

Στον αντίποδα αυτής της κατακερματισμένης βάσης, η κορυφή της πυραμίδας ελέγχεται από έναν πολύ περιορισμένο αριθμό μεγάλων εταιρειών. Οι αναλύσεις της αγοράς καταδεικνύουν μια ισχυρή και αυξανόμενη τάση συγκέντρωσης των κερδών και του κύκλου εργασιών σε λίγα χέρια. Εκτιμάται ότι οι 10 μεγαλύτερες εταιρείες του κλάδου ελέγχουν σχεδόν το 60% της αγοράς, αφήνοντας το υπόλοιπο 40% να διαχέεται στην πληθώρα των μικροϊδιοκτητών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ακόμη πιο εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι μόλις 5 από τις 163 μεγαλύτερες εταιρείες 3PL στην Ελλάδα συγκεντρώνουν το 26% των συνολικών εσόδων της αγοράς και το 29% των συνολικών κερδών, υπογραμμίζοντας μια μέτρια προς υψηλή συγκέντρωση στο ανώτερο επίπεδο της εφοδιαστικής αλυσίδας (EY, 2017). Η απόκλιση αυτή επιβεβαιώνεται και από τα πλέον πρόσφατα οικονομικά δεδομένα για το 2024, όπου οι κορυφαίες επιχειρήσεις του τομέα Μεταφορών και Logistics (οι 10 μεγαλύτερες) είδαν τον κύκλο εργασιών τους να αυξάνεται κατά 6,2% και τα κέρδη προ φόρων, τόκων και αποσβέσεων (EBITDA) να εκτοξεύονται κατά 14,5% (ICAP CRIF, 2026). Αντιθέτως, την ίδια περίοδο, οι λοιπές, μικρότερες μεταφορικές επιχειρήσεις κατέγραψαν μείωση του EBITDA κατά 2,3%, αποδεικνύοντας την αδυναμία τους να ανταποκριθούν στις αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις (ICAP CRIF, 2026).

Αυτή η δομή της αγοράς έχει οδηγήσει στην εδραίωση ενός εκτεταμένου μοντέλου υπεργολαβίας (subcontracting). Οι μεγάλες εταιρείες 3PL, προκειμένου να διατηρήσουν την ευελιξία τους και να μειώσουν το πάγιο κεφαλαιουχικό τους κόστος, αποφεύγουν συχνά να επενδύσουν στη δημιουργία ιδιόκτητων στόλων οχημάτων για τη φυσική διανομή, ειδικά στις απομακρυσμένες ή πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Αντίθετα, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ανάθεση του μεταφορικού έργου σε αυτούς τους μικρούς μεταφορείς ή ιδιοκτήτες-οδηγούς (owner-drivers), οι οποίοι παρέχουν αμιγώς υπηρεσίες έλξης (road-

traction-only services) με εξαιρετικά χαμηλά περιθώρια κέρδους (EY, 2017). Παρά το γεγονός ότι το ποσοστό υπεργολαβίας στις οδικές εμπορευματικές μεταφορές στην Ελλάδα – μετρούμενο σε τονοχιλιόμετρα (tonne-km) – ανέρχεται στο 66%, εάν η μέτρηση γίνει με βάση τους μεταφερόμενους τόνους, η παροχή υπηρεσιών μεταφοράς για λογαριασμό τρίτων (hire and reward) περιορίζεται μόλις στο 21% (EY, 2017). Ο έντονος αυτός κατακερματισμός και ο σκληρός ανταγωνισμός μεταξύ των χιλιάδων μικρών μεταφορέων έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση των τιμών σε επίπεδα που συχνά δεν εξασφαλίζουν την οικονομική βιωσιμότητα. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις κύριες οδικές αρτηρίες, η τιμολόγηση των μεταφορικών υπηρεσιών κυμαίνεται κατά μέσο όρο στο 1 ευρώ ανά χιλιόμετρο, ποσό το οποίο λειτουργεί ασφυκτικά για τους μικροϊδιοκτήτες (EY, 2017). Οποιαδήποτε αύξηση στο κόστος των καυσίμων, στα διόδια ή στη συντήρηση, απορροφάται άμεσα από τα ήδη πενιχρά κέρδη των μικρών μεταφορέων, καθώς δυσκολεύονται δραματικά να μετακυλήσουν αυτές τις αυξήσεις στους πελάτες τους (τους μεγάλους 3PLs ή τους τελικούς αποστολείς) (EY, 2017).

Η οικονομική αυτή ασφυξία μεταφράζεται άμεσα σε οξεία λειτουργική δυσκαμψία και τεχνολογική υστέρηση. Οι μικροί μεταφορείς, στερούμενοι επαρκούς ρευστότητας και κεφαλαίων κίνησης, αδυνατούν να επενδύσουν σε σύγχρονα Πληροφοριακά Συστήματα Διαχείρισης Μεταφορών (TMS) και σε προηγμένους αλγορίθμους δρομολόγησης. Κατά συνέπεια, δεν έχουν πρόσβαση σε εργαλεία βελτιστοποίησης που θα μπορούσαν να επιλύσουν το περίπλοκο Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP), το οποίο αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την αποτελεσματική και οικονομική διανομή στον αστικό ιστό (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Ως εκ τούτου, τα δρομολόγια που εκτελούνται εντός των ελληνικών πόλεων καθορίζονται συχνά εμπειρικά, οδηγώντας σε ανορθολογικές διαδρομές, αυξημένους χρόνους παράδοσης, πολλαπλές επικαλύψεις και εκτόξευση του λειτουργικού κόστους (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η έλλειψη ψηφιοποίησης και συντονισμού σημαίνει ότι πολλά οχήματα διανομής κυκλοφορούν καθημερινά στο κέντρο της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης με πολύ χαμηλά ποσοστά πλήρωσης φορτίου. Ενώ η βιομηχανία απαιτεί ποσοστά πληρότητας οχημάτων που να ξεπερνούν το 80% προκειμένου το μεταφορικό έργο να καταστεί βιώσιμο και κερδοφόρο, ο μέσος όρος στην Ελλάδα συχνά κυμαίνεται γύρω στο 50% (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κυκλοφορούν σχεδόν τα διπλάσια φορτηγά από όσα πραγματικά απαιτούνται για να εξυπηρετηθεί ο ίδιος όγκος εμπορευμάτων, προκαλώντας

δραματική κυκλοφοριακή συμφόρηση και αχρείαστη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Ένα από τα σημαντικότερα θύματα αυτού του κατακερματισμού είναι η αδυναμία εφαρμογής πρακτικών «συνδυασμένης μεταφοράς» ή ενοποίησης φορτίων (transport pooling / shared contract-logistics). Η σύγχρονη θεωρία των City Logistics επιτάσσει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών παραγωγών, προμηθευτών και μεταφορέων για την από κοινού χρήση των οχημάτων και των υποδομών, ώστε να επιτυγχάνονται οικονομίες κλίμακας, δεδομένου ότι το μεταφορικό κόστος μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 50% του συνολικού κόστους των logistics (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Διαμέσου του transport pooling, μικρότερα ασυνεχή φορτία συγκεντρώνονται και ομαδοποιούνται, επιτρέποντας τη χρήση οχημάτων υψηλής χωρητικότητας, τα οποία μειώνουν το μεταφορικό κόστος ανά τονοχιλιόμετρο έως και 20% (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Παρά τα προφανή οφέλη, η δομική αναρχία της ελληνικής αγοράς στέκεται εμπόδιο. Η καχυποψία, η έλλειψη κουλτούρας συνεργασίας, ο έντονος ανταγωνισμός μεταξύ των πολυάριθμων μικρών μεταφορέων και η απουσία ενός ισχυρού εθνικού ρυθμιστικού πλαισίου για τα urban logistics εμποδίζουν την ανάπτυξη τέτοιων συνεργατικών σχημάτων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Παρότι καταγράφονται ορισμένες τοπικές προσπάθειες δημιουργίας «μεταφορικών πρακτορείων» και άτυπων συμμαχιών (agencies) για την ομαδοποίηση των αποστολών (groupage) σε επίπεδο νομών, αυτές οι προσπάθειες είναι αποσπασματικές και δεν επαρκούν για να ανατρέψουν τη γενικότερη εικόνα της αγοράς, όπου οι μεγάλοι 3PLs εξακολουθούν να υπαγορεύουν τους όρους (EY, 2017).

Η επιμονή σε αυτό το λειτουργικό μοντέλο έχει επίσης σοβαρές επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα του ίδιου του κλάδου απέναντι σε οικονομικές διακυμάνσεις. Κατά τη διάρκεια της οξείας οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα, τα δομικά αυτά προβλήματα αναδείχθηκαν με τον πιο ανάγλυφο τρόπο. Αναλύοντας τα δεδομένα προστιθέμενης αξίας του τομέα, παρατηρείται ότι ενώ η προστιθέμενη αξία των υπηρεσιών αποθήκευσης και υποστήριξης αυξήθηκε κατά 6% μεταξύ 2009 και 2014, η αντίστοιχη αξία των αμιγώς μεταφορικών υπηρεσιών (όπου δραστηριοποιείται ο κύριος όγκος των μικρών μεταφορέων) κατέρρευσε κατά 54% (EY, 2017). Αυτό αποδεικνύει ότι οι εταιρείες logistics που μπόρεσαν να προσφέρουν υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας (warehousing, packaging) μπόρεσαν να

θωρακιστούν, ενώ οι μικροί μεταφορείς, εγκλωβισμένοι στην απλή μετακίνηση του φορτίου χωρίς δυνατότητα ενοποίησης ή βελτιστοποίησης, απορρόφησαν όλο το βάρος της ύφεσης (EY, 2017).

Συνοψίζοντας, ο έντονος κατακερματισμός της αγοράς αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα δεν αποτελεί απλώς ένα στατιστικό δεδομένο, αλλά μια βαθιά ριζωμένη παθογένεια που παράγει και αναπαράγει τη λειτουργική δυσκαμψία του κλάδου. Όσο το μεταφορικό έργο στο "τελευταίο μίλι" εκτελείται από χιλιάδες ασυντόνιστους, υποκεφαλαιοποιημένους μικροϊδιοκτήτες που παλεύουν για την οικονομική τους επιβίωση σε συνθήκες εξοντωτικού ανταγωνισμού, η μετάβαση σε ένα σύγχρονο, «έξυπνο» και πράσινο σύστημα αστικών διανομών θα παραμένει ανέφικτη. Η υπέρβαση αυτού του εμποδίου προϋποθέτει την οργανωτική αναδιάρθρωση της αγοράς, τη συνένωση δυνάμεων μέσω του transport pooling, και την αποφασιστική ενίσχυση του ρόλου των Αστικών Κέντρων Ενοποίησης (UCCs), ώστε να επιτευχθούν οι αναγκαίες οικονομίες κλίμακας, η βελτιστοποίηση των διαδρομών και η ελαχιστοποίηση του κοινωνικού και περιβαλλοντικού κόστους.

1.1.3. Ηλικιακή διάρθρωση στόλου και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Για να κατανοηθεί πλήρως το μέγεθος των προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο κλάδος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα, είναι αναγκαία η εις βάθος ανάλυση των δομικών χαρακτηριστικών του ίδιου του στόλου των οχημάτων, καθώς και των περιβαλλοντικών προεκτάσεων που προκύπτουν από τη λειτουργία του. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι οδικές μεταφορές αποτελούν τον αδιαμφισβήτητο κυρίαρχο στην κατανάλωση ενέργειας εντός του ευρύτερου τομέα των μεταφορικών δραστηριοτήτων. Σύμφωνα με τα πλέον πρόσφατα αναθεωρημένα στατιστικά δεδομένα, οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για το 73,4% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αφήνοντας πολύ πίσω τις αεροπορικές (12,5%), τις πλωτές (12,1%) και τις σιδηροδρομικές μεταφορές (1,4%) (European Commission, 2025). Το ενεργειακό αυτό μείγμα των οδικών μεταφορών εξακολουθεί να κυριαρχείται από τα ορυκτά καύσιμα, καθώς

το πετρέλαιο κίνησης (gas/diesel oil) καλύπτει το 63,7% της κατανάλωσης και η βενζίνη το 26,2%, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές, τα βιοκαύσιμα και η ηλεκτρική ενέργεια καταλαμβάνουν ακόμη μονοψήφια ποσοστά (European Commission, 2025). Ειδικότερα, στην κατηγορία των βαρέων επαγγελματικών οχημάτων (Heavy-Duty Vehicles - HDVs), τα οποία αναλαμβάνουν το κύριο βάρος των εμπορευματικών μεταφορών, η εξάρτηση από το πετρέλαιο αγγίζει το συντριπτικό 90% (European Commission, 2025).

Στην Ελλάδα, αυτή η πανευρωπαϊκή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα επιδεινώνεται δραματικά λόγω της ακραίας γήρανσης του εθνικού στόλου των επαγγελματικών οχημάτων. Η οικονομική κρίση της προηγούμενης δεκαετίας, η οποία συμπίεσε τα περιθώρια κέρδους και περιόρισε την πρόσβαση σε τραπεζικό δανεισμό, άφησε βαθιά σημάδια στον κλάδο, αναστέλλοντας σχεδόν κάθε οργανωμένη προσπάθεια ανανέωσης του μεταφορικού δυναμικού (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το αποτέλεσμα είναι η Ελλάδα να καταγράφει σήμερα ένα από τα πιο αρνητικά ρεκόρ στην Ευρώπη: η μέση ηλικία των βαρέων φορτηγών υπερβαίνει τα 20 έτη, κατατάσσοντας τη χώρα στην τελευταία θέση μεταξύ των κρατών-μελών της Ε.Ε., ενώ το 59% του συνολικού έργου των οδικών μεταφορών εκτελείται από οχήματα ηλικίας άνω των 10 ετών (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Στα ελαφρά φορτηγά (vans), τα οποία αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των διανομών στο "τελευταίο μίλι" (last-mile) εντός των πυκνοκατοικημένων αστικών κέντρων, η κατάσταση είναι οριακά μόνο καλύτερη, παραμένοντας ωστόσο εξαιρετικά προβληματική (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η ιστορική εξέλιξη της σύνθεσης του στόλου, όπως αποτυπώνεται στατιστικά για τη δεκαετία 2014-2024, αποκαλύπτει ένα τεχνολογικό βάλτωμα και μια ανησυχητικά αργή μετάβαση προς την αποανθρακοποίηση. Συγκεκριμένα, τα ελαφρά και βαρέα φορτηγά που κινούνται με Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης (ICE), κυρίως πετρέλαιο, αυξήθηκαν σε απόλυτους αριθμούς από 1.315.420 το 2014 σε 1.372.100 το 2024 (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Στον αντίποδα, παρά τις παγκόσμιες επιταγές για πράσινη μετάβαση, τα αμιγώς ηλεκτρικά επαγγελματικά οχήματα (Battery Electric Vehicles - BEV) αυξήθηκαν μεν από τα μόλις 120 το 2014 στα 4.800 το 2024, αλλά το νούμερο αυτό παραμένει στατιστικά ασήμαντο, καθώς αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 0,35% του συνολικού στόλου (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αντίστοιχα, τα υβριδικά ή οχήματα άλλων εναλλακτικών

καυσίμων ανήλθαν από 2.100 το 2014 σε 14.200 το 2024, αριθμός που υποδεικνύει ότι ο κλάδος εξακολουθεί να βασίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά σε ρυπογόνες, παρωχημένες τεχνολογίες (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τα επιβατικά οχήματα, όπου ο ρυθμός ανανέωσης στην Ευρώπη μπορεί να κυμαίνεται από 1,4% έως και πάνω από 10% ετησίως ανάλογα με τη χώρα (European Commission, 2026), στα επαγγελματικά οχήματα της Ελλάδας ο ρυθμός αυτός παραμένει καθηλωμένος, με τη συντριπτική πλειονότητα των φορτηγών που κυκλοφορούν καθημερινά στις πόλεις να ανήκουν σε τεχνολογικές κλάσεις ρύπων Euro 4 ή και παλαιότερες (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Οι συνέπειες αυτής της παρατεταμένης ηλικιακής διάρθρωσης είναι πολυδιάστατες και πλήττουν καίρια τόσο την οικονομική βιωσιμότητα των ίδιων των μεταφορικών επιχειρήσεων όσο και το περιβάλλον. Σε λειτουργικό και οικονομικό επίπεδο, η γήρανση του στόλου μεταφράζεται άμεσα σε κατακόρυφη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Υπολογίζεται ότι τα παλαιάς τεχνολογίας οχήματα που διαθέτουν οι Έλληνες μεταφορείς καταναλώνουν έως και 30% περισσότερο καύσιμο σε σύγκριση με τα σύγχρονα, αποδοτικότερα οχήματα τεχνολογίας Euro 6 (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Δεδομένου ότι το κόστος των καυσίμων αποτελεί τη σημαντικότερη δαπάνη στις οδικές μεταφορές (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022), αυτή η επιπλέον κατανάλωση συμπιέζει δραματικά τα ήδη χαμηλά περιθώρια κέρδους των μικρών μεταφορέων, καθιστώντας τους εξαιρετικά ευάλωτους σε κάθε διεθνή διακύμανση των τιμών του πετρελαίου.

Πέραν της κατανάλωσης, τα πεπαλαιωμένα οχήματα εγκυμονούν υψηλά κόστη συντήρησης και επισκευών. Η αυξημένη συχνότητα των μηχανικών βλαβών δεν επιβαρύνει μόνο τον προϋπολογισμό των επιχειρήσεων λόγω της δαπάνης για ανταλλακτικά (τα οποία συχνά είναι δυσεύρετα για πολύ παλιά μοντέλα), αλλά απορρυθμίζει πλήρως τον αυστηρό προγραμματισμό των αστικών διανομών, προκαλώντας καθυστερήσεις στην αλυσίδα εφοδιασμού (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Παράλληλα, ανακύπτουν και σοβαρά ζητήματα οδικής ασφάλειας. Ένας στόλος εικοσαετίας στερείται κατά κανόνα των σύγχρονων, προηγμένων συστημάτων ενεργητικής και παθητικής ασφάλειας (όπως τα συστήματα αντιμπλοκαρίσματος τροχών ABS τελευταίας γενιάς, τα συστήματα αυτόματου φρεναρίσματος και αποφυγής σύγκρουσης, και οι αισθητήρες τυφλού σημείου), αυξάνοντας

τον κίνδυνο ατυχημάτων εντός του πυκνού και χαοτικού αστικού ιστού (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Το πιο ανησυχητικό, ωστόσο, τίμημα του απαρχαιωμένου στόλου καταβάλλεται στον τομέα του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG) και τοπικών ατμοσφαιρικών ρύπων, υποβαθμίζοντας την ποιότητα ζωής στα μεγάλα αστικά κέντρα (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία των City Logistics, η διανομή των προϊόντων στο "τελευταίο μίλι" παράγει δυσανάλογα υψηλούς ρύπους εξαιτίας των συνεχών στάσεων (stop-and-go), των χαμηλών ταχυτήτων και της κυκλοφοριακής συμφόρησης, καταστάσεις που πολλαπλασιάζουν τις εκπομπές ενός παλαιού κινητήρα (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Αναλύοντας τα μεγέθη, προκύπτει ένα εντυπωσιακό περιβαλλοντικό παράδοξο: ενώ τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα (HDVs) αντιπροσωπεύουν μόλις το 4% του συνολικού στόλου των οχημάτων που κυκλοφορούν στους δρόμους της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι υπεύθυνα για το 30% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τις οδικές μεταφορές (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Στο πλαίσιο ερευνών για την περιοχή της Αττικής και του Θριάσιου Πεδίου, ο μέσος συντελεστής εκπομπών για ένα τυπικό αρθρωτό φορτηγό (άνω των 33 τόνων) παλαιάς τεχνολογίας υπολογίζεται στα 0,6626 κιλά ισοδύναμου CO_2 ανά διανυόμενο χιλιόμετρο (kg CO_2 eq/km) (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Αν αναλογιστεί κανείς τα εκατομμύρια χιλιόμετρα που διανύουν καθημερινά χιλιάδες τέτοια οχήματα στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, συχνά μάλιστα χωρίς να είναι πλήρως φορτωμένα (empty runs ή χαμηλό load factor), γίνεται αντιληπτό το μέγεθος της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Εκτός από το CO_2, τα παλαιά πετρελαιοκίνητα φορτηγά εκλύουν τεράστιες ποσότητες οξειδίων του αζώτου (NO_x) και αιωρούμενων μικροσωματιδίων (PM), τα οποία εγκλωβίζονται στην ατμόσφαιρα των πόλεων και ενοχοποιούνται για σοβαρές αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η αντιμετώπιση αυτής της περιβαλλοντικής απειλής και η βελτίωση της αποδοτικότητας προσκρούουν, ωστόσο, σε σημαντικά εμπόδια που σχετίζονται τόσο με το κόστος της "πράσινης" τεχνολογίας όσο και με την έλλειψη κατάλληλων υποδομών. Η σύγχρονη

κοινωνία, οι καταναλωτές αλλά και οι ευρωπαϊκές κυβερνήσεις απαιτούν πλέον φιλικές προς το περιβάλλον αλυσίδες εφοδιασμού (Green Freight Distribution), γεγονός που προϋποθέτει τη χρήση οχημάτων νέας τεχνολογίας με ελάχιστη έως μηδενική κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με προηγμένους αλγορίθμους δρομολόγησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (VRPTW) (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Παρά ταύτα, η υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης στα επαγγελματικά οχήματα στη χώρα μας φαντάζει ουτοπική υπό τις παρούσες συνθήκες.

Πρώτον, το κόστος κτήσης ενός αμιγώς ηλεκτρικού φορτηγού (BEV) παραμένει εξαιρετικά υψηλό, κοστίζοντας συχνά έως και τρεις φορές περισσότερο από ένα αντίστοιχο όχημα τεχνολογίας diesel (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Για τον μέσο Έλληνα μεταφορέα-μικροϊδιοκτήτη, ο οποίος λειτουργεί στα όρια της βιωσιμότητας και αντιμετωπίζει έντονο ανταγωνισμό, μια τέτοια επένδυση είναι πρακτικά αδύνατη χωρίς τη θέσπιση γενναίων, μακροπρόθεσμων και άμεσων κρατικών επιδοτήσεων και χρηματοδοτικών εργαλείων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Δεύτερον, ακόμα και αν εξασφαλιζόταν η χρηματοδότηση για την αγορά των οχημάτων, υπάρχει παντελής έλλειψη ενός αξιόπιστου και εκτεταμένου δικτύου ταχυφόρτισης (fast-charging) προσαρμοσμένου στις ανάγκες των βαρέων επαγγελματικών οχημάτων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Σε αντίθεση με τα επιβατικά Ι.Χ., τα φορτηγά απαιτούν τεράστια ποσά ενέργειας και εξειδικευμένους σταθμούς φόρτισης εντός ή στις παρυφές των πόλεων (π.χ. κοντά στις βιομηχανικές ζώνες και τα εμπορευματικά κέντρα). Πολλές επιχειρήσεις που εξέτασαν το ενδεχόμενο δημιουργίας ιδιωτικών σταθμών φόρτισης στις εγκαταστάσεις τους διαπίστωσαν ότι το τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης (του ΔΕΔΔΗΕ) συχνά αδυνατεί να υποστηρίξει τα απαιτούμενα βιομηχανικά φορτία χωρίς εκτεταμένες και δαπανηρές αναβαθμίσεις υποδομών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Συνεπώς, η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και η εξισορρόπηση των αρνητικών επιπτώσεων της ηλικιακής διάρθρωσης του στόλου δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στην αντικατάσταση των οχημάτων, αλλά απαιτεί ταυτόχρονα και ριζικό επιχειρησιακό ανασχεδιασμό. Όπως επισημαίνεται χαρακτηριστικά στις σύγχρονες αναλύσεις των City Logistics, η απάντηση στο πρόβλημα βρίσκεται στη βέλτιστη χρήση των

διαθέσιμων πόρων (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Η ενοποίηση των μεταφορικών ροών (transport pooling) και η χρήση οχημάτων υψηλής χωρητικότητας για τη μεταφορά μεγάλων όγκων μέχρι τα όρια των πόλεων, μειώνουν σημαντικά το κόστος ανά μονάδα φορτίου (τονοχιλιόμετρο) και ελαχιστοποιούν τις εκπομπές ρύπων, καθώς απαιτούνται λιγότερα βαρέα οχήματα στους δρόμους (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Από εκεί και πέρα, η ύπαρξη οργανωμένων Αστικών Κέντρων Ενοποίησης (UCCs) καθίσταται απολύτως αναγκαία. Τα κέντρα αυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως σταθμοί μεταφόρτωσης, όπου τα εμπορεύματα που καταφθάνουν με μεγάλα ρυπογόνα φορτηγά, θα ομαδοποιούνται και θα μεταφέρονται στο κέντρο της πόλης αποκλειστικά από μικρά, ευέλικτα ηλεκτρικά βαν ή και ποδήλατα μεταφοράς φορτίων (cargo bikes), εξαλείφοντας έτσι την ατμοσφαιρική και ηχητική ρύπανση στις πυκνοκατοικημένες περιοχές (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023).

Συμπερασματικά, το περιβαλλοντικό ζήτημα που γεννάται από τις αστικές εμπορευματικές μεταφορές στην Ελλάδα είναι άρρηκτα συνυφασμένο με τη γερασμένη και ρυπογόνο φύση του εθνικού στόλου, σε συνδυασμό με την αδυναμία της αγοράς να αυτορυθμιστεί και να εκσυγχρονιστεί. Όσο η αποανθρακοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί προνόμιο μόνο ελάχιστων μεγάλων πολυεθνικών εταιρειών 3PL που διαθέτουν τους πόρους για τέτοιες επενδύσεις, οι ελληνικές πόλεις θα συνεχίσουν να υφίστανται τις συνέπειες ενός αναχρονιστικού μοντέλου. Η επίτευξη ενός βιώσιμου και "πράσινου" συστήματος αστικών διανομών επιτάσσει, επομένως, ισχυρές θεσμικές παρεμβάσεις, γενναία κρατικά κίνητρα για την απόσυρση των παλαιών φορτηγών, άμεση κατασκευή υποδομών φόρτισης, και, πρωτίστως, τον χωροταξικό και τεχνολογικό ανασχεδιασμό των διαδικασιών ενοποίησης φορτίων (transport pooling) (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Μόνο μέσα από αυτή τη συνδυαστική στρατηγική θα καταστεί εφικτή η ελαχιστοποίηση της κυκλοφοριακής και περιβαλλοντικής ασφυξίας που προκαλεί το "τελευταίο μίλι" στη σύγχρονη εποχή.

1.1.4. Λειτουργικές προκλήσεις στο «Τελευταίο μίλι» (Last-Mile Delivery)

Η πλέον σύνθετη, δαπανηρή και περιβαλλοντικά επιβαρυντική συνιστώσα της εφοδιαστικής αλυσίδας στα αστικά κέντρα είναι αδιαμφισβήτητα η φυσική διανομή στο «τελευταίο μίλι» (last-mile delivery). Το «τελευταίο μίλι» ορίζεται ως το τελικό στάδιο της μεταφοράς των εμπορευμάτων, από το τελευταίο κέντρο διανομής ή τον κόμβο ενοποίησης (όπως το Θριάσιο Πεδίο) έως την πόρτα του τελικού παραλήπτη, είτε αυτός είναι επιχείρηση λιανικής, είτε χώρος εστίασης, είτε τελικός καταναλωτής (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Στην Ελλάδα, και ειδικότερα στα πολεοδομικά συγκροτήματα της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, η λειτουργία του last-mile δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική πρόκληση δρομολόγησης, αλλά έναν καθημερινό αγώνα επιβίωσης απέναντι σε ένα αστικό περιβάλλον που σχεδιάστηκε χωρίς καμία απολύτως πρόνοια για τις σύγχρονες ανάγκες των εμπορευματικών μεταφορών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός εξαιρετικά αναποτελεσματικού συστήματος διανομής, το οποίο πλήττει την κερδοφορία των μεταφορικών επιχειρήσεων, υποβαθμίζει την ποιότητα ζωής των πολιτών και εξαντλεί σωματικά και ψυχολογικά το ανθρώπινο δυναμικό του κλάδου.

Η ρίζα του προβλήματος εντοπίζεται στην ίδια τη μορφολογία του ελληνικού αστικού ιστού, ο οποίος χαρακτηρίζεται από στενούς δρόμους, υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και παντελή έλλειψη ολοκληρωμένου χωροταξικού σχεδιασμού για τα City Logistics (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Οι οδηγοί των φορτηγών διανομής καλούνται καθημερινά να πλοηγηθούν σε ένα περιβάλλον κυκλοφοριακού χάους, όπου η ταχύτητα κίνησης είναι εξαιρετικά χαμηλή και κυριαρχεί το μοτίβο των συνεχών στάσεων και εκκινήσεων (stop-and-go) (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Η κατάσταση αυτή όχι μόνο εκτοξεύει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και μικροσωματιδίων, αλλά καθιστά σχεδόν αδύνατη την τήρηση των αυστηρών χρονικών παραθύρων παράδοσης (time windows) που επιβάλλουν οι πελάτες (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Τα χρονικά αυτά παράθυρα, τα οποία συχνά συμπίπτουν με τις ώρες αιχμής της επιβατικής κυκλοφορίας, δημιουργούν ασφυκτική πίεση στους μεταφορείς, οι οποίοι προσπαθούν να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις του λιανεμπορίου με τους περιορισμούς του οδικού δικτύου (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η πιο χαρακτηριστική ίσως παθογένεια των αστικών διανομών στην Ελλάδα είναι το πρόβλημα της στάθμευσης και της φορτοεκφόρτωσης. Η έλλειψη επαρκών, θεσμοθετημένων και ελεύθερων θέσεων φορτοεκφόρτωσης αποτελεί έναν καθημερινό εφιάλτη για τους επαγγελματίες (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Ακόμη και στις λιγοστές περιπτώσεις που υπάρχουν ειδικές ζώνες, αυτές συχνά καταλαμβάνονται παράνομα από ιδιωτικά επιβατικά οχήματα, λόγω της απουσίας αυστηρής και συνεχούς αστυνόμευσης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ως εκ τούτου, οι οδηγοί των φορτηγών αναγκάζονται να καταφύγουν στην παράνομη στάθμευση, διπλοπαρκάροντας σε κεντρικές αρτηρίες, κλείνοντας λωρίδες κυκλοφορίας ή σταθμεύοντας πάνω σε πεζοδρόμια, γεγονός που οδηγεί σε συχνά πρόστιμα από την Τροχαία, διαπληκτισμούς με άλλους οδηγούς και περαιτέρω επιδείνωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η βιωματική πραγματικότητα των οδηγών στους δρόμους της Αθήνας περιγράφεται γλαφυρά μέσα από αυθεντικές μαρτυρίες επαγγελματιών του κλάδου, οι οποίες αποκαλύπτουν το μέγεθος της "ζούγκλας" που επικρατεί στο τελευταίο μίλι. Ένας οδηγός φορτοταξί που εκτελεί διανομές, για παράδειγμα, ξεκινά τη μέρα του αναλαμβάνοντας ο ίδιος εξ ολοκλήρου το έργο της φόρτωσης, λειτουργώντας ουσιαστικά ως αποθηκάριος: διαλύει τις παλέτες, παίρνει τα κιβώτια ένα-ένα και "χτίζει" τον χώρο φόρτωσης του οχήματος σαν ένα πολύπλοκο παζλ, προκειμένου να χωρέσουν όλα τα εμπορεύματα (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Καθώς το όχημα εισέρχεται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως τα Πατήσια ή το κέντρο της Αθήνας, η κατάσταση γίνεται αφόρητη. Ο οδηγός προσπαθεί να σταθμεύσει για να παραδώσει, αντιμετωπίζοντας κορναρίσματα, φωνές, και διαπληκτισμούς από τους διερχόμενους οδηγούς ΙΧ που δυσανασχετούν με την παραμικρή καθυστέρηση (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Ακόμη χειρότερα, η απουσία βοηθών οδηγού αναγκάζει τον ίδιο τον μεταφορέα να αναλάβει τον ρόλο του μεταφορέα-εργάτη (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Είναι πλέον συνήθης τακτική εταιρειών και σούπερ μάρκετ να υποχρεώνουν τον οδηγό του φορτηγού να ξεφορτώσει τα εμπορεύματα χρησιμοποιώντας χειροκίνητο παλετοφόρο, να τα μεταφέρει στις ράμπες ή ακόμη και στο εσωτερικό των αποθηκών, διανύοντας συχνά μεγάλες αποστάσεις πάνω σε κακοτεχνίες, σπασμένα

πεζοδρόμια και ανισόπεδους δρόμους (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Το σωματικό τίμημα αυτής της πρακτικής είναι τεράστιο· δεν είναι τυχαίο ότι παλαιότεροι οδηγοί καταθέτουν πως φτάνοντας στην ηλικία της συνταξιοδότησης το σώμα τους είναι «εντελώς διαλυμένο» από τη μακροχρόνια, βαριά χειρωνακτική καταπόνηση που δεν ανήκει στα στενά καθήκοντα της οδήγησης, αλλά αποτελεί παράπλευρη συνέπεια των δυσλειτουργιών του last-mile (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Παράλληλα με τα προβλήματα του αμιγώς αστικού περιβάλλοντος, η ομαλή ροή των εμπορευματικών μεταφορών στο τελευταίο μίλι υπονομεύεται ριζικά και από τις αρρυθμίες των κεντρικών κόμβων και των λιμένων, οι οποίοι αποτελούν την αφετηρία ή την κατάληξη των αστικών διαδρομών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το "τελευταίο μίλι" δεν είναι ένα απομονωμένο σύστημα, αλλά ο τελευταίος κρίκος μιας αλυσίδας που πάσχει από σοβαρές καθυστερήσεις στα σημεία ενοποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατάσταση στους μεγάλους λιμένες της χώρας. Το Πανελλήνιο Συνδικάτο Χερσαίων Εμπορευματικών Μεταφορών (Π.Σ.Χ.Ε.Μ.) έχει καταγγείλει επανειλημμένα με επίσημες ανακοινώσεις του τις σοβαρές επιπτώσεις που προκαλεί η συνεχιζόμενη δυσλειτουργία και οι καθυστερήσεις στον Σταθμό Εμπορευματοκιβωτίων Πειραιά (ΡΟΤ) και στο λιμάνι της Θεσσαλονίκης (Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024). Οι οδηγοί των φορτηγών αντιμετωπίζουν καθημερινά χαοτικές καταστάσεις στην προσπάθειά τους να παραλάβουν ή να επιστρέψουν κενά εμπορευματοκιβώτια (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Οι ουρές αναμονής στους τερματικούς σταθμούς μεταφράζονται σε αμέτρητες χαμένες εργατοώρες. Ένα φορτηγό που εγκλωβίζεται για πολύωρη αναμονή στις πύλες του λιμανιού αποδιοργανώνει πλήρως το χρονοδιάγραμμα των παραδόσεων που πρέπει να εκτελέσει στον αστικό ιστό της Αθήνας μέσα στην ίδια μέρα, προκαλώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση καθυστερήσεων, παραβιάσεων ωραρίων και δυσαρέσκειας των τελικών πελατών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024). Επιπρόσθετα, τέτοιες καθυστερήσεις εντείνουν το ήδη βεβαρημένο ψυχολογικό φορτίο των οδηγών, οι οποίοι καλούνται να «τρέξουν» στη συνέχεια μέσα στην κίνηση της πόλης για να αναπληρώσουν τον χαμένο χρόνο (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Η πίεση αυτή συχνά επιτείνεται από εποχικούς και θεσμικούς παράγοντες. Οι εορταστικές περίοδοι ή τα τριήμερα, κατά τα οποία τίθενται σε ισχύ απαγορεύσεις κυκλοφορίας φορτηγών άνω των 3,5 τόνων (όπως π.χ. κατά την περίοδο του Αγίου Πνεύματος), δημιουργούν ένα φαινόμενο «συμπίεσης» του μεταφορικού έργου (Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024). Ο τεράστιος όγκος αγαθών που πρέπει να διανεμηθεί στα αστικά κέντρα (ειδικά σε είδη διατροφής και λιανεμπορίου) συμπιέζεται στις ημέρες ακριβώς πριν ή μετά την απαγόρευση, προκαλώντας ασφυξία στις αστικές υποδομές και στα σημεία φόρτωσης. Ακόμη και σε κανονικές περιόδους, οι θεσμικές αγκυλώσεις, όπως η έλλειψη ενιαίου κανονιστικού πλαισίου μεταξύ των διαφόρων δήμων της Αττικής σχετικά με τα επιτρεπόμενα ωράρια τροφοδοσίας των καταστημάτων, καθιστούν τον στρατηγικό προγραμματισμό των δρομολογίων (routing) έναν δυσεπίλυτο γρίφο (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ένα φορτηγό που ξεκινά από τον Ασπρόπυργο μπορεί να κληθεί να παραδώσει σε τρεις διαφορετικούς δήμους, ο καθένας εκ των οποίων έχει θεσπίσει αντικρουόμενα ωράρια κατά τα οποία επιτρέπεται η φορτοεκφόρτωση στους εμπορικούς του δρόμους.

Οι λύσεις για την αποσυμφόρηση του last-mile αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης διεθνούς ακαδημαϊκής έρευνας, η οποία ωστόσο αναδεικνύει την απόσταση που χωρίζει την Ελλάδα από τις σύγχρονες πρακτικές των City Logistics. Η κεντρική παραδοχή για την εξυγίανση του συστήματος είναι η δημιουργία Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (UCCs), τα οποία απουσιάζουν παντελώς από την ελληνική πραγματικότητα (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Εάν υπήρχαν τέτοια κέντρα στις παρυφές των πυκνοκατοικημένων ζωνών, τα μεγάλα και ρυπογόνα φορτηγά (όπως τα βαρέα οχήματα των 33 τόνων) δεν θα χρειάζονταν να εισέλθουν ποτέ στο κέντρο των πόλεων (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Αντ' αυτού, το φορτίο τους θα μεταφορτωνόταν σε μικρότερα, πιο ευέλικτα, και φιλικά προς το περιβάλλον οχήματα.

Προς αυτή την κατεύθυνση, η σύγχρονη βιβλιογραφία προτείνει την ενσωμάτωση εναλλακτικών, «πράσινων» μέσων διανομής για το τελευταίο μίλι, όπως τα ηλεκτρικά ποδήλατα μεταφοράς φορτίου (cargo bikes) και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (drones). Μελέτες περίπτωσης που έχουν διεξαχθεί ακόμη και σε ελληνικές πόλεις δείχνουν ότι η χρήση cargo bikes και drones μπορεί να μειώσει δραστικά τη συμφόρηση, το κόστος και

τις εκπομπές ρύπων στον αστικό ιστό, παρακάμπτοντας τους περιορισμούς του οδικού δικτύου (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Ωστόσο, η ευρεία υιοθέτηση τέτοιων καινοτόμων λύσεων προσκρούει σε ρυθμιστικά εμπόδια, ζητήματα ασφάλειας και, πρωτίστως, στην έλλειψη των απαραίτητων συνοδευτικών υποδομών, όπως σταθμοί επαναφόρτισης, ειδικές λωρίδες κίνησης για ποδήλατα και μικρά αστικά κέντρα μεταφόρτωσης (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024).

Μια άλλη πρωτοποριακή και διεθνώς ανερχόμενη λύση που εξετάζεται, είναι η αξιοποίηση των πλεοναζουσών χωρητικοτήτων των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (μετρό, τραμ, αστικά λεωφορεία) για τη μετακίνηση εμπορευμάτων εντός της πόλης (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Έχουν μάλιστα πραγματοποιηθεί διεθνώς πιλοτικά προγράμματα (π.χ. στο Παρίσι και τη Δρέσδη) όπου εμπορεύματα μεταφέρονται μέσω συρμών τραμ ή του μετρό (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Στην Ελλάδα, ωστόσο, τέτοιες συνέργειες βρίσκονται εκτός συζήτησης επί του παρόντος, καθώς προαπαιτούν την ύπαρξη τυποποιημένων διατροπικών εμπορευματοκιβωτίων (intermodal containers) που θα προσαρμόζονται τόσο στα ΜΜΜ όσο και στα cargo bikes, αλλά και την υπέρβαση τεράστιων διαχειριστικών, λειτουργικών και ρυθμιστικών προκλήσεων (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Η πολυπλοκότητα του συντονισμού μεταξύ δημοσίων φορέων συγκοινωνιών και ιδιωτικών μεταφορικών εταιρειών, η διασφάλιση της ασφάλειας των επιβατών, και η απουσία κατάλληλου εξοπλισμού ταχείας φορτοεκφόρτωσης στους σταθμούς των ΜΜΜ, καθιστούν την ολοκλήρωση επιβατικών και εμπορευματικών ροών ένα μακρινό σενάριο για τα ελληνικά δεδομένα (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024).

Καταλήγοντας, η διανομή στο «τελευταίο μίλι» στην Ελλάδα παραμένει εγκλωβισμένη σε έναν φαύλο κύκλο παραδοσιακών πρακτικών και ελλιπών υποδομών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το κυκλοφοριακό χάος, η παντελής απουσία χώρων φορτοεκφόρτωσης, η αυθαίρετη επιβολή χρονικών παραθύρων, οι καθυστερήσεις που μετακυλίονται από τα κεντρικά λιμάνια και η εξουθένωση των οδηγών, συνθέτουν την καθημερινή πραγματικότητα (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024; Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024). Όσο η Πολιτεία και η Τοπική Αυτοδιοίκηση διστάζουν να θεσπίσουν ενιαίους κανόνες, να δημιουργήσουν Αστικά Κέντρα Ενοποίησης και να επενδύσουν σε υποδομές που θα επιτρέπουν την ενσωμάτωση

νέων, "πράσινων" μέσων διανομής (cargo bikes, drones), το last-mile θα συνεχίσει να αποτελεί τη μεγαλύτερη "μαύρη τρύπα" κόστους και ρύπανσης για τον κλάδο των αστικών εμπορευματικών μεταφορών (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Συνεπώς, η αντιμετώπιση αυτών των λειτουργικών δυσχερειών δεν απαιτεί μόνο την τεχνολογική αναβάθμιση του στόλου, αλλά την πλήρη αναδιαμόρφωση του μοντέλου προσέγγισης του αστικού χώρου από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη.

1.1.5. Η κρίση του ανθρώπινου δυναμικού και οι εργασιακές συνθήκες

Η ομαλή και αποδοτική λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας και ειδικότερα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών βασίζεται στον κρισιμότερο, ίσως, κρίκο της: το ανθρώπινο δυναμικό. Παρά την τεχνολογική πρόοδο και τις επενδύσεις σε υποδομές, ο κλάδος των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα, όπως και στο σύνολο σχεδόν της Ευρώπης, μαστίζεται τα τελευταία χρόνια από μια βαθιά και εντεινόμενη δομική κρίση που αφορά την έλλειψη εξειδικευμένων επαγγελματιών οδηγών (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το φαινόμενο αυτό δεν αποτελεί μια παροδική αρρυθμία της αγοράς εργασίας, αλλά το αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας υποβάθμισης των εργασιακών συνθηκών, της στασιμότητας των αποδοχών και της πλήρους απουσίας ενός οργανωμένου πλαισίου ένταξης νέων επαγγελματιών στον κλάδο (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Η μαζική φυγή έμπειρων οδηγών από το επάγγελμα και η δραματική απροθυμία των νέων να εισέλθουν σε αυτό, δημιουργούν ένα ασφυκτικό περιβάλλον για τις μεταφορικές εταιρείες, υπονομεύοντας άμεσα τη βιωσιμότητα των αστικών διανομών και την ομαλή τροφοδοσία των πόλεων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η πρώτη και πλέον προφανής αιτία αυτής της κρίσης, με την οποία συμφωνεί η συντριπτική πλειονότητα των επαγγελματιών, είναι η οικονομική αναντιστοιχία μεταξύ προσφοράς και αμοιβής. Οι αποδοχές των οδηγών φορτηγών παραμένουν χαμηλές και καθηλωμένες, σε πλήρη αναντιστοιχία με τον διαρκώς αυξανόμενο όγκο εργασίας, τις τεράστιες ευθύνες που φέρουν και, κυρίως, σε σχέση με τη ραγδαία αύξηση του κόστους

διαβίωσης τα τελευταία χρόνια (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Η κατάργηση ή η μη υποχρεωτική εφαρμογή των κλαδικών συλλογικών συμβάσεων εργασίας άφησε τους εργαζομένους εκτεθειμένους, συμπιέζοντας την αγοραστική τους δύναμη και καθιστώντας το επάγγελμα μη ελκυστικό (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μισθοί δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματική φύση και την επικινδυνότητα της εργασίας, η οικονομική δυσφορία αποτελεί τον θεμέλιο λίθο της φυγής από τον κλάδο (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Ωστόσο, το πρόβλημα δεν περιορίζεται αποκλειστικά στο μισθολογικό σκέλος, αλλά επεκτείνεται και γιγαντώνεται μέσα από την καθημερινή, βιωματική πραγματικότητα των ακραίων εργασιακών συνθηκών, ιδιαίτερα στον τομέα των αστικών διανομών (last-mile delivery). Οι συνθήκες εργασίας όχι απλώς δεν βελτιώνονται, αλλά, σύμφωνα με μαρτυρίες των ίδιων των επαγγελματιών, γίνονται ολοένα και πιο αντίξοες. Ένα χαρακτηριστικό, καθημερινό φαινόμενο που περιγράφεται ανάγλυφα, είναι η μετατροπή του οδηγού από χειριστή οχήματος σε εξουθενωμένο χειρώνακτα εργάτη αποθήκης (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Οι οδηγοί των φορτοταξί ή των οχημάτων διανομής αναγκάζονται συχνά να αναλαμβάνουν εξ ολοκλήρου την εξοντωτική διαδικασία της φόρτωσης του οχήματός τους: διαλύουν τις αρχικές παλέτες και μεταφέρουν τα κιβώτια ένα προς ένα, "χτίζοντας" τον χώρο φόρτωσης (σαν ένα πολύπλοκο παιχνίδι Tetris) προκειμένου να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τη χωρητικότητα του οχήματος (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Αυτή η μη προβλεπόμενη, βαριά σωματική καταπόνηση συνεχίζεται αμείωτη και κατά την εκφόρτωση στους τελικούς παραλήπτες. Αντί οι οδηγοί να συνοδεύονται από βοηθούς, όπως υπαγορεύουν οι ορθές πρακτικές, επιφορτίζονται οι ίδιοι με τη χειρωνακτική παράδοση. Είναι πλέον πάγια –και εξαιρετικά καταχρηστική– τακτική από πολλές εταιρείες και μεγάλες αλυσίδες σούπερ μάρκετ να υποχρεώνουν τον οδηγό, μετά από πολύωρη οδήγηση, να ξεφορτώσει το βαρύ όχημα (συχνά συρόμενο ή επικαθήμενο) χρησιμοποιώντας ο ίδιος χειροκίνητο παλετοφόρο, να μεταφέρει τα εμπορεύματα στις ράμπες ή ακόμη και βαθιά μέσα στο εσωτερικό των αποθηκών του πελάτη (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη

οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Το σωματικό τίμημα αυτής της πρακτικής είναι ολέθριο. Μαρτυρίες παλαιότερων επαγγελματιών οδηγών καταδεικνύουν ότι η μακροχρόνια υποβολή σε αυτή την εξουθενωτική χειρωνακτική εργασία τούς αφήνει με «σώματα εντελώς διαλυμένα» φτάνοντας στην ηλικία της συνταξιοδότησης στα 70 τους έτη (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Στη σωματική εξάντληση προστίθεται το τεράστιο ψυχολογικό φορτίο (στρες) και η κοινωνική απαξίωση που υφίστανται οι οδηγοί καθημερινά μέσα στην αστική "ζούγκλα". Ο οδηγός που επιχειρεί να παραδώσει εμπορεύματα στο κέντρο της Αθήνας ή της Θεσσαλονίκης, εν μέσω πυκνής κίνησης, μετατρέπεται συχνά σε δέκτη ακραίας επιθετικότητας (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Η έλλειψη οργανωμένων και ελεύθερων θέσεων φορτοεκφόρτωσης τον αναγκάζει να σταθμεύσει σε ακατάλληλα σημεία, αντιμετωπίζοντας κορναρίσματα, λεκτικές επιθέσεις, φωνές, ακόμη και περιπτώσεις που οδηγοί επιβατικών οχημάτων αποπειρώνται να χειροδικήσουν εναντίον του για την παραμικρή καθυστέρηση που μπορεί να προκαλέσει στην κυκλοφορία (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αυτή η διαρκής νευρικότητα, το μόνιμο άγχος των αυστηρών χρονικών παραθύρων παράδοσης (time windows) και η καθημερινή σύγκρουση με τους άλλους χρήστες του οδικού δικτύου καθιστούν την εργασία αφόρητη και υποβαθμίζουν δραματικά το κύρος του επαγγέλματος (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Πέραν των καθαρά αστικών διανομών, η κρίση του κλάδου τροφοδοτείται και από τις συνθήκες που επικρατούν στις εθνικές και διεθνείς μεταφορές, οι οποίες αναπόφευκτα αποτελούν τον τροφοδότη των αστικών κέντρων logistics. Ένα από τα πιο σκοτεινά σημεία της ελληνικής εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η παντελής απουσία υποδομών ανάπαυσης και στοιχειώδους υγιεινής για τους οδηγούς (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Στο εθνικό οδικό δίκτυο, όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει στην Εγνατία Οδό σε διαδρομές άνω των 650 χιλιομέτρων (από την Αλεξανδρούπολη έως την Ηγουμενίτσα), δεν υφίστανται οργανωμένοι, ασφαλείς χώροι στάθμευσης (truck stops) που να παρέχουν εγκαταστάσεις όπου ένας οδηγός μπορεί να σταθμεύσει με ασφάλεια, να κάνει μπάνιο ή να αναπαυθεί αξιοπρεπώς (Για ποιους λόγους

υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Αντίστοιχα θλιβερή είναι η κατάσταση και πέριξ των μεγάλων βιομηχανικών ζωνών. Στη βιομηχανική περιοχή της Σίνδου στη Θεσσαλονίκη, όπου καταλήγει ένας τεράστιος όγκος εμπορευμάτων, οι οδηγοί αναγκάζονται να διανυκτερεύουν μέσα στις καμπίνες τους, σταθμεύοντας σε περιοχές που έχουν μετατραπεί σε παράνομους σκουπιδότοπους, γεμάτους ψηλά χόρτα, φίδια και τρωκτικά, υπό την πλήρη αδιαφορία των τοπικών και δημοτικών αρχών για τον καθαρισμό και την ασφάλεια (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Η έλλειψη φυλασσόμενων χώρων στάθμευσης στην Αττική (όπως στον Ασπρόπυργο) προσθέτει το άγχος και τον φόβο της κλοπής καυσίμων ή πολύτιμου φορτίου κατά τη διάρκεια της νύχτας, αυξάνοντας την εργασιακή ανασφάλεια (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Η ψυχολογική φθορά κορυφώνεται από εξωτερικούς, συστημικούς παράγοντες που προκαλούν τεράστιες καθυστερήσεις, για τις οποίες οι οδηγοί δεν φέρουν καμία ευθύνη, αλλά υφίστανται όλες τις συνέπειες. Οι οδηγοί που εκτελούν δρομολόγια προς τα Βαλκάνια (Βουλγαρία, Ρουμανία κ.λπ.) έρχονται αντιμέτωποι με ουρές χιλιομέτρων στα σύνορα, παραμένοντας εγκλωβισμένοι στην καμπίνα τους για 15, 20 ή και 25 ώρες σε μια εξοντωτική διαδικασία "σταμάτα-ξεκίνα" (stop-and-go) (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Αυτές οι αναμονές καταστρέφουν τον προγραμματισμό των νομίμων ωραρίων οδήγησης και ανάπαυσης, εκθέτοντας τους οδηγούς στον κίνδυνο εξοντωτικών προστίμων από τις ευρωπαϊκές αρχές, δημιουργώντας ένα καθεστώς συνεχούς τρόμου (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Παράλληλα, οι εγχώριες θεσμικές αγκυλώσεις, όπως οι θερινές απαγορεύσεις κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων κατά τα Σαββατοκύριακα ή τα εορταστικά τριήμερα, δημιουργούν συνθήκες απάνθρωπης μεταχείρισης. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα οδηγών που εγκλωβίζονται εν μέσω καύσωνα (με θερμοκρασίες που αγγίζουν τους 42 βαθμούς Κελσίου) σε σημεία όπως η Λεπτοκαρυά, περιμένοντας επί ώρες να λήξει η απαγόρευση, βράζοντας κυριολεκτικά μέσα στις μεταλλικές καμπίνες τους (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Όλα τα παραπάνω εξηγούν την αποχώρηση των παλαιότερων, αλλά ταυτόχρονα εγείρουν το κρίσιμο ερώτημα: γιατί δεν εισέρχονται νέοι στο επάγγελμα; Τα εμπόδια εισόδου

για τους νέους είναι πρακτικά ανυπέρβλητα, δημιουργώντας ένα αδιέξοδο ανανέωσης του εργατικού δυναμικού. Καταρχάς, το οικονομικό κόστος για την απόκτηση των απαραίτητων εγγράφων είναι απαγορευτικό. Ένας νέος 18 ή 19 ετών καλείται να καταβάλει ποσά που ξεπερνούν κατά πολύ τα 2.000 ευρώ προκειμένου να αποκτήσει τα επαγγελματικά διπλώματα (κατηγορίας Γ, Ε, ή Δ για λεωφορεία), το Πιστοποιητικό Επαγγελματικής Ικανότητας (ΠΕΙ) και την κάρτα ψηφιακού ταχογράφου (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Για τις λαϊκές οικογένειες, μια τέτοια δαπάνη, χωρίς εξασφαλισμένη και καλοπληρωμένη θέση εργασίας, είναι αδύνατη.

Δεύτερον, απουσιάζει παντελώς ένα θεσμικό πλαίσιο μαθητείας και ομαλής ένταξης (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Όταν ένας νέος καταφέρει τελικά να βγάλει το δίπλωμα, έρχεται αντιμέτωπος με την άρνηση των μεταφορικών εταιρειών να τον προσλάβουν λόγω "έλλειψης εμπειρίας". Οι ιδιοκτήτες των μεταφορικών επιχειρήσεων διστάζουν, και δικαιολογημένα, να εμπιστευτούν ένα όχημα αξίας εκατοντάδων χιλιάδων ευρώ και φορτία τεράστιας αξίας σε έναν εντελώς άπειρο οδηγό, φοβούμενοι την πρόκληση ατυχημάτων και την καταστροφή της περιουσίας τους (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Έτσι, δημιουργείται ένας φαύλος κύκλος, όπου ο νέος οδηγός δεν μπορεί να αποκτήσει εμπειρία διότι δεν τον προσλαμβάνουν, και δεν τον προσλαμβάνουν διότι δεν έχει εμπειρία. Οι προτάσεις που διατυπώνονται από εμπειρογνώμονες του χώρου αφορούν την άμεση ίδρυση κρατικών ή επιδοτούμενων σχολών μαθητείας (μέσω ΟΑΕΔ ή ΕΠΑΛ), όπου οι νέοι θα λαμβάνουν ταυτόχρονα θεωρητική εκπαίδευση και πρακτική άσκηση δίπλα σε έμπειρους οδηγούς (ως συνοδηγοί). Μάλιστα, προτείνεται η χρηματοδότηση τέτοιων ακαδημιών να προέρχεται από τα παράβολα των 150 ευρώ που καταβάλλουν οι οδηγοί κάθε πέντε χρόνια για την ανανέωση του ΠΕΙ, το οποίο σήμερα θεωρείται από την πλειονότητα των επαγγελματιών ως ένα αμιγώς εισπρακτικό, φορολογικό μέτρο που δεν τους προσφέρει απολύτως καμία ουσιαστική, νέα γνώση (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Παράλληλα, ο κλάδος έρχεται αντιμέτωπος με το χάσμα των ψηφιακών δεξιοτήτων, ενόψει της μετάβασης στο μοντέλο Logistics 4.0. Οι σύγχρονες εμπορευματικές μεταφορές απαιτούν τη χρήση προηγμένων πληροφοριακών συστημάτων, όπως Συστήματα Διαχείρισης

Αποθηκών (WMS), Συστήματα Διαχείρισης Μεταφορών (TMS), "έξυπνους" ταχογράφους και εφαρμογές τηλεματικής σε φορητές συσκευές (tablets/scanners) για την ψηφιακή επιβεβαίωση της παράδοσης (Proof of Delivery) (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το γερασμένο ανθρώπινο δυναμικό, μην έχοντας λάβει καμία υποστήριξη ή εκπαίδευση, αδυνατεί συχνά να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της "έξυπνης" εφοδιαστικής αλυσίδας. Όπως επισημαίνει η Ελληνική Εταιρεία Logistics, η εκπαίδευση του προσωπικού στην Ελλάδα παραμένει ελλιπής και κατακερματισμένη, περιοριζόμενη αυστηρά στις υποχρεωτικές από το νόμο πιστοποιήσεις (όπως το δίπλωμα ADR για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων) (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αντίθετα, απουσιάζει η συνεχής επαγγελματική κατάρτιση σε κρίσιμα σύγχρονα αντικείμενα, όπως η οικολογική και οικονομική οδήγηση (eco-driving) και η εξοικείωση με ψηφιακά εργαλεία βελτιστοποίησης, στοιχείο που διευρύνει την "ψηφιακή ανισότητα" μεταξύ των μεγάλων 3PL παρόχων και των μικρομεσαίων μεταφορέων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Συμπερασματικά, η έλλειψη ανθρώπινου δυναμικού στον κλάδο των οδικών μεταφορών είναι το σύμπτωμα μιας βαθύτερης, συστημικής παθογένειας. Το φαινόμενο που παρατηρείται σήμερα στην αγορά είναι ο "κανιβαλισμός" των επιχειρήσεων, όπου η μία μεταφορική εταιρεία προσπαθεί να αποσπάσει τους οδηγούς της άλλης προσφέροντας πρόσκαιρα κίνητρα, χωρίς όμως να αυξάνεται η συνολική δεξαμενή των διαθέσιμων εργαζομένων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Όσο τα παιδιά των ίδιων των σημερινών αυτοκινητιστών αποτρέπονται από τους ίδιους τους γονείς τους να ακολουθήσουν το επάγγελμα λόγω των άθλιων συνθηκών (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024), και όσο η Πολιτεία κωφεύει απέναντι στην ανάγκη αναβάθμισης των υποδομών, επιδότησης των επαγγελματικών αδειών και θέσπισης κανόνων για τη φόρτωση/εκφόρτωση, το επάγγελμα του οδηγού θα φθίνει (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η επιτυχής μετάβαση σε ένα σύγχρονο μοντέλο αστικών διανομών (City Logistics) προϋποθέτει απαρέγκλιτα τη διασφάλιση ανθρώπινων, ασφαλών και δίκαια αμειβόμενων συνθηκών εργασίας για τους ανθρώπους που κρατούν την αλυσίδα εφοδιασμού ζωντανή.

1.1.6. Τεχνολογική ενσωμάτωση, πληροφοριακά συστήματα και logistics 4.0

Ο κλάδος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας βρίσκεται στην αυγή μιας νέας, μετασχηματιστικής εποχής, η οποία διαμορφώνεται από τη ραγδαία τεχνολογική πρόοδο της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης (Logistics 4.0). Στο σύγχρονο αυτό περιβάλλον, οι τεχνολογικές καινοτομίες προσφέρουν «εκρηκτικές» δυνατότητες και ευκαιρίες για τις επιχειρήσεις, επηρεάζοντας άμεσα την ένταση της συμμετοχής τους στις εγχώριες και παγκόσμιες αλυσίδες αξίας (Αμδίτης, 2024). Η ουσία των Logistics 4.0 έγκειται στη δυνατότητα που παρέχεται στις επιχειρήσεις να γεφυρώσουν τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο σε πραγματικό χρόνο και σε διαρκή βάση, εγκαταλείποντας τη γραμμική προσέγγιση της εφοδιαστικής υπέρ ενός πιο ολιστικού και δυναμικού μοντέλου. Αυτή η μετάβαση γεννά τα Ψηφιακά Εφοδιαστικά Δίκτυα (Digital Supply Chain Networks - DSNs), τα οποία βασίζονται στη διασύνδεση και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ φυσικών αντικειμένων —όπως μηχανήματα, συσκευές, προϊόντα, αποθήκες και οχήματα— και προηγμένων ψηφιακών συστημάτων, αποτελώντας πλέον την πηγή του σημαντικότερου ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος (Αμδίτης, 2024). Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωση αυτής της τεχνολογίας στον ελλαδικό χώρο αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις, διαμορφώνοντας ένα τοπίο πολλαπλών ταχυτήτων.

Ειδικότερα, η τεχνολογική υποδομή των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από μια έντονη και εδραιωμένη «ψηφιακή ανισότητα» (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ενώ οι μεγάλες εταιρείες παροχής υπηρεσιών 3PL (Third-Party Logistics) και οι πολυεθνικοί όμιλοι επενδύουν εντατικά στον εκσυγχρονισμό των λειτουργιών τους, η συντριπτική πλειονότητα των μικρών και μεσαίων μεταφορέων επιδεικνύει σημαντική διστακτικότητα στην υιοθέτηση σύγχρονων λύσεων πληροφορικής (Αμδίτης, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Στην ελληνική αγορά, είναι ακόμη λίγα τα παραδείγματα των επιχειρήσεων που χρησιμοποιούν έξυπνα συστήματα για να προβλέψουν τη μελλοντική τους ζήτηση, να διαχειριστούν αποτελεσματικά τους αποθηκευτικούς τους χώρους και να βελτιστοποιήσουν τον στόλο τους (Αμδίτης, 2024). Αντίθετα, η πλειονότητα των μικροϊδιοκτητών συνεχίζει να λειτουργεί βασιζόμενη σε παραδοσιακές, εμπειρικές μεθόδους, αδυνατώντας να παρακολουθήσει τις απαιτήσεις της σύγχρονης «έξυπνης» εφοδιαστικής αλυσίδας (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η βάση για την τεχνολογική οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας εντοπίζεται στα Συστήματα Διαχείρισης Αποθηκών (Warehouse Management Systems - WMS) και στα Συστήματα Διαχείρισης Μεταφορών (Transportation Management Systems - TMS). Η χρήση αυτών των συστημάτων θεωρείται πλέον θεμελιώδης προϋπόθεση για τη συμμετοχή στην οργανωμένη αγορά των logistics (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Τα συστήματα WMS επιτρέπουν την παρακολούθηση των αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των προϊόντων και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής (picking). Εντούτοις, στην ελληνική πραγματικότητα, πολλά από αυτά τα συστήματα υπολειτουργούν, χρησιμεύοντας ως απλά ψηφιακά μητρώα και απογραφικά εργαλεία, χωρίς να αξιοποιούν τους προηγμένους αλγόριθμους πρόβλεψης που διαθέτουν (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Παράλληλα, τα συστήματα TMS χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό των δρομολογίων (routing) και την παρακολούθηση του στόλου μέσω GPS. Η διεθνής βιβλιογραφία και η πρακτική εμπειρία αποδεικνύουν ότι τα ψηφιοποιημένα συστήματα μεταφορών (ICT) μπορούν να επιφέρουν μειώσεις στο λειτουργικό κόστος από 5% έως και 20%, αυξάνοντας ταυτόχρονα και ουσιαστικά το επίπεδο της παρεχόμενης εξυπηρέτησης (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Στην Ελλάδα, ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των TMS κατά τη διανομή στο "τελευταίο μίλι" μειώνεται δραματικά λόγω της έλλειψης ανοιχτών δεδομένων κίνησης (real-time traffic data) από τις δημοτικές αρχές, γεγονός που περιορίζει την ακρίβεια των δυναμικών προβλέψεών τους (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Εκτός από τα στατικά πληροφοριακά συστήματα, κρίσιμη είναι και η τεχνολογική αναβάθμιση επί των ίδιων των οχημάτων. Η τεχνολογία εντός της καμπίνας του φορτηγού επικεντρώνεται πρωτίστως στην ασφάλεια, τη θεσμική συμμόρφωση και την αμφίδρομη επικοινωνία (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Οι ψηφιακοί ταχογράφοι αποτελούν το βασικό εργαλείο παρακολούθησης του μεταφορικού έργου και των ωραρίων των οδηγών. Ήδη ο κλάδος βρίσκεται σε φάση μετάβασης στους "έξυπνους" ταχογράφους δεύτερης γενιάς, ωστόσο η διαδικασία αυτή συναντά εμπόδια, όπως η πρόσφατη προσωρινή έλλειψη καρτών ταχογράφου που δημιούργησε δυσλειτουργίες και απαίτησε έκτακτες ρυθμιστικές παρεμβάσεις (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Επιπρόσθετα, η τηλεματική και η φορητή τεχνολογία (mobile technology), όπως η χρήση tablets και smartphones από τους οδηγούς, επιτρέπουν την άμεση και ψηφιακή επιβεβαίωση της παράδοσης (Proof of Delivery

- POD). Η χρήση αυτών των συσκευών μειώνει δραστικά τον χρόνο της γραφειοκρατίας και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σφαλμάτων κατά την ενημέρωση των κεντρικών συστημάτων της αποθήκης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Σε πιο προηγμένες εφαρμογές, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο. Τα οχήματα εξοπλίζονται με αισθητήρες (sensors) που παρακολουθούν συνεχώς τη θερμοκρασία του φορτίου —στοιχείο απολύτως κρίσιμο για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα των ευπαθών προϊόντων— καθώς και την κατανάλωση καυσίμου ή την οδηγική συμπεριφορά (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η τεχνολογία IoT επιτρέπει την παρακολούθηση της θέσης, της κίνησης και της κατάστασης των αγαθών σε πραγματικό χρόνο. Τα παραγόμενα μεγάλα δεδομένα (Big Data) αξιοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των διαδρομών, τη μείωση του κόστους μεταφοράς, την ελαχιστοποίηση των διαταραχών στην αλυσίδα, την παρακολούθηση των αποθεμάτων για αποτελεσματικότερη χρήση του χώρου και την προληπτική συντήρηση (predictive maintenance) του εξοπλισμού, προκειμένου να αποφευχθούν αιφνίδιες βλάβες (Αμδίτης, 2024). Παρ' όλα αυτά, η υιοθέτηση του IoT αποκτά πραγματικό νόημα μόνο όταν εφαρμόζεται οριζόντια, σε όλο το μήκος της αλυσίδας αξίας. Στην Ελλάδα, η ολοκληρωμένη αυτή διασύνδεση συμβαίνει σε ελάχιστες περιπτώσεις, καθώς η ενσωμάτωση των δεδομένων των αισθητήρων στα κεντρικά πληροφοριακά συστήματα παραμένει μια τεχνική και οικονομική πρόκληση για τις περισσότερες εγχώριες επιχειρήσεις (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Αμδίτης, 2024).

Στον πυρήνα της τεχνολογικής προσέγγισης των αστικών διανομών βρίσκεται η μαθηματική και αλγοριθμική επίλυση του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP). Το VRP, το οποίο μελετάται εδώ και δεκαετίες, θεωρείται η πιο διαδεδομένη εφαρμογή για την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση των αστικών εμπορευματικών δραστηριοτήτων, καθώς στοχεύει στον καθορισμό των βέλτιστων διαδρομών με το ελάχιστο δυνατό κόστος, την ελαχιστοποίηση της διανυόμενης απόστασης και τη βέλτιστη χρήση του στόλου (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Η αποτελεσματική αντιμετώπιση της διανομής προϊόντων στις αστικές περιοχές προϋποθέτει τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων, ιδιαίτερα όταν υπεισέρχονται αυστηροί χρονικοί περιορισμοί (time windows) που επιβάλλουν οι πελάτες. Η συγκεκριμένη παραλλαγή, γνωστή ως Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (VRPTW), απαιτεί ιδιαίτερα

πολύπλοκους υπολογισμούς (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Η σύγχρονη ακαδημαϊκή έρευνα προτείνει, για παράδειγμα, τη χρήση γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms) που αντιμετωπίζουν το VRPTW με ταυτόχρονες παραλαβές και παραδόσεις. Οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές των οχημάτων, με διπλό στόχο: την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και την ταυτόχρονη εκτίμηση και μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO2), αναλύοντας πώς αυτές επηρεάζονται από τη χρήση πετρελαιοκίνητων έναντι ηλεκτροκίνητων οχημάτων (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023).

Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι για την αντιμετώπιση αυτών των πολύπλοκων προβλημάτων δρομολόγησης χρησιμοποιούνται τόσο ντετερμινιστικά όσο και στοχαστικά μαθηματικά μοντέλα. Ενώ η ντετερμινιστική βελτιστοποίηση παρέχει μια βασική κατανόηση, η στοχαστική μοντελοποίηση είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας, όπως οι διακυμάνσεις της ζήτησης, τα απρόβλεπτα χρονικά παράθυρα και η απρόβλεπτη κυκλοφοριακή συμφόρηση (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Οι ερευνητές στρέφονται ολοένα και περισσότερο σε ευρετικές και μετα-ευρετικές μεθόδους επίλυσης (π.χ. Adaptive Large Neighborhood Search - ALNS) για την εξαγωγή βέλτιστων λύσεων σε σύντομο χρόνο (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Στο μέλλον, η αξιοποίηση στοχαστικών πληροφοριών και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time data) από τις "έξυπνες" πόλεις αναμένεται να αναβαθμίσει ριζικά τη δυναμική δρομολόγηση, επιτρέποντας στα συστήματα να αναπροσαρμόζουν τις διαδρομές "εν πτήσει" ανάλογα με την κίνηση, μειώνοντας δραστικά τους χρόνους εξυπηρέτησης (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024).

Παράλληλα με τα παραπάνω, στο ευρύτερο πλαίσιο των Logistics 4.0, αναδύονται καινοτόμες τεχνολογίες αιχμής, οι οποίες εισέρχονται δυναμικά στα ερευνητικά και πιλοτικά προγράμματα των εταιρειών πληροφορικής. Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και μηχανικής εκμάθησης (machine learning) δοκιμάζονται για την κατανόηση των μοτίβων της κυκλοφοριακής συμφόρησης (π.χ. υπολογισμός του Travel Time Index), προκειμένου να ταξινομηθούν οι αστικές περιοχές και να οργανωθούν αντίστοιχα τα δρομολόγια (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Η τεχνολογία Blockchain εξετάζεται σοβαρά ως εργαλείο ιχνηλασιμότητας και παρακολούθησης των λειτουργιών του τελευταίου μιλίου,

προσφέροντας ασυναγώνιστη διαφάνεια και ασφάλεια δεδομένων (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Εντός των αποθηκευτικών κέντρων, το IoT επιτρέπει λειτουργίες όπως η αυτοματοποιημένη αναπλήρωση αποθεμάτων βάσει προγνωστικών μοντέλων, η ανάπτυξη ψηφιακών αντιγράφων (digital twins) των εγκαταστάσεων για την προσομοίωση της δυναμικότητάς τους, η χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality - AR) κατά τις φορτοεκφορτώσεις, και η αξιοποίηση συνεργατικών ρομπότ (cobots) για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων εργασιών με μειωμένο κόστος (Αμδίτης, 2024). Ωστόσο, στην Ελλάδα, η χρήση αυτόνομων οχημάτων, συνεργατικών ρομπότ ή μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones) παραμένει σε πρώιμο, πιλοτικό ή ερευνητικό στάδιο. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα οικονομικά οφέλη μιας τόσο κοστοβόρας επένδυσης δεν έχουν καταστεί ακόμη ξεκάθαρα και προβλέψιμα για την εγχώρια αγορά (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Αμδίτης, 2024).

Η μετάβαση σε αυτό το νέο ψηφιακό οικοσύστημα δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνολογικό ζήτημα, αλλά συνιστά μια βαθιά διαρθρωτική πρόκληση που προσκρούει σε πολλαπλά εμπόδια. Πέραν του ευμετάβλητου οικονομικού περιβάλλοντος, των ανεπαρκών υποδομών και της έλλειψης ισχυρών κρατικών πολιτικών παροχής κινήτρων, ο κρισιμότερος ανασταλτικός παράγοντας είναι ο ίδιος ο άνθρωπος (Αμδίτης, 2024). Ο ψηφιακός μετασχηματισμός προκύπτει στο σημείο τομής μεταξύ ανθρώπων, επιχειρήσεων και τεχνολογίας. Διαπνέει τη στρατηγική, την εταιρική κουλτούρα, τις οργανωτικές διαδικασίες και, φυσικά, τις δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού (Αμδίτης, 2024). Επί του παρόντος, το προσωπικό στον κλάδο των μεταφορών στερείται συχνά της κατάλληλης εκπαίδευσης για να αφομοιώσει αυτές τις αλλαγές στον χώρο εργασίας. Ειδικά στην ελληνική αγορά, το χάσμα ψηφιακών δεξιοτήτων αναμένεται να διευρυνθεί τα επόμενα χρόνια (Αμδίτης, 2024). Για να πλοηγηθούν επιτυχώς σε αυτό το απαιτητικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις οφείλουν να επενδύσουν συστηματικά στην εκπαίδευση, τον ψηφιακό αλφαβητισμό και τη διά βίου μάθηση των εργαζομένων τους, ενώ το "τρίγωνο" έρευνας, εκπαίδευσης και καινοτομίας πρέπει να αποκτήσει ζωτικό ρόλο (Αμδίτης, 2024).

Συνοψίζοντας, η τεχνολογική ενσωμάτωση στον κλάδο των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα αποτελεί ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη ευκαιρία και τη μεγαλύτερη πρόκληση. Η δημιουργία Ψηφιακών Εφοδιαστικών Δικτύων (DSNs) και η καθολική υιοθέτηση

των εργαλείων του Logistics 4.0 —από τα προηγμένα TMS και το IoT μέχρι τους αλγόριθμους VRPTW και την τεχνητή νοημοσύνη— είναι ο μόνος δρόμος για τη βελτιστοποίηση των πόρων, τη μείωση του αστικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την επιβίωση στο εξαιρετικά ανταγωνιστικό διεθνές περιβάλλον. Εντούτοις, για να μετουσιωθεί η τεχνολογική αυτή δυνατότητα σε πραγματική επιχειρηματική καινοτομία, απαιτείται η υπέρβαση της "ψηφιακής ανισότητας" μέσω στρατηγικών επενδύσεων, η ένταξη των ελληνικών εταιρειών σε ευρύτερα διεθνή οικοσυστήματα και, πάνω απ' όλα, η άμεση και ουσιαστική αναβάθμιση των ψηφιακών δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού, το οποίο καλείται να χειριστεί την τεχνολογία του αύριο (Αμδίτης, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

1.1.7. Θεσμικά εμπόδια και οικονομικά μεγέθη του κλάδου

Η δυναμική του κλάδου των αστικών εμπορευματικών μεταφορών και ευρύτερα της εφοδιαστικής αλυσίδας στην Ελλάδα διαμορφώνεται μέσα από μια διαρκή αλληλεπίδραση ανάμεσα στις θεσμικές αγκυλώσεις που δυσχεραίνουν την καθημερινή λειτουργία και στα οικονομικά μεγέθη που αποτυπώνουν μια αγορά έντονων αντιθέσεων και ανισοτήτων. Η κατανόηση της βιωσιμότητας και της προοπτικής του κλάδου προϋποθέτει την εις βάθος ανάλυση του ρυθμιστικού περιβάλλοντος μέσα στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν οι επιχειρήσεις, καθώς και τη μελέτη των οικονομικών τους επιδόσεων, οι οποίες αναδεικνύουν το χάσμα μεταξύ των μεγάλων πολυεθνικών παρόχων 3PL και των εγχώριων μικρομεσαίων μεταφορέων.

1.1.7.1. Ρυθμιστικό πλαίσιο και θεσμικά εμπόδια στο αστικό περιβάλλον

Παρά το γεγονός ότι η πολιτεία έχει κάνει βήματα για τον εκσυγχρονισμό της εφοδιαστικής αλυσίδας σε μακρο-επίπεδο, η λειτουργία των διανομών στο "τελευταίο μίλι" (last-mile) παραμένει δέσμια ενός κατακερματισμένου και συχνά αντιφατικού ρυθμιστικού πλαισίου (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το κυριότερο θεσμικό εμπόδιο που αντιμετωπίζουν οι μεταφορικές επιχειρήσεις κατά τη διανομή των προϊόντων τους είναι η

επιβολή διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων κανονισμών από την Τοπική Αυτοδιοίκηση (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Κάθε δήμος της Αττικής ή της Θεσσαλονίκης διατηρεί το δικαίωμα να θεσπίζει τα δικά του, ανεξάρτητα ωράρια (χρονικά παράθυρα) κατά τα οποία επιτρέπεται η τροφοδοσία των εμπορικών καταστημάτων και η διέλευση βαρέων οχημάτων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αυτός ο κανονιστικός κατακερματισμός καθιστά τον στρατηγικό προγραμματισμό των δρομολογίων εξαιρετικά δυσχερή· ένα φορτηγό που ξεκινά από το εμπορευματικό κέντρο του Θριασίου Πεδίου καλείται να εξυπηρετήσει πελάτες σε τρεις ή τέσσερις διαφορετικούς δήμους, αντιμετωπίζοντας ασύμβατα ωράρια φορτοεκφόρτωσης, με αποτέλεσμα την τεχνητή αύξηση των καθυστερήσεων και την αδυναμία βελτιστοποίησης της διαδρομής (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Σε αυτό το χαοτικό περιβάλλον προστίθεται η χρόνια έλλειψη επαρκών, θεσμοθετημένων χώρων φορτοεκφόρτωσης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η πολιτεία και οι δήμοι έχουν αποτύχει να διασφαλίσουν τη νόμιμη και απρόσκοπτη πρόσβαση των επαγγελματικών οχημάτων στα εμπορικά κέντρα, καθώς οι λιγοστές ειδικές ζώνες καταλαμβάνονται συστηματικά από παράνομα σταθμευμένα επιβατικά οχήματα (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Αυτή η θεσμική αδράνεια στην αστυνόμευση αναγκάζει τους οδηγούς φορτηγών να παρανομούν, σταθμεύοντας σε διπλές σειρές ή πάνω σε πεζοδρόμια, γεγονός που τους εκθέτει σε συνεχή πρόστιμα από την Τροχαία και επιτείνει την κυκλοφοριακή ασφυξία των πόλεων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

1.1.7.2. Γραφειοκρατία, ψηφιακή μετάβαση και θεσμικές παρεμβάσεις

Στο ευρύτερο ρυθμιστικό πεδίο, η ελληνική εφοδιαστική αλυσίδα επωφελήθηκε σημαντικά από την ψήφιση του Νόμου 4302/2014, ο οποίος αναγνώρισε για πρώτη φορά τα logistics ως μια διακριτή και ανεξάρτητη οικονομική δραστηριότητα, διαχωρίζοντάς την από την αμιγώς βιομηχανική ή εμπορική (EY, 2017). Ο νόμος αυτός στόχευσε στην άρση των διοικητικών εμποδίων για την ίδρυση και λειτουργία μεγάλων εμπορευματικών κέντρων, καταργώντας παλαιότερες χρονοβόρες διαδικασίες αδειοδότησης που αποθάρρυναν τους

επενδυτές (ΕΥ, 2017). Ωστόσο, η νομοθετική αυτή πρωτοβουλία αφορούσε κυρίως τις μεγάλες υποδομές (όπως το Θριάσιο και το στρατόπεδο Γκόνου) και δεν συνοδεύτηκε από αντίστοιχες, τολμηρές παρεμβάσεις για τα City Logistics και τη μικρο-διανομή, όπου η αναρχία παραμένει (ΕΥ, 2017; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Παράλληλα, η μετάβαση του κλάδου στη ψηφιακή εποχή συνοδεύεται από νέες γραφειοκρατικές προκλήσεις. Η προσπάθεια της πολιτείας να πατάξει τη φοροδιαφυγή και να εξορθολογήσει τον κλάδο μέσω της εφαρμογής του ψηφιακού δελτίου αποστολής (Ψηφιακή Διακίνηση Αποθεμάτων) έχει προκαλέσει έντονες αντιδράσεις από τους εκπροσώπους των μεταφορέων, οι οποίοι ζητούν την απλοποίηση της διαδικασίας επιβεβαίωσης μεταφοράς, ώστε να μην μετατραπεί σε ένα ακόμη δυσβάσταχτο διοικητικό βάρος για τους οδηγούς και τις μικρές επιχειρήσεις (Δελτία Τύπου Αρχεία - Π.Σ.Χ.Ε.Μ., 2024). Αντίστοιχα προσκόμματα καταγράφονται και στη συμμόρφωση με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, όπως απέδειξε η πρόσφατη προσωρινή έλλειψη καρτών για τους ψηφιακούς (ευφυείς) ταχογράφους 2ης γενιάς, η οποία υποχρέωσε το Υπουργείο Μεταφορών να εκδώσει εγκυκλίους και προσωρινές ρυθμίσεις για να μην παραλύσει το μεταφορικό έργο (Δελτία Τύπου Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Ένα επιπρόσθετο θεσμικό εμπόδιο που πλήττει την ομαλή ροή των εμπορευμάτων προς τα αστικά κέντρα είναι οι αποσπασματικές κυκλοφοριακές ρυθμίσεις και οι περιορισμοί στο εθνικό οδικό δίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επιβολή απαγορεύσεων κυκλοφορίας φορτηγών άνω των 3,5 τόνων κατά τη διάρκεια εορταστικών περιόδων (π.χ. τριήμερο Αγίου Πνεύματος, Πάσχα) ή θερινών μηνών (Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024). Τα μέτρα αυτά, αν και στοχεύουν στη διευκόλυνση των επιβατικών οχημάτων, προκαλούν τεράστια ασφυξία στην εφοδιαστική αλυσίδα, συμπιέζοντας τον όγκο των διανομών στις αμέσως προηγούμενες ή επόμενες ημέρες και επιβαρύνοντας δραματικά το last-mile (Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Σε αυτά προστίθενται οι καθημερινές καθυστερήσεις στα σημεία ενοποίησης, όπως ο Σταθμός Εμπορευματοκιβωτίων Πειραιά (ΡΟΤ) και το λιμάνι της Θεσσαλονίκης, όπου οι ουρές αναμονής για την παραλαβή ή επιστροφή κενών εμπορευματοκιβωτίων καταστρέφουν κάθε χρονοδιάγραμμα αστικών παραδόσεων, μετακυλίοντας το κόστος στον τελικό μεταφορέα (Ανακοινώσεις Αρχεία - Π. Σ. Χ. Ε. Μ., 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Το ζήτημα των αδειών των Φορτηγών Δημόσιας Χρήσης (ΦΔΧ) αποτελεί ίσως την πιο χαρακτηριστική περίπτωση θεσμικής αγκύλωσης. Ο ιστορικός κατακερματισμός των αδειών εμποδίζει τη δημιουργία μεγάλων, ανταγωνιστικών εταιρικών σχημάτων μεταφοράς. Παρά τις νομοθετικές προσπάθειες, η έλλειψη ουσιαστικών οικονομικών και φορολογικών κινήτρων για συγχωνεύσεις ή δημιουργία συνεργατικών σχηματισμών (transport pooling) διαιωνίζει τον "κανιβαλισμό" της αγοράς και εμποδίζει την επίτευξη των αναγκαίων οικονομιών κλίμακας (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Apostolopoulos & Kasselouris, 2022).

1.1.7.3. Οικονομικά μεγέθη: η ιστορική ανθεκτικότητα και η άνοδος των 3PL

Η οικονομική ανάλυση του κλάδου των logistics και των οδικών μεταφορών αποκαλύπτει μια αγορά δύο ταχυτήτων, η οποία σφυρηλατήθηκε μέσα από τις αλλεπάλληλες οικονομικές κρίσεις της χώρας. Ιστορικά, κατά τη διάρκεια της ελληνικής ύφεσης (2008-2014), η συνολική αξία των αμιγώς μεταφορικών υπηρεσιών μειώθηκε δραματικά κατά 54%, επιβεβαιώνοντας την ευπάθεια των μικρών μεταφορέων (EY, 2017). Στον αντίποδα, η προστιθέμενη αξία των υπηρεσιών αποθήκευσης και υποστήριξης της μεταφοράς (logistics/warehousing) κατέγραψε αύξηση 6%, αποδεικνύοντας ότι οι πάροχοι 3PL που προσέφεραν υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας (όπως διαχείριση παραγγελιών, συσκευασία και cross-docking) όχι μόνο άντεξαν την κρίση, αλλά αύξησαν και τα μερίδια αγοράς τους (EY, 2017).

Είναι ενδεικτικό ότι το 2014, εν μέσω συνεχιζόμενης ύφεσης, ο κύκλος εργασιών των 163 μεγαλύτερων εταιρειών 3PL στην Ελλάδα ανήλθε στα 840 εκατομμύρια ευρώ, καταγράφοντας αύξηση 3,1% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, ενώ τα κέρδη προ φόρων, τόκων και αποσβέσεων (EBITDA) του τομέα αυξήθηκαν κατά 16%, φτάνοντας τα 53,54 εκατομμύρια ευρώ (EY, 2017). Το 70% αυτών των επιχειρήσεων κατέγραψε κερδοφορία, αντλώντας το μεγαλύτερο μέρος των εσόδων τους (55%) από την αποθήκευση και το 37% από τη διανομή (EY, 2017).

Η αναδιάρθρωση της αγοράς συνοδεύτηκε και από αλλαγές στα λειτουργικά κόστη, και ειδικότερα στα κόστη μίσθωσης ακινήτων (warehousing rents). Μετά την κρίση, οι τιμές

ενοικίασης βιομηχανικών χώρων συμπιέστηκαν σημαντικά, δημιουργώντας ευκαιρίες για τους μεγάλους παίκτες. Το μέσο κόστος ενοικίασης στη ζώνη του Θριάσιου Πεδίου —της πλέον περιζήτητης αγοράς— σταθεροποιήθηκε μεταξύ 3 και 3,5 ευρώ ανά τετραγωνικό μέτρο, σημαντικά μειωμένο από τα 5,5 ευρώ της προ-κρίσης εποχής (EY, 2017). Στη Βοιωτία οι τιμές είναι έως και 40% χαμηλότερες, ενώ στη Βόρεια Ελλάδα τα ενοίκια κυμαίνονται στα 3 ευρώ για τη Σίνδο και στα 2 έως 2,5 ευρώ για το Καλοχώρι (EY, 2017). Τα ανταγωνιστικά αυτά μισθώματα επέτρεψαν στις κορυφαίες εταιρείες να επεκτείνουν τις εγκαταστάσεις τους με χαμηλό λειτουργικό κόστος.

Επιπρόσθετα, η θεσμοθέτηση ρυθμίσεων φορολογικής ελάφρυνσης για το διεθνές εμπόριο ευνόησε τους μεγάλους παρόχους. Η ύπαρξη πέντε Ελεύθερων Ζωνών Εμπορίου (Free Trade Zones) —στον Πειραιά, τη Θεσσαλονίκη, το Ηράκλειο, τον Αστακό και τη Βοιωτία— επιτρέπει την εισαγωγή, αποθήκευση και επανεξαγωγή εμπορευμάτων με αναστολή καταβολής τελωνειακών δασμών και ΦΠΑ, βελτιώνοντας ραγδαία τις ταμειακές ροές (cash flow) των μεγάλων 3PLs που διαχειρίζονται διεθνή φορτία (EY, 2017).

1.1.7.4. Συγκέντρωση αγοράς, κερδοφορία και ανισότητες (δεδομένα 2023-2024)

Η θετική πορεία των κορυφαίων εταιρειών του κλάδου συνεχίστηκε και εδραιώθηκε τα τελευταία έτη, όπως αποτυπώνεται στα πλέον πρόσφατα οικονομικά δεδομένα. Η κερδοφορία παρουσιάζει υψηλότατο βαθμό συγκέντρωσης. Ήδη από την προηγούμενη δεκαετία είχε διαφανεί η τάση, καθώς μόλις 5 από τις 163 μεγαλύτερες επιχειρήσεις 3PL συγκέντρωναν το 26% των συνολικών εσόδων και το 29% των συνολικών κερδών της αγοράς (EY, 2017).

Η μελέτη "Business Leaders in Greece" της ICAP CRIF για τη χρήση του 2023 έδειξε ότι, παρά την αποκλιμάκωση του ρυθμού ανάπτυξης της ελληνικής οικονομίας (αύξηση ΑΕΠ 2,3%) και τις εξωγενείς πιέσεις από την ενεργειακή κρίση, οι 500 πιο κερδοφόρες επιχειρήσεις της χώρας διεύρυναν τα κέρδη τους. Συγκεκριμένα, τα συνολικά κέρδη EBITDA ενισχύθηκαν κατά 13,1% ανερχόμενα σε 24,4 δισεκατομμύρια ευρώ, ενώ τα προ φόρου κέρδη διαμορφώθηκαν σε 17,5 δισ. ευρώ (αύξηση 4,7%), καλύπτοντας το 80% των κερδών

του συνόλου των 30.296 ελληνικών εταιρειών με διαθέσιμους ισολογισμούς (Μελέτη της ICAP CRIF: BUSINESS LEADERS IN GREECE (2023), 2024).

Τα δεδομένα για το 2024 επιβεβαιώνουν την ενίσχυση αυτής της δυναμικής. Ο συνολικός κύκλος εργασιών των 500 κορυφαίων εταιρειών (όλων των κλάδων) αυξήθηκε κατά 4,8% φτάνοντας τα 148,9 δισεκατομμύρια ευρώ (ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024). Ακόμη πιο εντυπωσιακή είναι η εκτίναξη των συνολικών EBITDA, τα οποία άγγιξαν τα 26,8 δισεκατομμύρια ευρώ, καταγράφοντας αύξηση 14,5% σε σχέση με το 2023, και των προ φόρου κερδών που ανήλθαν σε 21,8 δισ. ευρώ (αύξηση 30%) (ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024).

Εστιάζοντας αποκλειστικά στον τομέα των Μεταφορών και Logistics, η ασυμμετρία της αγοράς είναι πρόδηλη. Το 2024, οι 10 μεγαλύτερες επιχειρήσεις (Top 10) του κλάδου Μεταφορών και Logistics είδαν τον κύκλο εργασιών τους να αυξάνεται κατά 6,2% και τα λειτουργικά τους κέρδη (EBITDA) να αυξάνονται θεαματικά κατά 14,5% (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Οι αριθμοί αυτοί αποδεικνύουν ότι οι μεγάλες εταιρείες 3PL —οι οποίες ελέγχουν περίπου το 60% της αγοράς— διαθέτουν την ισχυρή χρηματοοικονομική βάση, την τεχνογνωσία και τη στρατηγική βούληση να υλοποιήσουν αναγκαίες κεφαλαιουχικές και τεχνολογικές επενδύσεις, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητά τους και μεγιστοποιώντας τα κέρδη τους (ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Στον αντίποδα, το υπόλοιπο 40% της αγοράς που απαρτίζεται από το πλήθος των μικρών μεταφορέων (κυρίως ιδιοκτήτες 1-2 φορτηγών), βιώνει μια εντελώς διαφορετική οικονομική πραγματικότητα (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ενώ το 2024 οι λοιπές μεταφορικές επιχειρήσεις κατέγραψαν μια οριακή αύξηση του κύκλου εργασιών κατά 1,8%, το EBITDA τους συρρικνώθηκε κατά 2,3% (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η μείωση της κερδοφορίας στις μικρές επιχειρήσεις εξηγείται από τη ραγδαία αύξηση των λειτουργικών δαπανών: το αυξημένο κόστος των καυσίμων, των διοδίων και οι υψηλές δαπάνες συντήρησης του γηρασμένου στόλου τους απορροφούν τα ήδη πενιχρά περιθώρια κέρδους (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Εγκλωβισμένοι στην παροχή απλών υπηρεσιών έλξης (road traction) μέσω υπεργολαβιών για λογαριασμό των μεγάλων 3PLs, οι

μικροϊδιοκτήτες πληρώνονται με τιμές που συχνά καθηλώνονται στο 1 ευρώ ανά διανυόμενο χιλιόμετρο (EY, 2017). Η αδυναμία τους να μετακυλήσουν τις αυξήσεις του κόστους στους πελάτες τους, τους οδηγεί στα όρια της οικονομικής ασφυξίας.

1.1.7.5. Συμπερασματική σύνθεση

Τα οικονομικά μεγέθη και τα θεσμικά εμπόδια λειτουργούν ως συγκοινωνούντα δοχεία που καθορίζουν το μέλλον του κλάδου των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα. Από τη μία πλευρά, ο "σκληρός πυρήνας" των μεγάλων, υπερκερδοφόρων εταιρειών 3PL επιδεικνύει αξιοθαύμαστη ανθεκτικότητα και επενδυτική δυναμική, αξιοποιώντας τις σύγχρονες υποδομές του Θριάσιου και των Ελεύθερων Ζωνών (EY, 2017; ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024). Από την άλλη πλευρά, η ραχοκοκαλιά της φυσικής διανομής στο last-mile —δηλαδή οι μικροί μεταφορείς— ασφυκτιά οικονομικά και αδυνατεί να ακολουθήσει τις επιταγές της τεχνολογικής και "πράσινης" μετάβασης (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Η υπέρβαση αυτής της διττής παθογένειας απαιτεί μια αποφασιστική στρατηγική παρέμβαση. Η κερδοφορία του κλάδου δεν μπορεί να βασίζεται στο εξοντωτικό outsourcing με συμπιεσμένα κόστη εις βάρος των μικρών αυτοκινητιστών. Είναι αδήριτη ανάγκη η Πολιτεία να προχωρήσει στον εξορθολογισμό του θεσμικού πλαισίου (νομοθεσία για τα City Logistics, ενιαία ωράρια διανομών, νόμιμες θέσεις φορτοεκφόρτωσης), ενθαρρύνοντας παράλληλα μέσα από στοχευμένα χρηματοδοτικά εργαλεία τη δημιουργία συνεργατικών σχημάτων (transport pooling) (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Μόνο με την υλοποίηση ενός τέτοιου ολιστικού σχεδιασμού, οι ελληνικές επιχειρήσεις θα μπορέσουν συνολικά να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητά τους, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των ισχυρών ισολογισμών των κορυφαίων εταιρειών και της καθημερινής λειτουργικής πραγματικότητας στους δρόμους των πόλεων (ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024).

1.1.8. Συμπεράσματα και προοπτικές βελτίωσης

Η ενδελεχής ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης του κλάδου των αστικών εμπορευματικών μεταφορών (City Logistics) στην Ελλάδα αναδεικνύει ένα τοπίο γεμάτο έντονες αντιφάσεις, δομικές προκλήσεις, αλλά και τεράστιες, ανεκμετάλλευτες ευκαιρίες. Όπως τεκμηριώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ο κλάδος λειτουργεί σε ένα περιβάλλον δύο ταχυτήτων: από τη μία πλευρά, οι μεγάλες, τεχνολογικά προηγμένες εταιρείες 3PL που καταγράφουν ραγδαία αύξηση της κερδοφορίας τους (EBITDA) και συγκεντρώνουν τις δραστηριότητές τους σε υπερσύγχρονους κόμβους όπως το Θριάσιο Πεδίο και η Σίνδος, και από την άλλη, το 40% της αγοράς που αποτελείται από χιλιάδες κατακερματισμένους μικροϊδιοκτήτες που παλεύουν για την επιβίωσή τους (EY, 2017; ICAP CRIF: Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας, το 2024, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Το κυκλοφοριακό χάος στο "τελευταίο μίλι", ο γερασμένος στόλος οχημάτων (με μέση ηλικία άνω των 20 ετών), η "ψηφιακή ανισότητα", τα γραφειοκρατικά εμπόδια των ΟΤΑ και η οξεία κρίση εξεύρεσης επαγγελματιών οδηγών συνθέτουν ένα σύστημα που, αν και ζωτικής σημασίας για την εθνική οικονομία, λειτουργεί στα όρια των αντοχών του (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Ωστόσο, η διεθνής βιβλιογραφία και οι βέλτιστες πρακτικές προσφέρουν έναν σαφή οδικό χάρτη για τον στρατηγικό ανασχεδιασμό και την εξυγίανση του συστήματος, ο οποίος βασίζεται στη συνεργασία, την καινοτομία και την αειφορία.

1.1.8.1. Η αναγκαιότητα των αστικών κέντρων ενοποίησης εμπορευμάτων (Urban Consolidation Centers - UCCs)

Το πρώτο και πλέον καθοριστικό βήμα για την προοπτική βελτίωσης των αστικών διανομών είναι η ριζική αναδιάρθρωση της χωροταξικής και λειτουργικής δομής τους, μέσω της θεσμοθέτησης και κατασκευής Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (Urban Consolidation Centers - UCCs). Σήμερα, η απουσία τέτοιων υποδομών εντός ή στις παρυφές των αστικών ιστών της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης επιτρέπει την είσοδο βαρέων,

ρυπογόνων και συχνά μισοάδειων φορτηγών (έως και 33 τόνων) στα κέντρα των πόλεων (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Σύμφωνα με τη θεωρία των City Logistics, τα μεγάλα εμπορευματικά κέντρα (όπως το Θριάσιο) θα πρέπει να λειτουργούν αποκλειστικά ως macro-hubs. Τα φορτία από εκεί θα πρέπει να κατευθύνονται μαζικά και ομαδοποιημένα σε μικρότερα, περιφερειακά UCCs (micro-hubs), τα οποία θα χωροθετούνται στρατηγικά κοντά στις εμπορικές ζώνες των δήμων (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022; Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020).

Εντός των UCCs, θα πραγματοποιείται η μεταφόρτωση (cross-docking) και η τελική διανομή θα αναλαμβάνεται αποκλειστικά από "πράσινα", ευέλικτα μέσα, όπως μικρά ηλεκτρικά βαν, ηλεκτρικά ποδήλατα μεταφοράς φορτίου (cargo bikes), ή ακόμη και μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) για ειδικές περιπτώσεις παράδοσης μικρών δεμάτων (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Μελέτες περίπτωσης αποδεικνύουν ότι η μεσολάβηση αυτών των κέντρων ενοποίησης μειώνει ραγδαία τον αριθμό των οχημάτων που κυκλοφορούν στην πόλη, επιλύοντας το πρόβλημα της παράνομης στάθμευσης, αποσυμφορώντας τους δρόμους και εκμηδενίζοντας τις εκπομπές ρύπων και θορύβου (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020). Η υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου προϋποθέτει την άμεση άρση των προβλημάτων χρήσεων γης από την Τοπική Αυτοδιοίκηση και την παραχώρηση ανεκμετάλλευτων δημοτικών, στρατιωτικών (π.χ. πρώην στρατόπεδο Γκόνου) ή δημόσιων χώρων για τη δημιουργία αυτών των κόμβων (EY, 2017; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

1.1.8.2. Ανάπτυξη συνεργατικών σχημάτων (Transport Pooling) και οικονομίες κλίμακας

Για να αποδώσουν τα UCCs, απαιτείται ταυτόχρονα μια βαθιά αλλαγή στην επιχειρηματική κουλτούρα του ελληνικού κλάδου, δηλαδή η μετάβαση από τον ακραίο κατακερματισμό στη συλλογικότητα, μέσω της εφαρμογής μοντέλων συνεργατικής εφοδιαστικής και ενοποίησης μεταφορών (transport pooling / shared contract-logistics). Η τρέχουσα "δομική αναρχία", όπου περίπου 19.000 μικροϊδιοκτήτες με μέσο στόλο 1,5 όχημα ανταγωνίζονται σκληρά μεταξύ τους, οδηγεί σε δρομολόγια με χαμηλό ποσοστό πλήρωσης

(συχνά γύρω στο 50%), ενώ η βιωσιμότητα απαιτεί πληρότητες άνω του 80% (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Το "transport pooling" επιτρέπει σε διαφορετικούς παραγωγούς, προμηθευτές και μεταφορείς να μοιράζονται τον ίδιο χώρο φόρτωσης σε οχήματα υψηλής χωρητικότητας, ενοποιώντας τις ροές τους (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Αυτή η ομαδοποίηση ασυνεχών φορτίων επιφέρει σημαντικές οικονομίες κλίμακας, καθώς μειώνει τον συνολικό αριθμό των εκτελούμενων δρομολογίων, ρίχνει κατακόρυφα το μεταφορικό κόστος ανά τονοχιλιόμετρο (το οποίο συχνά αντιστοιχεί στο 50% του συνολικού κόστους logistics) και αυξάνει δραματικά το περιθώριο κέρδους των ίδιων των αυτοκινητιστών (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022). Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η Πολιτεία οφείλει να θεσπίσει ισχυρά φορολογικά και χρηματοδοτικά κίνητρα για τη συγχώνευση μικρών μεταφορικών εταιρειών ή τη δημιουργία μεγάλων, ισχυρών συνεταιρισμών και "μεταφορικών πρακτορείων", τα οποία θα μπορούν να διαπραγματευτούν με ίσους όρους απέναντι στους κολοσσούς 3PL και το οργανωμένο λιανεμπόριο (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024; EY, 2017).

1.1.8.3. Ανανέωση στόλου, πράσινη μετάβαση και εναλλακτικά μέσα

Η αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες μελλοντικές προκλήσεις. Η Ελλάδα κατέχει το αρνητικό ρεκόρ της Ευρώπης με τον γηραιότερο στόλο φορτηγών, ο οποίος εξαρτάται σε ποσοστό άνω του 90% από το ρυπογόνο πετρέλαιο (diesel) (European Commission, 2025; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Καθώς το "τελευταίο μίλι" ευθύνεται για δυσανάλογα υψηλούς ρύπους λόγω των συνεχών στάσεων (stop-and-go) (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023), η μετάβαση στη "Μηδενικών Εκπομπών" Αστική Εφοδιαστική (Zero-Emission City Logistics) αποτελεί μονόδρομο.

Δεδομένου ότι το κόστος απόκτησης ενός αμιγώς ηλεκτρικού επαγγελματικού οχήματος (BEV) παραμένει απαγορευτικό για τον μέσο Έλληνα μεταφορέα (συχνά τριπλάσιο ενός συμβατικού), η προοπτική βελτίωσης εξαρτάται αποκλειστικά από την υλοποίηση ενός συνεκτικού κρατικού προγράμματος επιδοτήσεων και απόσυρσης (Ανάλυση της

Υφιστάμενης Δομής, 2024). Παράλληλα, είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης δημόσιων υποδομών ταχυφόρτισης (fast-charging) βαρέων οχημάτων πέριξ των βιομηχανικών ζωνών και των εμπορευματικών κέντρων, καθώς το τοπικό δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ αδυνατεί συχνά να υποστηρίξει τα απαιτούμενα βιομηχανικά φορτία χωρίς αναβαθμίσεις (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).

Πέραν των ηλεκτρικών φορτηγών, η διεθνής ερευνητική σκηνή και η πρακτική εφαρμογή σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες προτείνουν καινοτόμες, εναλλακτικές μεθόδους αστικής διανομής, οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν σοβαρά για την ελληνική πραγματικότητα. Ιδιαίτερα υποσχόμενη είναι η έννοια της ενσωμάτωσης των εμπορευματικών μεταφορών στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (MMM) (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Δυνητικά έργα όπως η μεταφορά φορτίων με το δίκτυο του Μετρό, του Προαστιακού ή του Τραμ κατά τις ώρες μη αιχμής (ή με ειδικά διαμορφωμένα βαγόνια) έχουν εφαρμοστεί πιλοτικά στο εξωτερικό (π.χ. Παρίσι, Δρέσδη, Λονδίνο) με θεαματικά αποτελέσματα (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Μια προσομοίωση για τη χρήση του Μετρό στις αστικές διανομές έδειξε ότι, εφόσον υιοθετηθούν τυποποιημένα διατροπικά εμπορευματοκιβώτια (intermodal containers) που προσαρμόζονται τόσο στα MMM όσο και σε cargo bikes, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να καλύψει το 98,9% της τοπικής ζήτησης εμπορευμάτων, αποσυμφορώντας την κυκλοφορία κατά 98,8% (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024). Παρά τις λειτουργικές προκλήσεις και την ανάγκη για προσαρμογή των υποδομών (ράμπες, ασφάλεια επιβατών), τέτοιες συνέργειες (crowd-shipping) αποτελούν ίσως την πιο βιώσιμη μακροπρόθεσμη λύση.

1.1.8.4. Ψηφιακός μετασχηματισμός (Logistics 4.0) και έξυπνη δρομολόγηση

Η προοπτική βελτίωσης συνδέεται απόλυτα με τον ψηφιακό μετασχηματισμό των επιχειρήσεων και την εξάλειψη της ψηφιακής ανισότητας (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η ελληνική αγορά οφείλει να μεταβεί από την εμπειρική πρακτική στα Ψηφιακά Εφοδιαστικά Δίκτυα (Digital Supply Chain Networks - DSNs), αξιοποιώντας τις τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), της τηλεματικής και των Μεγάλων Δεδομένων (Big Data)

(Αμδίτης, 2024).

Σε λειτουργικό επίπεδο, η απόλυτη προτεραιότητα είναι η καθολική υιοθέτηση Συστημάτων Διαχείρισης Μεταφορών (TMS) ικανών να επιλύουν δυναμικά το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (VRPTW) (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Η χρήση προηγμένων μετα-ευρετικών αλγορίθμων (π.χ. γενετικοί αλγόριθμοι) επιτρέπει την ταυτόχρονη προσομοίωση παραδόσεων και παραλαβών, υπολογίζοντας τους περιορισμούς χωρητικότητας, τα αυστηρά χρονικά παράθυρα των πελατών, καθώς και τις εκτιμώμενες εκπομπές CO2 (Konstantakopoulos, Kechagias, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2023). Ωστόσο, για να λειτουργήσουν αυτοί οι "έξυπνοι" αλγόριθμοι, αποτελεί βασική προϋπόθεση η παροχή Ανοιχτών Δεδομένων (Open Data) από τις δημοτικές αρχές σχετικά με την κυκλοφοριακή συμφόρηση σε πραγματικό χρόνο (real-time traffic data), τις διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης και τα τοπικά ωράρια, ώστε τα δρομολόγια να αναπροσαρμόζονται "εν πτήσει" (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Τέλος, η αξιοποίηση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) για την πρόβλεψη της ζήτησης και συστημάτων blockchain για την αδιάβλητη ιχνηλασιμότητα των προϊόντων (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024) θα προσδώσουν στους μικρομεσαίους μεταφορείς το απαραίτητο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

1.1.8.5. Αναβάθμιση ανθρώπινου δυναμικού και εργασιακών συνθηκών

Οποιοσδήποτε τεχνολογικός σχεδιασμός είναι καταδικασμένος σε αποτυχία εάν δεν επιλυθεί η σοβαρή κρίση έλλειψης εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού. Όπως επισημαίνει η Διοίκηση του Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ., ο ψηφιακός μετασχηματισμός βρίσκεται στο σημείο τομής μεταξύ ανθρώπων, επιχειρήσεων και τεχνολογίας, καθιστώντας τον ψηφιακό αλφαβητισμό και τη διά βίου μάθηση των εργαζομένων τον κρισιμότερο παράγοντα επιτυχίας (Αμδίτης, 2024). Παράλληλα, πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα το τεράστιο κόστος εισόδου για τους νέους (διπλώματα, ταχογράφοι, ΠΕΙ), που συχνά υπερβαίνει τα 2.000 ευρώ, και η έλλειψη πλαισίου μαθητείας (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

Η πρόταση των εκπροσώπων του κλάδου για τη δημιουργία κρατικών ή επιδοτούμενων Σχολών Μαθητείας Οδηγών, ίσως και με χρηματοδότηση από τα παράβολα ανανέωσης των ΠΕΙ, αποτελεί μια ρεαλιστική διέξοδο (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Μέσω αυτών, οι νέοι θα αποκτούν πρακτική εμπειρία ως συνοδηγοί σε ασφαλές περιβάλλον. Εξίσου σημαντική είναι η ριζική βελτίωση των συνθηκών εργασίας: είναι αδιανόητο στη σύγχρονη εποχή ο οδηγός ενός οχήματος υψηλής τεχνολογίας να λειτουργεί και ως εργάτης φορτοεκφόρτωσης (χειρωνακτική χρήση παλετοφόρων σε ακατάλληλα πεζοδρόμια) (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024). Η Πολιτεία οφείλει να θεσπίσει κανόνες που θα διαχωρίζουν σαφώς το έργο της οδήγησης από αυτό της φόρτωσης, προστατεύοντας το σώμα, την ψυχολογία και την αξιοπρέπεια των επαγγελματιών. Παράλληλα, κρίνεται απολύτως αναγκαία η άμεση κατασκευή οργανωμένων και ασφαλών χώρων στάθμευσης και ανάπαυσης (truck stops) με αξιοπρεπείς εγκαταστάσεις υγιεινής κατά μήκος των εθνικών οδών και εντός των μεγάλων βιομηχανικών ζωνών (Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς, 2024).

1.1.8.6. Θεσμική θωράκιση και εθνικό στρατηγικό σχέδιο (Master Plan)

Τέλος, όλα τα παραπάνω απαιτούν ως συνδετικό κρίκο ένα ολιστικό, εθνικό θεσμικό πλαίσιο για τα City Logistics (Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024). Η κεντρική διοίκηση, σε συνεργασία με την Τοπική Αυτοδιοίκηση, πρέπει να προχωρήσει στον σχεδιασμό ενός Master Plan Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών, το οποίο θα βάλει τέλος στον κατακερματισμό των κανονισμών.

Βασικοί άξονες αυτού του στρατηγικού σχεδίου πρέπει να είναι:

1. Η θέσπιση ενιαίων, υπερτοπικών ωραρίων φορτοεκφόρτωσης και η εφαρμογή νυχτερινών διανομών (night deliveries), οι οποίες μειώνουν τον χρόνο ταξιδιού και την περιβαλλοντική επιβάρυνση, υπό την προϋπόθεση χρήσης αθόρυβου εξοπλισμού και ηλεκτρικών οχημάτων (Apostolopoulos & Kasselouris, 2022).
2. Η δημιουργία αποκλειστικών, προστατευμένων λωρίδων (dedicated truck lanes) για

τα επαγγελματικά οχήματα, στα πρότυπα των λεωφορειολωρίδων, για τη μείωση του χρόνου αναμονής στο κέντρο της πόλης (Michael, Papoutsidakis, & Priniotakis, 2020).

3. Η αυστηρή και ψηφιοποιημένη αστυνόμευση των θέσεων φορτοεκφόρτωσης (π.χ. μέσω ηλεκτρονικής κράτησης της θέσης - delivery bay booking systems), ώστε να εκλείψει το φαινόμενο της κατάληψής τους από ιδιωτικά Ι.Χ. (El Amrani, Fri, Benmoussa, & Rouky, 2024; Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής, 2024).
4. Η ενίσχυση του ρυθμιστικού πλαισίου (νόμος 4302/2014), επεκτείνοντας την απλοποίηση των αδειοδοτήσεων όχι μόνο για τις μεγάλες αποθήκες αλλά και για τους μικρούς αστικούς κόμβους (micro-hubs) και τις τεχνολογικές υποδομές του "τελευταίου μιλίου" (ΕΥ, 2017).

Συμπερασματικά, ο κλάδος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα διαθέτει τις εγγενείς δυνατότητες να εξελιχθεί σε έναν σύγχρονο, διεθνώς ανταγωνιστικό και αειφόρο τομέα της οικονομίας. Η μετάβαση, ωστόσο, από την τρέχουσα δομική αναρχία και την τεχνολογική υστέρηση, στο επιθυμητό οικοσύστημα των Logistics 4.0 και των Πράσινων Πόλεων, δεν θα προκύψει αυτόματα. Απαιτεί μια τολμηρή σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ), όπου η Πολιτεία θα παρέχει τις αναγκαίες υποδομές (Αστικά Κέντρα Ενοποίησης), την ψηφιακή διακυβέρνηση (Ανοιχτά Δεδομένα) και τα χρηματοδοτικά κίνητρα (ανανέωση στόλου), ενώ οι επιχειρήσεις μεταφορών —αποβάλλοντας τις παραδοσιακές αγκυλώσεις— θα ενσωματώσουν την κουλτούρα της συνεργατικότητας (transport pooling), τη συνεχή εκπαίδευση του προσωπικού τους και τις πλέον προηγμένες τεχνολογίες δρομολόγησης. Μόνο μέσα από αυτή την πολυδιάστατη και συντονισμένη προσπάθεια, το "τελευταίο μίλι" στην Ελλάδα θα πάψει να αποτελεί πεδίο ταλαιπωρίας και ασύμμετρου κόστους, μετατρεπόμενο σε πρότυπο αξιοπιστίας και περιβαλλοντικής υπευθυνότητας.

1.2. Βιβλιογραφική επισκόπησης του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP)

1.2.1. Το πρόβλημα διανομής φορτηγών (Truck Dispatching Problem)

1.2.1.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP) έκανε την επίσημη εμφάνισή του στην επιστημονική βιβλιογραφία υπό τον τίτλο *«The Truck Dispatching Problem»*. Το μνημειώδες αυτό άρθρο, το οποίο δημοσιεύθηκε το 1959 στο περιοδικό *Management Science*, συντάχθηκε από τον George Dantzig, τον θεμελιωτή του γραμμικού προγραμματισμού και της μεθόδου Simplex, και τον John Ramser. Η έρευνά τους χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από την Atlantic Refining Company και τη RAND Corporation, δύο οργανισμούς που αντιμετώπιζαν άμεσα πρακτικά προβλήματα βελτιστοποίησης της εφοδιαστικής αλυσίδας κατά τη μεταπολεμική περίοδο εκβιομηχάνισης.

Η ανάγκη που οδήγησε στη διατύπωση αυτού του μοντέλου ήταν ο επιχειρησιακός προγραμματισμός ενός στόλου βυτιοφόρων φορτηγών, τα οποία έπρεπε να μεταφέρουν υγρά καύσιμα από έναν κεντρικό σταθμό αποθήκευσης (bulk terminal) σε έναν μεγάλο αριθμό διάσπαρτων πρατηρίων βενζίνης. Μέχρι τότε, η δρομολόγηση γινόταν με εμπειρικές μεθόδους, γεγονός που οδηγούσε σε χαοτική σπατάλη πόρων, περιττά χιλιόμετρα και μειωμένη ικανοποίηση της ζήτησης (Dantzig, G. B., & Ramser, J. H., 1959). Ο Dantzig και ο Ramser αναγνώρισαν ότι η μαθηματική τυποποίηση αυτού του προβλήματος θα μπορούσε να μειώσει δραστικά το λειτουργικό κόστος των εταιρειών διανομής. Η εργασία τους αποτέλεσε τη γέφυρα μεταξύ του κλασικού Προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (Traveling Salesman Problem - TSP) και των σύγχρονων προβλημάτων δικτύων, εισάγοντας για πρώτη φορά την έννοια του περιορισμού της χωρητικότητας των οχημάτων σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών πελατών.

1.2.1.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Η μαθηματική δομή του προβλήματος διανομής φορτηγών βασίζεται σε ένα δίκτυο κόμβων, όπου ο κεντρικός τερματικός σταθμός συμβολίζεται ως P_0 και τα πρατήρια ως P_i για $i = 1, \ldots, n$.[9]

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου ορίζονται ως εξής:

- x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα μετακινηθεί απευθείας από τον κόμβο i στον κόμβο j, και 0 σε αντίθετη περίπτωση.
- x_{0i}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης που δηλώνει αν υφίσταται απευθείας σύνδεση της κεντρικής αποθήκης P_0 με το σημείο διανομής P_i.

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν το περιβάλλον του προβλήματος περιλαμβάνουν:

- d_{ij}: Η απόσταση (ή το κόστος μετάβασης) μεταξύ των σημείων P_i και P_j.
- q_i: Η ποσότητα της ζήτησης για κάθε πρατήριο P_i.
- C: Η μέγιστη χωρητικότητα του βυτιοφόρου οχήματος.

1.2.1.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του αρχικού μοντέλου των Dantzig και Ramser εστιάζει αποκλειστικά στην ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης που διανύει ο στόλος των οχημάτων για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων των πρατηρίων.

Η μαθηματική της διατύπωση εκφράζεται ως:

$$\min D = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} d_{ij} x_{ij}$$

Η συνάρτηση αυτή αθροίζει το γινόμενο της απόστασης d_{ij} με τη δυαδική μεταβλητή x_{ij} για κάθε πιθανό ζεύγος κόμβων του δικτύου. Η ελαχιστοποίηση αυτού του αθροίσματος διασφαλίζει ότι ο σχεδιασμός των δρομολογίων θα πραγματοποιηθεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο από πλευράς κατανάλωσης πόρων και χρόνου ταξιδιού.

1.2.1.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Για την εξασφάλιση της εφικτότητας και της λογικής συνέπειας των δρομολογίων, το μοντέλο των Dantzig και Ramser εισάγει ένα αυστηρό σύστημα περιορισμών:

1. Περιορισμοί σύνδεσης και βαθμού κόμβων: Κάθε πρατήριο P_i πρέπει να συνδέεται είτε απευθείας με τον κεντρικό σταθμό P_0 είτε με ακριβώς ένα άλλο πρατήριο P_j, εξασφαλίζοντας ότι όλοι οι πελάτες θα εξυπηρετηθούν:

$$\sum_{j=0}^{n} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \ldots, n$$

2. Περιορισμοί χωρητικότητας φορτηγών: Η συνολική ζήτηση των πρατηρίων που ομαδοποιούνται σε μια κοινή διαδρομή δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα C του βυτιοφόρου:

$$\sum_{i \in S} q_i \leq C$$

   Όπου S αντιπροσωπεύει το υποσύνολο των πελατών που έχουν ανατεθεί σε μια συγκεκριμένη διαδρομή.

3. Αποφυγή αυτοσυνδέσεων: Αποκλείεται η μετάβαση ενός οχήματος από έναν κόμβο στον εαυτό του:

$$x_{ii} = 0 \quad \forall i = 0, \ldots, n$$

4. Δυαδικότητα μεταβλητών:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j = 0,\ldots,n$$

1.2.1.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Λόγω της παντελούς έλλειψης υπολογιστικής ισχύος κατά το έτος 1959, οι Dantzig και Ramser πρότειναν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο σταδιακής συνένωσης (multi-stage aggregation heuristic). Η μεθοδολογία ξεκινά με μια βασική, μη βέλτιστη λύση, όπου κάθε πρατήριο εξυπηρετείται από ένα ξεχωριστό όχημα μέσω μιας αποκλειστικής διαδρομής μετ' επιστροφής από την αποθήκη ($P_0 \to P_i \to P_0$).

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εκτελεί διαδοχικές συνενώσεις βάσει του κριτηρίου των αποστάσεων. Αν η συνολική ζήτηση δύο πρατηρίων P_i και P_j δεν υπερβαίνει το μισό της χωρητικότητας του οχήματος ($q_i + q_j \leq C/2$ για το πρώτο στάδιο), και η απόσταση d_{ij} είναι σχετικά μικρή, οι δύο αυτές διαδρομές συγχωνεύονται. Οι Dantzig και Ramser εισήγαγαν επίσης τη μέθοδο των «γρήγορων διορθώσεων» (rapid corrections), όπου μη βασικές μεταβλητές με χαμηλό κόστος εισάγονται στη λύση, αντικαθιστώντας ακριβότερες συνδέσεις. Η διαδικασία αυτή εκτελείται σε διαδοχικά στάδια (stages) μέχρι να μην είναι δυνατή καμία περαιτέρω συγχώνευση χωρίς την παραβίαση του ορίου χωρητικότητας. Οι υπολογισμοί αυτοί σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μπορούν να εκτελεστούν είτε με το χέρι είσε με τις πρώτες αυτόματες ψηφιακές υπολογιστικές μηχανές της εποχής.

1.2.1.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το πεδίο εφαρμογής του αρχικού αυτού μοντέλου περιορίστηκε ιστορικά στη διανομή καυσίμων σε αστικά και ημιαστικά δίκτυα πρατηρίων. Ωστόσο, η επιχειρησιακή του επίδραση υπήρξε καταλυτική, καθώς απέδειξε ότι η εφαρμογή μαθηματικών μεθόδων μπορεί να επιφέρει σημαντικές μειώσεις στο λειτουργικό κόστος μεταφορών (Suresh Nanda KumarRamasam & PanneerselvamRamasamy Panneerselvam, 2012). Η εργασία αυτή άνοιξε

τον δρόμο για τη γέννηση της σύγχρονης επιστήμης των logistics, αποτελώντας το θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίστηκαν όλες οι κατοπινές παραλλαγές δρομολόγησης.

1.2.2. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό χωρητικότητας (Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP)

1.2.2.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό χωρητικότητας (Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP) αποτελεί τον κλασικό πυρήνα της θεωρίας δρομολόγησης (Dollevoet, Munari, Spliet, 2025). Αν και οι βάσεις του τέθηκαν με τον αλγόριθμο "Savings" των Clarke και Wright το 1964, η σύγχρονη και αυστηρή μαθηματική του διατύπωση ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με δύο δείκτες (two-index vehicle flow formulation) οριστικοποιήθηκε από τους Gilbert Laporte και Yves Nobert το 1983.

Η ανάγκη για τη δημιουργία του CVRP προέκυψε από τη ραγδαία ανάπτυξη των εμπορικών στόλων και την ανάγκη των επιχειρήσεων να διαχειριστούν ομοιογενείς στόλους οχημάτων που εδρεύουν σε μια ενιαία κεντρική αποθήκη. Σε αντίθεση με το αρχικό μοντέλο του 1959, το CVRP τυποποιεί την έννοια της πλήρους κάλυψης των αναγκών των πελατών με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό οχημάτων, εισάγοντας προηγμένους μαθηματικούς περιορισμούς για την εξάλειψη των ανεξάρτητων κλειστών βρόχων (subtours), οι οποίοι αποτελούσαν το κύριο εμπόδιο για την εύρεση ακριβών λύσεων.

1.2.2.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Στη μαθηματική διατύπωση του CVRP με τρεις δείκτες (three-index formulation), η οποία επιτρέπει τη σαφή παρακολούθηση κάθε οχήματος ξεχωριστά, ορίζονται οι ακόλουθες μεταβλητές απόφασης:

- x_{iik}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα k

διασχίσει απευθείας το τόξο από τον κόμβο i στον κόμβο j, και 0 σε αντίθετη περίπτωση.

- u_i: Βοηθητική συνεχής μεταβλητή (χρησιμοποιείται κυρίως στη διατύπωση Miller-Tucker-Zemlin), η οποία αντιπροσωπεύει το υπολειπόμενο φορτίο του οχήματος αμέσως μετά την επίσκεψη στον πελάτη i, συμβάλλοντας στην αποφυγή δημιουργίας υποδιαδρομών.

Οι παράμετροι του προβλήματος ορίζονται ως εξής:

- n: Ο συνολικός αριθμός των κόμβων του δικτύου, όπου ο κόμβος 1 ορίζεται ως η κεντρική αποθήκη (depot).
- p: Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων πανομοιότυπων οχημάτων του στόλου.
- d_{ij}: Η απόσταση ή το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο j.
- q_i: Η σταθερή και γνωστή εκ των προτέρων ζήτηση του πελάτη i (με $q_1 = 0$ για την αποθήκη).
- Q: Η μέγιστη μεταφορική ικανότητα (χωρητικότητα) κάθε οχήματος.

1.2.2.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του CVRP στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους του στόλου, το οποίο εκφράζεται ως το άθροισμα των αποστάσεων που διανύουν όλα τα οχήματα:

$$\min \sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} d_{ij} x_{ijk}$$

Στη διατύπωση αυτή, δεν επιτρέπεται η μετάβαση ενός οχήματος από έναν κόμβο στον εαυτό του, κάτι που εξασφαλίζεται θέτοντας $x_{iik} = 0$ για κάθε όχημα k και για κάθε κόμβο i.

1.2.2.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Το σύστημα περιορισμών του CVRP είναι αυστηρά δομημένο για να διασφαλίζει τη μαθηματική εγκυρότητα των διαδρομών:

1. Διατήρηση ροής (Flow Conservation): Διασφαλίζει ότι ο αριθμός των φορών που ένα όχημα εισέρχεται σε έναν κόμβο ισούται με τον αριθμό των φορών που εξέρχεται από αυτόν, αποτρέποντας τη διακοπή της διαδρομής:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ijk} = \sum_{i=1}^{n} x_{jik} \quad \forall j \in \{1, \ldots, n\},\, k \in \{1, \ldots, p\}$$

2. Καθολική εξυπηρέτηση πελατών: Κάθε πελάτης (κόμβοι 2 έως n) πρέπει να προσεγγίζεται ακριβώς μία φορά από ένα και μόνο όχημα:

$$\sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in \{2, \ldots, n\}$$

3. Αναχώρηση από την αποθήκη: Κάθε όχημα k υποχρεούται να ξεκινήσει τη διαδρομή του αναχωρώντας από την κεντρική αποθήκη (κόμβος 1):

$$\sum_{j=2}^{n} x_{1jk} = 1 \quad \forall k \in \{1, \ldots, p\}$$

(Σε συνδυασμό με τον περιορισμό διατήρησης ροής, αυτό διασφαλίζει ότι κάθε όχημα που αναχωρεί θα επιστρέψει τελικά στην αποθήκη).

4. Περιορισμός χωρητικότητας: Το συνολικό φορτίο που μεταφέρει το όχημα k για την εξυπηρέτηση των πελατών δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τη χωρητικότητά του Q:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=2}^{n} q_j x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in \{1,\ldots,p\}$$

5. Εξάλειψη υποδιαδρομών (Subtour Elimination): Αποτρέπει τη δημιουργία ανεξάρτητων κλειστών βρόχων που δεν περιλαμβάνουν την κεντρική αποθήκη.[15] Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των περιορισμών Miller-Tucker-Zemlin (MTZ):

$$u_i - u_j + Q\sum_{k=1}^{p} x_{ijk} \leq Q - q_j \quad \forall i,j \in \{2,\ldots,n\},\ i \neq j$$

6. Ακεραιότητα μεταβλητών:

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k$$

1.2.2.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το CVRP είναι εξαιρετικά δύσκολο συνδυαστικό πρόβλημα (NP-hard σε στενή έννοια). Για την επίλυσή του έχουν αναπτυχθεί τρεις μεγάλες κατηγορίες αλγορίθμων:

- Ακριβείς μέθοδοι (Exact Methods): Κατάλληλες για προβλήματα μικρού και μεσαίου μεγέθους (έως 100 πελάτες). Περιλαμβάνουν τους αλγορίθμους Branch-and-Cut, οι οποίοι συνδυάζουν τη διακλάδωση με την προσθήκη επιπέδων αποκοπής (όπως οι ανισότητες στρογγυλοποιημένης χωρητικότητας - rounded capacity inequalities), και Branch-and-Price που βασίζεται στη γέννηση στηλών (column generation).
- Κλασικές ευρετικές μέθοδοι (Heuristics): Όπως ο αλγόριθμος Clarke-Wright Savings, ο οποίος συγχωνεύει διαδρομές με βάση το κέρδος απόστασης, και μέθοδοι τοπικής αναζήτησης (2-opt, 3-opt).
- Μεταευρετικές μέθοδοι (Metaheuristics): Επιτρέπουν την εύρεση εξαιρετικών λύσεων σε πολύ σύντομο χρόνο για μεγάλης κλίμακας προβλήματα. Δημοφιλείς προσεγγίσεις

αποτελούν η Αναζήτηση Tabu (Tabu Search), οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization).

1.2.2.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το CVRP εφαρμόζεται ευρέως σε πληθώρα βιομηχανικών και εμπορικών δραστηριοτήτων, όπως η καθημερινή διανομή προϊόντων από κεντρικές αποθήκες σε καταστήματα λιανικής, ο προγραμματισμός δρομολογίων για τη συλλογή οικιακών απορριμμάτων, η διανομή τροφίμων και η μεταφορά πρώτων υλών στην παραγωγική διαδικασία.

1.2.3. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW)

1.2.3.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες επεκτάσεις του CVRP, καθώς εισάγει τη διάσταση του χρόνου στο φυσικό δίκτυο διανομής. Η συστηματική μελέτη και η δημιουργία των πρώτων προτύπων δοκιμής (benchmarks) για το VRPTW πραγματοποιήθηκε από τον Marius Solomon το 1987.

Η ανάπτυξη του μοντέλου υπαγορεύθηκε από την ανάγκη των σύγχρονων επιχειρήσεων logistics να ανταποκριθούν σε αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς παράδοσης. Στον πραγματικό κόσμο, οι πελάτες (όπως σούπερ μάρκετ, νοσοκομεία ή εργοστάσια) δεν απαιτούν απλώς την παράδοση των προϊόντων τους, αλλά θέτουν συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα εντός των οποίων πρέπει να ξεκινήσει η εξυπηρέτησή τους. Η παραβίαση αυτών των ορίων μπορεί να οδηγήσει σε άρνηση παραλαβής ή σε βαριές οικονομικές ρήτρες, καθιστώντας τον χρόνο εξίσου κρίσιμο πόρο με τη χωρητικότητα του οχήματος.

1.2.3.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Το VRPTW μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα πολυ-εμπορευματικής ροής δικτύου (multi-commodity network flow model).

Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος ορίζονται ως εξής:

- x_{ijk}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα k χρησιμοποιεί το τόξο (i, j) στο δρομολόγιό του, και 0 διαφορετικά.
- w_{ik}: Συνεχής πραγματική μεταβλητή που προσδιορίζει τον χρόνο έναρξης της εξυπηρέτησης του πελάτη i από το όχημα k.

Οι κρίσιμες παράμετροι περιλαμβάνουν:

- $[a_i, b_i$ (ή $[e_i, l_i]$): Το χρονικό παράθυρο του πελάτη i, όπου a_i είναι ο νωρίτερος επιτρεπτός χρόνος έναρξης εξυπηρέτησης και b_i ο αργότερος.
- s_i: Ο χρόνος που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του πελάτη i (service time).
- t_{ij}: Ο χρόνος μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο j.
- d_i: Η ζήτηση του πελάτη i.
- C: Η χωρητικότητα του οχήματος.

1.2.3.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του VRPTW μπορεί να έχει διπλή στόχευση. Στην κλασική της μορφή, ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος ταξιδιού:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk}$$

Ωστόσο, σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, η αντικειμενική συνάρτηση είναι ιεραρχική: πρωτίστως ελαχιστοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων οχημάτων (στόλου) και

δευτερευόντως η συνολική διανυθείσα απόσταση ή ο συνολικός χρόνος, καθώς η απόκτηση και συντήρηση οχημάτων αποτελεί το μεγαλύτερο πάγιο κόστος.

1.2.3.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Το VRPTW περιλαμβάνει όλους τους βασικούς περιορισμούς ροής και χωρητικότητας του CVRP, προσθέτοντας τους εξής χρονικούς περιορισμούς:

1. Συνέπεια χρονικής ροής: Διασφαλίζει ότι αν το όχημα k μεταβεί από τον πελάτη i στον πελάτη j, ο χρόνος έναρξης εξυπηρέτησης στον j (w_{jk}) δεν μπορεί να είναι μικρότερος από τον χρόνο έναρξης στον i (w_{ik}) συν τον χρόνο εξυπηρέτησης s_i και τον χρόνο μετάβασης t_{ij}.

   Αυτός ο μη γραμμικός περιορισμός γραμμικοποιείται ως εξής:

   $$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ij} \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A$$

   Όπου M_{ij} είναι μια επαρκώς μεγάλη θετική σταθερά (Big-M), η οποία μπορεί να βελτιωθεί ως $M_{ij} = \max\{b_i + s_i + t_{ij} - a_j, 0\}$.

2. Τήρηση χρονικών παραθύρων: Η έναρξη της εξυπηρέτησης πρέπει να εμπίπτει αυστηρά εντός των ορίων του χρονικού παραθύρου του πελάτη:

   $$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i \in N$$

   Αν ένα όχημα φτάσει νωρίτερα από το a_i, επιτρέπεται να περιμένει (waiting time) μέχρι να ανοίξει το παράθυρο, αλλά αν φτάσει μετά το b_i, η λύση καθίσταται ανέφικτη (hard time windows).

3. Χρονικό παράθυρο αποθήκης: Όλα τα οχήματα πρέπει να επιστρέψουν στην αποθήκη πριν από το κλείσιμό της:

$$E \leq w_{0k} \leq L \quad \forall k \in K$$

Όπου E και L είναι οι ώρες έναρξης και λήξης λειτουργίας αποθήκης αντίστοιχα.

1.2.3.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το VRPTW παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή υπολογιστική δυσκολία, καθώς ακόμα και η εύρεση μιας εφικτής λύσης για σταθερό αριθμό οχημάτων αποτελεί NP-complete πρόβλημα. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- Μεταευρετικές μέθοδοι: Ο διπλός προσαρμοστικός γενετικός αλγόριθμος (Dual Adaptive Genetic Algorithm - DAGA) ενσωματώνει προσαρμοστική αξιολόγηση κόστους και τοπική αναζήτηση. Επίσης, χρησιμοποιούνται συστήματα αποικίας μυρμηγκιών με δύο αποικίες (ACS-VEI για ελαχιστοποίηση οχημάτων και ACS-TIME για ελαχιστοποίηση απόστασης).
- Ακριβείς μέθοδοι: Η μέθοδος Branch-price-and-cut θεωρείται η πλέον επιτυχημένη ακριβής προσέγγιση για το VRPTW. Το υποπρόβλημα τιμολόγησης (pricing problem) επιλύεται ως ένα πρόβλημα εύρεσης συντομότερου μονοπατιού με περιορισμούς πόρων (Elementary Shortest Path Problem with Resource Constraints - ESPPRC) μέσω δυναμικού προγραμματισμού.

1.2.3.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το VRPTW έχει τεράστιο εύρος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των αστικών διανομών προϊόντων σε καταστήματα, του προγραμματισμού των σχολικών λεωφορείων, των υπηρεσιών κατ' οίκον νοσηλείας και φροντίδας (Home Healthcare) όπου οι επισκέψεις των νοσηλευτών πρέπει να γίνονται σε συγκεκριμένες ώρες, και της διανομής ευπαθών προϊόντων.

1.2.4. Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με δυνατότητα κατάτμησης παραδόσεων (Split Delivery Vehicle Routing Problem - SDVRP)

1.2.4.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με δυνατότητα κατάτμησης παραδόσεων (Split Delivery Vehicle Routing Problem - SDVRP) εισήχθη στην επιστημονική βιβλιογραφία από τους Moshe Dror και Pierre Trudeau το 1989 και το 1990.

Η θεμελιώδης ανάγκη που οδήγησε στη δημιουργία του SDVRP ήταν η άρση ενός πολύ αυστηρού περιορισμού του κλασικού VRP: της υπόθεσης ότι κάθε πελάτης πρέπει να εξυπηρετείται αποκλειστικά από ένα και μοναδικό όχημα. Στην πράξη, όταν η ζήτηση ενός πελάτη είναι πολύ μεγάλη (ακόμα και αν είναι μικρότερη από τη χωρητικότητα του οχήματος), η υποχρέωση για μία μόνο επίσκεψη μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά αναποτελεσματική χρήση της χωρητικότητας των οχημάτων και σε αύξηση των διανυόμενων αποστάσεων. Επιτρέποντας σε δύο ή περισσότερα οχήματα να μοιραστούν (κατατμήσουν) την παράδοση της ζήτησης ενός πελάτη, επιτυγχάνονται θεαματικές μειώσεις στο συνολικό κόστος και στον αριθμό των απαιτούμενων οχημάτων.

1.2.4.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Το SDVRP μοντελοποιείται αποτελεσματικά με βάση τις διαδρομές (route-based integer programming formulation). Έστω R το σύνολο όλων των εφικτών διαδρομών και C το σύνολο των πελατών.

Οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται ως εξής:

- x_r: Δυαδική μεταβλητή απόφασης που λαμβάνει την τιμή 1 εάν επιλεγεί η διαδρομή $r \in R$, και 0 διαφορετικά.
- y_i^r : Συνεχής μη αρνητική μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την ποσότητα του φορτίου που παραδίδεται στον πελάτη i από τη διαδρομή r.

Οι βασικές παράμετροι είναι:

- c_r: Το συνολικό κόστος (ή απόσταση) της διαδρομής r.
- d_i: Η συνολική ζήτηση του πελάτη i (η οποία μπορεί να είναι μικρότερη, ίση ή και μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του οχήματος).
- Q: Η μέγιστη μεταφορική ικανότητα του οχήματος.

1.2.4.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους των επιλεγμένων διαδρομών διανομής:

$$\min \sum_{r \in R} c_r x_r$$

1.2.4.4. 2.4.4 Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Το μαθηματικό μοντέλο του SDVRP διέπεται από τους ακόλουθους περιορισμούς:

1. Περιορισμός χωρητικότητας επιλεγμένης διαδρομής: Διασφαλίζει ότι η παράδοση στον πελάτη i μέσω της διαδρομής r μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν η συγκεκριμένη διαδρομή έχει επιλεγεί ($x_r = 1$), και ότι το συνολικό φορτίο της διαδρομής δεν υπερβαίνει τη χωρητικότητα του οχήματος Q :

$$\sum_{i \in r} y_i^r \leq Q x_r \quad \forall r \in R$$

Ο περιορισμός αυτός ενισχύεται υπολογιστικά ως εξής:

$$\sum_{i \in r} y_i^r \leq \min \left(\sum_{i \in r} d_i, Q \right) x_r \quad \forall r \in R$$

και διαχωρίζεται περαιτέρω για κάθε πελάτη:

$$y_i^r \leq d_i x_r \quad \forall r \in R, i \in C$$

2. Ικανοποίηση ζήτησης: Η συνολική ποσότητα που παραδίδεται σε έναν πελάτη i από όλες τις διαδρομές που τον επισκέπτονται πρέπει να καλύπτει πλήρως τη ζήτηση d_i:

$$\sum_{r \in R: i \in r} y_i^r \geq d_i \quad \forall i \in C$$

3. Ελάχιστος αριθμός διαδρομών: Εξασφαλίζει ότι ο αριθμός των επιλεγμένων διαδρομών είναι τουλάχιστον ίσος με τη συνολική ζήτηση στρογγυλοποιημένη προς τα πάνω ως προς τη χωρητικότητα Q :

$$\sum_{r \in R} x_r \geq \left\lceil \frac{\sum_{i \in C} d_i}{Q} \right\rceil$$

4. Αποφυγή κυκλικών κατατμήσεων (k-Split Cycles): Οι Dror και Trudeau απέδειξαν ότι υπάρχει πάντα μια βέλτιστη λύση χωρίς κυκλικές κατατμήσεις. Για την αποτροπή τους εισάγεται η εξής ανισότητα για κάθε ζεύγος πελατών:

$$\sum_{r \in R: \{i,j\} \in r} x_r \leq 1 \quad \forall i, j \in C$$

5. Ακεραιότητα και μη αρνητικότητα:

$$x_r \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R$$

$$y_i^r \geq 0 \quad \forall r \in R, i \in C$$

1.2.4.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το SDVRP, παρά το γεγονός ότι αποτελεί χαλάρωση του κλασικού CVRP, είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιλυθεί, καθώς ο προσδιορισμός των ποσοτήτων παράδοσης (y_i^r) εισάγει πρόσθετη πολυπλοκότητα. Οι κύριοι αλγόριθμοι επίλυσης είναι:

- Ευρετικές μέθοδοι: Ο αρχικός αλγόριθμος των Dror και Trudeau (1989) ήταν ένας τοπικός ευρετικός αλγόριθμος δύο σταδίων (εύρεση αρχικής λύσης VRP και στη συνέχεια κατάτμηση και βελτίωση). Σύγχρονες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο ALNS (Adaptive Large Neighborhood Search) με εξειδικευμένους τελεστές καταστροφής και αποκατάστασης.
- Ακριβείς μέθοδοι: Ο πρώτος αλγόριθμος Branch-and-Bound με χαλάρωση περιορισμών προτάθηκε από τους Dror et al. (1994). Σήμερα, οι κορυφαίες ακριβείς μέθοδοι βασίζονται σε Branch-and-Cut (με χρήση τυποποιήσεων ροής εμπορευμάτων δύο ακμών) και Branch-and-Price-and-Cut.

1.2.4.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το SDVRP είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε βιομηχανίες χύδην φορτίων (bulk logistics), όπως η μεταφορά τσιμέντου, άνθρακα, χάλυβα, καυσίμων, καθώς και σε υπηρεσίες παράδοσης μεγάλων παραγγελιών όπου η ζήτηση των πελατών προσεγγίζει ή υπερβαίνει τη χωρητικότητα των φορτηγών.

1.2.5. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες (Multi-Depot Vehicle Routing Problem - MDVRP)

1.2.5.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες (Multi-Depot Vehicle Routing Problem - MDVRP) αποτελεί μια φυσική γενίκευση του VRP, η οποία καταργεί την

υπόθεση της μίας και μοναδικής κεντρικής αποθήκης. Εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία στις εργασίες των Kulkarni και Bhave (1985) και Carpaneto et al. (1989), ενώ μελετήθηκε συστηματικά από κορυφαίους ερευνητές όπως οι Cordeau, Laporte, Salazar-González και Vigo.

Η ανάγκη για τη δημιουργία του MDVRP προέκυψε από τη γεωγραφική δομή των σύγχρονων μεγάλων επιχειρήσεων διανομής. Όταν μια εταιρεία logistics διαθέτει πολλαπλά κέντρα διανομής (depots) σε μια χώρα ή μια μητροπολιτική περιοχή, η δρομολόγηση των οχημάτων πρέπει να αποφασίζεται συνδυαστικά. Το πρόβλημα δεν είναι πλέον μόνο η σειρά επίσκεψης των πελατών, αλλά και η βέλτιστη εκχώρηση (assignment) κάθε πελάτη στην καταλληλότερη αποθήκη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος.

1.2.5.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Στο MDVRP, ορίζεται ένα σύνολο αποθηκών D και ένα σύνολο πελατών N.[33] Ο στόλος των οχημάτων K κατανέμεται στις αποθήκες.

Οι μεταβλητές απόφασης για τη διατύπωση με τρεις δείκτες είναι:

- x_{ijk}: Δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα k διασχίζει απευθείας το τόξο (i, j), και 0 διαφορετικά.
- y_{ik}: Δυαδική μεταβλητή εκχώρησης που λαμβάνει την τιμή 1 εάν ο πελάτης i εξυπηρετείται από το όχημα k (ανήκει σε συγκεκριμένη αποθήκη), και 0 διαφορετικά.

Οι βασικές παράμετροι είναι:

- c_{ij}: Το κόστος μετάβασης ή η απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j.
- q_i: Η ζήτηση του πελάτη i.
- Q: Η χωρητικότητα των οχημάτων.

1.2.5.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η κλασική αντικειμενική συνάρτηση του MDVRP στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (απόστασης) όλων των διαδρομών που εκτελούνται από όλα τα οχήματα όλων των αποθηκών:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk}$$

Σε ειδικές παραλλαγές, όπως το Min-Max MDVRP, στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης διαδρομής (longest route) μεταξύ όλων των οχημάτων, με σκοπό την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας ή την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης της διανομής:

$$\min \lambda \quad \text{s.t.} \quad \text{TSP}(S_k) \leq \lambda \quad \forall k \in K$$

1.2.5.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Οι περιορισμοί του MDVRP συνδυάζουν τους περιορισμούς εκχώρησης και δρομολόγησης:

1. Καθολική εξυπηρέτηση και μοναδικότητα: Κάθε πελάτης $i \in N$ πρέπει να εξυπηρετείται ακριβώς μία φορά από ένα μόνο όχημα:

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N$$

2. Διατήρηση ροής και σύνδεση με αποθήκη προέλευσης: Κάθε όχημα k που ανήκει στην αποθήκη $d \in D$ πρέπει να ξεκινά από αυτή την αποθήκη, να επισκέπτεται ένα σύνολο πελατών και να επιστρέφει στην ίδια ακριβώς αποθήκη d:

$$\sum_{j \in N \cup D} x_{djk} = 1 \quad \text{και} \quad \sum_{i \in N \cup D} x_{idk} = 1$$

3. Περιορισμός χωρητικότητας οχήματος:

$$\sum_{i \in N} q_i y_{ik} \leq Q \quad \forall k \in K$$

4. Εξάλειψη υποδιαδρομών: Διασφαλίζει ότι δεν δημιουργούνται ανεξάρτητοι κλειστοί βρόχοι μεταξύ των πελατών, αποκομμένοι από τις αποθήκες.

1.2.5.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το MDVRP παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα λόγω του συνδυασμού δύο NP-hard προβλημάτων (εκχώρησης και δρομολόγησης) [32]. Οι κύριες μέθοδοι επίλυσης είναι:

- Μεταευρετικοί αλγόριθμοι: Οι αλγόριθμοι Tabu Search (όπως αυτοί των Chao et al. και Renaud et al.) υπήρξαν ιστορικά οι πλέον επιτυχημένοι. Σήμερα χρησιμοποιούνται υβριδικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και γενετικών αλγορίθμων (HPSO-HGA) για την επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας (έως 200 πελάτες και 20 αποθήκες), καθώς και αλγόριθμοι μεταβλητής γειτονιάς (Variable Neighborhood Search - VNS).
- Ακριβείς μέθοδοι: Βασίζονται σε μοντέλα πολυ-εμπορευματικής ροής και επιλύονται με Branch-and-Cut.

1.2.5.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το MDVRP εφαρμόζεται σε μεγάλες αλυσίδες σούπερ μάρκετ με πολλαπλά κέντρα διανομής, σε εταιρείες ταχυμεταφορών (courier) εθνικής εμβέλειας, στη διανομή προϊόντων πετρελαιοειδών από διάφορα διυλιστήρια, καθώς και στη διανομή κερμάτων και μετρητών από τα κεντρικά και περιφερειακά θησαυροφυλάκια των Κεντρικών Τραπεζών.

1.2.6. Στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Stochastic Vehicle Routing Problem - SVRP)

1.2.6.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Stochastic Vehicle Routing Problem - SVRP) αναπτύχθηκε για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ των θεωρητικών ντετερμινιστικών μοντέλων και της πραγματικότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη αβεβαιότητα. Η θεμελίωση του SVRP ως προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων με προσφυγή (two-stage stochastic program with recourse) έγινε από τον Dimitri Bertsimas το 1992, ενώ η ανάπτυξη της μεθόδου "Integer L-shaped" για την ακριβή επίλυσή του πραγματοποιήθηκε από τους Gilbert Laporte και François Louveaux το 1993.

Στα κλασικά μοντέλα VRP, όλες οι παράμετροι (ζήτηση, χρόνοι μετάβασης) θεωρούνται τέλεια γνωστές εκ των προτέρων. Στον πραγματικό κόσμο, όμως, η ζήτηση ενός πελάτη αποκαλύπτεται μόνο όταν το όχημα φτάσει στον χώρο του, ενώ οι χρόνοι μετάβασης επηρεάζονται δραματικά από την κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ατυχήματα.

1.2.6.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Στο SVRP με στοχαστική ζήτηση (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands - VRPSD), οι μεταβλητές απόφασης χωρίζονται σε δύο στάδια:

- Πρώτο στάδιο (First-Stage Variables):
    - x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης που λαμβάνει την τιμή 1 εάν το τόξο (i, j) περιλαμβάνεται στην «a priori» σχεδιασμένη διαδρομή (πριν αποκαλυφθούν οι πραγματικές τιμές των στοχαστικών παραμέτρων), και 0 διαφορετικά.
- Δεύτερο στάδιο (Second-Stage / Recourse Variables):
    - θ: Συνεχής μεταβλητή που αντιπροσωπεύει το αναμενόμενο κόστος της δράσης προσφυγής (expected recourse cost) που θα απαιτηθεί κατά την εκτέλεση της

διαδρομής, όταν παρουσιαστούν αποτυχίες (π.χ. όταν η πραγματική ζήτηση υπερβεί τη χωρητικότητα του οχήματος).

Οι στοχαστικές παράμετροι περιλαμβάνουν:

- $\tilde{q}_i$: Στοχαστική μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τη ζήτηση του πελάτη i, η οποία ακολουθεί μια γνωστή πιθανοτική κατανομή (π.χ. κατανομή Poisson).
- Q: Η σταθερή χωρητικότητα του οχήματος.
- c_{ij}: Το κόστος της a priori διαδρομής.

1.2.6.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του SVRP στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του ντετερμινιστικού κόστους του πρώτου σταδίου και του αναμενόμενου κόστους προσφυγής του δευτέρου σταδίου:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} + E[Q(x, \tilde{\xi})]$$

Όπου $E[Q(x, \tilde{\xi})]$ είναι η αναμενόμενη τιμή του κόστους των διορθωτικών ενεργειών (recourse actions) υπό όλες τις πιθανές πραγματοποιήσεις των στοχαστικών παραμέτρων $\tilde{\xi}$. Η δράση προσφυγής συνίσταται συνήθως στο ότι, όταν το όχημα αδειάσει (failure), επιστρέφει στην αποθήκη για να ξαναγεμίσει και συνεχίζει τη σχεδιασμένη διαδρομή από το σημείο όπου αυτή διακόπηκε.

1.2.6.4. Περιορισμοί και Θεωρητικές Παραδοχές

Το μοντέλο του SVRP υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

1. Περιορισμοί σχεδιασμού a priori διαδρομής: Η a priori διαδρομή πρέπει να αποτελεί έναν έγκυρο κύκλο TSP που επισκέπτεται όλους τους πελάτες ακριβώς μία φορά.
2. Περιορισμοί δομής δικτύου:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V_c$$

3. Περιορισμοί L-shaped Cuts: Διασφαλίζουν ότι η μεταβλητή θ προσεγγίζει επαρκώς το αναμενόμενο κόστος αποτυχίας μέσω της σταδιακής προσθήκης γραμμικών περικοπών βελτιστοποίησης (optimality cuts) κατά τη διάρκεια της επίλυσης:

$$\theta \geq L(x)$$

4. Περιορισμοί αναμενόμενης ζήτησης: Δεν επιτρέπονται a priori διαδρομές των οποίων η συνολική αναμενόμενη ζήτηση υπερβαίνει τη χωρητικότητα Q:

$$\sum_{i \in V_c} E[\tilde{q}_i] \leq Q$$

1.2.6.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το SVRP είναι εξαιρετικά δύσκολο υπολογιστικά, καθώς απαιτεί την αξιολόγηση πολλαπλών στοχαστικών σεναρίων. Οι κυριότεροι αλγόριθμοι είναι:

- Ακριβείς μέθοδοι: Ο αλγόριθμος Integer L-shaped των Laporte και Louveaux αποτελεί το πρότυπο για την ακριβή επίλυση, χρησιμοποιώντας τεχνικές Branch-and-Cut όπου οι στοχαστικές περικοπές προστίθενται δυναμικά.[36] Επίσης, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι Branch-and-Price με δυναμικό προγραμματισμό για το υποπρόβλημα τιμολόγησης.
- Μέθοδοι μηχανικής μάθησης: Πρόσφατα αναπτύχθηκαν προσεγγίσεις βαθιάς ενισχυτικής μάθησης (Deep Reinforcement Learning - DRL) και προσομοίωσης νευρωνικών δικτύων προσοχής (attention-based models), οι οποίες επιτρέπουν την ταχύτατη λήψη αποφάσεων σε στοχαστικά περιβάλλοντα.

1.2.6.6. Πεδία Εφαρμογής και Επιχειρησιακή Επίδραση

Το SVRP εφαρμόζεται στη διανομή πετρελαιοειδών (όπου η κατανάλωση των πρατηρίων είναι στοχαστική), στη συλλογή οικιακών ή βιομηχανικών απορριμμάτων (όπου ο όγκος των κάδων αποκαλύπτεται μόνο κατά την άφιξη), στη διανομή μετρητών σε ATM, και σε αστικές διανομές με έντονα στοχαστικούς χρόνους ταξιδιού λόγω κυκλοφοριακών αιχμών και πυκνών αστικών δικτύων.

1.2.7. Το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Green Vehicle Routing Problem - G-VRP)

1.2.7.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Green Vehicle Routing Problem - G-VRP) εισήχθη στην επιστημονική κοινότητα από τις Sevgi Erdoğan και Elise Miller-Hooks το 2012.

Η δημιουργία του Green Vehicle Routing Problem υπαγορεύθηκε από την ανάγκη της πράσινης μετάβασης των logistics και την αυξανόμενη χρήση οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuel Vehicles - AFVs), όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) ή τα οχήματα υδρογόνου και φυσικού αερίου. Τα οχήματα αυτά παρουσιάζουν δύο σημαντικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα: περιορισμένη αυτονομία (driving range) και εξαιρετικά αραιή υποδομή σταθμών ανεφοδιασμού (refueling infrastructure).

Το G-VRP σχεδιάστηκε για να επιτρέψει στα οχήματα αυτά να εκτελούν μακρινά δρομολόγια, ενσωματώνοντας προγραμματισμένες στάσεις για ανεφοδιασμό κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους, ώστε να εκμηδενιστεί ο κίνδυνος ακινητοποίησης του οχήματος.

1.2.7.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Το G-VRP ορίζεται σε ένα γράφημα που περιλαμβάνει τον κεντρικό σταθμό D, το σύνολο των πελατών C και το σύνολο των σταθμών εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuel Stations - AFS) S.

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι:

- x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης που λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα μεταβαίνει απευθείας από τον κόμβο i στον κόμβο j, και 0 διαφορετικά.
- y_i: Συνεχής πραγματική μεταβλητή που καταγράφει το υπολειπόμενο επίπεδο καυσίμου (ή ενέργειας) στο ντεπόζιτο του οχήματος κατά την άφιξή του στον κόμβο j.
- τ_i: Συνεχής πραγματική μεταβλητή που καταγράφει τον ακριβή χρόνο άφιξης του οχήματος στον κόμβο j.

Οι βασικές παράμετροι είναι:

- F_{max} : Η μέγιστη χωρητικότητα του ντεπόζιτου καυσίμου / μπαταρίας του οχήματος.
- f_{ij}: Η κατανάλωση καυσίμου κατά τη μετάβαση από τον κόμβο i στον κόμβο j (θεωρείται γραμμικά ανάλογη της απόστασης d_{ij}).
- T_{max} : Η μέγιστη επιτρεπτή διάρκεια εκτέλεσης ενός δρομολογίου.
- p_i: Ο χρόνος εξυπηρέτησης στον κόμβο i (ή χρόνος επαναφόρτισης/ανεφοδιασμού αν ο κόμβος είναι σταθμός καυσίμων).

1.2.7.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του G-VRP στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυόμενης απόστασης από τα οχήματα εναλλακτικών καυσίμων:

$$\text{Minimize} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij}$$

Σε εναλλακτικές διατυπώσεις που εστιάζουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να μοντελοποιεί απευθείας την ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ή του συνολικού κόστους ενέργειας.

1.2.7.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Οι περιορισμοί του G-VRP είναι ιδιαίτερα αυστηροί για να διασφαλίσουν ότι τα οχήματα δεν θα ξεμείνουν από καύσιμα:

1. Περιορισμός επίσκεψης πελατών: Κάθε πελάτης $j \in C$ πρέπει να προσεγγίζεται ακριβώς μία φορά:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in C$$

2. Περιορισμός χρήσης σταθμών καυσίμων: Κάθε σταθμός καυσίμων $j \in S$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πολύ μία φορά ανά όχημα (για πολλαπλές επισκέψεις εισάγονται εικονικοί κόμβοι - dummy nodes):

$$\sum_{i \in V} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in S$$

3. Παρακολούθηση επίπεδου καυσίμου: Διασφαλίζει ότι το καύσιμο μειώνεται κατά την κίνηση και επαναφέρεται στο μέγιστο επίπεδο F_{max} κατά την επίσκεψη σε σταθμό ή στην αποθήκη:

$$F_{max} - f_{ij} x_{ij} - y_j + F_{max}(1 - x_{ij}) \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus C, j \in V$$

$$y_i - f_{ij} x_{ij} - y_j + F_{max}(1 - x_{ij}) \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in V$$

4. Αποτροπή ακινητοποίησης: Το υπολειπόμενο καύσιμο σε κάθε κόμβο πρέπει να είναι μη αρνητικό:

$$0 \leq y_j \leq F_{max} \quad \forall j \in V$$

5. Παρακολούθηση χρόνου και μέγιστης διάρκειας:

$$\tau_i + (p_i + t_{ij})x_{ij} - \tau_j \leq T_{max}(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V \setminus D,\, j \in V$$

$$0 \leq \tau_j \leq T_{max} \quad \forall j \in V$$

1.2.7.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Για την επίλυση του G-VRP, οι Erdoğan και Miller-Hooks πρότειναν δύο κατασκευαστικούς ευρετικούς αλγορίθμους: τον Modified Clarke and Wright Savings (MCWS) και τον αλγόριθμο ομαδοποίησης με βάση την πυκνότητα (Density-Based Clustering Algorithm).

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται εξελιγμένοι μεταευρετικοί αλγόριθμοι, όπως μιμητικοί αλγόριθμοι (memetic algorithms) [20] και αλγόριθμοι γενετικής αναζήτησης. Η ακριβής επίλυση πραγματοποιείται με τη χρήση του IBM ILOG CPLEX Optimizer επί γραμμικοποιημένων μοντέλων MILP, καθώς και με εξειδικευμένους αλγορίθμους Branch-and-Cut.

1.2.7.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το G-VRP εφαρμόζεται στον προγραμματισμό δρομολογίων αστικών εμπορευματικών μεταφορών με στόλους αμιγώς ηλεκτρικών ημιφορτηγών, στη δρομολόγηση λεωφορείων εναλλακτικών καυσίμων, καθώς και σε εταιρείες logistics που

επιδιώκουν τη συστηματική μείωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος μέσω της χρήσης AFVs.

1.2.8. Το δυναμικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Dynamic Vehicle Routing Problem - DVRP)

1.2.8.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Το δυναμικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Dynamic Vehicle Routing Problem - DVRP) εισήχθη και μελετήθηκε συστηματικά από τον Χαρίλαο Ν. Ψαραύτη (Harilaos N. Psaraftis) αρχικά το 1988 και στη συνέχεια το 1995.

Η ανάγκη για τη δημιουργία του DVRP προέκυψε από την αλματώδη ανάπτυξη των τεχνολογιών πληροφορικής, των συστημάτων GPS και των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, οι οποίες επέτρεψαν για πρώτη φορά τη λήψη πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Στα παραδοσιακά VRP, ο σχεδιασμός των δρομολογίων ολοκληρώνεται πριν από την αναχώρηση των οχημάτων και παραμένει σταθερός. Στον δυναμικό κόσμο, όμως, νέες παραγγελίες εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ τα οχήματα βρίσκονται ήδη καθ' οδόν, ακυρώσεις συμβαίνουν απροειδοποίητα, και ο dispatcher πρέπει να αναπροσαρμόζει τα δρομολόγια ακαριαία.

1.2.8.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Το DVRP μοντελοποιείται ως μια διαδικασία διαδοχικής λήψης αποφάσεων (Markov Decision Process - MDP).

Οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται ως εξής:

- s_t: Η κατάσταση του συστήματος (state) στο χρονικό σημείο απόφασης t, η οποία περιλαμβάνει τις τρέχουσες θέσεις των οχημάτων, το υπολειπόμενο φορτίο τους, τις ήδη δεσμευμένες διαδρομές και τις εκκρεμείς δυναμικές παραγγελίες.

- $a_t \in$ A(s_t): Η απόφαση δρομολόγησης (action) που λαμβάνεται στην κατάσταση s_t, όπως η ανάθεση μιας νέας παραγγελίας σε ένα συγκεκριμένο όχημα, η αλλαγή της σειράς των πελατών, ή η εντολή αναμονής (waiting) σε έναν κόμβο.

Οι δυναμικές παράμετροι περιλαμβάνουν:

- W_t: Η στοχαστική πληροφορία που αποκαλύπτεται στο βήμα t (π.χ. η γεωγραφική θέση και η ζήτηση μιας νέας παραγγελίας).
- $c(s_t, a_t)$: Το άμεσο κόστος ή η απόσταση που προκύπτει από την εφαρμογή της δράσης a_t στην κατάσταση s_t.

1.2.8.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του DVRP στο πλαίσιο του MDP στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου συνολικού κόστους (διανυόμενης απόστασης και ποινών καθυστέρησης) σε έναν ολόκληρο ορίζοντα σχεδιασμού.

Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το άμεσο κόστος, αλλά και την επίδραση της τρέχουσας απόφασης στη μελλοντική ικανότητα του στόλου να ανταποκριθεί σε νέες δυναμικές παραγγελίες.

1.2.8.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Το σύστημα περιορισμών του DVRP λειτουργεί δυναμικά:

1. Περιορισμοί συμβατότητας δράσεων: Η επιλεγμένη δράση a_t πρέπει να ανήκει στο σύνολο των εφικτών δράσεων $A(s_t)$, δηλαδή να μην παραβιάζει τα χρονικά παράθυρα των πελατών ή τη χωρητικότητα των οχημάτων.
2. Περιορισμός δυναμικής χωρητικότητας: Το φορτίο του οχήματος μετά την αποδοχή

νέας δυναμικής παραγγελίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα C.

3. Εξίσωση μετάβασης κατάστασης (State Transition): Καθορίζει πώς το σύστημα μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση s_{t+1} με βάση την τρέχουσα κατάσταση s_t, τη δράση a_t και τη νέα στοχαστική πληροφορία W_{t+1}:

$$s_{t+1} = S^M(s_t, a_t, W_{t+1})$$

4. Περιορισμοί δέσμευσης (Commitment): Μόλις ένα όχημα ξεκινήσει την πορεία του προς έναν πελάτη και ξεπεράσει ένα κρίσιμο χρονικό σημείο, η επίσκεψη αυτή θεωρείται δεσμευμένη (committed) και δεν μπορεί να τροποποιηθεί.

1.2.8.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Το DVRP απαιτεί εξαιρετικά γρήγορους αλγορίθμους, καθώς οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται σχεδόν ακαριαία [51]. Χρησιμοποιούνται οι εξής προσεγγίσεις:

- Στρατηγικές batching και επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης (Re-optimization): Οι δυναμικές παραγγελίες συγκεντρώνονται σε μικρά χρονικά διαστήματα (batches) και επιλύεται επανειλημμένα ένα στατικό VRP με χρήση Simulated Annealing ή Clarke-Wright.
- Προσεγγιστικός δυναμικός προγραμματισμός (Approximate Dynamic Programming - ADP): Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Post-Decision State Rollout (PDS-RA) ως μέθοδο lookahead για την προσέγγιση της μελλοντικής αξίας των καταστάσεων.
- Βαθιά ενισχυτική μάθηση (Deep Reinforcement Learning - DRL): Συνδυάζεται με Simulated Annealing (DRLSA) για την άμεση παραγωγή βέλτιστων αποφάσεων επαναδρομολόγησης.

1.2.8.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το DVRP αποτελεί τον πυρήνα των σύγχρονων ψηφιακών πλατφορμών διανομής φαγητού και προϊόντων κατ' απαίτηση (on-demand food/grocery delivery), των υπηρεσιών ride-hailing (όπως Uber, Bolt), των επειγουσών μεταφορών με ασθενοφόρα, και της διανομής ιατρικών αποθεμάτων σε περιπτώσεις ανθρωπιστικών κρίσεων.

1.2.9. Το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP)

1.2.9.1. Ιστορικό πλαίσιο και δημιουργοί του μοντέλου

Η ραγδαία ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης και η ανάγκη για περιβαλλοντικά βιώσιμες αστικές μεταφορές οδήγησαν στην εμφάνιση του Ηλεκτρικού Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP). Αν και το G-VRP των Erdoğan και Miller-Hooks (2012) έθεσε τις βάσεις για εναλλακτικά καύσιμα, η πρώτη ολοκληρωμένη και αυστηρή μαθηματική διατύπωση του EVRP με Χρονικά Παράθυρα και Σταθμούς Επαναφόρτισης (E-VRPTW) παρουσιάστηκε από τους Michael Schneider, Andreas Stenger και Dominik Goeke το 2014.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα, τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχουν περιορισμένη αυτονομία μπαταρίας και απαιτούν σημαντικό χρόνο για επαναφόρτιση. Οι Schneider κ.ά. (2014) εισήγαγαν ένα μοντέλο όπου ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται γραμμικά από την κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC) της μπαταρίας κατά την άφιξη στον σταθμό, προσφέροντας μια πολύ πιο ρεαλιστική προσέγγιση από τον σταθερό χρόνο ανεφοδιασμού του G-VRP. Η εξέλιξη του μοντέλου συνεχίστηκε με τους Keskin και Çatay (2016), οι οποίοι επέτρεψαν τη μερική φόρτιση (partial recharging) αντί της υποχρεωτικής πλήρους φόρτισης, και τους Montoya κ.ά. (2017), οι οποίοι ενσωμάτωσαν μη γραμμικές συναρτήσεις φόρτισης (nonlinear charging functions) για να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των σύγχρονων μπαταριών ιόντων λιθίου.

1.2.9.2. Μεταβλητές απόφασης και μαθηματική μοντελοποίηση

Το EVRP μοντελοποιείται σε ένα δίκτυο που περιλαμβάνει την αποθήκη προέλευσης V_0, το σύνολο των πελατών I, και ένα σύνολο εικονικών κόμβων για τους σταθμούς φόρτισης F'_0, οι οποίοι επιτρέπουν πολλαπλές επισκέψεις στον ίδιο φυσικό σταθμό.

Οι βασικές μεταβλητές απόφασης ορίζονται ως εξής:

- x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή απόφασης που λαμβάνει την τιμή 1 εάν το όχημα διασχίσει το τόξο (i, j), και 0 διαφορετικά.
- τ_i: Συνεχής μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τον χρόνο άφιξης του οχήματος στον κόμβο i.
- y_i: Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC) της μπαταρίας κατά την άφιξη στον κόμβο i.
- u_i: Συνεχής μεταβλητή που παρακολουθεί το υπολειπόμενο φορτίο εμπορεύματος στο όχημα κατά την άφιξη στον κόμβο i.

Οι κρίσιμες παράμετροι περιλαμβάνουν:

- Q: Η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας (σε kWh).
- r: Ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα απόστασης.
- g: Ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας ανά μονάδα χρόνου.
- C: Η μέγιστη χωρητικότητα εμπορεύματος του οχήματος.

1.2.9.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση των Schneider κ.ά. (2014) είναι ιεραρχική. Πρωτίστως ελαχιστοποιεί τον αριθμό των απαιτούμενων ηλεκτρικών οχημάτων (στόλος) και δευτερευόντως τη συνολική διανυθείσα απόσταση:

$$\min \sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0j}$$

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} d_{ij} x_{ij}$$

Σε μεταγενέστερες παραλλαγές με μερική ή μη γραμμική φόρτιση, ο στόχος συχνά μετατρέπεται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος ενέργειας και το κόστος φόρτισης στους σταθμούς.

1.2.9.4. Περιορισμοί και θεωρητικές παραδοχές

Το μαθηματικό μοντέλο του EVRP υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

1. Διατήρηση ροής και κάλυψη πελατών: Κάθε πελάτης $j \in I$ πρέπει να εξυπηρετείται ακριβώς μία φορά:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in I$$

2. Παρακολούθηση κατάσταση φόρτισης (SoC):

- Αν ο προηγούμενος κόμβος i είναι πελάτης ή η αποθήκη ($i \in I \cup \{0\}$), το επίπεδο μπαταρίας στον κόμβο j μειώνεται κατά την κατανάλωση ενέργειας της διαδρομής:

$$0 \leq y_j \leq y_i - (r \cdot d_{ij}) x_{ij} + Q(1 - x_{ij}) \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

- Αν ο προηγούμενος κόμβος i είναι σταθμός φόρτισης ($i \in F_0'$), η μπαταρία

θεωρείται ότι φορτίστηκε πλήρως (ή έως ένα επίπεδο) και στη συνέχεια καταναλώνεται ενέργεια για τη μετάβαση στον j:

$$0 \leq y_j \leq Q - (r \cdot d_{ij})x_{ij} \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

3. Παρακολούθηση φορτίου: Το φορτίο του οχήματος πρέπει να μειώνεται κατάλληλα μετά την παράδοση στον πελάτη i και να μην υπερβαίνει τη χωρητικότητα C:

$$0 \leq u_j \leq u_i - q_i x_{ij} + C(1 - x_{ij}) \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

4. Χρονικοί περιορισμοί και χρόνος φόρτισης:

○ Για αναχώρηση από πελάτη ή αποθήκη i:

$$\tau_i + (t_{ij} + s_i)x_{ij} - l_0(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

○ Για αναχώρηση από σταθμό φόρτισης i, ο χρόνος άφιξης στον επόμενο κόμβο j περιλαμβάνει και τον χρόνο επαναφόρτισης, ο οποίος εξαρτάται γραμμικά από το υπολειπόμενο SoC (y_i) κατά την άφιξη στον σταθμό:

$$\tau_i + t_{ij}x_{ij} + g(Q - y_i) - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

○ Τήρηση Χρονικών Παραθύρων:

$$e_j \leq \tau_j \leq l_j \quad \forall j \in V \setminus \{0\}$$

1.2.9.5. Αλγοριθμική επίλυση και μεθοδολογίες προσέγγισης

Λόγω της εξαιρετικά υψηλής πολυπλοκότητας, οι ακριβείς αλγόριθμοι (όπως Branch-and-Cut και Branch-Price-and-Cut) μπορούν να επιλύσουν μόνο μικρού μεγέθους

προβλήματα (έως 25-50 πελάτες). Ως εκ τούτου, η έρευνα έχει εστιάσει σε ισχυρές μεταευρετικές μεθόδους:

- Υβριδικός VNS/TS: Οι Schneider κ.ά. (2014) πρότειναν έναν υβριδικό αλγόριθμο που συνδυάζει την Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighborhood Search) με την Αναζήτηση Tabu (Tabu Search) για την εντατικοποίηση της έρευνας στον χώρο των λύσεων.
- Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS): Χρησιμοποιείται ευρύτατα για το EVRP με μερική φόρτιση, ενσωματώνοντας ευρετικούς κανόνες για τη βέλτιστη εισαγωγή σταθμών φόρτισης (station insertion heuristics) και τον καθορισμό των ποσοτήτων φόρτισης.
- Bi-level Optimization και ALNS με Simulated Annealing: Χρησιμοποιείται για την επίλυση του EVRP με μη γραμμική φόρτιση (E-VRP-NL), διαχωρίζοντας την εύρεση της διαδρομής (routing) από τον προγραμματισμό της φόρτισης (charging scheduling), ο οποίος επιλύεται ως ξεχωριστό υποπρόβλημα (Fixed-Route Vehicle Charging Problem - FRVCP).

1.2.9.6. Πεδία εφαρμογής και επιχειρησιακή επίδραση

Το EVRP αποτελεί το κεντρικό εργαλείο σχεδιασμού για τις σύγχρονες αστικές εμπορευματικές μεταφορές (last-mile logistics), τις εταιρείες ταχυμεταφορών (courier, DHL, UPS) που αντικαθιστούν τους στόλους τους με ηλεκτρικά βαν, και τις υπηρεσίες διανομής τροφίμων και φαρμάκων σε πυκνοκατοικημένες αστικές ζώνες με χαμηλές εκπομπές ρύπων (Low Emission Zones).

1.2.10. Συνοπτικός πίνακας προοδευτικής εξέλιξης των μοντέλων VRP

Ο Πίνακας 2.10 παρουσιάζει την προοδευτική εξέλιξη των μοντέλων VRP.

Πίνακας 2.10: Παρουσίαση προοδευτικής εξέλιξης των μοντέλων VRP

Μοντέλο & Δημιουργοί	Νέες Μεταβλητές Απόφασης & Παράμετροι	Νέα Αντικειμενική Συνάρτηση	Νέοι Περιορισμοί	Αλγόριθμος Επίλυσης
Truck Dispatching Problem *(Dantzig & Ramser, 1959)*	• x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή σύνδεσης. • d_{ij}: Απόσταση. • q_i: Ζήτηση. • C: Χωρητικότητα.	$\min \sum_i \sum_j d_{ij} x$	• $\sum_i x_{ij} =$ (Σύνδεση). • $\sum_{i \in S} q_i \leq$ (Χωρητικότητα). • $x_{ii} =$ (Όχι αυτοσύνδεση).	• Σταδιακή συνένωση (stage aggregation) και γρήγορες διορθώσεις με το χέρι.

CVRP *(Laporte & Nobert, 1983 / Clarke & Wright, 1964)*	• x_{iik}: Δυαδική μεταβλητή κίνησης οχήματος k. • u_i: Υπολειπόμενο φορτίο (MTZ).	$\min \sum_k \sum_i \sum_j d_{ij} x$	• Διατήρηση ροής ανά όχημα. • Εξάλειψη υποδιαδρομών (MTZ ή DFJ περιορισμοί).	• Savings. • Branch-and-Cut. • Tabu Search. • Γενετικοί αλγόριθμοι.
VRPTW *(Solomon, 1987)*	• w_{ik}: Χρόνος έναρξης εξυπηρέτησης. • $[a_i, b_i$: Χρονικό παράθυρο. • s_i: Χρόνος εξυπηρέτησης. • t_{ij}: Χρόνος ταξιδιού.	$\min \sum_k \sum_{(i,j)} c_{ij} x$ *(ή ιεραρχικά:* $\min$ *οχημάτων)*	• Συνέπεια ροής χρόνου: $w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{ik} \leq (1 -$. • Τήρηση παραθύρων: $a_i \leq w_{ik} \leq$.	• Nearest Neighbor με χρόνο. • Branch-and-Price-and-Cut. • DAGA. • Ant Colony.

SDVRP *(Dror & Trudeau, 1989/1990)*	• x_r: Δυαδική επιλογής διαδρομής r. • y_i^r: Ποσότητα παράδοσης στον i μέσω r.	$\min \sum_r c_r a$	• Ικανοποίηση ζήτησης: $\sum_r y_i^r \geq$. • Χωρητικότητα διαδρομής: $\sum_i y_i^r \leq$. • Αποφυγή k-split cycles.	• Ευρετική κατάτμηση 2 σταδίων. • ALNS. • Branch-and-Cut με ροές εμπορευμάτων.
MDVRP *(Cordeau et al. / Kulkarni & Bhave, 1985)*	• y_{ik}: Δυαδική εκχώρησης πελάτη σε όχημα. • D: Σύνολο πολλαπλών αποθηκών.	$\min \sum_i \sum_j c_{ij} \sum_k x$ *(ή* $\min$ *για min-max)*	• Κάθε όχημα ξεκινά και καταλήγει στην ίδια αποθήκη προέλευσης. • Εκχώρηση πελατών σε αποθήκες.	• Tabu Search. • Υβριδικός PSO-GA. • Variable Neighborhood Search (VNS).
SVRP	• θ: Αναμενόμενο κόστος προσφυγής.	$\min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} +$	• Δομή a priori κύκλου TSP.	• Integer L-Shaped Method. • Deep Reinforcement Learnin

(Bertsimas, 1992 / Laporte & Louveaux, 1993)	• $\tilde{q}_i$: Στοχαστική ζήτηση πελάτη.		• Integer L-shaped cuts: $\theta \geq$.	• Branch-and-Price.
G-VRP *(Erdoğan & Miller-Hooks, 2012)*	• y_i: Επίπεδο καυσίμου στον κόμβο j. • τ_i: Χρόνος άφιξης στον κόμβο j. • S: Σταθμοί καυσίμων (AFS).	$\min \sum \sum d_{ij} x$ *(ή* $\min_{\text{εκπομπών}} CO_i$*)*	• Παρακολούθηση καυσίμου: $y_i - f_{ij} x_{ij} \geq$. • Αποτροπή ακινητοποίησης: $y_i \geq$. • Μέγιστη διάρκεια: $\tau_i \leq$	• MCWS & Density-Based Clustering. • Memetic Algorithms. • Exact MILP (CPLEX).
DVRP *(Psaraftis, 1988/1995)* [49]	• s_t: Κατάσταση συστήματος στο t. • a_t: Απόφαση δρομολόγησης στο t. • W_t: Δυναμική πληροφορία.	$\min E[\sum c(s_t, a_t$	• $a_t \in$ (Συμβατότητα δράσεων). • Μετάβαση κατάστασης: $s_{t+1} =$.	• Δυναμική επαναβελτιστοποίηση (Batching). • Post-Decision State Rollout. • DRLSA.

EVRP *(Schneider et al., 2014)*	• x_{ij}: Δυαδική μεταβλητή κίνησης. • t_j: Χρόνος άφιξης στον j. • y_j: Επίπεδο φόρτισης SoC στον j. • u_j: Φορτίο εμπορεύματος στον j. • Q: Χωρητικότητα μπαταρίας.	min $sum_j x_{0j}$ (min οχημάτων) και min $\sum \sum (d_{ij} * x_{ij})$	• Παρακολούθηση μπαταρίας SoC: $y_j <= y_i - r * d_{ij} * x_{ij} + Q * (1 - x_{ij})$. • Χρονικοί περιορισμοί με φόρτιση: $t_i + t_{ij} * x_{ij} + g * (Q - y_i) - (l_0 + g * Q) * (1 - x_{ij}) <= t_j$.	• Υβριδικός VNS/TS. • ALNS με μερική/μη γραμμική φόρτιση. • Exact Branch-Price-and-Cut.

1.2.11. Συμπεράσματα

Η ιστορική αναδρομή και η μαθηματική ανάλυση της εξέλιξης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP) καταδεικνύουν μια σαφή πορεία από την απλοποιημένη, στατική και ντετερμινιστική μοντελοποίηση της δεκαετίας του 1959 σε εξαιρετικά πολύπλοκα, δυναμικά και στοχαστικά συστήματα που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας.

Κάθε νέα παραλλαγή του αρχικού μοντέλου που παρουσιάστηκε δεν αποτέλεσε απλώς μια θεωρητική άσκηση, αλλά μια άμεση απάντηση σε συγκεκριμένους επιχειρησιακούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς:

- Η εισαγωγή της χωρητικότητας (CVRP) επέτρεψε τη διαχείριση πραγματικών στόλων.
- Τα χρονικά παράθυρα (VRPTW) ενσωμάτωσαν την ποιότητα εξυπηρέτησης και τον συντονισμό του χρόνου.
- Η κατάτμηση παραδόσεων (SDVRP) προσέφερε πρωτοφανή ευελιξία και εξοικονόμηση πόρων σε βαριές βιομηχανίες.
- Οι πολλαπλές αποθήκες (MDVRP) επέτρεψαν τη μοντελοποίηση αποκεντρωμένων δικτύων διανομής μεγάλης κλίμακας.
- Η στοχαστικότητα (SVRP) και η δυναμικότητα (DVRP) εισήγαγαν τα μαθηματικά της αβεβαιότητας και των αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, εκμεταλλευόμενες τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υποδομές.
- Τέλος, το πράσινο VRP (G-VRP) ευθυγράμμισε τη μαθηματική βελτιστοποίηση με τις επιταγές της βιώσιμης ανάπτυξης και της μείωσης των εκπομπών ρύπων.

Η πρόοδος αυτή συνοδεύτηκε από μια παράλληλη επανάσταση στους αλγορίθμους επίλυσης. Από τις χειροκίνητες προσεγγίσεις των Dantzig και Ramser, η επιστήμη μετακινήθηκε στους ακριβείς αλγορίθμους Branch-and-Cut-and-Price που επιλύουν

βέλτιστα προβλήματα εκατοντάδων πελατών, και στη συνέχεια στις μεταευρετικές μεθόδους και τη βαθιά ενισχυτική μάθηση που επιτρέπουν την ακαριαία λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η τάση αυτή προδιαγράφει ένα μέλλον όπου το VRP θα είναι πλήρως ενσωματωμένο σε αυτόνομα συστήματα διανομής (όπως drones και αυτόνομα οχήματα), προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και βελτιστοποίηση των μεταφορών σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.3. Περιγραφή κλάδου αστικών μεταφορών στην Ελλάδα

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται αποτελούν επίσημα στατιστικά δελτία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής που αναλύουν την πορεία των οδικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα για το έτος 2024 και το τρίτο τρίμηνο του 2025. Τα έγγραφα παρουσιάζουν λεπτομερή δεδομένα σχετικά με το βάρος των φορτίων και τα τονοχιλιόμετρα, διακρίνοντας τη δραστηριότητα ανάμεσα σε οχήματα ιδιωτικής και δημόσιας χρήσης. Επιπλέον, παρέχεται μια γεωγραφική κατανομή των μεταφορών, αναδεικνύοντας την Αττική και την Κεντρική Μακεδονία ως τα κύρια κέντρα φόρτωσης και εκφόρτωσης προϊόντων. Οι εκθέσεις εξετάζουν επίσης τις μεταβολές ανά τύπο συσκευασίας, όπως τα στερεά χύμα φορτία και τα παλετοποιημένα εμπορεύματα. Τέλος, περιλαμβάνονται μεθοδολογικές σημειώσεις και ορισμοί που διασφαλίζουν την ορθή ερμηνεία των στατιστικών μεγεθών σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς.

1.3.1. Εισαγωγή στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές (City Logistics) στην Ελλάδα

Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές (City Logistics) διαδραματίζουν έναν απολύτως καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη οικονομία και κοινωνία, καθώς αποτελούν τον ζωτικό κρίκο της αλυσίδας εφοδιασμού που συνδέει τους παραγωγούς και τους

προμηθευτές με τους λιανεμπόρους και τους τελικούς καταναλωτές που ζουν και δραστηριοποιούνται στο αστικό περιβάλλον (Zeimpekis, 2023). Σύμφωνα με τον ορισμό των Taniguchi et al. (1999), ως αστική εφοδιαστική (city logistics) ορίζεται η διαδικασία της πλήρους βελτιστοποίησης των δραστηριοτήτων εφοδιασμού των πόλεων, λαμβάνοντας υπόψη τις κοινωνικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και ενεργειακές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη μεταφορά εμπορευμάτων (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Αυτό το εξαιρετικά περίπλοκο δίκτυο δεν περιορίζεται μόνο στην απλή μετακίνηση αγαθών, αλλά περιλαμβάνει την αποτελεσματική οργάνωση της παράδοσης (delivery), της συλλογής (pick-up), του χειρισμού, της ολιγόωρης αποθήκευσης, της διαχείρισης αποθεμάτων, καθώς και των αντίστροφων ροών (reverse logistics), όπως είναι οι επιστροφές προϊόντων και η διαχείριση απορριμμάτων (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Η Σημασία του «Τελευταίου Μιλίου» (Last-Mile Delivery) και οι Παράγοντες Ανάπτυξης Το πιο απαιτητικό, πολύπλοκο και δαπανηρό τμήμα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών είναι το λεγόμενο «τελευταίο μίλι» (last-mile), δηλαδή ο τελικός κρίκος της αλυσίδας που αφορά την παράδοση των αγαθών από το κατώτατο σημείο τήρησης αποθέματος στον τελικό καταναλωτή (Zeimpekis, 2023). Το κόστος της παράδοσης του τελευταίου μιλίου υπολογίζεται ότι αντιπροσωπεύει συνήθως το 30% έως 40% του συνολικού μεταφορικού κόστους, ενώ ορισμένες μελέτες (π.χ. Gevaers et al., 2009) το τοποθετούν σε ένα εύρος μεταξύ 13% και 75% του συνολικού κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021; Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021). Η ραγδαία ανάπτυξη του συγκεκριμένου κλάδου τα τελευταία χρόνια οφείλεται σε πολυάριθμους παράγοντες, με κυριότερο την ταχεία αστικοποίηση. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία του ΟΗΕ, το επίπεδο αστικοποίησης στην Ευρώπη προβλέπεται να αγγίξει το 83,7% μέχρι το έτος 2050, ασκώντας τεράστια πίεση στις υφιστάμενες μεταφορικές υποδομές και καθιστώντας απολύτως αναγκαία τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών διανομής (Zeimpekis, 2023).

Παράλληλα, η έκρηξη του ηλεκτρονικού εμπορίου (e-commerce), η οποία καταγράφει ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης της τάξης του 10% με 20%, έχει αλλάξει ριζικά τη συμπεριφορά των καταναλωτών, δημιουργώντας μαζική ζήτηση για παραδόσεις κατ' οίκον (home delivery) και ταχείες εξυπηρετήσεις, συχνά εντός της ίδιας ημέρας (same-day delivery) (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Οι σύγχρονοι πελάτες διατηρούν πλέον πολύ υψηλές προσδοκίες όσον αφορά την αξιοπιστία, την ταχύτητα και την ιχνηλασιμότητα (product tracking), απαιτώντας ολοκληρωμένη εικόνα (end-to-end visibility) για τον ακριβή χρόνο και τόπο παράδοσης των αγαθών τους μέσω των έξυπνων συσκευών τους (Zeimpekis, 2023). Αυτή η τάση επιταχύνθηκε δραματικά κατά τη διάρκεια της υγειονομικής κρίσης του COVID-19, όπου οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές αποτέλεσαν τον βασικό πυλώνα επιβίωσης της κοινωνίας, εξασφαλίζοντας την τροφοδοσία των σούπερ μάρκετ, τη διανομή ιατροφαρμακευτικού υλικού (όπως τα εμβόλια) και την απρόσκοπτη λειτουργία του λιανεμπορίου (Κωστοπούλου, 2021).

Περιβαλλοντικές, Κοινωνικές και Κυκλοφοριακές Προκλήσεις στα Αστικά Κέντρα Η έντονη μεταφορική δραστηριότητα εντός των αστικών ιστών συνεπάγεται μια σειρά από οξύτατες περιβαλλοντικές και κυκλοφοριακές προκλήσεις (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Τα οχήματα εμπορευματικών μεταφορών στην Ευρώπη ευθύνονται για το 25% περίπου των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO2) στα αστικά κέντρα, καθώς και για το 30% έως 50% των υπόλοιπων ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως τα μικροσωματίδια (PM10) (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Επιπλέον, συμβάλλουν δραματικά στην ηχορύπανση, την κυκλοφοριακή συμφόρηση (congestion) και τη μείωση της οδικής ασφάλειας (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Η διεξαγωγή διανομών σε περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή και κτιριακή πυκνότητα υπόκειται σε αυστηρούς χωρικούς και χρονικούς περιορισμούς (Κωστοπούλου, 2021). Η έλλειψη εξειδικευμένων υποδομών και ειδικών χώρων στάθμευσης για φόρτωση και εκφόρτωση (loading zones) αναγκάζει τους οδηγούς των φορτηγών να καταφεύγουν σε παράνομες πρακτικές, όπως το διπλοπαρκάρισμα ή η στάθμευση πάνω σε πεζοδρόμια

(Κωστοπούλου, 2021). Αυτό το φαινόμενο, σε συνδυασμό με την κυκλοφορία των οχημάτων τροφοδοσίας τις ίδιες ώρες αιχμής με τα επιβατικά Ι.Χ., προκαλεί κυκλοφοριακό χάος και τεράστιες καθυστερήσεις, καθιστώντας αδύνατη τη βέλτιστη δρομολόγηση και αυξάνοντας κατακόρυφα την κατανάλωση καυσίμων και το λειτουργικό κόστος των επιχειρήσεων (Κωστοπούλου, 2021).

Η Υφιστάμενη Κατάσταση του Κλάδου στην Ελλάδα και την Αττική Στην Ελλάδα, παρά τη γεωστρατηγική θέση της χώρας και τη συμβολή των οδικών μεταφορών κατά 7% στο ΑΕΠ και 7% στην απασχόληση, ο κλάδος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών χαρακτηρίζεται από σημαντικές παθογένειες, κατακερματισμό και έλλειψη σύγχρονων πρακτικών συνεργασίας (ΕΥ, 2021; Zeimpekis, 2023). Η αγορά παροχής υπηρεσιών logistics προς τρίτους (3PL) αποτελείται κυρίως από μικρές εταιρείες με πολύ χαμηλά περιθώρια κέρδους, όπου ο μέσος πάροχος διαθέτει μόλις 1,5 φορτηγά (ΕΥ, 2021). Υπάρχει χαρακτηριστική απουσία διάθεσης για συνεργασίες (συνέργειες) μεταξύ των μεταφορικών εταιρειών, γεγονός που εμποδίζει την ενοποίηση των φορτίων (consolidation) (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Εστιάζοντας ειδικότερα στη Μητροπολιτική περιοχή της Αττικής, το υφιστάμενο μοντέλο λειτουργίας των αστικών διανομών κρίνεται ως απολύτως μη βιώσιμο (Κωστοπούλου, 2021). Τα στατιστικά στοιχεία είναι αποκαλυπτικά: τα φορτηγά διανομής κινούνται άδεια στο 60% των ημερήσιων διαδρομών τους, επιβαρύνοντας το αστικό οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Αττικής κατά 15% και παράγοντας τεράστιους όγκους περιττών ρύπων (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Σε αντίθεση με τις εθνικές εμπορευματικές μεταφορές, όπου η πληρότητα των φορτηγών (load factor) στην Ελλάδα ξεπερνά το 70%, στις αστικές διανομές εντός των Αθηνών ο δείκτης αυτός είναι απελπιστικά χαμηλός (Κωστοπούλου, 2021).

Ένα ακόμη τεράστιο αγκάθι αποτελεί η γήρανση του στόλου των επαγγελματικών οχημάτων. Ενώ γενικά ο ελληνικός στόλος είναι από τους γηραιότερους στην Ευρώπη, ειδικά τα οχήματα που εκτελούν διανομές (last-mile) εντός της Αττικής έχουν ηλικία που

ξεπερνά κατά μέσο όρο τα 20 έτη, όντας εξαιρετικά ρυπογόνα και τεχνολογικά παρωχημένα (Κωστοπούλου, 2021). Η απουσία υποδομών, όπως οργανωμένα Αστικά Κέντρα Ενοποίησης Εμπορευμάτων (ΑΚΕΕ), καθώς και η έλλειψη ολοκληρωμένου ψηφιακού ελέγχου – αφού ελάχιστες επιχειρήσεις διαθέτουν συστήματα δυναμικής δρομολόγησης και τηλεματικής παρακολούθησης του στόλου – διαιωνίζουν την αναποτελεσματικότητα (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Θεσμικό Πλαίσιο και η Ανάγκη για Μετάβαση σε "Έξυπνες" Διανομές Επιπροσθέτως, το ρυθμιστικό πλαίσιο στα μεγάλα ελληνικά αστικά κέντρα δυσχεραίνει το μεταφορικό έργο. Στην Αθήνα, η τροφοδοσία υπόκειται σε έναν κατακερματισμένο καμβά κανονισμών, όπως ο «Μικρός Δακτύλιος», η «Μπλε Ζώνη» και το «Εμπορικό Τρίγωνο», που απαγορεύουν την είσοδο βαρέων οχημάτων συγκεκριμένες ώρες, περιορίζοντας τη στάθμευση (έως 30 λεπτά) ή επιβάλλοντας απαγορεύσεις πρόσβασης, αναγκάζοντας τις εταιρείες να χρησιμοποιούν περισσότερα και μικρότερα βαν, πολλαπλασιάζοντας έτσι τον αριθμό των διαδρομών (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Η τοπική αυτοδιοίκηση εμφανίζεται συχνά διστακτική να εφαρμόσει ριζοσπαστικές λύσεις αειφορίας, ενώ οι ίδιες οι μεταφορικές εταιρείες αδυνατούν, λόγω οικονομικής δυσπραγίας, να επενδύσουν στη μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση ή σε "έξυπνα" πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης στόλου (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Όπως καθίσταται σαφές, το κυκλοφοριακό κομφούζιο, η περιβαλλοντική υποβάθμιση και το απαγορευτικό λειτουργικό κόστος των υφιστάμενων πρακτικών επιτάσσουν τη ριζική αναδιάρθρωση του κλάδου (Κωστοπούλου, 2021). Υπό το πρίσμα των ευρωπαϊκών επιταγών για μείωση των εκπομπών (Fit for 55) και για μηδενικές εκπομπές (zero emissions) έως το 2050, αναδύεται ως απόλυτη και άμεση προτεραιότητα η υιοθέτηση ενός νέου, τεχνολογικά προηγμένου μοντέλου αστικών διανομών (Zeimpekis, 2023). Ένα τέτοιο μοντέλο θα πρέπει να βασίζεται στη μετάβαση στα ηλεκτρικά φορτηγά, στην αξιοποίηση προηγμένων αλγορίθμων δρομολόγησης (Vehicle Routing Problems) και στην κεντρική ενορχήστρωση (control towers), ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η οικονομική

βιωσιμότητα των επιχειρήσεων, η αποσυμφόρηση των δρόμων και η βελτίωση της ποιότητας ζωής των Ελλήνων πολιτών στα αστικά κέντρα (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

1.3.2. Περιβαλλοντικές προκλήσεις και η αναγκαιότητα μετάβασης στα ηλεκτρικά φορτηγά

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών, η ραγδαία αστικοποίηση και η συνεπακόλουθη αύξηση της εμπορευματικής κίνησης στα σύγχρονα αστικά κέντρα έχουν αναδείξει τις αστικές εμπορευματικές μεταφορές (City Logistics) σε μία από τις κυριότερες πηγές περιβαλλοντικής υποβάθμισης (Zeimpekis, 2023). Η διακίνηση αγαθών με τη χρήση συμβατικών οχημάτων παροχής υπηρεσιών προκαλεί σοβαρότατες αρνητικές εξωτερικές επιδράσεις (externalities), οι οποίες επηρεάζουν δυσμενώς το περιβάλλον, την ποιότητα ζωής των πολιτών, την οδική ασφάλεια, αλλά και την ίδια την αστική υποδομή (Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021). Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές στην Ευρώπη είναι υπεύθυνες για το 25% περίπου των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που καταγράφονται στις πόλεις, καθώς και για ένα τεράστιο ποσοστό της τάξης του 30% έως 50% των υπόλοιπων ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως τα εξαιρετικά επιβλαβή για τη δημόσια υγεία μικροσωματίδια (PM10) και τα οξείδια του αζώτου (NOx) (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Εκτός από την ατμοσφαιρική ρύπανση, τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα φορτηγά διανομής αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες της ηχορύπανσης και της κυκλοφοριακής συμφόρησης, υποβαθμίζοντας δραματικά το αστικό οικοσύστημα (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Ιδιαίτερη αίσθηση προκαλεί το γεγονός ότι η διανομή των αστικών εμπορευμάτων αποδεικνύεται κατά μέσο όρο δύο φορές πιο ρυπογόνα ανά διανυόμενο χιλιόμετρο σε σύγκριση με τις υπεραστικές ή εθνικές εμπορευματικές μεταφορές (Κωστοπούλου, 2021).

Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται σε τρεις κρίσιμους παράγοντες που χαρακτηρίζουν τις διανομές εντός πόλεων: Πρώτον, στην ηλικία των οχημάτων, καθώς αποτελεί συνήθη πρακτική των εταιρειών να δρομολογούν στον αστικό ιστό οχήματα τα οποία βρίσκονται στο τέλος της διάρκειας ζωής τους, όντας εξαιρετικά ρυπογόνα και τεχνολογικά παρωχημένα (Κωστοπούλου, 2021). Δεύτερον, στο μέγεθος των οχημάτων, δεδομένου ότι οι χωρικοί περιορισμοί των πόλεων (π.χ. στενοί δρόμοι, έλλειψη χώρων στάθμευσης) επιβάλλουν τη χρήση μικρότερων φορτηγών, γεγονός που αναγκάζει τις εταιρείες να εκτελούν πολλαπλάσια δρομολόγια για να μεταφέρουν τον ίδιο όγκο εμπορευμάτων σε σχέση με ένα βαρύ όχημα (Κωστοπούλου, 2021). Τρίτον, στους περιορισμούς ταχύτητας και τις κυκλοφοριακές συνθήκες, αφού οι συνεχείς στάσεις και εκκινήσεις (stop-and-go), το διπλοπαρκάρισμα και οι αναμονές σε φωτεινούς σηματοδότες αυξάνουν κατακόρυφα την κατανάλωση συμβατικών καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων (Κωστοπούλου, 2021).

Η Ελληνική Πραγματικότητα: Ένας γηρασμένος και ενεργοβόρος στόλος εστιάζοντας στην Ελλάδα και ειδικότερα στη Μητροπολιτική Περιφέρεια της Αττικής, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μεγεθύνονται δραματικά εξαιτίας των ενδογενών παθογενειών του κλάδου (Κωστοπούλου, 2021). Ο ελληνικός στόλος επαγγελματικών οχημάτων είναι από τους γηραιότερους στην Ευρώπη, με το μεγαλύτερο μέρος του εμπορευματικού έργου να εκτελείται από παλαιά οχήματα, υπονομεύοντας την περιβαλλοντική βιωσιμότητα (ΕΣΣΜ, 2019). Ειδικά ο στόλος διανομής εντός του λεκανοπεδίου της Αττικής είναι εξαιρετικά γερασμένος, καθώς η μέση ηλικία των φορτηγών ξεπερνά πλέον τα 20 έτη, ενώ ελάχιστες επιχειρήσεις (μόλις το 9%) διαθέτουν σύγχρονα οχήματα (Κωστοπούλου, 2021).

Το υφιστάμενο μοντέλο λειτουργίας των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Αττική χαρακτηρίζεται ως απολύτως μη βιώσιμο, έντονα ενεργοβόρο και με βαρύτατες συνέπειες για την υγεία των πολιτών (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Η απουσία συνεργατικών σχημάτων (collaboration) μεταξύ των μεταφορικών εταιρειών και η έλλειψη ενοποίησης των φορτίων έχουν ως αποτέλεσμα τα φορτηγά να κινούνται εντελώς άδεια στο 60% των ημερήσιων διαδρομών τους (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου,

2021). Αυτή η εντυπωσιακή αναποτελεσματικότητα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, αν και η αστική μεταφορά εμπορευμάτων αντιπροσωπεύει μόλις το 15% της συνολικής κυκλοφορίας στο αστικό δίκτυο, ευθύνεται δυσανάλογα για το 30% έως 50% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και το 25% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της Περιφέρειας Αττικής (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Ευρωπαϊκές Οδηγίες και Στρατηγικοί Στόχοι Μείωσης των Ρύπων Αναγνωρίζοντας το κρίσιμο αυτό πρόβλημα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει ένα εξαιρετικά αυστηρό και δεσμευτικό ρυθμιστικό πλαίσιο, επιβάλλοντας τη ριζική μετάβαση σε «πράσινες» αστικές διανομές (ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ, 2020). Ήδη από τη Λευκή Βίβλο των Μεταφορών του 2011, τέθηκε ως κεντρικός ευρωπαϊκός στόχος η επίτευξη αστικών εμπορευματικών μεταφορών με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO2-free city logistics) έως το έτος 2030 στα μεγάλα αστικά κέντρα (ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ, 2020; Κωστοπούλου, 2021). Παράλληλα, η μακροχρόνια στρατηγική της Ε.Ε. προβλέπει τη συνολική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές κατά 80% έως 85% μέχρι το 2050, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ, 2020).

Πρόσφατα, η στρατηγική αυτή ενισχύθηκε περαιτέρω μέσω του πακέτου πολιτικής "Fit for 55", το οποίο επιτάσσει τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2035 και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας (zero emissions) έως το 2050 (Zeimpekis, 2023). Οι κανονισμοί αυτοί απαιτούν από όλα τα Κράτη-Μέλη, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, να εγκαταλείψουν σταδιακά τα ορυκτά καύσιμα και να υιοθετήσουν εναλλακτικές μορφές ενέργειας (ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ, 2020). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ορίσει ρητά την ηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο, τα βιοκαύσιμα και το φυσικό αέριο ως τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα που διαθέτουν τη δυναμική να υποκαταστήσουν μακροπρόθεσμα το πετρέλαιο στον τομέα των μεταφορών (Zeimpekis, 2023).

Για την επιβολή αυτών των στόχων σε τοπικό επίπεδο, οι ευρωπαϊκές πόλεις δημιουργούν εκτεταμένες Ζώνες Χαμηλών Εκπομπών (Low Emission Zones - LEZ) και Ζώνες

Μηδενικών Εκπομπών (Zero Emission Zones - ZEZ) στα ιστορικά και εμπορικά τους κέντρα (Zeimpekis, 2023). Στις LEZ επιβάλλεται αυστηρή απαγόρευση εισόδου ή καταβολή υψηλών διοδίων στα πλέον ρυπογόνα οχήματα, προκειμένου να μειωθούν δραστικά τα αιωρούμενα σωματίδια και το διοξείδιο του αζώτου (Zeimpekis, 2023). Αντίστοιχα, οι ZEZ απαγορεύουν πλήρως την κυκλοφορία οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης (βενζινοκινητήρες, πετρελαιοκινητήρες), επιτρέποντας την πρόσβαση αποκλειστικά σε οχήματα μηδενικών εκπομπών, όπως είναι τα αμιγώς ηλεκτρικά φορτηγά και τα ηλεκτρικά τρίκυκλα (e-cargo bikes), βελτιώνοντας παράλληλα και τον ακουστικό φόρτο της πόλης, καθώς τα οχήματα αυτά είναι πρακτικά αθόρυβα (Zeimpekis, 2023).

Η Αναγκαιότητα Μετάβασης στα Ηλεκτρικά Φορτηγά και οι Εθνικές Πολιτικές Υπό το πρίσμα αυτών των ασφυκτικών περιβαλλοντικών προκλήσεων και νομοθετικών δεσμεύσεων, η μετάβαση του στόλου των αστικών διανομών προς την ηλεκτροκίνηση δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική επιλογή, αλλά μια απόλυτη και αδήριτη αναγκαιότητα (Κωστοπούλου, 2021). Η αντικατάσταση των ρυπογόνων φορτηγών diesel από υβριδικά και αμιγώς ηλεκτρικά ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (vans) προσφέρει την πλέον βιώσιμη λύση για την παράδοση στο «τελευταίο μίλι» (last-mile), εξασφαλίζοντας μηδενικές εκπομπές ρύπων σε τοπικό επίπεδο και αισθητή μείωση της ηχορύπανσης (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021).

Για την υποστήριξη αυτής της κομβικής μετάβασης στην Ελλάδα, αναπτύσσονται ήδη εθνικές στρατηγικές και προγράμματα επιδοτήσεων. Κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζει η δράση «Κινούμαι Ηλεκτρικά» του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η οποία χορηγεί «οικολογικό bonus» υπό τη μορφή οικονομικής επιδότησης για την αγορά ή μίσθωση αμιγώς ηλεκτρικών ή υβριδικών οχημάτων επαγγελματικής χρήσης, με ταυτόχρονη επιδότηση για την απόσυρση του παλαιού ρυπογόνου στόλου (Κωστοπούλου, 2021). Ο πρωταρχικός σκοπός της δράσης είναι η ταχεία διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο εθνικό δυναμικό, ώστε να μειωθούν δραστικά οι εκπομπές ρύπων, σε πλήρη ευθυγράμμιση με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Κωστοπούλου, 2021).

Επιπρόσθετα, η αναμενόμενη Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) αναφορικά με τα Αστικά Κέντρα Ενοποίησης Εμπορευμάτων (ΑΚΕΕ) πρόκειται να επιβάλει ρητά τη χρήση καθαρών τεχνολογιών και οχημάτων μηδενικών ρύπων για τις παραδόσεις εντός του αστικού ιστού (Zeimpekis, 2023).

Παρά ταύτα, η ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών φορτηγών προσκρούει σε σημαντικά πρακτικά εμπόδια που απαιτούν συντονισμένες λύσεις. Το υψηλό κόστος κτήσης των ηλεκτρικών οχημάτων συγκριτικά με τα συμβατικά, η περιορισμένη χωρητικότητα και αυτονομία της ηλεκτρικής μπαταρίας, ο χρονοβόρος κύκλος φόρτισης, καθώς και η δραματική έλλειψη δημοσίων και ιδιωτικών σταθμών φόρτισης, αποτελούν παράγοντες που καθυστερούν την άμεση εμπορική τους διείσδυση στις εταιρείες 3PL (Zeimpekis, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Γι' αυτόν τον λόγο, καθίσταται απαραίτητο οι Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Δήμοι) να προσφέρουν επιπρόσθετα τοπικά κίνητρα, όπως παραδείγματος χάριν η μείωση των δημοτικών τελών για εκείνες τις επιχειρήσεις που αποδεδειγμένα τροφοδοτούνται από εταιρείες που χρησιμοποιούν «πράσινες» τεχνολογίες και ηλεκτρικά οχήματα (Zeimpekis, 2023). Συμπερασματικά, η αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού αδιεξόδου απαιτεί την ολιστική ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, προετοιμάζοντας το έδαφος για την αναλυτική εξέταση των τεχνικών χαρακτηριστικών τους, των περιορισμών της μπαταρίας τους και του απαιτούμενου μεγέθους του στόλου.

1.3.3. Χαρακτηριστικά και περιορισμοί του στόλου ηλεκτρικών φορτηγών

Η υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων (Η/Ο) στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές θεωρείται η επικρατέστερη και πλέον βιώσιμη λύση για τη διανομή στο «τελευταίο μίλι» (last-mile), ωστόσο η πλήρης ενσωμάτωσή τους στην εφοδιαστική αλυσίδα προσκρούει σε συγκεκριμένους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Αν και το ρυθμιστικό πλαίσιο συχνά ευνοεί τη χρήση τους –για παράδειγμα, στο κέντρο της

Αθήνας τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα μεικτού βάρους έως 2,5 τόνων εξαιρούνται από πολλούς χρονικούς και κυκλοφοριακούς περιορισμούς που ισχύουν για τον Δακτύλιο (Κωστοπούλου, 2021)– η αγορά συνεχίζει να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις ως προς την αυτονομία τους, την υποδομή φόρτισης, το μέγεθός τους και το αυξημένο κόστος κτήσης.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Χωρητικότητα και Κόστος Η αγορά προσφέρει πλέον ποικίλες επιλογές ηλεκτρικών βαν (vans) και ελαφρών φορτηγών που είναι ιδανικά για τις συνθήκες του αστικού ιστού. Ενδεικτικά μοντέλα της αγοράς, όπως τα Nissan e-NV200, Peugeot e-Expert (με μπαταρία 50 kWh), Volkswagen e-Crafter και Mercedes-Benz eVito, προσφέρουν ωφέλιμο φορτίο που κυμαίνεται από περίπου 700 έως 1.400 κιλά και ωφέλιμο όγκο φόρτωσης από 4,2 έως 10,7 κυβικά μέτρα (Κωστοπούλου, 2021). Πολλά από αυτά τα οχήματα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να φιλοξενήσουν έως και δύο ευρωπαλέτες, καθιστώντας τα πρακτικά για την τροφοδοσία καταστημάτων λιανικής, αν και η χωρητικότητά τους παραμένει μικρότερη συγκριτικά με τα παραδοσιακά βαρέα οχήματα διανομής. Παράλληλα, εισάγονται σταδιακά στην Ελλάδα και μεγαλύτερα αμιγώς ηλεκτρικά φορτηγά, όπως τα Volvo FL και FE Electric, τα οποία μπορούν να εξυπηρετήσουν μεικτό βάρος έως 16,7 και 27 τόνους αντίστοιχα. Εντούτοις, το υψηλό κόστος κτήσης παραμένει ένας από τους κυριότερους ανασταλτικούς παράγοντες. Η στελέχωση ενός στόλου 10 ηλεκτρικών βαν εκτιμάται, κατά μέσο όρο, στις 500.000 ευρώ, γεγονός που καθιστά αναγκαία την κρατική επιδότηση μέσω προγραμμάτων όπως το «Κινούμαι Ηλεκτρικά» (Κωστοπούλου, 2021).

Χωρητικότητα Ηλεκτρικής Μπαταρίας και Ημερήσια Διανυόμενη Απόσταση Το κυριότερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών φορτηγών σχετίζεται άμεσα με τη χωρητικότητα της ηλεκτρικής τους μπαταρίας και την επακόλουθη περιορισμένη αυτονομία τους. Βάσει ερευνών και πρακτικών εφαρμογών, η αυτονομία ενός μέσου ηλεκτροκίνητου οχήματος διανομής υπολογίζεται συνήθως σε 120 έως 150 χιλιόμετρα χωρίς να χρειαστεί επαναφόρτιση, ενώ σε άλλες εφαρμογές ελαφρών οχημάτων (όπως στο Ρότερνταμ) η

εμβέλεια κυμαίνεται στα 75 με 90 χιλιόμετρα (EEL, 2023; Κωστοπούλου, 2021). Ο περιορισμός αυτός της μπαταρίας συνεπάγεται ότι η μέγιστη ημερήσια διανυόμενη απόσταση είναι αυστηρά καθορισμένη, γεγονός που συχνά αποτρέπει την εκτέλεση πολλαπλών διαδοχικών δρομολογίων κατά τη διάρκεια της ίδιας ημέρας. Επιπροσθέτως, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται δραματικά όταν το όχημα καλείται να μεταφέρει ψυχόμενο φορτίο. Ο ψυκτικός θάλαμος αντλεί ενέργεια απευθείας από την ίδια μπαταρία, γεγονός που μειώνει δραστικά τα διαθέσιμα χιλιόμετρα αυτονομίας και καθιστά πρακτικά αδύνατες τις διανομές μεγάλων αποστάσεων για ευπαθή προϊόντα χωρίς συχνή ενδιάμεση φόρτιση.

Πλήθος Ημερήσιων Διανομών, Χρόνος Ταξιδιού και Χρόνος Φόρτισης Εξαιτίας της περιορισμένης αυτονομίας, ο ημερήσιος χρόνος ταξιδιού και το πλήθος των ημερήσιων διανομών ανά όχημα αναπόφευκτα συμπιέζονται. Για τον λόγο αυτό, τα ηλεκτρικά φορτηγά ενδείκνυνται πρωτίστως για αστικά δρομολόγια που χαρακτηρίζονται από πολύ πυκνό δίκτυο παράδοσης και αφορούν μικρές γεωγραφικές ζώνες λίγων τετραγωνικών χιλιομέτρων, όπως το Ιστορικό Τρίγωνο ή η Μπλε Ζώνη της Αθήνας, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων παράδοσης είναι ελάχιστες. Επιπλέον, ο χρόνος φόρτισης της ηλεκτρικής μπαταρίας και οι ανεπαρκείς υποδομές δημοσίων ή ιδιωτικών σταθμών φόρτισης αποτελούν πρόσθετους ανασταλτικούς παράγοντες στην οργάνωση του ημερήσιου προγράμματος (scheduling) των εταιρειών. Σε αντίθεση με το συμβατικό όχημα diesel που ανεφοδιάζεται σε ελάχιστα λεπτά, ο απαιτούμενος χρόνος επαναφόρτισης εντός του ωραρίου λειτουργίας δημιουργεί καθυστερήσεις, αδρανοποιώντας το όχημα (downtime) για σημαντικό χρονικό διάστημα και περιορίζοντας τον ωφέλιμο χρόνο που αυτό βρίσκεται σε κίνηση (EEL, 2023).

Επιπτώσεις στο Μέγεθος του Στόλου (Fleet Size) Όλοι οι προαναφερθέντες περιορισμοί (μικρότερη χωρητικότητα φορτίου, περιορισμένη αυτονομία και χρονοβόρα φόρτιση) διαμορφώνουν καθοριστικά τις αποφάσεις των επιχειρήσεων για το τελικό μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών φορτηγών. Εφόσον ένα ηλεκτρικό βαν αδυνατεί να

εκτελέσει τον ίδιο αριθμό δρομολογίων (λόγω μπαταρίας) και να μεταφέρει τον ίδιο όγκο φορτίου (λόγω μικρότερων διαστάσεων) με ένα βαρύ συμβατικό όχημα σε μία βάρδια, οι εταιρείες 3PL και οι λιανέμποροι ενδέχεται να αναγκαστούν να προμηθευτούν μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων για να καλύψουν ακριβώς τον ίδιο ημερήσιο όγκο παραγγελιών. Η πρόκληση αυτή γεννά μια νέα και εξαιρετικά σύνθετη επιχειρησιακή ανάγκη: την παράλληλη και συνδυασμένη επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης και της φόρτισης (Vehicle Routing and Charging Problem) των ηλεκτρικών φορτηγών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το συνολικό μέγεθος του απαιτούμενου στόλου και να διασφαλιστεί η οικονομική βιωσιμότητα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών.

1.3.4. Στατιστικά δεδομένα και παράμετροι του ημερήσιου μεταφορικού έργου

Οι οδικές εμπορευματικές μεταφορές διαδραματίζουν απολύτως κυρίαρχο ρόλο στην Ελλάδα, καθώς η συμμετοχή τους προσεγγίζει το 98% του συνόλου των εμπορευματικών μεταφορών της χώρας, προσφέροντας την απαραίτητη ευελιξία για παραδόσεις από πόρτα σε πόρτα (door-to-door) (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Σύμφωνα με τα επίσημα στατιστικά δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ για το έτος 2024, το συνολικό βάρος των φορτίων που διακινήθηκαν με φορτηγά οχήματα ταξινομημένα στην Ελλάδα ανήλθε σε 258.995 χιλιάδες τόνους, σημειώνοντας μείωση της τάξης του 6,0% σε σύγκριση με το 2023, ενώ το συνολικό μεταφορικό έργο ξεπέρασε τα 20,6 δισεκατομμύρια τονοχιλιόμετρα (ΕΛΣΤΑΤ, 2025). Παρά τη γενική μείωση του όγκου, καταγράφηκε σημαντική αύξηση 27,6% στα εμπορεύματα που μεταφέρονται σε παλέτες, τα οποία άγγιξαν τις 47.537,6 χιλιάδες τόνους, γεγονός που αντανακλά την ανάγκη για τυποποιημένες συσκευασίες στις αστικές διανομές (ΕΛΣΤΑΤ, 2025).

Σε επίπεδο γεωγραφικής κατανομής, η Περιφέρεια Αττικής αποτελεί τον αδιαμφισβήτητο κεντρικό κόμβο της χώρας για τις εθνικές μεταφορές, συγκεντρώνοντας τον μεγαλύτερο όγκο φορτώσεων, με 66.328,1 χιλιάδες τόνους, και εκφορτώσεων, με

66.678,3 χιλιάδες τόνους, ακολουθούμενη από την Κεντρική Μακεδονία (η οποία ωστόσο προηγείται στις διεθνείς μεταφορές) και τη Στερεά Ελλάδα (ΕΛΣΤΑΤ, 2025). Περαιτέρω πτωτική τάση καταγράφηκε στα πιο πρόσφατα στοιχεία του τρίτου τριμήνου του 2025, όπου το συνολικό βάρος των διακινούμενων φορτίων ανήλθε σε 54.622,7 χιλιάδες τόνους, παρουσιάζοντας μείωση 17,6% σε σχέση με το αντίστοιχο τρίμηνο του 2024 (ΕΛΣΤΑΤ, 2026).

- Χαρακτηριστικά στόλου: μεταφορική ικανότητα και κενά χιλιόμετρα. Εστιάζοντας στο αστικό περιβάλλον, οι παράμετροι του ημερήσιου μεταφορικού έργου διαφοροποιούνται αισθητά. Ενώ στις εθνικές εμπορευματικές μεταφορές στην Ελλάδα ο δείκτης πληρότητας των φορτηγών (load factor) ξεπερνά το 70% –επίδοση σαφώς υψηλότερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο του 40%–, εντός των αστικών κέντρων, όπως η Αθήνα, τα οχήματα υπολειτουργούν (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Επίσημα δεδομένα της Περιφέρειας Αττικής δείχνουν ότι τα φορτηγά διανομής κινούνται εντελώς άδεια στο 60% των ημερήσιων διαδρομών τους, φαινόμενο που οφείλεται κυρίως στις διαδρομές επιστροφής (backhauling) προς τις αποθήκες μετά την ολοκλήρωση των παραδόσεων (PP City Logistics, 2023; Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Το πρόβλημα της αναποτελεσματικότητας εντείνεται από τον κατακερματισμό του κλάδου των 3PL, όπου ο μέσος πάροχος διαθέτει μόλις 1,5 φορτηγά (EY, 2021).
- Αναφορικά με το μέγεθος του στόλου και τη χωρητικότητά του, ο κλάδος των σούπερ μάρκετ προσφέρει ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα. Μελετώντας τον ιδιόκτητο στόλο μεγάλης αλυσίδας (ΑΒ Βασιλόπουλος), ο οποίος αριθμεί 67 οχήματα διανομής, προκύπτει ότι η πλειονότητα των φορτηγών (33%) έχει μικτό βάρος 16 τόνων, ενώ τα συνηθέστερα οχήματα έχουν χωρητικότητα 15 και 18 ευρωπαλετών (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Ο συγκεκριμένος τύπος οχημάτων καθορίζει τόσο τη δυνατότητα πρόσβασης σε στενούς αστικούς δρόμους όσο και τον όγκο των προϊόντων που μπορούν να

διανεμηθούν σε κάθε δρομολόγιο.

- Ημερήσια διανυόμενη απόσταση, χρόνος ταξιδιού και πλήθος διανομών. Οι αστικές διανομές αντιμετωπίζουν δομικές προκλήσεις, καθώς το πλήθος των ημερήσιων διανομών χαρακτηρίζεται από παραδόσεις μικρότερων όγκων εμπορευμάτων με εξαιρετικά υψηλή συχνότητα προς τα σημεία πώλησης (λιανεμπόριο), γεγονός που δυσχεραίνει την ορθολογική ενοποίηση των φορτίων (consolidation) (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021).

Αυτό το κατακερματισμένο μοντέλο αυξάνει άμεσα την ημερήσια διανυόμενη απόσταση (συνολικά οχηματοχιλιόμετρα) και εκτοξεύει τον ημερήσιο χρόνο ταξιδιού, εξαιτίας της έντονης κυκλοφοριακής συμφόρησης και της έλλειψης χώρων στάθμευσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις αστικές διανομές, η παράνομη στάθμευση (διπλοπαρκάρισμα) αποτελεί το 50% των περιπτώσεων κατά την εκφόρτωση, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για μία μέση παράδοση σε ένα κατάστημα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 και 15 λεπτών (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Ο χρόνος αυτός προστίθεται στον συνολικό ημερήσιο χρόνο ταξιδιού, αδρανοποιώντας τον στόλο.

Η εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης και η προώθηση σεναρίων συνδυαστικής διανομής –μέσω Αστικών Κέντρων Ενοποίησης– μπορούν να συμπιέσουν δραστικά τα παραπάνω μεγέθη. Βάσει προσομοιώσεων δρομολόγησης στην Αττική, η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση 2 ή 3 καταστημάτων ανά όχημα (ενοποίηση) μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής ημερήσιας διανυόμενης απόστασης από 9% έως και 16%, ελαττώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό μέγεθος του απαιτούμενου στόλου οχημάτων (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021). Τέλος, ο αυστηρός σχεδιασμός των διαδρομών σε καθορισμένα χρονικά παράθυρα (time windows), καθώς και η μετατόπιση των δρομολογίων σε νυχτερινές ώρες, αποτελούν απαραίτητες παρεμβάσεις προκειμένου να αποφευχθούν οι ώρες αιχμής, να μειωθεί ο χρόνος του ταξιδιού και να αυξηθεί η αποδοτικότητα κάθε ημερήσιας διανομής (Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών, 2021; PP City Logistics, 2023).

1.3.5. Συστήματα αυτόματης δρομολόγησης (Vehicle Routing Systems) στις αστικές διανομές

1.3.5.1. Εισαγωγή στα Συστήματα Αυτόματης Δρομολόγησης και η Σημασία τους

Στο εξαιρετικά πολύπλοκο και δυναμικό περιβάλλον των αστικών εμπορευματικών μεταφορών, η ορθολογική διαχείριση του στόλου και η βελτιστοποίηση των διαδρομών αποτελούν τους κρισιμότερους παράγοντες για την επίτευξη οικονομικής και περιβαλλοντικής αειφορίας. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing System - VRS) αποτελεί μια εξελιγμένη τεχνολογική λύση που έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού και διαχείρισης των διαδρομών που ακολουθεί ένας στόλος επαγγελματικών οχημάτων (PP City Logistics, 2023). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί προηγμένους αλγορίθμους, δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και σύνθετες τεχνολογίες γεωγραφικής χαρτογράφησης (GIS) για την αποτελεσματική και αυτοματοποιημένη κατανομή εργασιών και προορισμών σε κάθε όχημα του στόλου (PP City Logistics, 2023). Με τον εξορθολογισμό της διαδικασίας σχεδιασμού των δρομολογίων, τα συστήματα αυτά στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού, στη βελτιστοποίηση του συντελεστή πληρότητας των οχημάτων, στη δραστική μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και, τελικά, στη βελτίωση της συνολικής επιχειρησιακής απόδοσης και εξοικονόμησης κόστους για τις επιχειρήσεις (PP City Logistics, 2023).

Στον πυρήνα ενός αυτοματοποιημένου συστήματος δρομολόγησης βρίσκεται η ικανότητά του να επιλύει σύνθετα μαθηματικά προβλήματα, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη πολλαπλούς και αυστηρούς περιορισμούς, όπως είναι η μέγιστη χωρητικότητα των οχημάτων, τα επιθυμητά παράθυρα παράδοσης των πελατών, οι τρέχουσες συνθήκες κυκλοφορίας στο αστικό οδικό δίκτυο, ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης (service time) σε κάθε σημείο παράδοσης, ακόμη και οι προβλέψεις των καιρικών συνθηκών (PP City Logistics, 2023). Τα υπερσύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν προγνωστικές αναλύσεις (predictive analytics) για τη δημιουργία των βέλτιστων διαδρομών, διασφαλίζοντας όχι

μόνο έγκαιρες παραδόσεις, αλλά και την αποφυγή περιοχών με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση (PP City Logistics, 2023).

1.3.5.2. Το Μαθηματικό Υπόβαθρο

Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP) Όλα τα σύγχρονα συστήματα αυτόματης δρομολόγησης βασίζονται στη θεωρητική και αλγοριθμική επίλυση του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP). Το VRP παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Dantzig και Ramser το έτος 1959, με την πρώτη αλγοριθμική προσέγγιση να εφαρμόζεται στη διανομή καυσίμων σε πρατήρια, ενώ το 1964 οι Clarke και Wright πρότειναν έναν "άπληστο" ευρετικό αλγόριθμο αποταμιεύσεων (savings algorithm), ο οποίος επέφερε σημαντικές βελτιώσεις (Κωστοπούλου, 2021). Το VRP αποτελεί, στην ουσία, μια γενίκευση του κλασικού Προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (Traveling Salesman Problem - TSP), καθώς αναζητά ένα πλήθος βέλτιστων διαδρομών στις οποίες κάθε όχημα ξεκινά από μία αποθήκη (depot), διατρέχει ένα σύνολο πελατών με αυστηρά καθορισμένη σειρά και επιστρέφει στον αρχικό κόμβο, με κύριο αντικειμενικό σκοπό την ελαχιστοποίηση του μεταφορικού κόστους και της συνολικής διανυόμενης απόστασης (Κωστοπούλου, 2021).

Καθώς το κλασικό πρόβλημα VRP ανήκει στην κατηγορία των NP-Hard (NP-Πολύπλοκων) προβλημάτων, η εξεύρεση της απόλυτα βέλτιστης λύσης για μεγάλους στόλους και πολλούς πελάτες απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ (Κωστοπούλου, 2021). Για την επίλυσή του εφαρμόζονται τρεις μεγάλες κατηγορίες μεθόδων: α) οι Ακριβείς μέθοδοι επίλυσης (Exact algorithms), που προβλέπουν τη συστηματική απαρίθμηση κάθε πιθανής λύσης, β) οι Ευρετικοί αλγόριθμοι (Heuristic algorithms), που επιτελούν μια περιορισμένη εξερεύνηση του χώρου των λύσεων παράγοντας ικανοποιητικές προσεγγίσεις σε σύντομο χρόνο, και γ) οι Μεθευρετικοί αλγόριθμοι (Metaheuristic algorithms), οι οποίοι συνδυάζουν διαδικασίες τοπικής αναζήτησης με στρατηγικές

αποφυγής τοπικών ελαχίστων για την εύρεση λύσεων εξαιρετικά υψηλής ποιότητας (Κωστοπούλου, 2021).

1.3.5.3. Παραλλαγές του VRP στις Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές

Στο αστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις έρχονται αντιμέτωπες με ποικίλους επιχειρησιακούς περιορισμούς, γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία εξειδικευμένων παραλλαγών του προβλήματος δρομολόγησης, οι οποίες ενσωματώνονται στα σύγχρονα VRS:

- Πρόβλημα Δρομολόγησης με Περιορισμένη Χωρητικότητα (Capacitated VRP - CVRP): Πρόκειται για την πιο θεμελιώδη παραλλαγή, όπου η ζήτηση κάθε πελάτη ικανοποιείται από ένα και μόνο όχημα, και το άθροισμα της ζήτησης όλων των πελατών σε μία διαδρομή δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τη μέγιστη μεταφορική ικανότητα (ωφέλιμο βάρος ή όγκο) του οχήματος (Κωστοπούλου, 2021).
- Πρόβλημα Δρομολόγησης με Χρονικά Παράθυρα (VRP with Time Windows - VRPTW): Αποτελεί ίσως την πιο κρίσιμη παραλλαγή για τα City Logistics. Εισάγει τον παράγοντα του χρόνου, απαιτώντας η εξυπηρέτηση του πελάτη να εκτελείται εντός ενός αυστηρά προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος (Κωστοπούλου, 2021). Τα χρονικά παράθυρα διακρίνονται σε "hard" (αυστηρά), όπου η παραβίασή τους καθιστά τη λύση ανέφικτη, και σε "soft" (ελαστικά), όπου επιτρέπονται αποκλίσεις (νωρίτερες ή αργότερες παραδόσεις) με την επιβολή μιας οικονομικής ποινής (penalty cost) στον αντικειμενικό στόχο του αλγορίθμου, αντανακλώντας τη μείωση της ποιότητας εξυπηρέτησης (Κωστοπούλου, 2021).
- Πρόβλημα Διανομής και Παραλαβής (VRP with Pickup and Delivery - VRPPD): Εδώ τα οχήματα δεν εκτελούν μόνο διανομές (linehauls) από την αποθήκη, αλλά και παραλαβές (backhauls) προϊόντων ή επιστροφών από τους πελάτες. Ο αλγόριθμος

πρέπει να εξασφαλίζει ότι το όχημα διαθέτει επαρκή κενό χώρο ανά πάσα στιγμή της διαδρομής του για να εκτελέσει την παραλαβή, ενώ υπάρχουν και παραλλαγές (Simultaneous pickup and delivery) όπου η παράδοση και η παραλαβή γίνονται ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο (Κωστοπούλου, 2021).

- Ομογενής και Ετερογενής Στόλος (HFVRP): Σε ένα ομογενές πρόβλημα όλα τα διαθέσιμα οχήματα έχουν την ίδια χωρητικότητα και το ίδιο κόστος λειτουργίας, ενώ στο ετερογενές πρόβλημα ο στόλος αποτελείται από οχήματα διαφόρων μεγεθών, κάτι εξαιρετικά σύνηθες στην Ελλάδα όπου χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα μικρά βαν και μεγάλα φορτηγά. Ο στόχος επεκτείνεται στην εξεύρεση της βέλτιστης σύνθεσης του στόλου (fleet composition) για την ελαχιστοποίηση του συνολικού παγίου και μεταβλητού κόστους (Κωστοπούλου, 2021).
- Πρόβλημα Πολλαπλών Αποθηκών (Multi-depot VRP): Όταν μια εταιρεία (π.χ. μια μεγάλη αλυσίδα σούπερ μάρκετ) διαθέτει πολλαπλά κέντρα διανομής στην Αττική, το σύστημα καλείται να αποφασίσει από ποια αποθήκη θα ξεκινήσει το κάθε όχημα για να ελαχιστοποιήσει τις επικαλύψεις (Κωστοπούλου, 2021).

1.3.5.4. Δυναμική και Στοχαστική Δρομολόγηση

Στην πραγματικότητα των αστικών κέντρων, τα σύγχρονα VRS δεν περιορίζονται πλέον στη στατική δρομολόγηση, όπου όλες οι πληροφορίες (παραγγελίες, τοποθεσίες, ζήτηση) είναι γνωστές εκ των προτέρων. Η πολυπλοκότητα των αστικών διανομών εισάγει την έννοια της Δυναμικής Δρομολόγησης (Dynamic VRP) και της Στοχαστικής Δρομολόγησης (Stochastic VRP) (Κωστοπούλου, 2021). Σε ένα δυναμικό περιβάλλον, οι πληροφορίες μεταβάλλονται συνεχώς: νέες παραγγελίες εισέρχονται ενώ τα οχήματα βρίσκονται ήδη καθ' οδόν, πελάτες ακυρώνουν αιτήματα, ή η διαθεσιμότητα των οχημάτων αλλάζει (π.χ. λόγω βλάβης) (Κωστοπούλου, 2021).

Αντίστοιχα, στο στοχαστικό VRP, παράμετροι όπως ο χρόνος ταξιδιού είναι τυχαίες μεταβλητές. Καθυστερήσεις λόγω απρόβλεπτης κυκλοφοριακής συμφόρησης, οδικών ατυχημάτων ή κακών καιρικών συνθηκών επηρεάζουν άμεσα τον προγραμματισμό (Κωστοπούλου, 2021). Με την ενσωμάτωση δυνατοτήτων εντοπισμού θέσης και επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο (real-time data), τα συστήματα αυτόματης δρομολόγησης μπορούν να αναπροσαρμόζουν (re-route) τις διαδρομές δυναμικά, εξασφαλίζοντας την ελάχιστη δυνατή διαταραχή του προγράμματος και ενημερώνοντας έγκαιρα τους πελάτες για πιθανές αποκλίσεις στους χρόνους άφιξης (ETA) (PP City Logistics, 2023).

1.3.5.5. Πλατφόρμες ενορχήστρωσης τελευταίου μιλίου (Control Towers) και τηλεματική

Η υλοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης στην πράξη γίνεται μέσω ισχυρών ψηφιακών εργαλείων, όπως τα Συστήματα Ενορχήστρωσης Τελευταίου Μιλίου (Control towers / last-mile orchestration platforms) και τα Συστήματα Διαχείρισης Στόλου (Fleet Management Systems) (PP City Logistics, 2023). Οι πλατφόρμες ενορχήστρωσης αυτοματοποιούν πλήρως τη διαδικασία, επιτρέποντας την άμεση λήψη, διαχείριση και ανάθεση έκτακτων αιτημάτων στους οδηγούς εν κινήσει, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους προαναφερθέντες περιορισμούς (PP City Logistics, 2023).

Αυτές οι πλατφόρμες διασυνδέονται άμεσα με συστήματα τηλεματικής. Ένα σύστημα διαχείρισης στόλου μεταδίδει μέσω δικτύου (π.χ. GPRS, 5G) πληροφορίες από το όχημα προς το κέντρο ελέγχου, όπως η ακριβής θέση μέσω GPS, δεδομένα από αισθητήρες τεχνολογίας IoT (π.χ. θερμοκρασία ψυκτικού θαλάμου, κατάσταση κινητήρα, στάθμη καυσίμου, άνοιγμα θυρών), καθώς και πληροφορίες από τη θύρα CANBUS του οχήματος (PP City Logistics, 2023). Αυτά τα δεδομένα, σε συνδυασμό με τις ψηφιακές εφαρμογές επιβεβαίωσης παράδοσης (Proof-of-Delivery - PoD) στα smartphones των οδηγών,

παρέχουν απόλυτη και ολοκληρωμένη ορατότητα από άκρο σε άκρο (end-to-end visibility), επιτρέποντας στον υπεύθυνο logistics να γνωρίζει ακριβώς την πορεία της παραγγελίας, αποτρέποντας ταυτόχρονα φαινόμενα κλοπής και καθυστερήσεων (PP City Logistics, 2023). Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί δυναμικά τέτοιες λύσεις ψηφιοποίησης μέσω έργων όπως το FENIX, το οποίο αναπτύσσει ψηφιακές υπηρεσίες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού χωρητικότητας, της δρομολόγησης και της διαχείρισης εμπορευμάτων, ενισχύοντας τη συνεργατικότητα (B2B) και τη μείωση των ρύπων (Ελληνικό Παρατηρητήριο Μεταφορών & Logistics, 2024).

1.3.5.6. Εμπορικά Λογισμικά Δρομολόγησης και η Ελληνική Πραγματικότητα

Για την πρακτική εφαρμογή της αυτόματης δρομολόγησης αξιοποιούνται εξειδικευμένα λογισμικά. Προγράμματα γεωγραφικών πληροφοριών, όπως το ArcGIS με την επέκταση Network Analyst, προσφέρουν στους χρήστες τη δυνατότητα να εισάγουν το οδικό δίκτυο με όλους τους πραγματικούς περιορισμούς του (π.χ. μονόδρομοι, περιορισμοί βάρους, δακτύλιος), το πλήθος των οχημάτων και τις ζητούμενες στάσεις (Κωστοπούλου, 2021). Με βάση αυτά, το λογισμικό παράγει πίνακες δρομολογίων που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος, διευκολύνοντας την ανάλυση σεναρίων (Κωστοπούλου, 2021). Επιπλέον, εξειδικευμένες διαδικτυακές πλατφόρμες (όπως η εφαρμογή του ερευνητικού έργου ENIRISST "Dash" ή εμπορικά προγράμματα όπως της PTV και της PowerFleet) επιτρέπουν την εισαγωγή δυναμικών παραμέτρων, όπως η ζήτηση ανά κατάστημα, τα ακριβή χρονικά παράθυρα τροφοδοσίας εντός του εμπορικού τριγώνου της Αθήνας και ο διαθέσιμος χρόνος των οδηγών (Κωστοπούλου, 2021). Μέσα από προσομοιώσεις, έχει αποδειχθεί ότι η χρήση τέτοιων συστημάτων για τη συνδυαστική διανομή αγαθών στην Αττική (π.χ. ομαδοποίηση παραγγελιών 2-3 καταστημάτων ανά δρομολόγιο) μπορεί να επιφέρει εντυπωσιακή μείωση των διανυόμενων χιλιομέτρων σε ποσοστά 9% έως 16%, με ταυτόχρονη μείωση του απαιτούμενου αριθμού οχημάτων κατά 20% (Κωστοπούλου, 2021).

Παρά τα αδιαμφισβήτητα και πολλαπλά οφέλη της αυτόματης δρομολόγησης (μείωση κόστους λειτουργίας, βελτίωση αξιοπιστίας χρόνου παράδοσης, μείωση ανθρακικού αποτυπώματος), η διείσδυση των "έξυπνων" συστημάτων διαχείρισης (ITS) και δρομολόγησης στην ελληνική αγορά παραμένει απογοητευτικά χαμηλή (Κωστοπούλου, 2021). Σύμφωνα με αναλύσεις της αγοράς (π.χ. συνέδριο Logistics 9), μόλις το 6% των ελληνικών επιχειρήσεων διαθέτει συνεχή on-line πρόσβαση για την παρακολούθηση της εξέλιξης της δρομολόγησης του φορτίου σε πραγματικό χρόνο, ενώ ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης του 11% παραμένει με παντελώς ελλιπή πληροφόρηση, ποσοστά που δεν έχουν βελτιωθεί ουσιαστικά από το 2011 (Κωστοπούλου, 2021). Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στην τεράστια έλλειψη τεχνογνωσίας, στη δομή της αγοράς που αποτελείται από χιλιάδες μικρές επιχειρήσεις χωρίς κεφάλαια για επενδύσεις, και στην άρνηση υιοθέτησης νέων τεχνολογιών από τα στελέχη (Κωστοπούλου, 2021). Ωστόσο, η μετάβαση στα ηλεκτρικά φορτηγά και η ανάγκη επίλυσης των περιορισμών της φόρτισής τους (Vehicle Routing and Charging Problem) που θα εξεταστεί λεπτομερώς στη συνέχεια, καθιστά πλέον την ενσωμάτωση των συστημάτων αυτόματης δρομολόγησης απολύτως υποχρεωτική για την επιβίωση των επιχειρήσεων του κλάδου.

1.3.6. Συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης Ηλεκτρικών φορτηγών στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές

1.3.6.1. Η μετάβαση από το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης στο E-VRP (Electric Vehicle Routing Problem)

Όπως αναλύθηκε εκτενώς, η ενσωμάτωση των συστημάτων αυτόματης δρομολόγησης αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την αποδοτική διαχείριση ενός στόλου οχημάτων. Ωστόσο, η επιτακτική μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση για την επίτευξη αειφόρων αστικών εμπορευματικών μεταφορών (CO2-free city logistics) εισάγει ένα νέο, ριζικά διαφορετικό και εξαιρετικά πολύπλοκο επίπεδο αποφάσεων. Στο κλασικό

Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP), η τροφοδοσία του οχήματος με καύσιμα θεωρείται συνήθως δεδομένη και ο χρόνος ανεφοδιασμού αμελητέος. Αντιθέτως, η χρήση ηλεκτρικών φορτηγών (E-VRP) μετασχηματίζει τον σχεδιασμό, καθώς η διαχείριση της ενέργειας γίνεται ο κεντρικός πυρήνας της δρομολόγησης. Πλέον, ο υπεύθυνος εφοδιαστικής αλυσίδας (logistics manager) δεν καλείται απλώς να βρει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ της αποθήκης και των πελατών, αλλά να λάβει συνδυασμένες αποφάσεις δρομολόγησης και φόρτισης, εναρμονίζοντας έξι αυστηρά αλληλεξαρτώμενα κριτήρια: τη χωρητικότητα της ηλεκτρικής μπαταρίας, τον ημερήσιο χρόνο ταξιδιού, την ημερήσια διανυόμενη απόσταση, τον χρόνο φόρτισης, το πλήθος των ημερήσιων διανομών και, τελικά, το συνολικό μέγεθος του στόλου. Αυτή η πολυπαραμετρική εξίσωση αποτελεί τη μεγαλύτερη σύγχρονη πρόκληση για τα συστήματα ενορχήστρωσης του «τελευταίου μιλίου» (last-mile orchestration platforms).

1.3.6.2. Χωρητικότητα ηλεκτρικής μπαταρίας και ημερήσια διανυόμενη απόσταση

Η θεμελιώδης παράμετρος που υπαγορεύει τον σχεδιασμό της διαδρομής είναι η χωρητικότητα της ηλεκτρικής μπαταρίας του οχήματος. Στη σύγχρονη αγορά επαγγελματικών οχημάτων, κυριαρχούν ηλεκτρικά βαν (e-vans) όπως το Peugeot e-Expert, με μπαταρία χωρητικότητας 50 kWh, το Nissan e-NV200, και μεγαλύτερα οχήματα όπως το Volkswagen e-Crafter, τα οποία προσφέρουν μεταφορική ικανότητα από 4,2 έως 10,7 κυβικά μέτρα και ωφέλιμο φορτίο που προσεγγίζει τα 700 έως 1.400 κιλά. Η χωρητικότητα αυτής της μπαταρίας μεταφράζεται σε μια αυστηρά περιορισμένη ημερήσια διανυόμενη απόσταση (αυτονομία), η οποία σε πραγματικές συνθήκες κυμαίνεται από 120 έως 150 χιλιόμετρα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογών με συνεχή σταμάτα-ξεκίνα (stop-and-go) μπορεί να περιοριστεί ακόμη και στα 75 με 90 χιλιόμετρα.

Αυτό το κατασκευαστικό όριο επιβάλλει χωρικούς περιορισμούς, καθιστώντας τα ηλεκτρικά οχήματα ιδανικά κυρίως για την εξυπηρέτηση κλειστών γεωγραφικών ζωνών με

πολύ πυκνό δίκτυο παραδόσεων, όπως ο εσωτερικός δακτύλιος και το Εμπορικό Τρίγωνο της Αθήνας. Το πρόβλημα της διανυόμενης απόστασης περιπλέκεται δραματικά όταν το όχημα καλείται να εκτελέσει μεταφορές προϊόντων υπό καθεστώς ελεγχόμενης θερμοκρασίας (cold chain logistics). Οι μελέτες καταδεικνύουν ότι τα ηλεκτροκίνητα οχήματα αδυνατούν να μεταφέρουν ψυχόμενο φορτίο διανύοντας μεγάλες αποστάσεις, καθώς ο ψυκτικός θάλαμος αντλεί σημαντικά ποσά ενέργειας απευθείας από την κύρια μπαταρία. Συνεπώς, ο αλγόριθμος δρομολόγησης πρέπει να υπολογίζει δυναμικά την εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας (State of Charge - SoC), συνυπολογίζοντας όχι μόνο τη χιλιομετρική απόσταση, αλλά και το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου, το τοπογραφικό ανάγλυφο, καθώς και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, ούτως ώστε το όχημα να μην ακινητοποιηθεί κατά τη διάρκεια του δρομολογίου.

1.3.6.3. Χρόνος φόρτισης ηλεκτρικής μπαταρίας και ημερήσιος χρόνος ταξιδιού

Ενώ σε ένα όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης ο χρόνος ταξιδιού περιλαμβάνει τον καθαρό χρόνο οδήγησης, τις καθυστερήσεις λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης και τον χρόνο εκφόρτωσης, στα ηλεκτρικά φορτηγά προστίθεται μια εξαιρετικά κρίσιμη μεταβλητή: ο χρόνος φόρτισης της ηλεκτρικής μπαταρίας. Όταν η ημερήσια διανυόμενη απόσταση υπερβαίνει τη μέγιστη αυτονομία του οχήματος, το σύστημα δρομολόγησης υποχρεούται να εισάγει στο πρόγραμμα έναν ενδιάμεσο σταθμό επαναφόρτισης (charging node).

Η απόφαση αυτή επιδρά καταλυτικά στον συνολικό ημερήσιο χρόνο ταξιδιού διανομής (travel time). Ο χρόνος φόρτισης δεν είναι στιγμιαίος. Ανάλογα με την τεχνολογία του σταθμού (ταχυφορτιστές DC ή κανονικοί AC) και τις προδιαγραφές του οχήματος, το όχημα μπορεί να παραμείνει αδρανές (downtime) από 30 λεπτά έως και αρκετές ώρες. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ο οδηγός παραμένει ανενεργός και το μεταφορικό έργο παγώνει. Επιπλέον, το λογισμικό δρομολόγησης (π.χ. ArcGIS Network Analyst) πρέπει

να υπολογίσει και τον χρόνο παρέκκλισης (detour time) από την ιδανική διαδρομή προκειμένου το όχημα να προσεγγίσει τον πλησιέστερο διαθέσιμο σταθμό φόρτισης, γεγονός που συνιστά μείζον πρόβλημα στην Ελλάδα λόγω της συνεχιζόμενης ανεπάρκειας τέτοιων υποδομών. Οι πλατφόρμες ενορχήστρωσης πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα διαθεσιμότητα των φορτιστών, ώστε να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις αναμονής στην ουρά του σταθμού.

1.3.6.4. Επίδραση στο πλήθος ημερήσιων διανομών και τα χρονικά παράθυρα (Time Windows)

Το άμεσο αποτέλεσμα της μειωμένης αυτονομίας και της ανάγκης για χρονοβόρα φόρτιση είναι η κάθετη συμπίεση στο πλήθος των ημερήσιων διανομών (number of deliveries) που μπορεί να εκτελέσει ένα ηλεκτρικό φορτηγό κατά τη διάρκεια μιας εργασιακής βάρδιας. Στις αστικές διανομές (last-mile), η πυκνότητα των στάσεων είναι τεράστια, και ο χρόνος εξυπηρέτησης (service time) σε κάθε πελάτη κυμαίνεται παραδοσιακά από 5 έως 15 λεπτά. Σε ένα συμβατικό μοντέλο, ένα βαρύ φορτηγό θα μπορούσε να παραμείνει στο δίκτυο ολόκληρη την ημέρα. Αντιθέτως, το ηλεκτρικό όχημα αναγκάζεται να μειώσει τον αριθμό των επισκέψεων (stops), είτε επιστρέφοντας νωρίτερα στην κεντρική αποθήκη (depot) για επαναφόρτιση, είτε αφιερώνοντας πολύτιμο χρόνο σε κάποιον δημόσιο φορτιστή.

Το πρόβλημα μεγεθύνεται όταν εισάγονται οι περιορισμοί των χρονικών παραθύρων παράδοσης (VRPTW - Vehicle Routing Problem with Time Windows), που είναι ο κανόνας στο σύγχρονο λιανεμπόριο. Εάν η βέλτιστη διαδρομή απαιτεί από το ηλεκτρικό όχημα να σταματήσει για φόρτιση επί 45 λεπτά, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να παραβιαστεί το αυστηρό χρονικό παράθυρο εξυπηρέτησης (π.χ. 10:00 - 11:30 π.μ.) του επόμενου καταστήματος. Οι παραβιάσεις αυτές επιφέρουν οικονομικές ποινές (penalty costs) και ραγδαία πτώση στο επίπεδο ικανοποίησης του πελάτη. Ως εκ τούτου, οι

αλγόριθμοι που υποστηρίζουν το E-VRP πρέπει να προγραμματίζουν τη φόρτιση στα λεγόμενα "νεκρά" χρονικά διαστήματα ή να εναρμονίζουν τη στάση στον φορτιστή με τον υποχρεωτικό χρόνο ανάπαυσης του οδηγού, επιτυγχάνοντας τον μέγιστο δυνατό συγχρονισμό (synchronization) των λειτουργιών.

1.3.6.5. Οικονομικές επιπτώσεις και η βελτιστοποίηση του μεγέθους του ατόλου ηλεκτρικών φορτηγών (Fleet Size)

Όλοι οι προαναφερθέντες περιορισμοί συγκλίνουν στο πιο κρίσιμο, από οικονομικής άποψης, κριτήριο: τον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους του στόλου (Fleet Sizing). Από τη στιγμή που κάθε μεμονωμένο ηλεκτρικό φορτηγό είναι ικανό να διανύσει μικρότερη απόσταση, να μεταφέρει μικρότερο όγκο φορτίου και να εκτελέσει λιγότερες παραδόσεις εντός της βάρδιας του σε σύγκριση με ένα πετρελαιοκίνητο όχημα, δημιουργείται ένα μαθηματικό και λειτουργικό κενό. Για να καλυφθεί ο ίδιος ακριβώς συνολικός όγκος παραγγελιών, οι εταιρείες παροχής υπηρεσιών 3PL ή οι αλυσίδες λιανικής ενδέχεται να αναγκαστούν να αυξήσουν τον αριθμό των οχημάτων που αναπτύσσουν στο δρόμο.

Η διόγκωση του μεγέθους του στόλου, ωστόσο, αποτελεί έναν εφιάλτη για την οικονομική βιωσιμότητα των εταιρειών (economic sustainability). Το κόστος κτήσης των ηλεκτρικών επαγγελματικών οχημάτων παραμένει απαγορευτικά υψηλό. Σύμφωνα με αναλύσεις της αγοράς, η δημιουργία ενός στόλου 10 ηλεκτρικών βαν (π.χ. τύπου e-Crafter ή e-Expert) ανέρχεται κατά μέσο όρο στο δυσθεώρητο ποσό των 500.000 ευρώ, και αυτό χωρίς να συνυπολογιστεί το τεράστιο κόστος δημιουργίας υποδομών φόρτισης (charging hubs) εντός των εγκαταστάσεων της επιχείρησης. Συνεπώς, η λανθασμένη λήψη αποφάσεων στη δρομολόγηση, η οποία οδηγεί σε τεχνητή ανάγκη για μεγαλύτερο στόλο, μπορεί να καταστρέψει το περιθώριο κέρδους.

Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης, οι συνδυασμένες αποφάσεις επιβάλλουν την προσέγγιση του "Προβλήματος Δρομολόγησης με Ετερογενή Στόλο" (Heterogeneous Fleet VRP). Στις έξυπνες αστικές μεταφορές, οι επιχειρήσεις δε χρησιμοποιούν μόνο έναν τύπο οχήματος. Μέσω σύνθετων λογισμικών, η διανομή επιμερίζεται σε ένα υβριδικό μίγμα μέσων: βαρέα ηλεκτρικά φορτηγά (π.χ. Volvo FL Electric, έως 16,7 τόνων) χρησιμοποιούνται για την κεντρική τροφοδοσία Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (ΑΚΕΕ), μικρότερα ηλεκτρικά βαν αναλαμβάνουν τις ακτινωτές διανομές στις παρυφές της πόλης, ενώ ηλεκτρικά ποδήλατα φορτίου (e-cargo bikes), τα οποία δεν απαιτούν σταθμούς φόρτισης υψηλής τάσης και παρακάμπτουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση, αναλαμβάνουν τον τελικό εφοδιασμό στα στενά δρομάκια του Ιστορικού Κέντρου. Ο συνδυασμός αυτός αποτρέπει τη γραμμική αύξηση του μεγέθους του στόλου των ακριβών e-vans, μεγιστοποιώντας την αξιοποίηση (utilization) κάθε μονάδας.

1.3.6.6. Η συμβολή των τεχνολογιών πληροφορικής (ITS) στις συνδυασμένες αποφάσεις

Η ταυτόχρονη διαχείριση της απόστασης, του χρόνου, της φόρτισης και του πλήθους διανομών καθιστά την ανθρώπινη, χειροκίνητη δρομολόγηση πρακτικά αδύνατη. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων βασίζεται αποκλειστικά σε μεθευρετικούς αλγορίθμους (Metaheuristic algorithms) που τρέχουν εντός ισχυρών συστημάτων διαχείρισης στόλου (Fleet Management Systems) και πλατφορμών ενορχήστρωσης (Control Towers). Μέσω συστημάτων τηλεματικής και αισθητήρων τεχνολογίας IoT (Internet of Things) που συνδέονται στη θύρα CANBUS των ηλεκτρικών φορτηγών, το κέντρο ελέγχου λαμβάνει συνεχώς, σε πραγματικό χρόνο, πληροφορίες για το υπόλοιπο της μπαταρίας του οχήματος, τη θερμοκρασία της, και τον ακριβή ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας.

Στο πλαίσιο μιας δυναμικής δρομολόγησης (Dynamic VRP), εάν το σύστημα

ανιχνεύσει ότι η μπαταρία ενός οχήματος καταναλώνεται ταχύτερα από το αναμενόμενο – λόγω αυξημένου βάρους φορτίου ή παρατεταμένης κυκλοφοριακής συμφόρησης στο κέντρο της πόλης – ο αλγόριθμος παρεμβαίνει αυτομάτως. Ανασχεδιάζει άμεσα τη διαδρομή (re-routing), κατευθύνει το όχημα σε διαθέσιμο σταθμό φόρτισης, και μεταφέρει (re-assign) τις υπολειπόμενες ημερήσιες διανομές του (πλήθος παραγγελιών) σε ένα άλλο διαθέσιμο ηλεκτρικό όχημα του στόλου που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση και διαθέτει επαρκές απόθεμα ενέργειας.

Αυτή η αμφίδρομη, έξυπνη ροή δεδομένων, σε συνδυασμό με την εφαρμογή μοντέλων συνεργατικών μεταφορών (collaborative logistics) όπου ανταγωνιστικές εταιρείες μοιράζονται τη χωρητικότητα και τους φορτιστές των στόλων τους, αποτελεί το απόλυτο εχέγγυο. Μόνο μέσω αυτών των δυναμικών, συνδυασμένων αποφάσεων δρομολόγησης και διαχείρισης φόρτισης είναι εφικτό να μειωθούν τα άδεια οχηματοχιλιόμετρα, να διατηρηθεί σταθερός ο ημερήσιος χρόνος ταξιδιού, να εκτελεστεί απρόσκοπτα το σύνολο των ημερήσιων διανομών και να συγκρατηθεί το μέγεθος του στόλου ηλεκτρικών φορτηγών σε βιώσιμα επίπεδα. Έτσι, διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας στην Ελλάδα, ικανοποιώντας τις υψηλές απαιτήσεις των καταναλωτών στο "τελευταίο μίλι", ενώ παράλληλα εκπληρώνονται στο ακέραιο οι στρατηγικοί ευρωπαϊκοί στόχοι για κλιματικά ουδέτερες πόλεις με μηδενικές εκπομπές ρύπων (zero emissions).

1.3.7. Συμπεράσματα και προοπτικές για την αειφόρο εφοδιαστική στην Ελλάδα

Η εκτενής ανάλυση του κλάδου των αστικών εμπορευματικών μεταφορών (City Logistics) στην Ελλάδα καταδεικνύει ότι το υφιστάμενο, παραδοσιακό μοντέλο λειτουργίας είναι πλέον μη βιώσιμο, καθώς επιβαρύνει δυσανάλογα το αστικό περιβάλλον, επιτείνει την κυκλοφοριακή συμφόρηση και υποβαθμίζει την οικονομική αποδοτικότητα των επιχειρήσεων. Η άμεση μετάβαση σε ένα "πράσινο", ολοκληρωμένο και έξυπνο

οικοσύστημα διανομών δεν αποτελεί απλώς επιχειρηματική επιλογή, αλλά επιτακτική ανάγκη και ευρωπαϊκή δέσμευση (Λευκή Βίβλος, "Fit for 55") για πόλεις κλιματικά ουδέτερες, με στόχο τις μηδενικές εκπομπές (zero emissions) έως το έτος 2050.

Όπως διαπιστώθηκε, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών φορτηγών για την εξυπηρέτηση του «τελευταίου μιλίου» (last-mile) δημιουργεί νέες, εξαιρετικά σύνθετες επιχειρησιακές προκλήσεις, καθιστώντας την ταυτόχρονη και συνδυασμένη επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης και φόρτισης οχημάτων απολύτως κρίσιμη για τη βιωσιμότητα των εταιρειών. Αυτές οι συνδυασμένες αποφάσεις είναι το μοναδικό εργαλείο που μπορεί να εξισορροπήσει τους αυστηρούς τεχνικούς περιορισμούς (μικρότερη χωρητικότητα ηλεκτρικής μπαταρίας, μειωμένη ημερήσια διανυόμενη απόσταση, χρονοβόρος κύκλος φόρτισης) με τις αυξημένες εμπορικές απαιτήσεις για την έγκαιρη εκτέλεση ενός μεγάλου πλήθους ημερήσιων διανομών εντός συγκεκριμένων χρονικών παραθύρων. Μέσω της βέλτιστης, δυναμικής δρομολόγησης, οι επιχειρήσεις logistics ελαχιστοποιούν τον ημερήσιο χρόνο ταξιδιού και τα περιττά οχηματοχιλιόμετρα, αποτρέποντας την τεχνητή και δαπανηρή διόγκωση του μεγέθους του στόλου τους (fleet size), η οποία διαφορετικά θα καθιστούσε τη μετάβαση οικονομικά ασύμφορη λόγω του πολύ υψηλού κόστους κτήσης των ηλεκτροκίνητων βαν.

Βασικό συμπέρασμα της έρευνας αποτελεί, ωστόσο, η διαπίστωση ότι οι αλγόριθμοι και η τεχνολογία από μόνα τους δεν αρκούν, εάν δεν συνοδεύονται από μια ριζική αλλαγή κουλτούρας προς την κατεύθυνση των συνεργατικών σχημάτων (collaborative logistics). Η ειλικρινής συνεργασία των μεταφορικών εταιρειών, μέσω της κοινής χρήσης στόλων και της αξιοποίησης Αστικών Κέντρων Ενοποίησης Εμπορευμάτων (ΑΚΕΕ) στις παρυφές των πόλεων, έχει αποδειχθεί ότι εξαλείφει τα άδεια δρομολόγια, αυξάνει θεαματικά τον συντελεστή πληρότητας των ηλεκτρικών φορτηγών (άνω του 90%) και μειώνει δραστικά τον συνολικό αριθμό των οχημάτων που απαιτούνται για την τροφοδοσία του αστικού ιστού. Ενδεικτικές μελέτες προσομοίωσης έδειξαν ότι τέτοιες πρακτικές συνδυαστικής διανομής στην Αττική μπορούν να επιφέρουν εντυπωσιακή

μείωση των διανυόμενων χιλιομέτρων έως και 16%, προσφέροντας τεράστια εξοικονόμηση τόσο στο λειτουργικό κόστος των επιχειρήσεων όσο και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Παράλληλα, η αναμόρφωση των αστικών μεταφορών θα πρέπει να εμπλουτιστεί με εναλλακτικά, έξυπνα μοντέλα εξυπηρέτησης. Η εγκατάσταση δικτύων από έξυπνες θυρίδες (smart lockers) για άμεση παραλαβή δεμάτων, η χρήση ηλεκτρικών ποδηλάτων (e-cargo bikes) στα ιστορικά κέντρα, οι νυχτερινές παραδόσεις (off-hour deliveries) με αθόρυβα οχήματα, καθώς και η ανάπτυξη συνδυασμένων επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών (π.χ. μεταφορά μικρών δεμάτων μέσω ταξί ή λεωφορείων ΚΤΕΛ/αστικών) αποτελούν εξαιρετικά καινοτόμες διεξόδους που μειώνουν την πίεση στο οδικό δίκτυο. Για τον απόλυτο συντονισμό αυτού του πολύπλοκου, πολυτροπικού δικτύου, η ευρεία υιοθέτηση Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (ITS) και προηγμένων συστημάτων ενορχήστρωσης "τελευταίου μιλίου" (control towers) κρίνεται ως απαραίτητη προϋπόθεση, καθώς προσφέρει ορατότητα σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθηση της κατάστασης της μπαταρίας των οχημάτων και άμεση επαναδρομολόγηση.

Εν κατακλείδι, η οριστική και επιτυχής αναδιάρθρωση των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα απαιτεί την ισχυρή σύμπραξη όλων ανεξαιρέτως των εμπλεκόμενων φορέων (stakeholders). Είναι επιτακτική η ανάγκη παροχής υποστήριξης από την Πολιτεία και την Τοπική Αυτοδιοίκηση, μέσω της απλοποίησης του ρυθμιστικού πλαισίου, της προσφοράς γενναίων οικονομικών και φορολογικών κινήτρων (όπως το πρόγραμμα "Κινούμαι Ηλεκτρικά" ή η μείωση δημοτικών τελών για εταιρείες που χρησιμοποιούν «πράσινες» διανομές) και της δημιουργίας βασικών υποδομών, όπως πυκνά δίκτυα σταθμών φόρτισης, Ζώνες Χαμηλών Εκπομπών και λωρίδες πολλαπλών χρήσεων (multi-use lanes) για εύκολη φορτοεκφόρτωση. Μόνο μέσα από τον ολιστικό και συντονισμένο σχεδιασμό των υποδομών, της σύγχρονης τεχνολογίας, των αλγορίθμων βελτιστοποίησης και των επιχειρηματικών συνεργειών, ο κλάδος των City Logistics θα μετατραπεί σε ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για την ελληνική

οικονομία, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ένα καθαρότερο, ασφαλέστερο και απολύτως βιώσιμο αστικό περιβάλλον για όλους τους πολίτες.

1.4. Νομοθεσία και στόχοι Ε.Ε. και Ελλάδας για τη βιώσιμη χρήση φορτηγών με ηλεκτρικές μπαταρίες στις αστικές εμπορευματικές μεταφορές

Το πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Κανονισμού για τις Υποδομές Εναλλακτικών Καυσίμων (AFIR) θεσπίζει υποχρεωτικούς στόχους για την επέκταση του δικτύου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα βαρέα οχήματα, καθώς η τεχνολογία Megawatt Charging System (MCS) αναδεικνύεται ως απαραίτητη για την ταχεία φόρτιση φορτηγών και λεωφορείων κατά τη διάρκεια των διαλειμμάτων τους. Τα κείμενα αναλύουν τα νέα τεχνικά πρότυπα ασφαλείας, όπως το IEC TS 63379, και τις απαιτήσεις για διαφάνεια στις πληρωμές μέσω τραπεζικών καρτών χωρίς την ανάγκη συνδρομών. Επιπλέον, εξετάζεται η στρατηγική σημασία του δικτύου TEN-T για τη μείωση των εκπομπών ρύπων στις οδικές εμπορευματικές μεταφορές έως το 2030. Τέλος, αναφέρονται ελληνικές πρωτοβουλίες, όπως το πρόγραμμα «Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ'», που προσφέρει οικονομικά κίνητρα για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης.

1.4.1. Το Ευρωπαϊκό Στρατηγικό Πλαίσιο και οι στόχοι μείωσης εκπομπών για τα εμπορευματικά οχήματα

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και η άμεση ανάγκη για ριζική δράση έχουν οδηγήσει σε μια θεμελιώδη, πολυεπίπεδη και άνευ προηγουμένου αναδιάρθρωση του τομέα των εμπορευματικών μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας εντός της

Ευρωπαϊκής Ένωσης (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Κεντρικός άξονας αυτής της μακρόπνοης στρατηγικής είναι η μετάβαση προς ένα βιώσιμο σύστημα ενέργειας, το οποίο υπαγορεύεται από τον υπαρξιακό κίνδυνο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal), η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο (Κανονισμός ΕΕ 2021/1119), ο οποίος θεσπίζει τον νομικά δεσμευτικό στόχο για την επίτευξη πλήρους κλιματικής ουδετερότητας έως το έτος 2050, καθώς και τον κρίσιμο ενδιάμεσο στόχο της μείωσης των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΑτΘ) κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε άμεση σύγκριση με τα επίπεδα εκπομπών του 1990 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Για να μετουσιωθούν αυτοί οι ιστορικοί στόχοι σε απτά και μετρήσιμα αποτελέσματα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σχεδίασε και έθεσε σε εφαρμογή τη δέσμη μέτρων "Fit for 55", ένα εξαιρετικά περίπλοκο και αλληλένδετο σύνολο νομοθετικών προτάσεων και ρυθμιστικών αναθεωρήσεων που στοχεύουν στην άρση των δομικών και κανονιστικών εμποδίων, επιταχύνοντας με γεωμετρική πρόοδο την απομάκρυνση των κρατών-μελών από τα ορυκτά καύσιμα (AMPECO, 2024).

Εντός αυτής της ευρείας στρατηγικής αρχιτεκτονικής, ο τομέας των μεταφορών – και ειδικότερα ο κλάδος των οδικών εμπορευματικών μεταφορών– βρίσκεται στο απόλυτο επίκεντρο των ρυθμιστικών παρεμβάσεων των ευρωπαϊκών θεσμών. Η έμφαση αυτή εδράζεται σε αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικά δεδομένα: οι οδικές εμπορευματικές μεταφορές ευθύνονται από μόνες τους για περισσότερο από το 16% των συνολικών εκπομπών από όλες τις μεταφορές εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 κρατών-μελών (DigitalOcean, 2024). Επιπροσθέτως, τα βαρέα οχήματα (Heavy-Duty Vehicles - HDVs), μια ευρεία κατηγορία που περιλαμβάνει τα βαρέα φορτηγά, τα αστικά λεωφορεία και τα πούλμαν, αντιπροσωπεύουν ένα εξαιρετικά δυσανάλογο και διογκωμένο μερίδιο των συνολικών εκπομπών του οδικού δικτύου σε σχέση με τον πραγματικό αριθμό κυκλοφορούντων οχημάτων (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Παρά το τεράστιο περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, οι εκπομπές ρύπων από τα νέα βαρέα οχήματα είχαν παραμεληθεί νομοθετικά για μεγάλο χρονικό διάστημα και άρχισαν να ρυθμίζονται

σε ενωσιακό επίπεδο μόλις το 2019, γεγονός που καθιστούσε πλέον επιτακτική την ανάγκη για μια δραστική, συνολική ρυθμιστική προσέγγιση (DigitalOcean, 2024; Technical and Regulatory Architecture, 2024). Η προσέγγιση αυτή είναι πολυεπίπεδη, καθώς δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση, αλλά διεισδύει στον πυρήνα της βιομηχανίας, στοχεύοντας στην κατασκευή των οχημάτων και επιβάλλοντας έναν βίαιο αλλά αναγκαίο μετασχηματισμό της αλυσίδας εφοδιασμού προς τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών (Technical and Regulatory Architecture, 2024).

Ο πρωταρχικός νομοθετικός μοχλός για την επιβολή αυτού του μετασχηματισμού στην παραγωγή οχημάτων είναι η αυστηρή ακολουθία προτύπων επιδόσεων για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ο αρχικός Κανονισμός (ΕΕ) 2019/1242 αποτέλεσε ιστορικά το πρώτο βήμα θέσπισης προτύπων επιδόσεων για τα νέα βαρέα οχήματα (European Union, 2024). Ωστόσο, η ραγδαία επιδείνωση της κλιματικής κρίσης και η εξέλιξη της ευρωπαϊκής πολιτικής κατέστησαν σαφές ότι οι στόχοι του 2019 δεν επαρκούσαν. Κατά συνέπεια, υιοθετήθηκε ο Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1610, ο οποίος τροποποιεί τον προγενέστερο, αποτελώντας πλέον τον κεντρικό, αυστηρότερο και πιο ισχυρό μηχανισμό για την επιβολή βαθιών μειώσεων του CO2 σε ολόκληρο τον ευρωπαϊκό εμπορευματικό στόλο (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Αυτός ο νέος, ορόσημο κανονισμός, αντικατοπτρίζει μια τεράστια αύξηση της περιβαλλοντικής φιλοδοξίας, θεσπίζοντας νομικά δεσμευτικούς στόχους μείωσης που εφαρμόζονται απευθείας στον μέσο όρο εκπομπών των νέων οχημάτων που πωλούνται από τους κατασκευαστές (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Η νομική τροχιά που εγκαθιδρύει η τροποποίηση του 2024 είναι απολύτως σαφής και αυστηρή: επιβάλλει στους κατασκευαστές τη σταδιακή μείωση των εκπομπών CO2 θέτοντας ως πρώτη δέσμευση τη μείωση κατά 45% έως το έτος 2030 (EV Truck's Charging Trends, 2026). Η απαίτηση αυτή κλιμακώνεται δραματικά σε μια υποχρεωτική μείωση της τάξεως του 65% έως το 2035, για να κορυφωθεί στον απόλυτο και εξαιρετικά φιλόδοξο στόχο της σχεδόν πλήρους απανθρακοποίησης με μείωση κατά 90% έως το έτος 2040 (EV Truck's Charging Trends, 2026; Technical and Regulatory Architecture, 2024). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι

αυτά τα ποσοστά μείωσης υπολογίζονται και μετρώνται αυστηρά με βάση τα επίπεδα αναφοράς των εκπομπών που καταγράφηκαν την περίοδο 2019/2020 (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Οι συγκεκριμένοι στόχοι αποτελούν αδιαμφισβήτητα τα πιο φιλόδοξα και αυστηρά πρότυπα για τα αέρια του θερμοκηπίου που έχουν επιβληθεί ποτέ σε εμπορικά οχήματα σε παγκόσμιο επίπεδο (EV Truck's Charging Trends, 2026).

Ένα εξίσου κρίσιμο και μεταρρυθμιστικό χαρακτηριστικό της νέας ευρωπαϊκής ρυθμιστικής αρχιτεκτονικής του 2024 είναι η τεράστια και στρατηγική διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής της νομοθεσίας, η οποία διασφαλίζει ότι καμία ρυπογόνος κατηγορία εμπορευματικών οχημάτων δεν εξαιρείται από την πράσινη μετάβαση. Ενώ οι πρώιμες εκδοχές της νομοθεσίας εστίαζαν σχεδόν αποκλειστικά στα βαρέα φορτηγά με μικτό βάρος άνω των 16 τόνων, η νέα νομοθεσία έχει διευρυνθεί ώστε να ενσωματώσει τον πυρήνα των αστικών και περιαστικών εμπορευματικών μεταφορών (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Συγκεκριμένα, ο Κανονισμός 2024/1610 πλέον ενσωματώνει ρητά τα μικρότερα και μεσαία φορτηγά (μεικτού βάρους από 5 έως 16 τόνους), καλύπτοντας μεγάλο τμήμα της διανομής "τελευταίου μιλίου" (last-mile delivery) (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Παράλληλα, περιλαμβάνει τα οχήματα ειδικών χρήσεων (vocational vehicles), στα οποία συγκαταλέγονται τα απορριμματοφόρα, οι μπετονιέρες και τα οχήματα εργοταξίων. Αυτά τα οχήματα ειδικής χρήσης θα υπόκεινται στους αυστηρούς στόχους μείωσης εκπομπών (65% και 90%) ξεκινώντας υποχρεωτικά από το έτος 2035 (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Επιπροσθέτως, η ευρωπαϊκή νομοθεσία εισήγαγε μια καινοτομία αναγνωρίζοντας ότι τα ρυμουλκούμενα (trailers) και τα ημιρυμουλκούμενα (semi-trailers) δεν είναι απλώς παθητικά στοιχεία, αλλά επηρεάζουν σε τεράστιο βαθμό την αεροδυναμική και την αντίσταση κύλισης ενός οδικού συρμού. Ως εκ τούτου, ενσωματώθηκαν πλήρως στο ρυθμιστικό πλαίσιο, με τα ρυμουλκούμενα να υποχρεούνται να επιτύχουν τεχνολογική μείωση εκπομπών κατά 7,5% και τα ημιρυμουλκούμενα κατά 15% ήδη από το 2030 (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Στον τομέα των μαζικών αστικών μεταφορών, ο κανονισμός καθίσταται απολύτως ριζοσπαστικός, απαιτώντας νομικά το 90% των πωλήσεων νέων

αστικών λεωφορείων να αφορά αποκλειστικά οχήματα μηδενικών εκπομπών (ZEV) έως το 2030, με τον στόχο να αγγίζει το 100% (πλήρης απαγόρευση πώλησης ρυπογόνων αστικών λεωφορείων) έως το 2035 (Technical and Regulatory Architecture, 2024).

Η θεσμοθέτηση αυτών των εξαιρετικά φιλόδοξων, ποσοτικών και νομικά δεσμευτικών κλιματικών στόχων για τους κατασκευαστές δεν αποτελεί απλώς ένα αυστηρό περιβαλλοντικό μέτρο, αλλά σχεδιάστηκε σκόπιμα για να προσφέρει την απαραίτητη μακροπρόθεσμη επενδυτική ασφάλεια (investment certainty) σε ολόκληρο το οικοσύστημα της εφοδιαστικής αλυσίδας: από τους κατασκευαστές οχημάτων (OEMs) μέχρι τους παρόχους συστημάτων φόρτισης και τις ενεργειακές εταιρείες (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Όπως καταδεικνύουν έγκριτες ανεξάρτητες μελέτες, η επικείμενη μαζική είσοδος (market ramp-up) των φορτηγών μηδενικών εκπομπών στην αγορά αναμένεται να είναι τόσο σαρωτική, ώστε θα ξεπεράσει κατά πολύ τις αρχικές, πιο συντηρητικές εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το 2030 (κατά 2 έως 5 φορές μεγαλύτερη διείσδυση) (DigitalOcean, 2024). Οι εν λόγω έρευνες αναδεικνύουν κατηγορηματικά ότι τα ηλεκτρικά φορτηγά μπαταρίας (Battery-Electric Trucks - BETs) αντιπροσωπεύουν σήμερα τον πιο ορθολογικό, ενεργειακά αποδοτικό και τεχνολογικά ώριμο τρόπο για να επιτευχθεί ο απόλυτος στόχος των μηδενικών εκπομπών στις οδικές εμπορευματικές μεταφορές (DigitalOcean, 2024). Η αναγνώριση και η θεσμική στήριξη της στρατηγικής σημασίας των BETs θα βοηθήσει αποφασιστικά τους Ευρωπαίους κατασκευαστές βαρέων οχημάτων να αποκτήσουν και να διατηρήσουν ένα ισχυρό παγκόσμιο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, εναρμονιζόμενοι πλήρως τόσο με τις δεσμεύσεις της ίδιας της βιομηχανίας, όσο και με την εκρηκτική ανάπτυξη της ευρωπαϊκής βιομηχανίας παραγωγής κυψελών μπαταρίας (DigitalOcean, 2024). Η λογική είναι ξεκάθαρη: η επιτάχυνση της υιοθέτησης των BETs αφαιρεί άμεσα τα εμπόδια των ορυκτών καυσίμων και ευθυγραμμίζεται απόλυτα με τον ευρύτερο στόχο της Ε.Ε. για κλιματική ουδετερότητα έως τα μέσα του αιώνα (AMPECO, 2024).

Ωστόσο, το Ευρωπαϊκό Στρατηγικό Πλαίσιο λειτουργεί συνδυαστικά και δεν

περιορίζεται αποκλειστικά στα πρότυπα παραγωγής των κατασκευαστών. Ως συμπληρωματικό και εξίσου ισχυρό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων του "Fit for 55", η ευρωπαϊκή πολιτική επεκτείνει τη λογική της "τιμολόγησης του άνθρακα" (carbon pricing) στον τομέα των μεταφορών. Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένα νέο, αυτόνομο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (γνωστό ως ΣΕΔΕ 2 ή ETS 2), το οποίο αναμένεται να τεθεί σε πλήρη λειτουργία τα επόμενα έτη και θα καλύπτει ρητά τα ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στις οδικές μεταφορές (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αυτή η επέκταση προβλέπει την αύξηση της συνολικής φιλοδοξίας μείωσης των εκπομπών στους τομείς του ΣΕΔΕ στο 62%, γεγονός που μεταφράζεται σε άμεση οικονομική επιβάρυνση για όσους διαχειριστές στόλων συνεχίσουν να χρησιμοποιούν συμβατικά ρυπογόνα φορτηγά (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Παράλληλα, βάσει του Ευρωπαϊκού Κανονισμού για τον επιμερισμό των προσπαθειών (Effort Sharing Regulation), επιβάλλονται στα κράτη-μέλη, αυστηροί, νομικά δεσμευτικοί ετήσιοι στόχοι μείωσης των εκπομπών για τομείς που δεν καλύπτονταν από το αρχικό σύστημα εμπορίας, όπως ακριβώς οι οδικές εμπορευματικές μεταφορές (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ο διττός αυτός συνδυασμός —τα αυστηρά πρότυπα CO2 που επιβάλλουν τη ραγδαία αύξηση της προσφοράς ηλεκτρικών φορτηγών (BETs) από τη μία, και η επικείμενη εκτίναξη του κόστους λειτουργίας των πετρελαιοκίνητων οχημάτων μέσω του ΣΕΔΕ 2 από την άλλη— δημιουργεί ένα μακροοικονομικό περιβάλλον (push-and-pull effect) που καθιστά τον εξηλεκτρισμό των εμπορευματικών στόλων τη μοναδική βιώσιμη λύση επιβίωσης για τις εταιρείες logistics.

Τέλος, είναι κρίσιμο να υπογραμμιστεί ότι η επιτυχία της νομοθεσίας των προτύπων CO2 (Κανονισμός 2024/1610) συνδέεται άρρηκτα και αναπόσπαστα με τη δημιουργία των κατάλληλων υποδομών ενέργειας (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Το νομοθετικό πλαίσιο αναγνωρίζει έμπρακτα ότι η υποχρέωση των κατασκευαστών να διοχετεύουν ηλεκτρικά φορτηγά στην αγορά καθίσταται πρακτικά αδύνατη χωρίς τη διασφάλιση της προσβασιμότητας σε ενέργεια. Ενώ τα πρότυπα CO2 υπαγορεύουν την προσφορά των οχημάτων μηδενικών εκπομπών, ο νέος Ευρωπαϊκός

Κανονισμός (ΕΕ) 2023/1804 (Alternative Fuels Infrastructure Regulation - AFIR) έρχεται να λειτουργήσει ως το φυσικό θεμέλιο, διασφαλίζοντας την ταυτόχρονη, εναρμονισμένη και γεωγραφικά ισόρροπη ανάπτυξη των υποδομών ταχείας φόρτισης στα διευρωπαϊκά δίκτυα (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Η συνέργεια αυτή αποδεικνύει την ολιστική προσέγγιση της Ευρωπαϊκής Ένωσης: η βαθιά απαλλαγή των αστικών και υπεραστικών εμπορευματικών μεταφορών από τον άνθρακα δεν αποτελεί απλώς έναν τεχνολογικό στόχο, αλλά μια ολοκληρωμένη θεσμική, οικονομική και περιβαλλοντική μετάβαση που προστατεύει το κλίμα, καθαρίζει τον αέρα στα αστικά κέντρα μειώνοντας δραστικά την τοπική ρύπανση, και προασπίζει μακροπρόθεσμα τη δημόσια υγεία όλων των Ευρωπαίων πολιτών (Virta, 2024).

1.4.2. Ο Κανονισμός AFIR και οι υποδομές φόρτισης σε αστικούς κόμβους

Η φιλόδοξη μετάβαση στις μηδενικές εκπομπές του τομέα των μεταφορών δεν μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά και μόνο μέσω της επιβολής αυστηρών προτύπων CO2 στους κατασκευαστές οχημάτων, καθώς η μαζική υιοθέτηση των ηλεκτρικών φορτηγών μπαταρίας εξαρτάται άμεσα και απόλυτα από την ύπαρξη ενός αξιόπιστου, πυκνού, διαλειτουργικού και εύχρηστου δικτύου επαναφόρτισης (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Προς αυτή την κατεύθυνση, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο υιοθέτησαν τον Κανονισμό (ΕΕ) 2023/1804 για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuels Infrastructure Regulation - AFIR), ο οποίος τέθηκε σε πλήρη εφαρμογή στις 13 Απριλίου 2024 (European Union, 2024; Greenflux, 2024). Ο νέος αυτός Κανονισμός, ως βασικός και αναπόσπαστος πυλώνας της ευρωπαϊκής δέσμης μέτρων "Fit for 55", αντικαθιστά την προγενέστερη και λιγότερο αποτελεσματική Οδηγία 2014/94/ΕΕ, μετατρέποντας τις προηγούμενες "συστάσεις" σε αυστηρές νομικές υποχρεώσεις και συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους που εφαρμόζονται άμεσα και οριζόντια σε όλα τα κράτη-μέλη (European Union, 2024; Transport Community, 2024). Ο

πρωταρχικός στόχος του AFIR είναι να εξαλειφθεί πλήρως το "άγχος της αυτονομίας" (range anxiety) των οδηγών και των διαχειριστών στόλων, δημιουργώντας ένα ομοιογενές πανευρωπαϊκό δίκτυο που θα εξασφαλίζει την ελάχιστη αναγκαία υποδομή για να υποστηρίζει απρόσκοπτα τόσο τις αστικές και περιφερειακές, όσο και τις διασυνοριακές εμπορευματικές μεταφορές (Greenflux, 2024; Virta, 2024).

Για τα βαρέα οχήματα (Heavy-Duty Vehicles - HDVs), στα οποία εντάσσονται τα ηλεκτρικά φορτηγά και τα λεωφορεία, ο Κανονισμός AFIR ορίζει ένα εξαιρετικά φιλόδοξο, χρονικά κλιμακούμενο και λεπτομερές χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης υποδομών ταχείας και υπερταχείας φόρτισης, το οποίο ακολουθεί και αξιοποιεί τη γεωγραφική δομή του Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών (TEN-T). Η νομοθεσία διαχωρίζει σαφώς τις τεχνικές απαιτήσεις μεταξύ του κεντρικού (core) και του εκτεταμένου (comprehensive) οδικού δικτύου TEN-T, επιβάλλοντας σταδιακά αυξανόμενες απαιτήσεις ισχύος και πυκνότητας σταθμών (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Ειδικότερα, ως πρώτο κρίσιμο ορόσημο, έως τις 31 Δεκεμβρίου 2025, τα κράτη-μέλη υποχρεούνται να έχουν εγκαταστήσει δημόσια προσβάσιμους σταθμούς επαναφόρτισης αποκλειστικά για βαρέα οχήματα κατά μήκος τουλάχιστον του 15% του συνολικού δικτύου TEN-T (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; Kempower, 2024). Σε αυτό το αρχικό στάδιο, η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των σταθμών ορίζεται στα 120 χιλιόμετρα, και κάθε "σταθμός/πάρκο επαναφόρτισης" (recharging pool) πρέπει να προσφέρει συνολική ελάχιστη ισχύ 1.400 kW, περιλαμβάνοντας υποχρεωτικά τουλάχιστον ένα μεμονωμένο σημείο φόρτισης με ικανότητα ατομικής ισχύος εξόδου 350 kW ή μεγαλύτερη (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Η υποχρέωση αυτή κλιμακώνεται ραγδαία τα επόμενα έτη, καθώς έως τα τέλη του 2027, το 50% του δικτύου TEN-T πρέπει να καλύπτεται από αντίστοιχες υποδομές. Σε αυτό το σημείο, η απαιτούμενη συνολική ισχύς στον κεντρικό άξονα (core network) διπλασιάζεται στα 2.800 kW ανά σταθμό επαναφόρτισης, προσφέροντας πλέον τουλάχιστον δύο σημεία των 350 kW, ενώ για το εκτεταμένο δίκτυο η συνολική ισχύς διατηρείται στα 1.400 kW (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Η πλήρης

γεωγραφική ανάπτυξη του δικτύου κορυφώνεται και νομικά κλειδώνει το έτος 2030, όπου στο κεντρικό δίκτυο TEN-T η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των σταθμών μειώνεται δραστικά στα 60 χιλιόμετρα, καλύπτοντας το σύνολο του δικτύου. Τότε, η συνολική ελάχιστη ισχύς κάθε σταθμού εκτοξεύεται στο δυσθεώρητο μέγεθος των 3.600 kW, με απαίτηση για τουλάχιστον δύο μεμονωμένα σημεία υπερταχείας φόρτισης των 350 kW το καθένα (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Παράλληλα, για το εκτεταμένο δίκτυο (comprehensive network), το 2030 απαιτούνται σταθμοί συνολικής ισχύος 1.500 kW τοποθετημένοι κάθε 100 χιλιόμετρα το μέγιστο (LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Είναι προφανές ότι αυτές οι αυστηρές προδιαγραφές ισχύος αποσκοπούν στην πλήρη εναρμόνιση του χρόνου φόρτισης με τον υποχρεωτικό νομοθετικά χρόνο ανάπαυσης των οδηγών βαρέων οχημάτων, διασφαλίζοντας την εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας (LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Επιπλέον, για τη διευκόλυνση της διανυκτέρευσης και των μακρών παύσεων, ο AFIR επιβάλλει τη δημιουργία εξειδικευμένων υποδομών φόρτισης σε ασφαλείς και προστατευμένους χώρους στάθμευσης φορτηγών (Safe and Secure Parking Areas). Συγκεκριμένα, απαιτείται η εγκατάσταση τουλάχιστον δύο σημείων φόρτισης με ελάχιστη ισχύ 100 kW ανά ασφαλή χώρο στάθμευσης έως το έτος 2027, τα οποία υποχρεωτικά θα αυξηθούν σε τέσσερα σημεία των 100 kW έως το έτος 2030, επιτρέποντας την αργή και ασφαλή φόρτιση (overnight charging) των φορτηγών κατά τη διάρκεια της νύχτας (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023).

Πέραν της κάλυψης των μεγάλων διαδρόμων αυτοκινητοδρόμων, η ευρωπαϊκή νομοθεσία αναγνωρίζει ρητά ότι οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές και τα logistics της αστικής διανομής του "τελευταίου μιλίου" (last-mile delivery) αποτελούν κρίσιμο και θεμελιώδη κρίκο για την εύρυθμη λειτουργία των ευρωπαϊκών μητροπόλεων και τη ριζική μείωση της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Technical and Regulatory Architecture, 2024). Γι' αυτό τον λόγο, ο Κανονισμός AFIR εισάγει ειδικές, νομικά δεσμευτικές διατάξεις για τους λεγόμενους «αστικούς κόμβους» (urban nodes). Σύμφωνα με τις ρυθμίσεις του

Κανονισμού, έως τις 31 Δεκεμβρίου 2025, σε κάθε αναγνωρισμένο αστικό κόμβο (βάσει των κατευθυντήριων γραμμών του ΤΕΝ-Τ) πρέπει υποχρεωτικά να αναπτυχθούν δημόσια προσβάσιμα σημεία επαναφόρτισης αποκλειστικά σχεδιασμένα για βαρέα οχήματα, τα οποία θα παρέχουν στο σύνολό τους αθροιστική ισχύ εξόδου τουλάχιστον 900 kW (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; Transport Community, 2024). Στη διάταξη αυτή διευκρινίζεται με σαφήνεια ότι το κάθε επιμέρους σημείο επαναφόρτισης εντός των ορίων του αστικού κόμβου θα πρέπει να διαθέτει ελάχιστη ονομαστική ισχύ 150 kW, προκειμένου να εξυπηρετεί ταχέως, αποτελεσματικά και χωρίς καθυστερήσεις τα φορτηγά αστικής διανομής, τα απορριμματοφόρα και τα αστικά λεωφορεία κατά τη διάρκεια των σύντομων στάσεών τους (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; Transport Community, 2024). Καθώς οι στόλοι των ηλεκτρικών αστικών και περιαστικών φορτηγών αναμένεται να γιγαντωθούν με γεωμετρική πρόοδο τα αμέσως επόμενα χρόνια, ο στόχος αυτός ακριβώς διπλασιάζεται για το έτος 2030, χρονιά κατά την οποία η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για ηλεκτρικά φορτηγά σε κάθε αστικό κόμβο οφείλει νομικά να ανέλθει κατ' ελάχιστον στα 1.800 kW, πάντα με σημεία ικανά να παρέχουν τουλάχιστον 150 kW το καθένα (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; Transport Community, 2024). Η στρατηγική αυτή στόχευση στους αστικούς κόμβους αποσκοπεί στρατηγικά στη δημιουργία ενός πυκνού και ισχυρού δικτύου "φόρτισης στον προορισμό" (destination charging), το οποίο θα υποστηρίζει τα φορτηγά μεταφορών και εφοδιασμού ακριβώς τη στιγμή που εκφορτώνουν ή φορτώνουν εμπορεύματα στα κέντρα logistics, στις αποθήκες διανομής, στα λιμάνια και στις βιομηχανικές ζώνες των αστικών κέντρων, ελαχιστοποιώντας έτσι τον "νεκρό χρόνο" (downtime) των οχημάτων (Technical and Regulatory Architecture, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Παράλληλα, διατηρώντας μια τεχνολογικά ουδέτερη προσέγγιση για το μέλλον, ο AFIR απαιτεί νομικά και την ανάπτυξη σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refueling Stations - HRS). Οι σταθμοί αυτοί, με ελάχιστη δυναμικότητα παροχής 1 τόνου υδρογόνου ημερησίως και ικανότητα ανεφοδιασμού υπό πίεση 700 bar, πρέπει να αναπτυχθούν σε κάθε αστικό κόμβο καθώς και κάθε 200 χιλιόμετρα στο κεντρικό δίκτυο ΤΕΝ-Τ το αργότερο έως τις 31

Δεκεμβρίου 2030, εξασφαλίζοντας έτσι ευρείες εναλλακτικές λύσεις για τον τομέα των βαρέων μεταφορών (Transport Community, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023).

Μία από τις πιο καινοτόμες, φιλόδοξες και καταλυτικές παρεμβάσεις του ευρωπαϊκού Κανονισμού AFIR, η οποία φιλοδοξεί να μεταμορφώσει ριζικά την εμπειρία των χρηστών, είναι η αυστηρή ρύθμιση του τρόπου πληρωμής και της τιμολόγησης της παρεχόμενης ενέργειας. Η παρέμβαση αυτή καταργεί οριστικά το μέχρι πρότινος κατακερματισμένο και συχνά δυσλειτουργικό περιβάλλον των πολλαπλών εφαρμογών, των αδιαφανών χρεώσεων και των κλειστών εταιρικών δικτύων. Σύμφωνα με το θεμελιώδες Άρθρο 5 του Κανονισμού, επιβάλλεται ρητά σε όλα τα κράτη-μέλη η διασφάλιση της δυνατότητας "ad hoc" φόρτισης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο κάθε οδηγός ηλεκτρικού επαγγελματικού οχήματος πρέπει να μπορεί να φορτίσει και να πληρώσει άμεσα και εύκολα στον εκάστοτε σταθμό, χωρίς να απαιτείται καμία απολύτως προηγούμενη συμβατική δέσμευση, συνδρομή ή εγγραφή με τον πάροχο (CPO) της υποδομής (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; Transport Community, 2024). Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, όλοι οι νέοι δημόσια προσβάσιμοι σταθμοί επαναφόρτισης με ισχύ 50 kW και άνω —κατηγορία στην οποία προφανώς ανήκουν όλοι ανεξαιρέτως οι σταθμοί που προορίζονται για βαρέα οχήματα— οι οποίοι εγκαθίστανται μετά τις 13 Απριλίου 2024, είναι πλέον νομικά υποχρεωτικό να διαθέτουν ενσωματωμένες ή συνδεδεμένες συσκευές ανάγνωσης καρτών πληρωμής (payment card readers) ή εξοπλισμό για ανέπαφες συναλλαγές (contactless payment devices) (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; Powy, 2025). Οι εταιρείες εκμετάλλευσης μπορούν να επιλέξουν μεταξύ αυτόνομων τερματικών ανά σταθμό φόρτισης ή κεντρικών περιπτέρων πληρωμής (payment kiosks) που ελέγχουν πολλούς σταθμούς ταυτόχρονα (AMPECO, 2024; Virta, 2024). Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ευρωπαϊκών υποδομών δύο ταχυτήτων, ο AFIR ορίζει ότι οι υπάρχοντες σταθμοί ισχύος άνω των 50 kW που βρίσκονται κατά μήκος του δικτύου TEN-T, καθώς και στους ασφαλείς χώρους στάθμευσης, και οι οποίοι λειτουργούσαν ήδη πριν από την ημερομηνία εφαρμογής του Κανονισμού, πρέπει

υποχρεωτικά να αναβαθμιστούν τεχνολογικά εκ των υστέρων (retrofitting). Η αναβάθμιση αυτή, ώστε να προσφέρουν τις εν λόγω άμεσες επιλογές πληρωμής με τραπεζική κάρτα, πρέπει να έχει ολοκληρωθεί το αργότερο έως την 1η Ιανουαρίου 2027 (LIMITE EN - Data - European Union, 2023; KEBA, 2025). Εξίσου ζωτικής σημασίας με τις μεθόδους πληρωμής είναι η διασφάλιση της απόλυτης διαφάνειας των τιμών προς τους τελικούς καταναλωτές. Ο Ευρωπαίος νομοθέτης απαιτεί ρητά οι τιμές πώλησης της ενέργειας να είναι εύλογες, άμεσα συγκρίσιμες, απολύτως διαφανείς και να μην εισάγουν οποιεσδήποτε αθέμιτες διακρίσεις μεταξύ του περιστασιακού ad-hoc πελάτη και των πελατών που φορτίζουν βάσει μόνιμου συμβολαίου (roaming providers) (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; European Union, 2024). Στους σταθμούς ταχείας και υπερταχείας φόρτισης άνω των 50 kW, ο Κανονισμός AFIR ορίζει αυστηρά ότι η χρέωση πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην καταναλισκόμενη ενέργεια, δηλαδή η τιμή οφείλει να εμφανίζεται ρητά και ξεκάθαρα ως «τιμή ανά kWh» πριν την έναρξη της εκάστοτε συνεδρίας φόρτισης (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; Greenflux, 2024). Ωστόσο, αναγνωρίζοντας τις ανάγκες διαθεσιμότητας του δικτύου, επιτρέπεται νομικά στους διαχειριστές να επιβάλλουν ένα πρόσθετο "τέλος κατάληψης" (occupancy fee). Το συγκεκριμένο τέλος θα πρέπει να χρεώνεται αυστηρά ανά λεπτό, προκειμένου να αποθαρρύνεται η μακροχρόνια, αντιπαραγωγική και άσκοπη παραμονή των οχημάτων στα πολύτιμα σημεία υπερταχείας φόρτισης, αφότου έχει ολοκληρωθεί η πλήρωση της μπαταρίας τους (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; Greenflux, 2024).

Σε ένα παράλληλο αλλά απόλυτα αλληλένδετο επίπεδο, ο Κανονισμός AFIR αναλαμβάνει να δημιουργήσει το απαραίτητο τεχνολογικό και ψηφιακό υπόβαθρο, ώστε το σύνολο του δικτύου φόρτισης να είναι πλήρως προετοιμασμένο να ανταποκριθεί στις κολοσσιαίες ενεργειακές απαιτήσεις του μέλλοντος, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ευστάθεια και τη σταθερότητα των εθνικών ηλεκτρικών δικτύων. Βάσει της νέας νομοθεσίας, καθίσταται υποχρεωτικό όλοι οι δημόσια προσβάσιμοι σταθμοί φόρτισης που κατασκευάζονται, εγκαθίστανται ή ανακαινίζονται ριζικά μετά τον Απρίλιο (και Οκτώβριο αντίστοιχα) του 2024, να υποστηρίζουν προηγμένη ψηφιακή συνδεσιμότητα (digitally

connected) και να διαθέτουν αποδεδειγμένα την ικανότητα "έξυπνης επαναφόρτισης" (smart charging) (Greenflux, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Η τεχνολογία της έξυπνης φόρτισης είναι απολύτως κρίσιμη για τη διαχείριση της ενέργειας, καθώς επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της έντασης του παρεχόμενου ρεύματος στο όχημα σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τα σήματα του τοπικού δικτύου, τη ζήτηση ή τα μεταβαλλόμενα τιμολόγια (Kempower, 2024; LIMITE EN - Data - European Union, 2023). Αυτό όχι μόνο αποτρέπει την επικίνδυνη υπερφόρτωση του τοπικού ηλεκτρικού συστήματος από την ταυτόχρονη ταχεία φόρτιση πολλών βαρέων οχημάτων, αλλά διευκολύνει τα μέγιστα τη βέλτιστη ενσωμάτωση της ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) κατά τις ώρες εκτός αιχμής (Kempower, 2024). Σε επίπεδο διαχείρισης και ροής ανοιχτών δεδομένων (open data), ο AFIR θέτει σε άμεση εφαρμογή το νομικό πλαίσιο για την απόλυτη ψηφιακή διαλειτουργικότητα και την έγκυρη πληροφόρηση των χρηστών σε πραγματικό χρόνο. Οι διαχειριστές των υποδομών επαναφόρτισης (Charge Point Operators - CPOs) είναι πλέον νομικά υποχρεωμένοι να παρέχουν εντελώς δωρεάν τα στατικά και δυναμικά δεδομένα λειτουργίας των σταθμών τους, μέσω των λεγόμενων Εθνικών Σημείων Πρόσβασης (National Access Points - NAP) που οφείλει να δημιουργήσει το κάθε κράτος-μέλος (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; AMPECO, 2024). Τα απαιτούμενα στατικά δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως την ακριβή γεωγραφική τοποθεσία, τις ώρες λειτουργίας, τον αριθμό και τον τύπο των βυσμάτων, καθώς και τη μέγιστη ικανότητα ισχύος εξόδου της εγκατάστασης. Στον αντίποδα, τα δυναμικά δεδομένα είναι αυτά που ενημερώνουν τους οδηγούς βαρέων οχημάτων σε πραγματικό χρόνο για την επιχειρησιακή κατάσταση του φορτιστή (για παράδειγμα, εάν λειτουργεί κανονικά ή έχει τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης), τη διαθεσιμότητά του (αν χρησιμοποιείται τη δεδομένη στιγμή από άλλο όχημα) και την τρέχουσα ad-hoc τιμή ρεύματος της στιγμής (Virta, 2024; Greenflux, 2024). Μάλιστα, η κοινοτική νομοθεσία προβλέπει ότι το αργότερο έως τις 14 Απριλίου 2026, όλα τα παραπάνω δεδομένα πρέπει να αναφέρονται και να μεταδίδονται αποκλειστικά χρησιμοποιώντας το ενοποιημένο ευρωπαϊκό ψηφιακό πρότυπο επικοινωνίας DATEX II

(Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2024; AMPECO, 2024). Η αυστηρή υλοποίηση όλων αυτών των τεχνικών και ψηφιακών προδιαγραφών εξασφαλίζει περίτρανα ότι το ραγδαία αναπτυσσόμενο οικοσύστημα της ηλεκτροκίνησης, και δη των βαρέων εμπορευματικών οχημάτων, θα είναι πλήρως, αδιάλειπτα και ασφαλώς ενσωματωμένο στο ευρύτερο ευρωπαϊκό ενεργειακό και μεταφορικό δίκτυο, βελτιστοποιώντας το λειτουργικό κόστος διαχείρισης των εταιρικών στόλων και επιταχύνοντας δραστικά τη μετάβαση σε μια πραγματικά «πράσινη» εφοδιαστική αλυσίδα.

1.4.3. Οι Εθνικοί Στόχοι της Ελλάδας (ΕΣΕΚ) για τις Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές

Η εθνική στρατηγική της Ελλάδας για την ανάσχεση της κλιματικής αλλαγής και τη ριζική αναδιαμόρφωση του ενεργειακού της μείγματος αποτυπώνεται με απόλυτη σαφήνεια στο αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Ε.Σ.Ε.Κ.), το οποίο εγκρίθηκε επίσημα στα τέλη του 2024 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Κεντρικός πυλώνας αυτού του στρατηγικού κειμένου είναι η επίτευξη πλήρους κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, με έναν εξαιρετικά φιλόδοξο ενδιάμεσο στόχο που προβλέπει τη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 54% έως 55% το 2030, σε σύγκριση με τα ιστορικά επίπεδα του 1990 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Στο πλαίσιο αυτής της κολοσσιαίας προσπάθειας μετάβασης, ο τομέας των μεταφορών εντοπίζεται ως μία από τις μεγαλύτερες και πλέον δυσεπίλυτες προκλήσεις, καθώς αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη χώρα (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αποτελεί, μάλιστα, τον μοναδικό τομέα της ελληνικής οικονομίας στον οποίο παρατηρείται ανησυχητική αύξηση των εκπομπών (κατά περίπου 13%) μεταξύ των ετών 1990 και 2021 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Εντός αυτού του τομέα, οι οδικές μεταφορές –στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο πυρήνας της αστικής εμπορευματικής διανομής– ευθύνονται για τη συντριπτική πλειονότητα, αγγίζοντας το 85% του συνόλου των εκπομπών των μεταφορών (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ

ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η προσπάθεια απανθρακοποίησης στην Ελλάδα περιπλέκεται περαιτέρω από ένα δομικό μειονέκτημα: η χώρα διαθέτει έναν από τους γηραιότερους και πλέον ρυπογόνους στόλους οχημάτων σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση, με τη μέση ηλικία των επιβατικών να φτάνει τα 17 έτη και των φορτηγών να εκτοξεύεται στα 23 έτη (συγκριτικά με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο των 12 και 14,2 ετών αντίστοιχα) (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ωστόσο, το ΕΣΕΚ αντιμετωπίζει αυτή την υστέρηση ως μια τεράστια ευκαιρία για ραγδαία ανανέωση του εθνικού στόλου μέσω της μαζικής εισαγωγής τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών (ΥΠΕΝ_ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΕΣΕΚ, 2023).

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, ιδίως στον κρίσιμο τομέα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών και της διανομής "τελευταίου μιλίου" (last-mile logistics), το ΕΣΕΚ θέτει νομικά δεσμευτικούς και αυστηρά ποσοτικοποιημένους στόχους για τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (Light Commercial Vehicles - LCVs) μικτού βάρους έως 3,5 τόνων (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η στρατηγική αυτή διαφοροποιείται ριζικά από το παρελθόν, καθώς θεσπίζει για πρώτη φορά διακριτούς στόχους αποκλειστικά για τα ελαφρά φορτηγά, αναγνωρίζοντας τον καταλυτικό τους ρόλο στην "πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα" (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Το εθνικό σχέδιο προκρίνει ως βασικό μοχλό απανθρακοποίησης των LCVs τον άμεσο εξηλεκτρισμό τους και εξετάζει δύο διακριτά σενάρια υλοποίησης: το "Σενάριο Βάσης" (Σενάριο Α), το οποίο στηρίζεται στη συνέχιση των υφιστάμενων μέτρων, και το "Αισιόδοξο Σενάριο" (Σενάριο Β), το οποίο υιοθετείται ως ο κεντρικός πυλώνας της νέας κυβερνητικής πολιτικής και προϋποθέτει την εφαρμογή αυξημένων, επιθετικών μέτρων προώθησης της ηλεκτροκίνησης (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Σύμφωνα με το Σενάριο Β, η διείσδυση των νέων ηλεκτρικών ελαφρών φορτηγών (BEV και PHEV) στο σύνολο των ετήσιων ταξινομήσεων οφείλει να ακολουθήσει μια εκθετική, γεωμετρική πρόοδο. Ειδικότερα, ο στόχος διείσδυσης ξεκινά από το 11% για το έτος 2024, αυξάνεται στο 15% το 2025, αγγίζει το 19% το 2026, και κλιμακώνεται συστηματικά φτάνοντας το 24% το 2027 και το 29% το 2028 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η κορύφωση αυτής της δεκαετούς προσπάθειας αναμένεται στο τέλος της δεκαετίας, με τον στόχο να ορίζεται στο 34% για το 2029 και να καταλήγει στο

εξαιρετικά φιλόδοξο 40% το έτος 2030 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Είναι χαρακτηριστικό πως, εντός αυτής της νέας αγοράς ηλεκτρικών LCVs, η τεχνολογική επιλογή είναι ξεκάθαρη: τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV) αναμένεται να κυριαρχήσουν ολοκληρωτικά, αντιπροσωπεύοντας ένα συντριπτικό ποσοστό που θα ξεπερνά το 90% έως 95% των συνολικών πωλήσεων έναντι των plug-in υβριδικών (PHEV) καθ' όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου μέχρι το 2030 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η συνδυασμένη αυτή στρατηγική αναμένεται να αυξήσει τον συνολικό κυκλοφορούντα στόλο ηλεκτροκίνητων ελαφρών οχημάτων (επιβατικών και LCVs) από μόλις 30.600 οχήματα το 2023, σε περισσότερα από 460.000 οχήματα έως το τέλος της δεκαετίας (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Παράλληλα με τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, η αστική και περιαστική εμπορευματική διανομή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα βαρέα οχήματα (Heavy-Duty Vehicles - HDVs), δηλαδή φορτηγά με μικτό βάρος άνω των 3,5 τόνων. Το αναθεωρημένο ΕΣΕΚ προσεγγίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία με ισχυρό ρεαλισμό, καθώς αναγνωρίζει ότι η ελληνική αγορά βαρέων οχημάτων εξαρτάται παραδοσιακά από την αθρόα εισαγωγή μεταχειρισμένων και παλαιότερης τεχνολογίας φορτηγών (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αυτό το δομικό φαινόμενο καθυστερεί σημαντικά την άμεση και ορατή μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του εν κυκλοφορία στόλου, παρά την αυστηροποίηση των ευρωπαϊκών προτύπων CO2 για τα ολοκαίνουρια οχήματα (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ως εκ τούτου, για να επιτευχθεί η πλήρης κλιματική ουδετερότητα στον τομέα των HDVs, η εθνική στρατηγική διαχωρίζει ρητά τις τεχνολογικές λύσεις με βάση το μεταφορικό έργο. Για τα φορτηγά που εκτελούν δρομολόγια μικρών αποστάσεων (short-haul) –κατηγορία στην οποία εμπίπτει κατεξοχήν η αστική εμπορευματική διανομή και η τροφοδοσία καταστημάτων– προκρίνεται κατηγορηματικά ο άμεσος και πλήρης εξηλεκτρισμός του κλάδου (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αντιθέτως, για τις βαριές οδικές μεταφορές μεγάλων αποστάσεων (long-haul), το ΕΣΕΚ υιοθετεί έναν τεχνολογικό πλουραλισμό, προκρίνοντας έναν συνδυασμό λύσεων που περιλαμβάνει όχι μόνο τον ηλεκτρισμό, αλλά και το πράσινο

υδρογόνο, καθώς και τη χρήση ανανεώσιμων αερίων καυσίμων με μειωμένο ανθρακικό αποτύπωμα (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Μέχρι το έτος 2030, τα πετρελαιοειδή θα παραμείνουν το κυρίαρχο καύσιμο για τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα, καταναλώνοντας περίπου 873,5 ktoe (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ωστόσο, η ενεργειακή μετάβαση στα αστικά και περιαστικά φορτηγά επιταχύνεται δραματικά τη χρονική περίοδο 2030-2050. Σε αυτό το διάστημα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτροκίνητα HDVs προβλέπεται να εκτοξευθεί από τα 17,9 ktoe (το 2030) στο εντυπωσιακό μέγεθος των 618,3 ktoe το 2050, καθιστώντας τον ηλεκτρισμό τον απόλυτο κυρίαρχο των μελλοντικών βαρέων μεταφορών (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Για να μετουσιωθούν αυτοί οι στόχοι σε πράξη, η ελληνική πολιτεία αναπτύσσει ένα εξαιρετικά πυκνό, παρεμβατικό και πολυεπίπεδο σύστημα μέτρων πολιτικής, το οποίο στοχεύει άμεσα στη δημιουργία μιας «πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας». Η πολιτική προσέγγιση συνδυάζει ισχυρά κίνητρα (carrots) και αυστηρά αντικίνητρα (sticks). Σε επίπεδο κινήτρων, προβλέπεται η παροχή τόσο άμεσων οικονομικών επιδοτήσεων όσο και έμμεσων φορολογικών ελαφρύνσεων σε νομικά και φυσικά πρόσωπα για την κτήση ηλεκτρικών ελαφρών φορτηγών και βαν αστικής διανομής (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η προσπάθεια αυτή ενισχύεται μέσω της ανανέωσης και ουσιαστικής εφαρμογής του νόμου 4302/2014 περί «πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας», ο οποίος θα επιβάλλει την αυστηρή καταγραφή των περιβαλλοντικών επιδόσεων και των εκπομπών θερμοκηπίου τόσο κατά τη διάρκεια της οδικής διανομής εμπορευμάτων όσο και εντός των Κέντρων Αποθήκευσης και Διανομής (logistics centers) (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Παράλληλα, τα κίνητρα επεκτείνονται και στις μικρο-μεταφορές "τελευταίου μιλίου", επιδοτώντας στρατηγικά την αντικατάσταση των παραδοσιακών ρυπογόνων δικύκλων διανομής με ηλεκτρικά ποδήλατα μεταφοράς φορτίου (e-cargo bikes) (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Στον αντίποδα, η ελληνική νομοθεσία θα σκληρύνει τη στάση της απέναντι στα παλαιά, ρυπογόνα επαγγελματικά οχήματα. Θα εφαρμοστούν δυναμικά μέτρα απόσυρσης παλαιών συμβατικών οχημάτων, τα οποία θα συνδυαστούν με εξαιρετικά αυστηρούς τεχνικούς ελέγχους (τόσο στα ΚΤΕΟ όσο και με

ελέγχους στον δρόμο) προκειμένου να απομακρυνθούν τα οχήματα που δεν πληρούν τις προδιαγραφές (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ακόμη πιο καθοριστική για τον αστικό ιστό θα είναι η θεσμοθέτηση αυστηρών αντικινήτρων για τη χρήση παλαιών οχημάτων θερμικού κινητήρα, εμποδίζοντας ή επιβαρύνοντας οικονομικά την είσοδό τους στα κέντρα των μεγάλων πόλεων (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Η μετάβαση, ωστόσο, του αστικού εμπορευματικού στόλου στην ηλεκτροκίνηση θεωρείται πρακτικά αδύνατη χωρίς την ταυτόχρονη, σαρωτική ανάπτυξη των υποδομών ταχείας και υπερταχείας φόρτισης, μια πραγματικότητα που το ΕΣΕΚ ενσωματώνει πλήρως στον πυρήνα του σχεδιασμού του (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αναγνωρίζοντας ότι η διαθεσιμότητα φόρτισης αποτελεί το σημαντικότερο προαπαιτούμενο, ο εθνικός σχεδιασμός εναρμονίζεται απόλυτα με τις δεσμεύσεις που απορρέουν από τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό AFIR (2023/1804). Ο Κανονισμός αυτός επιβάλλει στην Ελλάδα την υποχρέωση να εξασφαλίσει δημοσίως προσβάσιμη ισχύ εξόδου ίση με 1,3 kW για κάθε αμιγώς ηλεκτρικό όχημα (BEV) και 0,8 kW για κάθε plug-in υβριδικό (PHEV) που προστίθεται στον εθνικό στόλο (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Με βάση την εκτιμώμενη ραγδαία αύξηση των ηλεκτρικών LCVs και επιβατικών, αυτό μεταφράζεται σε μια κολοσσιαία απαίτηση συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σταθμών φόρτισης που θα πρέπει να ξεπερνά τα 550 MW έως το έτος 2030 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Σε απόλυτους αριθμούς, το εθνικό σχέδιο οραματίζεται την εγκατάσταση από 40.000 έως και 100.000 δημοσίως προσβάσιμων σημείων φόρτισης μέχρι το τέλος της τρέχουσας δεκαετίας, καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες των αστικών εμπορευματικών στόλων (Technical and Regulatory Architecture, 2024).

Για να διασφαλιστεί η έγκαιρη κάλυψη αυτών των αναγκών, η ελληνική πολιτεία έχει ήδη θέσει σε εφαρμογή στοχευμένα προγράμματα, όπως η δράση «Φορτίζω Παντού», η οποία αξιοποιεί πόρους 80 εκατομμυρίων ευρώ από το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Το εν λόγω πρόγραμμα στοχεύει στην άμεση εγκατάσταση τουλάχιστον 4.500 έως 8.000 δημόσιων σημείων φόρτισης,

δίνοντας στρατηγική έμφαση στις αστικές περιοχές όπου η ιδιωτική στάθμευση και φόρτιση καθίσταται εξαιρετικά δυσχερής για τους διαχειριστές στόλων διανομής (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Παράλληλα, το ΕΣΕΚ απαιτεί την ψηφιακή αναβάθμιση αυτών των υποδομών: οι νέοι σταθμοί οφείλουν να ενσωματώνουν "ευφυή συστήματα φόρτισης" (smart charging), τα οποία θα επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο με τον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Μέσω της δυναμικής τιμολόγησης, η φόρτιση των αστικών εμπορευματικών οχημάτων θα κατευθύνεται στις ώρες χαμηλής ζήτησης ή υψηλής παραγωγής από ΑΠΕ, αποτρέποντας την υπερφόρτωση των τοπικών υποσταθμών διανομής και μειώνοντας δραστικά το λειτουργικό (ενεργειακό) κόστος (TCO) για τις εταιρείες logistics (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η ολιστική αυτή προσέγγιση της Ελλάδας καταδεικνύει ότι ο εξηλεκτρισμός των αστικών μεταφορών δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική αλλαγή του οχήματος, αλλά έναν πλήρη, πολυπαραγοντικό μετασχηματισμό του ενεργειακού και συγκοινωνιακού οικοσυστήματος των ελληνικών πόλεων.

1.4.4. Εθνική νομοθεσία για την πράσινη εφοδιαστική αλυσίδα και τη διανομή "Last-Mile"

Η επιτακτική ανάγκη εναρμόνισης της Ελλάδας με τους φιλόδοξους ευρωπαϊκούς στόχους του πακέτου "Fit for 55" και η μετάβαση προς ένα κλιματικά ουδέτερο μέλλον, οδήγησαν στη θέσπιση ενός εξαιρετικά παρεμβατικού και πολυεπίπεδου εθνικού νομοθετικού πλαισίου. Το θεσμικό αυτό πλαίσιο εστιάζει κατά προτεραιότητα στον τομέα των μεταφορών, ο οποίος αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου (ΑτΘ) στην Ελλάδα και, ανησυχητικά, τον μοναδικό τομέα της εθνικής οικονομίας όπου καταγράφηκε αύξηση των εκπομπών κατά περίπου 13% μεταξύ των ετών 1990 και 2021 (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Με τις οδικές μεταφορές να ευθύνονται για το 85% αυτών των εκπομπών, η ελληνική πολιτεία αναγνώρισε ότι η

απαλλαγή της εφοδιαστικής αλυσίδας και ειδικότερα της αστικής διανομής εμπορευμάτων από τον άνθρακα αποτελεί τον θεμέλιο λίθο της εθνικής περιβαλλοντικής πολιτικής (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Ως επιστέγασμα αυτής της στρατηγικής, ψηφίστηκε ο πρώτος Εθνικός Κλιματικός Νόμος (ν. 4936/2022), ο οποίος μεταφράζει τις διεθνείς δεσμεύσεις σε αυστηρούς, μετρήσιμους και νομικά δεσμευτικούς κανόνες, επηρεάζοντας άμεσα τη δομή, τη λειτουργία και τον εταιρικό σχεδιασμό των επιχειρήσεων logistics και αστικών διανομών (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος (ν. 4936/2022) εισάγει μια ριζοσπαστική παρέμβαση στον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες ανανεώνουν και διαχειρίζονται τους εμπορευματικούς και εταιρικούς τους στόλους, εγκαθιδρύοντας ένα σύστημα υποχρεωτικών ποσοστώσεων (quotas) για την εισαγωγή οχημάτων μηδενικών ή εξαιρετικά χαμηλών εκπομπών. Σύμφωνα με τις διατάξεις του νόμου, θεσπίζεται ένα απολύτως κρίσιμο ορόσημο: από την 1η Ιανουαρίου 2026, τουλάχιστον το ένα τρίτο (ήτοι το 33,3%) όλων των νέων εταιρικών οχημάτων που ταξινομούνται στην Ελλάδα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα και τα βαν (LCVs) που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των αστικών διανομών, πρέπει υποχρεωτικά να είναι είτε αμιγώς ηλεκτρικά (BEV) είτε plug-in υβριδικά (PHEV) (Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024). Μάλιστα, για να προσμετρηθούν στην ποσόστωση, τα υβριδικά οχήματα οφείλουν να εκπέμπουν λιγότερο από 50 γραμμάρια CO2 ανά χιλιόμετρο (Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024). Αυτή η νομική υποχρέωση λειτουργεί ως ένας πανίσχυρος "μοχλός ώθησης" (push factor) για ολόκληρη την αγορά της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αναγκάζει τις εταιρείες ταχυμεταφορών (couriers), τις αλυσίδες λιανικής, τα σούπερ μάρκετ και τους παρόχους υπηρεσιών logistics (3PL) να ενσωματώσουν άμεσα τον εξηλεκτρισμό στο λειτουργικό τους μοντέλο (TCO - Total Cost of Ownership), εγκαταλείποντας οριστικά τη μονοπωλιακή εξάρτηση από τα πετρελαιοκίνητα βαν (Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024; ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η στρατηγική αυτή στόχευση στους

εταιρικούς στόλους δεν είναι τυχαία. Τα εταιρικά οχήματα διανύουν πολλαπλάσια χιλιόμετρα εντός του αστικού ιστού σε σχέση με τα ιδιωτικά, με αποτέλεσμα ο εξηλεκτρισμός τους να επιφέρει δυσανάλογα μεγάλο και άμεσο όφελος τόσο στη μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όσο και στη δραστική βελτίωση της ποιότητας του αέρα στα αστικά κέντρα (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Παράλληλα με τον Κλιματικό Νόμο, η ελληνική νομοθεσία δημιουργεί ένα αυστηρό πλαίσιο λογοδοσίας, διαφάνειας και παρακολούθησης των περιβαλλοντικών επιδόσεων μέσω της πλήρους ενεργοποίησης και ενίσχυσης του ν. 4302/2014 για την «Πράσινη Εφοδιαστική Αλυσίδα» (Green Logistics). Το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) αναγνωρίζει ρητά ότι η απανθρακοποίηση δεν αφορά μόνο το ίδιο το όχημα (εξάτμιση), αλλά το σύνολο των διαδικασιών αποθήκευσης, μεταφόρτωσης και μεταφοράς (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η εφαρμογή του άρθρου 5 του ν. 4302/2014 καθιστά νομικά επιβεβλημένη τη λεπτομερή και συστηματική καταγραφή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG emissions) σε κάθε κρίκο της αλυσίδας. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο τις εκπομπές που προέρχονται από την ίδια την οδική μεταφορά και τη διανομή εμπορευμάτων με φορτηγά, αλλά και την αποτύπωση της κατανάλωσης ενέργειας εντός των Κέντρων Αποθήκευσης και Διανομής (Logistics Centers και Hubs) (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η θεσμική αυτή υποχρέωση καταγραφής αναμένεται να λειτουργήσει καταλυτικά, δημιουργώντας ένα διαφανές και συγκρίσιμο πλαίσιο μέτρησης (benchmarking) που θα αναδεικνύει τις εταιρείες που επενδύουν στον εξηλεκτρισμό και την ενεργειακή απόδοση. Μέσω αυτής της διαφάνειας, οι πελάτες και οι καταναλωτές αποκτούν ορατότητα στο πραγματικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των παραγγελιών τους, ωθώντας κατ' επέκταση τους παρόχους logistics σε έναν «πράσινο» ανταγωνισμό, όπου η χρήση ηλεκτρικών φορτηγών μπαταρίας θα αποτελεί πλέον κρίσιμο συγκριτικό πλεονέκτημα και προαπαιτούμενο βιωσιμότητας (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Η νομοθετική παρέμβαση γίνεται ακόμη πιο εξειδικευμένη και στοχευμένη όταν

προσεγγίζει την αποκαλούμενη διανομή του «τελευταίου μιλίου» (last-mile delivery), η οποία αποτελεί το πιο πολύπλοκο, ενεργοβόρο και ρυπογόνο τμήμα των αστικών εμπορευματικών μεταφορών. Η ραγδαία άνοδος του ηλεκτρονικού εμπορίου έχει πολλαπλασιάσει τον αριθμό των μικρών, συχνών παραδόσεων εντός των πυκνοκατοικημένων αστικών κέντρων, αυξάνοντας δραματικά την κυκλοφοριακή συμφόρηση και την τοπική ρύπανση. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, η εθνική νομοθεσία, μέσω του ΕΣΕΚ, δεν περιορίζεται στην απλή προώθηση των ηλεκτρικών βαν, αλλά εισάγει ρητές πολιτικές για τον ριζικό μετασχηματισμό των μικρο-μεταφορών (micro-mobility). Συγκεκριμένα, προβλέπεται η άμεση θέσπιση ισχυρών οικονομικών κινήτρων για την αντικατάσταση των συμβατικών, ρυπογόνων δίκυκλων (που χρησιμοποιούνται μαζικά από τις υπηρεσίες courier και διανομής φαγητού) με ηλεκτρικά ποδήλατα μεταφοράς φορτίου (e-cargo bikes) (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η νομική αναγνώριση και η επιδότηση των e-cargo bikes ως βασικών εργαλείων επαγγελματικής χρήσης για την εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί μια καινοτομία που επαναπροσδιορίζει τη λογική της αστικής παράδοσης. Τα οχήματα αυτά, μηδενικών εκπομπών και εξαιρετικά ευέλικτα, μπορούν να παρακάμπτουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση, να έχουν πρόσβαση σε πεζοδρομημένες ζώνες και περιοχές ήπιας κυκλοφορίας, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος λειτουργίας για τις εταιρείες και την ηχορύπανση για τους κατοίκους (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

Ωστόσο, το εθνικό νομοθετικό πλαίσιο λειτουργεί με τη διττή λογική του "μαστίγιου και καρότου" (push-and-pull effect). Παράλληλα με τα ισχυρά κίνητρα κτήσης ηλεκτρικών οχημάτων, το ΕΣΕΚ και η εθνική πολιτική προαναγγέλλουν τη σταδιακή θεσμοθέτηση αυστηρών αντικινήτρων (disincentives) για τη χρήση παλαιών, ρυπογόνων οχημάτων θερμικού κινητήρα (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η στρατηγική αυτή περιλαμβάνει τη δημιουργία Ζωνών Χαμηλών Εκπομπών (Low Emission Zones) στα κέντρα των μεγάλων πόλεων, οι οποίες θα περιορίζουν, θα τιμολογούν υψηλότερα, ή ακόμη και θα απαγορεύουν πλήρως την είσοδο παλαιών πετρελαιοκίνητων βαν και φορτηγών αστικής διανομής (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αυτά τα αντικίνητρα, τα οποία

θα αυστηροποιούνται σταδιακά λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό ανανέωσης του εθνικού στόλου, αποτελούν το ισχυρότερο νομοθετικό εργαλείο για την απομάκρυνση των συμβατικών φορτηγών από τον αστικό ιστό (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η πολιτική αυτή συνδέεται άρρηκτα με τον συνολικό χωροταξικό και συγκοινωνιακό ανασχεδιασμό των πόλεων μέσω της υποχρεωτικής εκπόνησης Σχεδίων Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (Σ.Β.Α.Κ.). Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία, όλοι οι Δήμοι με πληθυσμό άνω των 30.000 κατοίκων, καθώς και οι Περιφέρειες, υποχρεούνται νομικά να καταρτίσουν, να θεσμοθετήσουν και να εφαρμόσουν τέτοια σχέδια (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Τα Σ.Β.Α.Κ. δεν αντιμετωπίζουν αποσπασματικά το κυκλοφοριακό, αλλά επανασχεδιάζουν συνολικά τον αστικό χώρο, δίνοντας νομική και χωροταξική προτεραιότητα στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, στη μικροκινητικότητα, στους πεζούς και στα ηλεκτρικά εμπορευματικά οχήματα μηδενικών ρύπων. Η συνδυασμένη δράση του Κλιματικού Νόμου, της νομοθεσίας για την Πράσινη Εφοδιαστική Αλυσίδα (ν. 4302/2014) και των Σ.Β.Α.Κ., συγκροτεί ένα αδιαπέραστο νομικό και κανονιστικό πλέγμα. Το πλέγμα αυτό καθιστά απολύτως σαφές σε κάθε εμπλεκόμενο στον τομέα των logistics ότι το μέλλον των αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα θα είναι υποχρεωτικά, αποκλειστικά και νομοθετικά επιβεβλημένα, ηλεκτρικό και βιώσιμο (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024).

1.4.5. Εθνικά οικονομικά κίνητρα και προγράμματα επιδότησης εμπορευματικών στόλων

Η επιτυχής υλοποίηση των φιλόδοξων εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για την πλήρη απανθρακοποίηση των αστικών εμπορευματικών μεταφορών εξαρτάται σε θεμελιώδη βαθμό από την ικανότητα της εθνικής οικονομίας να υπερβεί το σημαντικότερο ίσως εμπόδιο της αγοράς: το εξαιρετικά υψηλό αρχικό κόστος κτήσης (CAPEX) των επαγγελματικών ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας συγκριτικά με τα αντίστοιχα οχήματα

συμβατικής τεχνολογίας (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αν και σε βάθος χρόνου η μετάβαση σε ηλεκτρικούς στόλους επιφέρει δραστική εξοικονόμηση στο συνολικό λειτουργικό κόστος (OPEX) των επιχειρήσεων logistics, η αρχική κεφαλαιακή δαπάνη αποτελεί ισχυρό αποτρεπτικό παράγοντα, ιδιαίτερα για τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στη διανομή του «τελευταίου μιλίου» (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Αναγνωρίζοντας αυτή την αστοχία της αγοράς και την κρισιμότητα της επενδυτικής ασφάλειας, η Ελληνική Πολιτεία, σε πλήρη ευθυγράμμιση με τις κατευθύνσεις του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), έχει θέσει σε εφαρμογή ένα πολυεπίπεδο, στοχευμένο και εξαιρετικά γενναιόδωρο πλαίσιο άμεσων οικονομικών κινήτρων, το οποίο φιλοδοξεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την ταχεία ανανέωση του ρυπογόνου εθνικού εμπορευματικού στόλου (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Το χρηματοδοτικό αυτό πλαίσιο αντλεί τους πόρους του από κορυφαία ευρωπαϊκά και εθνικά εργαλεία, αξιοποιώντας τόσο τα κονδύλια του Ταμείου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας, όσο και τα έσοδα του ελληνικού κράτους από το ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025; ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Μάλιστα, η νομική υποχρέωση διοχέτευσης των εσόδων από τους πλειστηριασμούς των αδιάθετων δικαιωμάτων ρύπων αποκλειστικά σε δράσεις κλιματικού σκοπού, οδήγησε στη δημιουργία ενός ειδικού λογαριασμού στην Τράπεζα της Ελλάδος, ο οποίος αποτελεί την κύρια δεξαμενή ρευστότητας για την επιδότηση της ηλεκτροκίνησης στη χώρα (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025).

Η «ναυαρχίδα» της εθνικής επιδοματικής πολιτικής για την υποστήριξη της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το πρόγραμμα «Κινούμαι Ηλεκτρικά». Μετά την ολοκλήρωση των δύο πρώτων κύκλων (Α' και Β'), οι οποίοι εγκαθίδρυσαν τις πρώτες βάσεις της αγοράς και οδήγησαν σε δεκάδες χιλιάδες αιτήσεις, το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών προχώρησε τον Μάιο του 2024 στην προκήρυξη της Δράσης «Κινούμαι Ηλεκτρικά - Γ' κύκλος» (Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ', 2024). Το πρόγραμμα αυτό σχεδιάστηκε με διακριτή στόχευση αφενός στα φυσικά πρόσωπα (Κατηγορία Α) και αφετέρου στα νομικά πρόσωπα και τις επιχειρήσεις (Κατηγορία Β), ενσωματώνοντας πλέον την εμπειρία των

προηγούμενων ετών για να απαντήσει πιο αποτελεσματικά στις πραγματικές ανάγκες της εφοδιαστικής αλυσίδας (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Αρχικά, οι όροι του Γ' κύκλου για τους εταιρικούς στόλους (Κατηγορία Β) προέβλεπαν την επιδότηση αμιγώς ηλεκτρικών ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων (κατηγορίας Ν1) με οικολογικό bonus που ανερχόταν στο 30% επί της Λιανικής Τιμής Προ Φόρων (Λ.Τ.Π.Φ.) με ανώτατο όριο τις 6.000 ευρώ για εταιρείες που αιτούνταν από 1 έως 20 οχήματα, και στο 20% (έως 4.000 ευρώ) για μεγαλύτερους εταιρικούς στόλους (Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ', 2024; Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024). Ωστόσο, η αυξανόμενη ζήτηση, η ταχύτατη εξέλιξη της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων, και η ανάγκη βελτιστοποίησης της κατανομής των δημοσίων πόρων, οδήγησαν την Ελληνική Κυβέρνηση σε μια κρίσιμη και ριζική αναθεώρηση του προγράμματος στα μέσα του 2025, μέσω της έκδοσης της υπ' αριθμόν απόφασης 124757/2025 (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025).

Η δεύτερη αυτή τροποποίηση του Γ' κύκλου επανακαθορίζει το τοπίο των επιδοτήσεων για τις αστικές εμπορευματικές μεταφορές, θεσπίζοντας αυστηρότερους αλλά ταυτόχρονα πιο στοχευμένους κανόνες, με αποκλειστικό σκοπό να αυξηθεί κατακόρυφα ο αριθμός των τελικών ωφελούμενων επιχειρήσεων. Σύμφωνα με το νέο θεσμικό πλαίσιο, ο συνολικός προϋπολογισμός της Δράσης για την Κατηγορία Β (Νομικά Πρόσωπα και Επιχειρήσεις) καθορίζεται στα 20.000.000 ευρώ, εκ των οποίων τα 19.700.000 ευρώ δεσμεύονται ρητά για την επιδότηση αυτοκινήτων (M1-N1) και οχημάτων μικροκινητικότητας (L1e-L7e), ενώ 300.000 ευρώ κατευθύνονται αποκλειστικά στην αγορά ηλεκτρικών ποδηλάτων για εταιρική χρήση (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Το πλέον κομβικό σημείο της νέας Κ.Υ.Α. είναι η ριζική αλλαγή του μοντέλου υπολογισμού του οικολογικού bonus για τα ηλεκτρικά βαν αστικής διανομής (Ν1). Αντί της προηγούμενης ποσοστιαίας επιδότησης, πλέον θεσπίζεται ένα αυστηρό, οριζόντιο, κατ' αποκοπή ποσό ύψους 3.000 ευρώ ανά όχημα (flat rate) (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Παράλληλα, εισάγεται για πρώτη φορά ένα αυστηρό ανώτατο όριο τιμής (price cap): το πρόγραμμα δεν επιδοτεί πλέον σε καμία περίπτωση εμπορευματικά ή εταιρικά οχήματα των οποίων η Λιανική Τιμή Προ Φόρων υπερβαίνει τις 50.000 ευρώ (Κ.Υ.Α. 124757/2025,

2025). Η ρυθμιστική αυτή παρέμβαση διαθέτει ξεκάθαρη οικονομική λογική: αποτρέπει τη σπατάλη δημόσιου χρήματος για την αγορά υπερπολυτελών επαγγελματικών οχημάτων υψηλού κόστους, και αντίθετα κατευθύνει αναγκαστικά τις εταιρείες logistics στην επιλογή πιο προσιτών, πρακτικών και ελαφρύτερων ηλεκτρικών βαν αστικής διανομής (last-mile delivery vans), διασφαλίζοντας ότι ο διαθέσιμος προϋπολογισμός των 20 εκατομμυρίων ευρώ θα εξυπηρετήσει πολύ μεγαλύτερο αριθμό εταιρικών στόλων και θα οδηγήσει σε ταχύτερη αντικατάσταση παλαιών οχημάτων.

Πέραν των παραδοσιακών ελαφρών φορτηγών (LCVs), η εθνική νομοθεσία αναγνωρίζει έμπρακτα ότι ο πυρήνας της κυκλοφοριακής συμφόρησης στα πυκνοκατοικημένα ελληνικά αστικά κέντρα απαιτεί νέες μορφές μικροκινητικότητας (micro-mobility) για τη διανομή εμπορευμάτων, ιδιαίτερα στον ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο των ταχυμεταφορών (couriers) και των παραδόσεων εστίασης (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Για το λόγο αυτό, ο αναθεωρημένος Γ' Κύκλος επιδοτεί γενναιόδωρα νομικά πρόσωπα για την απόκτηση οχημάτων κατηγορίας L (δίκυκλα, τρίκυκλα και βαρέα τετράκυκλα) τα οποία χρησιμοποιούνται μαζικά ως e-cargo bikes και μικρά οχήματα αστικής τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, για τις κατηγορίες L1e έως και L4e, η επιδότηση καθορίζεται στο 20% της Λ.Τ.Π.Φ. με μέγιστο όφελος τα 700 ευρώ, ενώ για τα βαρύτερα και ισχυρότερα οχήματα των κατηγοριών L5e έως και L7e, η επιδότηση αγγίζει το 30% με το μέγιστο ποσό να φτάνει τα 1.500 ευρώ ανά όχημα (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Επιπροσθέτως, το πρόγραμμα στηρίζει ξεκάθαρα την έννοια της "πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας" παρέχοντας επιδότηση ύψους 30% (με μέγιστο ποσό τα 500 ευρώ) για την αγορά επαγγελματικών ηλεκτρικών ποδηλάτων (e-bikes), υπό την αυστηρή προϋπόθεση ότι η κύρια δραστηριότητα της επιχείρησης δικαιολογεί τη χρήση τους για υπηρεσίες μεταφοράς (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Μια σημαντική, καινοτόμος προσθήκη του νέου πλαισίου είναι η κάλυψη εξειδικευμένων τεχνικών αναγκών της μικρο-διανομής: το πρόγραμμα ενισχύει την αγορά επιπλέον (δεύτερης) μπαταρίας για τα οχήματα τύπου L με το ποσό των 150 ευρώ, διασφαλίζοντας έτσι ότι οι εταιρείες διανομών μπορούν να διπλασιάσουν την αυτονομία και τον χρόνο παραγωγικής λειτουργίας των δίκυκλων τους

(uptime) (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025).

Το σύστημα των άμεσων επιδοτήσεων δεν λειτουργεί αποσπασματικά, αλλά συμπληρώνεται από ένα έξυπνο πλέγμα παράλληλων και αθροιστικών κινήτρων (bonus), που αποσκοπούν στην επίλυση συγκεκριμένων περιβαλλοντικών και γεωγραφικών προβλημάτων της χώρας. Το πιο κρίσιμο από αυτά είναι το οικονομικό κίνητρο απόσυρσης (scrappage scheme), το οποίο αποτελεί το ισχυρότερο εργαλείο για τη ριζική απομάκρυνση των παλαιών, εξαιρετικά ρυπογόνων πετρελαιοκίνητων βαν από τους δρόμους των πόλεων (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024; Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Βάσει της αναθεωρημένης Κ.Υ.Α., κάθε εταιρεία που επιλέγει την απόσυρση και οριστική καταστροφή ενός συμβατικού εμπορευματικού οχήματος κατηγορίας N1 ή επιβατικού M1, λαμβάνει ένα επιπρόσθετο, απόλυτα συνδυαστικό bonus ύψους 1.500 ευρώ ανά όχημα (ή 200 ευρώ για τα δίκυκλα/τρίκυκλα κατηγορίας L) (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Εξίσου σημαντική είναι η στρατηγική μέριμνα του προγράμματος για τη νησιωτικότητα της Ελλάδας και τη μετάβαση των μικρών κλειστών συστημάτων (GR-eco Islands) σε κλιματική ουδετερότητα. Οι επιχειρήσεις εφοδιαστικής αλυσίδας και διανομών που διατηρούν την έδρα τους σε νησιωτικούς Δήμους της επικράτειας απολαμβάνουν μια εξαιρετικά γενναιόδωρη πρόσθετη ενίσχυση: λαμβάνουν επιπλέον δημόσια δαπάνη ίση με 1.000 ευρώ για κάθε ηλεκτρικό φορτηγάκι (N1) που εντάσσουν στον στόλο τους (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Επίσης, για τις νησιωτικές αυτές επιχειρήσεις, το bonus απόσυρσης παλαιών ρυπογόνων τρίκυκλων (L5e-L7e) εκτοξεύεται στα 750 ευρώ, αναγνωρίζοντας το υψηλότερο μεταφορικό και διαχειριστικό κόστος της ανακύκλωσης στην περιφέρεια (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Η υποχρέωση των δικαιούχων εταιρειών (Κατηγορία Β) να διατηρήσουν τη φυσική κατοχή και τη χρήση των επιδοτούμενων οχημάτων τους για τουλάχιστον έξι (6) μήνες μετά την ταξινόμησή τους, διασφαλίζει ότι το δημόσιο χρήμα μεταφράζεται σε πραγματική μεταφορά μεταφορικού έργου από τα ορυκτά καύσιμα στην ηλεκτροκίνηση (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025).

Είναι, ωστόσο, καθολικά αποδεκτό στην επιστημονική και τεχνοκρατική κοινότητα

ότι καμία πολιτική επιδότησης της κτήσης ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορεί να μακροημερεύσει εάν δεν πλαισιώνεται από ταυτόχρονη, επιθετική ανάπτυξη των υποδομών επαναφόρτισης (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Στον τομέα των αστικών logistics, όπου οι στόλοι λειτουργούν βάσει εξαιρετικά πιεστικών χρονοδιαγραμμάτων διανομής, η αξιοπιστία και η ταχύτητα φόρτισης εντός του αμαξοστασίου (depot charging) αποτελεί ζήτημα επιβίωσης. Ανταποκρινόμενο σε αυτή την ανάγκη, το "Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ'" παρέχει στις επιχειρήσεις τη δυνατότητα να επιδοτηθούν με το ποσό των 400 ευρώ ανά συσκευή για την προμήθεια και εγκατάσταση «έξυπνων» σημείων επαναφόρτισης (smart chargers) σε χώρους ιδιωτικής πρόσβασης και εταιρικούς χώρους στάθμευσης (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Το πρόγραμμα επιτρέπει στις εταιρείες να χρηματοδοτήσουν τόσους «έξυπνους» φορτιστές όσος είναι και ο αντίστοιχος αριθμός των ηλεκτρικών εμπορευματικών αυτοκινήτων (Ν1) που εντάσσουν, ενθαρρύνοντας έτσι τη δημιουργία άρτιων και αυτόνομων οικοσυστημάτων φόρτισης στα logistics centers (Κ.Υ.Α. 124757/2025, 2025). Παράλληλα με τα ιδιωτικά αμαξοστάσια, η ανάγκη για φόρτιση "εν κινήσει" των ελαφρών και βαρέων φορτηγών αστικής διανομής εξυπηρετείται μέσω της συμπληρωματικής εθνικής δράσης «Φορτίζω Παντού». Αντλώντας έναν κολοσσιαίο προϋπολογισμό ύψους 80 εκατομμυρίων ευρώ από τον Πυλώνα Πράσινης Μετάβασης του Ταμείου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (Ελλάδα 2.0), το πρόγραμμα αυτό παρεμβαίνει δυναμικά για να εξαλείψει το "άγχος αυτονομίας" στον δημόσιο χώρο (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η δράση φιλοδοξεί να εγκαταστήσει άμεσα 4.500 έως και 8.000 δημόσια προσβάσιμα σημεία ταχείας επαναφόρτισης σε στρατηγικές αστικές και περιαστικές τοποθεσίες, μετατρέποντας το εθνικό δίκτυο σε ένα φιλόξενο και λειτουργικά ασφαλές περιβάλλον για τα ηλεκτρικά φορτηγά που διασχίζουν τις ελληνικές μητροπόλεις (ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, 2024). Η ολοκληρωμένη αυτή θεσμική και οικονομική αρχιτεκτονική της Ελλάδας, συνδυάζοντας την άμεση κεφαλαιακή ανακούφιση για την απόκτηση εμπορευματικών οχημάτων με τη μαζική συγχρηματοδότηση των ιδιωτικών και δημόσιων υποδομών φόρτισης, συνιστά ένα υποδειγματικό και απολύτως συμπαγές στρατηγικό πλαίσιο που

εγγυάται τη βιώσιμη, ηλεκτρική μετάβαση των αστικών εμπορευματικών μεταφορών.

1.4.6. Νομοθετικά πρότυπα και τεχνολογικές προδιαγραφές φόρτισης στα αμαξοστάσια (Depots)

Ο εξηλεκτρισμός των αστικών και περιαστικών εμπορευματικών μεταφορών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ανάπτυξη των δημόσιων υποδομών κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων, αλλά πρωτίστως από τον τεχνολογικό και ενεργειακό μετασχηματισμό των ιδιωτικών αμαξοστασίων (depots) και των κέντρων εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα κέντρα logistics και οι αποθήκες διαδραματίζουν έναν απολύτως θεμελιώδη ρόλο στο νέο οικοσύστημα της ηλεκτροκίνησης, καθώς προσφέρουν τον απαραίτητο χώρο και τον αδρανή χρόνο (idle time) για την επαναφόρτιση των επαγγελματικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, της εκφόρτωσης ή της νυχτερινής στάθμευσης (Kempower, 2024). Όπως καταδεικνύεται από τις αναλύσεις διαχείρισης στόλων, η δημόσια φόρτιση καθ' οδόν δεν επαρκεί από μόνη της για την εξασφάλιση της αποδοτικότητας κόστους (cost-effectiveness) μιας εταιρείας διανομών, καθιστώντας την κατοχή και τον έλεγχο ιδιωτικών φορτιστών στο αμαξοστάσιο στρατηγική αναγκαιότητα για τον έλεγχο του λειτουργικού κόστους και της διαθεσιμότητας (ChargeNode, 2024). Για να καταστεί ωστόσο η φόρτιση στο αμαξοστάσιο βιώσιμη, ελεγχόμενη και πλήρως ενσωματωμένη στο δίκτυο, έχει αναπτυχθεί και νομοθετηθεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πλέγμα τεχνολογικών προτύπων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας, το οποίο μετατρέπει τους φορτιστές από απλές συσκευές παροχής ρεύματος σε ευφυείς ενεργειακούς κόμβους (Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024).

Στον πυρήνα αυτής της ψηφιακής αρχιτεκτονικής βρίσκεται το διεθνές πρότυπο ISO 15118, το οποίο αποτελεί το παγκόσμιο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του ηλεκτρικού οχήματος (EV) και του Εξοπλισμού Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας (EVSE). Το πρότυπο αυτό καταργεί οριστικά τη βασική αναλογική σηματοδότηση (όπως το Pulse Width Modulation

- PWM) που χαρακτήριζε τις παλαιότερες υποδομές, αντικαθιστώντας τη με έναν ψηφιακό διάλογο υψηλού επιπέδου μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας γραμμής ισχύος (Power Line Communication - PLC) (Greenflux, 2024; EV Range, 2023). Βάσει του ευρωπαϊκού κανονισμού AFIR, η υποστήριξη του πρωτοκόλλου ISO 15118 καθίσταται νομικά υποχρεωτική από τον Ιανουάριο του 2026 για τους δημόσιους σταθμούς, ωστόσο η επίδρασή του, μέσω και της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD), επεκτείνεται ραγδαία και στις ιδιωτικές υποδομές φόρτισης εταιρικών στόλων (MENNEKES.org, 2024; AMPECO, 2024). Η σημασία του ISO 15118 έγκειται στην ικανότητά του να διαχειρίζεται τρεις θεμελιώδεις λειτουργίες: την αυτοματοποιημένη ταυτοποίηση, την έξυπνη διαχείριση φορτίου και την αμφίδρομη ροή ενέργειας (EV Range, 2023). Μέσω της λειτουργίας Plug & Charge (PnC), το όχημα και ο φορτιστής ανταλλάσσουν κρυπτογραφημένα ψηφιακά πιστοποιητικά, επιτρέποντας την αυτόματη έναρξη της φόρτισης και την τιμολόγηση χωρίς καμία ανάγκη χρήσης καρτών RFID ή εφαρμογών από τον οδηγό του φορτηγού (AMPECO, 2024; EVB, 2025). Η διαδικασία αυτή θωρακίζεται ψηφιακά με αρχιτεκτονική ασφαλείας «Μηδενικής Εμπιστοσύνης» (Zero Trust) και πρωτόκολλα κρυπτογράφησης Transport Layer Security (TLS 1.2 και υποχρεωτικά TLS 1.3 στην έκδοση ISO 15118-20), εξασφαλίζοντας απόλυτη προστασία των εταιρικών δεδομένων και αποτροπή κυβερνοεπιθέσεων στα κέντρα logistics (EV Range, 2023; Forsberg, 2024).

Παράλληλα, το πρότυπο ISO 15118 παρέχει το τεχνολογικό υπόβαθρο για την Έξυπνη Φόρτιση (Smart Charging) στα αμαξοστάσια. Το όχημα επικοινωνεί διαρκώς την ακριβή κατάσταση της μπαταρίας του (State of Charge - SoC) και τον προγραμματισμένο χρόνο αναχώρησης του δρομολογίου, επιτρέποντας στο κεντρικό σύστημα διαχείρισης (CPMS) να υπολογίσει και να κατανείμει τον βέλτιστο ρυθμό φόρτισης με βάση τις δυνατότητες του τοπικού δικτύου και τις κυμαινόμενες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας (AMPECO, 2024; EV Range, 2023). Στην πιο προηγμένη του έκδοση (ISO 15118-20), το πρωτόκολλο εισάγει επισήμως τη λειτουργία Vehicle-to-Grid (V2G), επιτρέποντας την αμφίδρομη ροή ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι τα τεράστιας χωρητικότητας ηλεκτρικά φορτηγά

μιας εταιρείας διανομών μπορούν να λειτουργήσουν ως κινητές, αποκεντρωμένες αποθήκες ενέργειας, επιστρέφοντας ρεύμα στο δίκτυο του αμαξοστασίου κατά τις ώρες αιχμής (peak shaving) και μειώνοντας δραματικά το λειτουργικό ενεργειακό κόστος της επιχείρησης (EVB, 2025; Forsberg, 2024).

Ενώ το λογισμικό επικοινωνίας τυποποιείται μέσω του ISO 15118, το φυσικό και ηλεκτρικό υλικό της φόρτισης στα αμαξοστάσια υφίσταται μια ιστορική αναβάθμιση προκειμένου να εξυπηρετήσει τα βαρέα οχήματα (HDVs). Σήμερα, η βιομηχανία βασίζεται κυρίως στο πρότυπο CCS (Combined Charging System), το οποίο μπορεί να αποδώσει ρεαλιστικά έως 350-500 kW ισχύος, χρόνος που είναι επαρκής για τη νυχτερινή φόρτιση (overnight charging) των φορτηγών αστικής διανομής ή την παραμονή στο depot (WattEV, 2026; ZERA, 2026). Ωστόσο, για τα βαρέα φορτηγά ή για περιπτώσεις αστικής τροφοδοσίας όπου απαιτείται εξαιρετικά γρήγορη ανακύκλωση του οχήματος (drayage yards), οι ώρες που απαιτούνται από το CCS καθιστούν την ηλεκτροκίνηση μη ανταγωνιστική. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, η βιομηχανία, υπό την ηγεσία του οργανισμού CharIN, ανέπτυξε το ριζοσπαστικό Megawatt Charging System (MCS), το οποίο οριστικοποιήθηκε τεχνικά μέσω των προτύπων SAE J3271 (το 2025) και IEC TS 63379 (τον Φεβρουάριο του 2026) (EV Truck's Charging Trends, 2026; ZERA, 2026; EGBatt, 2026).

Το σύστημα MCS αντιπροσωπεύει ένα κολοσσιαίο τεχνολογικό άλμα. Σχεδιασμένο για να προσφέρει μέγιστη θεωρητική ισχύ που αγγίζει τα 3,75 MW (3.750 kW), το MCS λειτουργεί με τάσεις που φτάνουν τα 1.250 έως και 1.500 Volts DC και ρεύματα που εκτοξεύονται στα 3.000 Αμπέρ (ZERA, 2026; Fiver New Energy, 2026). Για να γίνει κατανοητή η διαφορά, το MCS προσφέρει δεκαπλάσια ισχύ από έναν τυπικό σημερινό ταχυφορτιστή CCS, ικανό να φορτίσει ένα βαρέως τύπου ηλεκτρικό φορτηγό (με μπαταρία άνω των 600 kWh) από το 20% στο 80% σε λιγότερο από 30 λεπτά, εναρμονίζοντας πλήρως τον χρόνο φόρτισης με τα νομικά υποχρεωτικά διαλείμματα ανάπαυσης των οδηγών (WattEV, 2026; Green, 2026; Joint Charging, 2026). Για την ασφαλή διαχείριση αυτών των ασύλληπτων ρευμάτων, το πρότυπο IEC TS 63379 επιβάλλει τη χρήση νέων, ειδικά

σχεδιασμένων βυσμάτων (connectors) και ενεργά υγρόψυκτων καλωδίων (liquid-cooled cables) που διατηρούν την καλωδίωση σε ασφαλή θερμοκρασιακά επίπεδα (EGBatt, 2026; Fiver New Energy, 2026). Επιπροσθέτως, το MCS εγκαταλείπει την παραδοσιακή επικοινωνία μέσω PLC που χρησιμοποιεί το CCS, και εισάγει ψηφιακή επικοινωνία βασισμένη στο πρωτόκολλο 10BASE-T1S Automotive Ethernet, προκειμένου να υποστηρίξει τον τεράστιο όγκο δεδομένων και τις αυστηρές χρονικές απαιτήσεις που επιβάλλει το ISO 15118-20 (ZERA, 2026; Wikipedia, 2024).

Η μετάβαση, ωστόσο, στις τεχνολογίες ταχείας φόρτισης (CCS) και υπερ-ταχείας φόρτισης (MCS) εντός των αμαξοστασίων εγείρει μια τεράστια πρόκληση υποδομής: τις αντοχές του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου. Η εγκατάσταση πολλαπλών φορτιστών megawatt σε ένα κέντρο διανομής μετατρέπει το depot σε φορτίο αντίστοιχο μιας βαριάς βιομηχανικής εγκατάστασης (Joint Charging, 2026). Η ταυτόχρονη φόρτιση δεκάδων ηλεκτρικών φορτηγών στο τέλος της βάρδιας δημιουργεί μια απότομη κορύφωση ισχύος (power peak), η οποία, εάν δεν ελεγχθεί, όχι μόνο υπερβαίνει τη χωρητικότητα της σύνδεσης με το δίκτυο (grid capacity), αλλά εκτοξεύει και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των "χρεώσεων ισχύος" (demand charges) που επιβάλλουν οι πάροχοι (ChargeNode, 2024; Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport, 2024). Για να αποφευχθούν οι εξαιρετικά δαπανηρές και χρονοβόρες εργασίες αναβάθμισης του δικτύου διανομής (grid upgrades), η σύγχρονη νομοθεσία και η τεχνική πρακτική επιβάλλουν τη χρήση συστημάτων Δυναμικής Εξισορρόπησης Φορτίου (Dynamic Load Balancing - DLB) (Joint Charging, 2026; ChargeNode, 2024). Το DLB διανέμει έξυπνα τη διαθέσιμη ισχύ του κτιρίου σε όλους τους φορτιστές, μειώνοντας την ένταση σε κάθε όχημα όταν το συνολικό φορτίο αγγίζει το όριο της εγκατάστασης. Επιπλέον, για τα μεγαλύτερα logistics hubs, η εγκατάσταση MCS φορτιστών συνδυάζεται πλέον νομικά και τεχνικά με μεγάλα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας μέσω Μπαταριών (Battery Energy Storage Systems - BESS) (EGBatt, 2026; Driivz, 2024). Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει στο αμαξοστάσιο να "αποθηκεύει" ενέργεια από το δίκτυο με αργό, σταθερό και φθηνό ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (ή από ηλιακά πάνελ της στέγης) και να την εκφορτώνει

ακαριαία με ρυθμό megawatt στα φορτηγά όταν αυτά καταφθάνουν, δρώντας ως "ρυθμιστής" (buffer) που προστατεύει το δημόσιο δίκτυο από την κατάρρευση (EGBatt, 2026; Driivz, 2024).

Η διαχείριση αυτού του σύνθετου οικοσυστήματος φορτιστών, μπαταριών, δικτύου και οχημάτων απαιτεί λογισμικό υψηλότατων προδιαγραφών. Οι ευρωπαϊκές ρυθμίσεις κατευθύνουν τους φορείς (CPOs) στη χρήση του Open Charge Point Protocol (OCPP) έκδοσης 2.0.1. Σε αντίθεση με παλαιότερες εκδόσεις, το OCPP 2.0.1 είναι σχεδιασμένο να συνεργάζεται άψογα με το ISO 15118, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παρακολούθηση, τη διάγνωση βλαβών, την επιβολή έξυπνων προφίλ φόρτισης και την ενσωμάτωση εξαιρετικά ασφαλών μεθόδων τιμολόγησης (Joint Charging, 2026; AMPECO, 2024). Η αυστηρή εφαρμογή αυτών των προτύπων (ISO 15118, OCPP 2.0.1) σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές προδιαγραφές υλικού (MCS, DLB, BESS) συγκροτούν το απόλυτο νομοθετικό και τεχνολογικό πλέγμα. Διασφαλίζουν ότι οι εμπορευματικοί στόλοι που επιχειρούν μέσα και γύρω από τον αστικό ιστό θα λειτουργούν με μέγιστη επιχειρησιακή διαθεσιμότητα (uptime), με το χαμηλότερο δυνατό συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) και σε πλήρη αρμονία με την αντοχή και την ευστάθεια των εθνικών ηλεκτρικών δικτύων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού όσον αφορά στο πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) με χωρητικούς σταθμούς φόρτισης και λογική First-Come - First-Served.

2.1. Εισαγωγή στο πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP)

Η ραγδαία μετάβαση προς τη βιώσιμη αστική κινητικότητα και η ανάγκη για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχουν καταστήσει τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles - EVs) τον πυρήνα των σύγχρονων συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας και αστικών διανομών.1 Το κλασικό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP), το οποίο αποτελεί έναν από τους πιο μελετημένους τομείς της Επιχειρησιακής Έρευνας και της Συνδυαστικής Βελτιστοποίησης, έχει επεκταθεί για να ενσωματώσει τις ιδιαιτερότητες της ηλεκτροκίνησης, δημιουργώντας το Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP).3

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά οχήματα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine Vehicles - ICEVs), όπου ο ανεφοδιασμός καυσίμων θεωρείται ταχύτατος και οι σταθμοί καυσίμων είναι ευρέως διαθέσιμοι, τα ηλεκτρικά φορτηγά αντιμετωπίζουν δύο θεμελιώδεις επιχειρησιακούς περιορισμούς: την περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης λόγω της χωρητικότητας της μπαταρίας και τους μακρούς χρόνους που απαιτούνται για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών.[5] Αυτοί οι παράγοντες μετατρέπουν τη φόρτιση από μια δευτερεύουσα λειτουργική λεπτομέρεια σε κεντρικό στοιχείο του σχεδιασμού των δρομολογίων.[5] Ο σχεδιασμός διαδρομών για ηλεκτρικά φορτηγά αναδεικνύεται, συνεπώς, σε ένα συζευγμένο πρόβλημα εφοδιαστικής και διαχείρισης ενεργειακών πόρων, όπου η

εφικτότητα των δρομολογίων εξαρτάται όχι μόνο από τη χωρητικότητα φορτίου, αλλά και από τον χρόνο, τον τόπο και τον τρόπο φόρτισης των οχημάτων.[5]

Η παρούσα ανάλυση εστιάζει στην ανάπτυξη ενός εξαντλητικού μαθηματικού μοντέλου μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed-Integer Linear Programming - MILP) για την επίλυση ενός ειδικού και εξαιρετικά απαιτητικού προβλήματος EVRP. Στο υπό εξέταση σενάριο, μια εταιρεία διαθέτει ένα μοναδικό κέντρο διανομής (depot) από το οποίο επιχειρεί ένας στόλος πέντε όμοιων ηλεκτροκίνητων φορτηγών. Ο στόχος είναι η εξυπηρέτηση δέκα προκαθορισμένων πόλεων (σημείων πώλησης) εντός ενός αυστηρού χρονικού πλαισίου μιας βάρδιας οκτώ ωρών.[8] Το κάθε φορτηγό εκτελεί ακριβώς μία διαδρομή (δηλαδή εξέρχεται από το κέντρο διανομής, επισκέπτεται μια ακολουθία πελατών και επιστρέφει) φέροντας σταθερή χωρητικότητα για ένα κοινό μοναδιαίο φορτίο (π.χ. παλέτες). Η μέση ταχύτητα στο αστικό δίκτυο θεωρείται σταθερή στα 50 χιλιόμετρα ανά ώρα, ενώ το κόστος μετακίνησης μεταξύ των κόμβων είναι γνωστό και προκαθορισμένο.

Η ύψιστη πολυπλοκότητα του παρόντος προβλήματος, ωστόσο, δεν έγκειται απλώς στη δρομολόγηση, αλλά στη διαχείριση των υποδομών φόρτισης κατά την επιστροφή των οχημάτων στο κέντρο διανομής. Το κέντρο διανομής διαθέτει μόνο τέσσερις θέσεις φόρτισης (φορτιστές ίσης ικανότητας) για την εξυπηρέτηση των πέντε φορτηγών. Υπάρχει ένα πρόσθετο χρονικό περιθώριο δύο ωρών (πέραν του οκταώρου των διανομών) αποκλειστικά για τη φόρτιση, ανεβάζοντας τον απόλυτο διαθέσιμο χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης στις δέκα ώρες. Κάθε φορτηγό απαιτεί έναν ελάχιστο χρόνο φόρτισης 1,5 ώρας. Εάν ένα φορτηγό επιστρέψει νωρίτερα, κατευθύνεται αμέσως στον σταθμό φόρτισης.[10] Επειδή ο αριθμός των οχημάτων (5) υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων φορτιστών (4), αναπόφευκτα δημιουργείται ζήτημα συμφόρησης και αναμονής.[11] Το μοντέλο επιβάλλει ρητά την εφαρμογή του κανόνα First-Come-First-Served (FCFS) (εξυπηρέτηση με σειρά Προτεραιότητας άφιξης), απαιτώντας την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών γραμμικοποίησης για την προσομοίωση της ουράς αναμονής χωρίς την καταφυγή σε μη-γραμμικά ή στοχαστικά μοντέλα της θεωρίας ουρών αναμονής.[8]

Στις επόμενες ενότητες, αναλύεται εις βάθος το θεωρητικό υπόβαθρο της μοντελοποίησης, ορίζονται εξαντλητικά οι δείκτες, οι παράμετροι και οι μεταβλητές απόφασης μέσω δομημένων πινάκων, διατυπώνεται η αντικειμενική συνάρτηση και, τέλος, αναλύονται λεπτομερώς οι περιορισμοί του μοντέλου και οι επιχειρησιακές τους προεκτάσεις.

2.2. Ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου και των επιχειρησιακών παραδοχών

Για την ορθή δόμηση του μαθηματικού μοντέλου, το σύστημα διανομής πρέπει να αναπαρασταθεί ως ένας κατευθυνόμενος γράφος $G = (V, A)$. Το δίκτυο αποτελείται από έναν κεντρικό κόμβο αφετηρίας/τερματισμού (το κέντρο διανομής) και περιφερειακούς κόμβους που αντιστοιχούν στις πόλεις (σημεία πώλησης).

- Αναπαράσταση κέντρου διανομής: προκειμένου να διατηρηθεί η μαθηματική αυστηρότητα στις εξισώσεις διατήρησης της ροής, το κέντρο διανομής αναπαρίσταται από δύο διακριτούς κόμβους: τον κόμβο 0 (αφετηρία στην αρχή της βάρδιας) και τον κόμβο 10 (τερματισμός στο τέλος της βάρδιας, ο οποίος ταυτίζεται με τον κόμβο 0). Οποιαδήποτε διαδρομή ξεκινά από το 0, διέρχεται από ένα υποσύνολο πελατών και καταλήγει στο 0.
- Μέγιστη ικανότητα φόρτωσης κάθε φορτηγού έχει ορισθεί σε 35 κιβώτια.

  Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει καθοριστικά το μοντέλο και την τελική λύση.
- Μέγιστη χωρητικότητα ηλεκτρικής μπαταρίας κάθε φορτηγού έχει ορισθεί σε 50 kw.

  Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει καθοριστικά το μοντέλο και την τελική λύση.

- Ρυθμός κατανάλωσης ηλεκτρικής μπαταρίας κάθε φορτηγού ανά χιλιομετρική απόσταση έχει ορισθεί σε 0,25 kw/km.

  Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει καθοριστικά το μοντέλο και την τελική λύση.

- Ταχύτητα και χρόνος: η κίνηση σε αστικό περιβάλλον προσομοιώνεται με μια μέση σταθερή ταχύτητα 40 χιλιομέτρων ανά ώρα. Αυτή η παραδοχή επιτρέπει τη ντετερμινιστική μετατροπή των χιλιομετρικών αποστάσεων μεταξύ των πόλεων i και j σε ακριβείς χρόνους μετακίνησης. Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει καθοριστικά το μοντέλο και την τελική λύση.

- Περιορισμοί βάρδιας (Shift Limits): το συνολικό λειτουργικό παράθυρο του συστήματος είναι άκαμπτο. Η διαδικασία διανομής (οδήγηση και παράδοση) πρέπει να ολοκληρωθεί αυστηρά εντός οκτώ (8) ωρών. Με την επιστροφή στο κέντρο διανομής, τα οχήματα εισέρχονται σε μια φάση επαναφόρτισης, για την οποία το σύστημα διαθέτει συνολικό χρονικό όριο 10 ωρών (8 ώρες για διανομή πλέον 2 για φόρτιση). Οποιοσδήποτε συνδυασμός δρομολογίων που έχει ως αποτέλεσμα ένα όχημα να βρίσκεται εκτός της αποθήκης μετά την 8η ώρα, ή να παραμένει στον σταθμό φόρτισης μετά τη 10η ώρα, απορρίπτεται ως ανέφικτος (infeasible).

  Η μεταβολή αυτών των δύο παραμέτρων επηρεάζουν καθοριστικά το μοντέλο και την τελική λύση.

- Ελάχιστος χρόνος φόρτισης και συμφόρηση: κάθε φορτηγό απαιτεί κατ' ελάχιστον 1,5 ώρα φόρτισης, το οποίο σημαίνει ότι δεσμεύει φυσικά τον πόρο του φορτιστή για αυτό το διάστημα.[11] Δεδομένου ότι δύναται να υπάρχουν περισσότερα φορτηγά από διαθέσιμους φορτιστές, η ταυτόχρονη άφιξη όλων των φορτηγών (π.χ. μαζική επιστροφή στην 8η ώρα) θα οδηγήσει αναπόφευκτα το επόμενο φορτηγό σε αναμονή. Αν περιμένει 1,5 ώρα (μέχρι να ελευθερωθεί ο πρώτος φορτιστής) και στη συνέχεια φορτίσει για 1,5 ώρα, η συνολική διάρκεια παραμονής του θα φτάσει τις 3 ώρες (μετά την 8η), ξεπερνώντας το όριο των 10 ωρών. Συνεπώς, το μοντέλο καλείται

να επιλέξει δρομολόγια που αναγκάζουν τα ηλεκτρικά φορτηγά να επιστρέφουν κλιμακωτά (staggered arrivals) για να αποτρέψει την παραβίαση της καταληκτικής ώρας.

2.3. Μαθηματικό μοντέλο: σύνολα, δείκτες και παράμετροι

Ο ορισμός των μαθηματικών συνόλων, των δεικτών και των σταθερών παραμέτρων αποτελεί το θεμέλιο της ακριβούς μοντελοποίησης των φυσικών διαστάσεων του EVRP. Η χρήση πινάκων εξασφαλίζει τη βέλτιστη συμπύκνωση και οπτική σαφήνεια αυτής της πληροφορίας.

Ακολουθεί η πλήρης και αυστηρή μαθηματική διατύπωση του μοντέλου Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) για το πρόβλημα δρομολόγησης των ηλεκτρικών φορτηγών.

Επιλέχθηκε το δομημένο περιβάλλον του R Studio για την εκτέλεση του μαθηματικού μοντέλου του ακέραιου μικτού γραμμικού προγραμματισμού (MIP) του EVRP, καθώς:

- ✓ προσθέτει ευελιξία ως προς την εισαγωγή δεδομένων,
- ✓ επιτρέπει τις ερωτήσεις προς τον χρήστη για την εισαγωγή μεταβλητών (για παράδειγμα το πλήθος των φορτηγών και των πόλεων προς διανομή),
- ✓ διαθέτει ποικιλία βιβλιοθηκών για την ενσωμάτωση κώδικα και μοντέλων επιχειρησιακής έρευνας (βελτιστοποίηση),
- ✓ δίνει πολλαπλές δυνατότητες εξαγωγής και ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα ισχύουν τα ακόλουθα:

2.3.1. Σύνολα και Δείκτες

2.3.1.1. Δείκτες:

- i, j ∈ N: δείκτες που αναφέρονται στις τοποθεσίες (πόλεις ή αποθήκη) με τη μορφή από – προς πόλη.
- k ∈ K: δείκτης που αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό φορτηγό, το οποίο θα επιλεχθεί για την ικανοποίηση της ζήτησης.
- num_cities: δείκτης που καθορίζεται από τον χρήστη πριν την επίλυση του μοντέλου (δυναμική μεταβλητή) και αφορά το μέγιστο πλήθος των πόλεων (πελατών).
- num_trucks: δείκτης που καθορίζεται από τον χρήστη πριν την επίλυση του μοντέλου (δυναμική μεταβλητή) και αφορά το μέγιστο πλήθος των διαθέσιμων ηλεκτρικών φορτηγών.

2.3.1.2. Σύνολα:

- N: Το σύνολο όλων των κόμβων (τοποθεσιών) του δικτύου, όπου N = {1, 2, …, n}.

  Ο κόμβος 1 αντιπροσωπεύει την κεντρική αποθήκη.

  Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, N = 1 + num_cities.

- C: Το υποσύνολο των κόμβων που αντιπροσωπεύουν τις πόλεις-πελάτες που θα επισκεφθούν τα ηλεκτρικά οχήματα, όπου C = {2, 3, …, num_cities}.

  Ο δείκτης num_ cities αποτελεί βασική παράμετρος που καθορίζει ο χρήστης κατά την εκτέλεση του κώδικα

- K: Το σύνολο των διαθέσιμων ηλεκτρικών φορτηγών, όπου K = {1, 2, ..., num_trucks}. Ο δείκτης num_trucks αποτελεί βασική παράμετρος που καθορίζει ο χρήστης κατά την εκτέλεση του κώδικα.

2.3.2. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου

2.3.2.1. Δεδομένα δικτύου & ζήτησης

- dij: Η απόσταση σε χιλιόμετρα για τη μετάβαση από τον κόμβο i στον κόμβο j (i, j $\in$ N).
- qi: Η απαίτηση σε δέματα (κιβώτια) της πόλης i $\in$ N (με q1 = 0 για την κεντρική αποθήκη).

2.3.2.2. Τεχνικές προδιαγραφές φορτηγών & ενέργειας

- Q: Η μέγιστη χωρητικότητα της καρότσας του κάθε φορτηγού (Q = 35 κιβώτια).
- Bmax: Το μέγιστο μέγεθος/χωρητικότητα της ηλεκτρικής μπαταρίας (Bmax = 50 kW).
- e: Η κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (e = 0.25 kW/km).
- v: Η σταθερή ταχύτητα κίνησης των φορτηγών σε όλο το δίκτυο (v = 40 χλμ/ώρα).

2.3.2.3. Περιορισμοί χρόνου & μαθηματικές σταθερές

- Tdeliv: Ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος για την καθαρή διανομή (Tdeliv = 8 ώρες).
- Toper: Ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος λειτουργίας (Toper = 10 ώρες). Αφορά τις οκτώ ώρες διανομών στις πόλεις πλέον ένα παράθυρο δύο ωρών για την φόρτιση όλων των ηλεκτρικών μπαταριών, όταν επιστρέψουν στην κεντρική αποθήκη.
- M: Μια επαρκώς μεγάλη θετική σταθερά (Big-M, M = 10000) για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των περιορισμών.

2.3.3. Μεταβλητές απόφασης

2.3.3.1. Δυαδικές Μεταβλητές (Binary)

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{αν το φορτηγό } k \text{ μετακινείται απευθείας από τον κόμβο } i \text{ στον κόμβο } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K$$

2.3.3.2. Συνεχείς μεταβλητές (Continuous)

- $U_{ik} >= 0$: Το συσσωρευμένο φορτίο (κιβώτια) που έχει παραδώσει το φορτηγό k μέχρι και την επίσκεψή του στον κόμβο i. (Χρησιμοποιείται για τη χωρητικότητα και την απάλειψη υποκυκλωμάτων).
- $B_{ik} >= 0$: Το επίπεδο της μπαταρίας (σε kW) του φορτηγού k κατά τη στιγμή της άφιξής του στον κόμβο i.
- $T_{ik} >= 0$: ο χρόνος (σε ώρες) κατά τον οποίο το φορτηγό k φτάνει στον κόμβο i (μεταβλητή που εξαρτάται άμεσα από την απόσταση και την σταθερή ταχύτητα κίνησης στο δίκτυο).

2.3.4. Αντικειμενική συνάρτηση

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυόμενης απόστασης από όλα τα φορτηγά του στόλου:

$$\min Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} d_{ij} \cdot X_{ijk}$$

2.3.5. Μαθηματικοί περιορισμοί και ανάλυση

2.3.5.1. Περιορισμοί δρομολόγησης, ροής & δομής EVRP

- Απαγόρευση αυτο-μετάβασης:

  $X_{iik} = 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in K$

Ανάλυση: Εμποδίζει μαθηματικά ένα φορτηγό να κάνει δρομολόγιο από μια πόλη προς τον εαυτό της, κάτι που δεν έχει νόημα και θα αύξανε τεχνητά το κόστος.

- Υποχρεωτική και μοναδική εξυπηρέτηση πελατών:

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C$$

Ανάλυση: Αυτός ο περιορισμός εγγυάται ότι κάθε πόλη-πελάτης θα εξυπηρετηθεί ακριβώς μία φορά από ένα και μόνο φορτηγό. Η ισότητα αναγκάζει τον solver να βρει διαδρομές για όλους.

- Διατήρηση ροής (Flow Conservation):

$$\sum_{i \in N} X_{ijk} = \sum_{l \in N} X_{jlk} \quad \forall j \in N, \forall k \in K$$

Ανάλυση: Εξασφαλίζει τη συνέχεια της διαδρομής. Αν το φορτηγό k εισέλθει στην πόλη j ($\sum X_{ijk} = 1$), οφείλει υποχρεωτικά να εξέλθει από αυτήν προς κάποια άλλη τοποθεσία i ($\sum X_{jik} = 1$).

- Περιορισμός μίας αναχώρησης από την αποθήκη:

$$\sum_{j \in C} X_{1jk} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

Ανάλυση: Επιτρέπει σε κάθε φορτηγό k να ξεκινήσει το πολύ μία φορά από την κεντρική αποθήκη (κόμβος 1). Αν ένα φορτηγό δεν χρειάζεται, το άθροισμα θα είναι 0 (το φορτηγό μένει στην κεντρική αποθήκη).

2.3.5.2. Περιορισμοί χωρητικότητας φορτίου & απάλειψης υποκυκλωμάτων (MTZ)

- Αρχική κατάσταση φορτίου:

  $U_{1k} = 0 \; \forall \; k \in K$

Ανάλυση: Θέτει το συσσωρευμένο παραδοθέν φορτίο στο μηδέν κατά την εκκίνηση από την αποθήκη.

- Δυναμικός υπολογισμός και όριο φορτίου (Miller-Tucker-Zemlin):

$$U_{ik} - U_{jk} + q_j \leq M \cdot (1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in N, \forall j \in C, \forall k \in K$$

$$0 \leq U_{ik} \leq Q \quad \forall i \in N, \forall k \in K$$

Ανάλυση: Επιτυγχάνει δύο πράγματα ταυτόχρονα:

- Αν το φορτηγό εκτελέσει τη διαδρομή i → j ($X_{ijk} = 1$), ο περιορισμός γίνεται:

$U_{ik} + q_j <= U_{jk}$,

αναγκάζοντας το συσσωρευμένο φορτίο να αυξηθεί κατά τη ζήτηση της νέας πόλης.

- Επειδή η μεταβλητή U αυξάνεται αυστηρά σε κάθε βήμα, αποκλείεται μαθηματικά η δημιουργία κλειστών υποκυκλωμάτων (subtours) μεταξύ των πόλεων, χωρίς αυτά να συνδέονται με την αποθήκη. Παράλληλα, το U <= Q εγγυάται ότι κανένα φορτηγό δεν θα μεταφέρει πάνω από 35 κιβώτια συνολικά.

2.3.5.3. Περιορισμοί ενέργειας & μπαταρίας (κυκλικοί)

- Πλήρης φόρτιση στην εκκίνηση:

  $B_{1k} = B_{max} \; \forall \; k \in K$

Ανάλυση: Διασφαλίζει ότι όλα τα φορτηγά ξεκινούν το δρομολόγιό τους από την αποθήκη με 100% γεμάτη μπαταρία (50 kW).

- Παρακολούθηση κατανάλωσης μπαταρίας (Σε όλο το δίκτυο):

$$B_{jk} - B_{ik} + (e \cdot d_{ij}) \leq M \cdot (1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in K$$

$$0 \leq B_{ik} \leq B_{max} \quad \forall i \in N, \forall k \in K$$

Ανάλυση: Αν το φορτηγό k κινηθεί από το i στο j ($X_{ijk} = 1$), ο περιορισμός μετατρέπεται σε $B_{jk} <= B_{ik} - (e * d_{ij})$.

Αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία στη νέα πόλη j θα είναι μειωμένη κατά την ενέργεια που κάηκε στη διαδρομή. Επειδή ορίστηκε για $\forall$ j $\in$ N (όλο το δίκτυο), ο έλεγχος ισχύει και όταν το φορτηγό επιστρέφει στην αποθήκη (j=1), εξασφαλίζοντας ότι δεν θα ξεμείνει ποτέ από ρεύμα (B >= 0).

2.3.5.4. Περιορισμοί χρονικών ορίων (κυκλικοί)

Χρονική αφετηρία:

$T_{1k} = 0 \; \forall \; k \in K$

Ανάλυση: Ορίζει ως χρονική στιγμή 0 την ώρα που το φορτηγό βρίσκεται έτοιμο για αναχώρηση στην αποθήκη.

Υπολογισμός χρόνου άφιξης:

$$T_{ik} - T_{jk} + \left(\frac{d_{ij}}{v}\right) \leq M \cdot (1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in K$$

Ανάλυση: Αν $X_{ijk} = 1$, τότε $T_{jk} >= T_{ik} + d_{ij}/v$. Ο χρόνος άφιξης στην επόμενη πόλη j είναι τουλάχιστον ίσος με τον χρόνο της προηγούμενης πόλης συν τον χρόνο οδήγησης (Απόσταση/Ταχύτητα). Ισχύει και για την επιστροφή στην αποθήκη (j=1).

- Μέγιστο χρονικό παράθυρο βάρδιας διανομής:

$$T_{ik} \leq T_{deliv} \quad \forall i \in C, \forall k \in K$$

Ανάλυση: Εξασφαλίζει ότι το φορτηγό θα έχει προλάβει να επισκεφτεί όλες τις πόλεις του δρομολογίου του μέσα στο αυστηρό όριο των 8 ωρών καθαρής διανομής, προτού επιστρέψει για την τελική του φόρτιση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) με χωρητικούς σταθμούς φόρτισης και λογική First-Come - First-Served.

3.1. Υποθέσεις και απλοποιήσεις μοντέλου δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) με σταθμούς φόρτισης

Η παρούσα ανάλυση εστιάζει στην ανάπτυξη ενός εξαντλητικού μαθηματικού μοντέλου Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed-Integer Linear Programming - MILP) για την επίλυση ενός ειδικού και εξαιρετικά απαιτητικού προβλήματος EVRP.

Ένα σημαντικό κενό στην παραδοσιακή προσέγγιση του EVRP υπήρξε η υπόθεση ότι οι σταθμοί φόρτισης έχουν άπειρη χωρητικότητα (uncapacitated charging stations). Σε αυτές τις περιπτώσεις, υποτίθεται ότι ανεξάρτητα από το πόσα οχήματα φτάνουν ταυτόχρονα σε έναν σταθμό, θα υπάρχει πάντα διαθέσιμος φορτιστής για να εξυπηρετηθούν άμεσα. Στην πραγματικότητα, και ειδικά σε κέντρα διανομής (depots) με συγκεκριμένες δυνατότητες ηλεκτρικής υποδομής, ο αριθμός των φορτιστών είναι πεπερασμένος. Αυτό εισάγει το πρόβλημα των Capacitated Charging Stations στο EVRP, το οποίο αυξάνει δραματικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η βέλτιστη λύση δεν αφορά πλέον μόνο τον εντοπισμό της συντομότερης διαδρομής, αλλά απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού μηχανών (machine scheduling problem), προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι χρόνοι αναμονής στις ουρές των σταθμών.

Η ενσωμάτωση της λογικής First-Come-First-Served (FCFS) σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς φορτιστές (multiple chargers) και περιορισμένη χωρητικότητα παραδοσιακά αντιμετωπίζεται μέσω στοχαστικών προσεγγίσεων, όπως συστήματα ουρών. Αν και η

θεωρία ουρών αναμονής παρέχει εξαιρετικά εργαλεία για τη μελέτη των μέσων χρόνων καθυστέρησης, η φύση της είναι μη γραμμική, καθιστώντας την ακατάλληλη για άμεση ενσωμάτωση σε αυστηρά μοντέλα MILP. Ως εκ τούτου, πρόσφατες έρευνες εστιάζουν στη χρήση ρητών αιτιοκρατικών μεταβλητών δείκτη (indicator variables) και περιορισμών Big-M για την ακριβή αποτύπωση της αλληλουχίας άφιξης και της εξασφάλισης προτεραιότητας. Αυτή η προσέγγιση "κλειδώνει" μαθηματικά τον χρόνο έναρξης φόρτισης ενός οχήματος με βάση τη σειρά άφιξής του, δημιουργώντας κλειστό σύστημα εξισώσεων το οποίο ένας επιλύτης (solver) όπως ο Gurobi ή ο CPLEX μπορεί να αξιολογήσει άμεσα.

Στο υπό εξέταση σενάριο, μια εταιρεία διαθέτει:

- Μία κεντρική αποθήκη (κέντρο διανομής): κοινή αφετηρία και κοινός τερματισμός για όλο τον στόλο των ηλεκτρικών φορτηγών.
- Έως δέκα ηλεκτροκίνητα φορτηγά: ο συνολικός διαθέσιμος στόλος για τις διανομές.
- Κοινό μοναδιαίο φορτίο φόρτωσης: ομοιογενές φορτίο (π.χ. παλέτες ή κουτιά) για όλα τα οχήματα, όπου τα κιβώτια έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Στην παρούσα εφαρμογή το βάρος δεν λαμβάνεται υπόψη ως προς την μέγιστη ικανότητα βάρους του ηλεκτρικού οχήματος.
- Σταθερή χωρητικότητα: Ίδιο μέγιστο όριο φορτίου για κάθε ηλεκτρικό φορτηγό (35 κιβώτια).
- Σταθερή μέση ταχύτητα όλων των ηλεκτρικών φορτηγών: 40 χλμ/ώρα κατά την κίνηση στο αστικό περιβάλλον.
- Έως δέκα πόλεις/σημεία πώλησης: το σταθερό πλήθος των πελατών προς εξυπηρέτηση. Το κέντρο διανομής καταλαμβάνει τη μια θέση καθώς είναι σε διαφορετική πόλη από τους πελάτες.
- Γνωστό και σταθερό κόστος διαδρομών: καθορισμένο κόστος για κάθε διαδρομή από την πόλη i στην πόλη j.
- Οκτώ ώρες χρόνος διανομών: ο καθαρός επιχειρησιακός χρόνος λειτουργίας για τις παραδόσεις των ηλεκτρικών φορτηγών.

- Έως πέντε θέσεις φόρτισης: η συνολική υποδομή για την υποδοχή των ηλεκτρικών φορτηγών στο κέντρο διανομής.
- Δύο ώρες χρόνος φόρτισης: επιπλέον χρόνος που διατίθεται αποκλειστικά για τη φόρτιση, πέραν του οκταώρου των διανομών.
- Ελάχιστος χρόνος φόρτωσης της ηλεκτρικής μπαταρίας του φορτηγού: 1,5 ώρα.
- Κανόνας First-Come, First-Served στους δύο φορτιστές: τα φορτηγά που επιστρέφουν καταλαμβάνουν θέση φόρτισης με βάση τη σειρά άφιξής τους.

Τα οφέλη αυτών των απλοποιήσεων εντοπίζονται στους εξής άξονες και εξυπηρετούν τους αντίστοιχους σκοπούς (όφελος αποπλοίησης):

- Μαθηματική γραμμικοποίηση (αποφυγή μη-γραμμικών σχέσεων)
    - Η υπόθεση: Σταθερή ταχύτητα 40 χλμ/ώρα και σταθερός χρόνος φόρτισης 2 ώρες.
    - Το όφελος: Στο πραγματικό EVRP, η ταχύτητα αλλάζει λόγω κίνησης και η φόρτιση είναι μια μη-γραμμική καμπύλη (η μπαταρία φορτίζει πιο αργά μετά το 80%). Αυτό απαιτεί πολύπλοκες διαφορικές εξισώσεις. Με τις απλοποιήσεις, ο χρόνος ταξιδιού και ο χρόνος φόρτισης γίνονται σταθερές παράμετροι (constants). Το μοντέλο παραμένει αυστηρά γραμμικό (MILP), κάτι που επιτρέπει σε solvers (όπως το Gurobi ή το CPLEX) να το λύσουν σε μικρό χρονικό διάστημα.
- Δραματική μείωση των μεταβλητών απόφασης
    - Η υπόθεση: 1 Κέντρο Διανομής, έως 10 φορτηγά, έως 10 πόλεις, έως 5 φορτιστές.
    - Το όφελος: Ο αριθμός των δυαδικών μεταβλητών xijk (που ελέγχουν ποιο φορτηγό πάει πού) εξαρτάται άμεσα από το γινόμενο Κόμβοι x Κόμβοι x Οχήματα. Περιορίζοντας το πρόβλημα σε αυτές τις διαστάσεις, οι πιθανοί συνδυασμοί μειώνονται σε ένα διαχειρίσιμο μέγεθος. Το μοντέλο μπορεί να τρέξει ακόμα και σε ένα απλό Excel (Solver add-in) χωρίς να "κρασάρει".

- Απλοποίηση της διαχείρισης φορτίου (Homogeneity)
    - Η υπόθεση: κοινό μοναδιαίο φορτίο (π.χ. κιβώτια) και σταθερή χωρητικότητα, με ίδιες διαστάσεις για κάθε ένα κιβώτιο.
    - Το όφελος: αποφεύγεται το λεγόμενο "Multi-Dimensional Knapsack Problem", όπου πρέπει να υπολογιστεί αν χωράνε ετερογενή αντικείμενα (διαφορετικών διαστάσεων και βάρους) στο ίδιο φορτηγό. Η χωρητικότητα γίνεται ένας απλός μονοδιάστατος μετρητής (π.χ. max 10 παλέτες).
- Απομόνωση του "Χρονικού Συγχρονισμού" (Scheduling)
    - Η υπόθεση: διαχωρισμός 8 ωρών διανομής και 2 ωρών φόρτισης στο Depot με κανόνα FCFS.
    - Το όφελος: αν τα φορτηγά φόρτιζαν κατά τη διάρκεια των δρομολογίων σε τυχαίους σταθμούς στην πόλη, το μοντέλο θα έπρεπε να παρακολουθεί συνεχώς το επίπεδο της μπαταρίας σε κάθε τόξο. Μεταφέροντας τη φόρτιση αποκλειστικά στο τέλος του 8ώρου μέσα στην κεντρική αποθήκη, το "πράσινο" πρόβλημα δρομολόγησης μετατρέπεται σε ένα πιο απλό πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής/ουρών (Job-Shop Scheduling) για τους 5 φορτιστές, το οποίο είναι μαθηματικά πολύ πιο εύκολο να επιλυθεί.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το πραγματικό όφελος είναι ότι οι υποθέσεις αυτές δημιουργούν μια "γέφυρα" μεταξύ θεωρίας και πράξης. Επιτρέπουν τη δημιουργία ενός μοντέλου που είναι ιδανικό για χρήση, καθώς αναδεικνύει όλες τις βασικές έννοιες του EVRP (χωρητικότητα, χρονικοί περιορισμοί, διαχείριση κοινών πόρων/φορτιστών), χωρίς να εγκλωβίζεται σε αδιέξοδους υπολογιστικούς χρόνους.

Σε υπόθεση εργασίας με άρση αυτών των περιορισμών, το μοντέλο περνάει από το ελεγχόμενο περιβάλλον στην απόλυτη πολυπλοκότητα του πραγματικού κόσμου. Το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα εξαιρετικά σύνθετο, μη γραμμικό και στοχαστικό μαθηματικό πρόβλημα, το οποίο οι κλασικοί solvers (όπως το Gurobi) αδυνατούν να επιλύσουν για ρεαλιστικά μεγέθη.

3.2. Μοντέλο επίλυσης μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού

Το μοντέλο της επίλυσης μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί είναι το R Studio, όπου η τελευταία διαθέσιμη έκδοση για λήψη και εγκατάσταση είναι η 2026.05.0 build 218. Είναι μια ελαφριά εφαρμογή η οποία μπορεί να διαχειριστεί πολύ μεγάλο πλήθος σε περιορισμούς και ακέραιες μεταβλητές απόφασης.

Εναλλακτικά εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση παρόμοιων μοντέλων στην επιχειρησιακή έρευνα είναι:

- Microsoft Excel: διαθέτει πολλούς αλγόριθμους και υποστηρίζει γραμμικό, ακέραιο και μη γραμμικό προγραμματισμό.
- Lindo: είναι ένα δωρεάν περιβάλλον εργασίας, το οποίο διαθέτει μια τεράστια βιβλιοθήκη αλγορίθμων για επίλυση προβλημάτων επιχειρησιακής έρευνας με αδύναμη τεκμηρίωση και έκδοση που χρονολογείται από το 2002. Δυστυχώς είναι εργαλείο που καθυστερεί ιδιαίτερα σε μεγάλα μαθηματικά μοντέλα και δυστυχώς δεν έχει τους ικανούς μηχανισμούς να διαχειρίζεται δυναμικά τη μνήμη του υπολογιστή, με αποτέλεσμα συχνά να καταρρέει (crach).

3.3. Δεδομένα δικτύου διανομής, ηλεκτρικών φορτηγών, ζήτησης ανά πόλη

Α) Οι βασικές παράμετροι του μοντέλου είναι:

- ✓ Έως 9 πόλεις (1 αποθήκη διανομής και 9 πελάτες).
- ✓ Έως 10 ηλεκτρικά φορτηγά.
- ✓ Μέγιστο πλήθος κιβωτίων ανά φορτηγό: 35 (μοναδιαίο φορτίο: κιβώτιο).
- ✓ 5 φορτιστές στο κέντρο διανομής.
- ✓ Μέγεθος ηλεκτρικής μπαταρίας φορτηγού: 50 kw.
- ✓ Κατανάλωση: 0,25 kw/km ή 200 χιλιόμετρα αυτονομίας.

Β) το κόστος μεταφοράς μεταξύ των πόλεων περιγράφονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 6.3.1: κόστος μεταφοράς μεταξύ των πόλεων

	Πόλη 1	**Πόλη 2**	**Πόλη 3**	**Πόλη 4**	**Πόλη 5**	**Πόλη 6**	**Πόλη 7**	**Πόλη 8**	**Πόλη 9**	**Πόλη 10**
Πόλη 1	0	80	100	70	60	70	90	90	50	80
Πόλη 2	80	0	100	90	80	80	50	100	80	70
Πόλη 3	100	100	0	80	80	50	70	100	60	60
Πόλη 4	70	90	80	0	100	90	100	70	90	90
Πόλη 5	60	80	80	100	0	80	100	80	80	100
Πόλη 6	70	80	50	90	80	0	60	50	60	70
Πόλη 7	90	50	70	100	100	60	0	70	100	100
Πόλη 8	90	100	100	70	80	50	70	0	50	70
Πόλη 9	50	80	60	90	80	60	100	50	0	100
Πόλη 10	80	70	60	90	100	70	100	70	100	0

Σημείωση: η πόλη 1 αναφέρεται στο κέντρο διανομής, όπου όλα τα ηλεκτρικά οχήματα αναχωρούν και επιστρέφουν για φόρτιση. Αν ένα φορτηγό επιστρέψει νωρίς, δεν εκτελεί δεύτερο δρομολόγιο.

Γ) Η ζήτηση (σε κιβώτια) για κάθε μια πόλη είναι σταθερή ως εξής:

Πίνακας 6.3.2: ζήτηση για κάθε μια πόλη

Πόλη 2	28
Πόλη 3	18
Πόλη 4	20
Πόλη 5	28
Πόλη 6	21
Πόλη 7	22
Πόλη 8	30
Πόλη 9	27
Πόλη 10	21

Σημείωση: Λόγω της παραμετροποίησης, αν ο χρήστης επιλέξει το μοντέλο να εκτελεστεί για 5 πόλεις, το μοντέλο θα διαβάσει τις αποστάσεις μεταξύ των 5 πόλεων και την ζήτηση για τις 5 πρώτες πόλεις.

3.4. Αποτελέσματα μοντέλου

Εκτελέσαμε το μαθηματικό μοντέλο του EVRP με τις ακόλουθες παραμέτρους (σενάριο 1 και 2 για μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 35 και 45 κιβώτια αντίστοιχα):

Σενάριο 1: χωρητικότητα φορτηγού 35 κιβώτια

Πίνακας 6.4.1: σενάριο για χωρητικότητα φορτηγού 35 κιβώτια

Πλήθος διαθέσιμων φορτηγών	Πλήθος πελατών	Αντικειμενική συνάρτηση (σε χλμ)	Φορτηγά στο μοντέλο	Φορτηγό και διαδρομή	Χρόνος εκτέλεσης (σε λεπτά)
4	3	500	3	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη	< 1
5	4	620	4	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Αποθήκη	< 1

				Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη	
5	6	-	-	Μη εφικτή λύση	< 1
6	6	940	6	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Αποθήκη Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη	
7	6	940	6	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Αποθήκη	< 1

				Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 6 -> Αποθήκη	
7	8	-	-	Μη εφικτή λύση	-
8	8	1220	8	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 9 -> Αποθήκη	12

				Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Αποθήκη Φορτηγό 7 : Αποθήκη -> Πόλη 8 -> Αποθήκη Φορτηγό 8 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη	

Σενάριο 2: χωρητικότητα φορτηγού 45 κιβώτια

Πίνακας 6.4.2: σενάριο για χωρητικότητα φορτηγού 45 κιβώτια

Πλήθος διαθέσιμων φορτηγών	Πλήθος πελατών	Αντικειμενική συνάρτηση (σε χλμ)	Φορτηγά στο μοντέλο	Φορτηγό και διαδρομή	Χρόνος εκτέλεσης (σε λεπτά)
4	3	320	2	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 3 -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη	<1
5	4	440	3	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη	<1
5	6	560	4	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη	<1

				Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη	
6	6	560	4	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη	<1
7	6	840	6	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 8 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη	2

				Φορτηγό 7 : Αποθήκη -> Πόλη 9 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη	
7	8	840	6	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 8 -> Αποθήκη Φορτηγό 4 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 6 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη Φορτηγό 7 : Αποθήκη -> Πόλη 9 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη	2
8	8	840	6	Φορτηγό 1 : Αποθήκη -> Πόλη 8 -> Αποθήκη Φορτηγό 2 : Αποθήκη -> Πόλη 9 -> Πόλη 3 -> Αποθήκη Φορτηγό 3 : Αποθήκη -> Πόλη 7 -> Πόλη 6 -> Αποθήκη Φορτηγό 5 : Αποθήκη -> Πόλη 4 -> Αποθήκη	12

				Φορτηγό 7 : Αποθήκη -> Πόλη 2 -> Αποθήκη Φορτηγό 8 : Αποθήκη -> Πόλη 5 -> Αποθήκη	

3.5. Περιγραφή μοντέλου στο R Studio

Ο κώδικας στο R Studio είναι ο ακόλουθος (100 γραμμές) και δίνει τη δυνατότητα παραμετροποίησης σε όλες τις κρίσιμες παραμέτρους:

```
# ========================================================================
# 1. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ & ΦΟΡΤΩΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ
# ========================================================================
library(ompr)
library(ompr.roi)
library(ROI.plugin.glpk)

# ========================================================================
# 2. ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (ΧΩΡΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ)
# ========================================================================
num_trucks <- 4
num_cities <- 3

# ========================================================================
# 3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ
# ========================================================================
city_names <- c("Αποθήκη", "Πόλη 2", "Πόλη 3", "Πόλη 4", "Πόλη 5", "Πόλη 6", "Πόλη 7",
"Πόλη 8", "Πόλη 9", "Πόλη 10")
```

```
distance_vector <- c(
  0,  80, 100,  70,  60,  70,  90,  90,  50,  80,
  80,   0, 100,  90,  80,  80,  50, 100,  80,  70,
  100, 100,   0,  80,  80,  50,  70, 100,  60,  60,
  70,  90,  80,   0, 100,  90, 100,  70,  90,  90,
  60,  80,  80, 100,   0,  80, 100,  80,  80, 100,
  70,  80,  50,  90,  80,   0,  60,  50,  60,  70,
  90,  50,  70, 100, 100,  60,   0,  70, 100, 100,
  90, 100, 100,  70,  80,  50,  70,   0,  50,  70,
  50,  80,  60,  90,  80,  60, 100,  50,   0, 100,
  80,  70,  60,  90, 100,  70, 100,  70, 100,   0
)
full_distance_matrix <- matrix(distance_vector, nrow = 10, byrow = TRUE)
full_demands <- c(0, 28, 18, 20, 28, 21, 22, 30, 27, 21)

total_nodes <- 1 + num_cities
distance_matrix <- full_distance_matrix[1:total_nodes, 1:total_nodes]
demands <- full_demands[1:total_nodes]

trucks <- 1:num_trucks
nodes <- 1:total_nodes
customers <- if(total_nodes > 2) 2:total_nodes else 2
```

```
# Όρια
capacity <- 45
battery_size <- 50
energy_consumption <- 0.25
max_autonomy <- battery_size / energy_consumption # 200 χλμ!

# ============================================================================
# 4. ΧΤΙΣΙΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
# ============================================================================
model <- MIPModel() |>
  # Μοναδική μεταβλητή: X[i,j,k]
  add_variable(X[i, j, k], i = nodes, j = nodes, k = trucks, type = "binary") |>

  # Στόχος
  set_objective(
    sum_expr(distance_matrix[i, j] * X[i, j, k], i = nodes, j = nodes, k = trucks), sense = "min"
  ) |>
   # Περιορισμοί Δρομολόγησης
  add_constraint(X[i, i, k] == 0, i = nodes, k = trucks) |>
  add_constraint(sum_expr(X[i, j, k], i = nodes, k = trucks) == 1, j = customers) |>
  add_constraint(sum_expr(X[i, j, k], i = nodes) == sum_expr(X[j, l, k], l = nodes), j = nodes, k =
trucks) |>
  add_constraint(sum_expr(X[1, j, k], j = customers) <= 1, k = trucks) |>
```

```
 # Χωρητικότητα
 add_constraint(sum_expr(demands[j] * sum_expr(X[i, j, k], i = nodes), j = customers) <= capacity, k = trucks) |>

 # Μέγιστη Απόσταση ανά Φορτηγό (Αυτονομία Μπαταρίας)
 add_constraint(sum_expr(distance_matrix[i, j] * X[i, j, k], i = nodes, j = nodes) <= max_autonomy, k = trucks)

# ==============================================================================
# 5. ΕΠΙΛΥΣΗ & ΕΚΤΥΠΩΣΗ
# ==============================================================================
result <- solve_model(model, with_ROI(solver = "glpk", verbose = FALSE))

cat("\n======================================================================\n")
cat(paste("Κατάσταση Επίλυσης (Status):", solver_status(result), "\n"))
cat("======================================================================\n")

if(solver_status(result) == "success") {
 cat(paste("Συνολική Απόσταση:", objective_value(result), "χλμ\n\n"))

 all_solutions <- get_solution(result, X[i, j, k])
 active_routes <- all_solutions[all_solutions$value > 0.9, c("i", "j", "k")]

 if(nrow(active_routes) > 0) {
```

```
  print("--- ΠΛΑΝΟ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΟΡΤΗΓΩΝ ---")
  for(truck_id in unique(active_routes$k)) {
    truck_data <- active_routes[active_routes$k == truck_id, ]
    cat(paste("\nΦορτηγό", truck_id, ":\n"))
    for(row in 1:nrow(truck_data)) {
      origin <- city_names[truck_data$i[row]]
      destination <- city_names[truck_data$j[row]]
      cat(paste("  From:", origin, " -> To:", destination, "\n"))
    }
  }
 }
} else {
 cat("ΠΡΟΣΟΧΗ: Δεν βρέθηκε εφικτή λύση.\n")
}
```

3.6. Περιγραφή μοντέλου στο Lindo

Το αντίστοιχο μοντέλο στο Lindo είναι 700 γραμμές και η σύνταξη αποκαλύπτει τις δομικές αδυναμίες αναπαράστασης του μοντέλου:

- Ο κώδικας περιγραφής του μοντέλου είναι τεράστιος για να δομηθεί από την αρχή και με ακρίβεια.
- Καταχώρηση και διαχείριση 600 μεταβλητών απόφασης.
- Κάθε λάθος καταχώρηση στις μεταβλητές απόφασης οδηγεί σε λανθασμένη λύση.
- Ο εντοπισμός της λανθασμένης καταχώρησης είναι πρακτικά αδύνατη.

- Οποιαδήποτε μεταβολή σε τιμές, δείκτες ή σύνολα οδηγεί σε μεγάλη απώλεια χρόνου και ενέργειας για την ορθή περιγραφή και ενσωμάτωση στο μοντέλο.

Ο κώδικας Lindo είναι ο ακόλουθος (παραθέτουμε το μοντέλο καθαρά για ενημερωτικούς σκοπούς και για να αναδείξουμε τις εγγενείς αδυναμίες του ως προς την ευκολία χρήσης, την ακρίβεια σύνταξης κώδικα):

```
# 1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

MIN 80 X1_2_1 + 100 X1_3_1 + 70 X1_4_1 + 60 X1_5_1 + 70 X1_6_1 + 90 X1_7_1 + 90 X1_8_1 + 50 X1_9_1 + 80
X2_1_1 + 100 X2_3_1 + 90 X2_4_1 + 80 X2_5_1 + 80 X2_6_1 + 50 X2_7_1 + 100 X2_8_1 + 80 X2_9_1 + 100 X3_1_1
+ 100 X3_2_1 + 80 X3_4_1 + 80 X3_5_1 + 50 X3_6_1 + 70 X3_7_1 + 100 X3_8_1 + 60 X3_9_1 + 70 X4_1_1 + 90
X4_2_1 + 80 X4_3_1 + 100 X4_5_1 + 90 X4_6_1 + 100 X4_7_1 + 70 X4_8_1 + 90 X4_9_1 + 60 X5_1_1 + 80 X5_2_1
+ 80 X5_3_1 + 100 X5_4_1 + 80 X5_6_1 + 100 X5_7_1 + 80 X5_8_1 + 80 X5_9_1 + 70 X6_1_1 + 80 X6_2_1 + 50
X6_3_1 + 90 X6_4_1 + 80 X6_5_1 + 60 X6_7_1 + 50 X6_8_1 + 60 X6_9_1 + 90 X7_1_1 + 50 X7_2_1 + 70 X7_3_1 +
100 X7_4_1 + 100 X7_5_1 + 60 X7_6_1 + 70 X7_8_1 + 100 X7_9_1 + 90 X8_1_1 + 100 X8_2_1 + 100 X8_3_1 + 70
X8_4_1 + 80 X8_5_1 + 50 X8_6_1 + 70 X8_7_1 + 50 X8_9_1 + 50 X9_1_1 + 80 X9_2_1 + 60 X9_3_1 + 90 X9_4_1 +
80 X9_5_1 + 60 X9_6_1 + 100 X9_7_1 + 50 X9_8_1 + 80 X1_2_2 + 100 X1_3_2 + 70 X1_4_2 + 60 X1_5_2 + 70
X1_6_2 + 90 X1_7_2 + 90 X1_8_2 + 50 X1_9_2 + 80 X2_1_2 + 100 X2_3_2 + 90 X2_4_2 + 80 X2_5_2 + 80 X2_6_2
+ 50 X2_7_2 + 100 X2_8_2 + 80 X2_9_2 + 100 X3_1_2 + 100 X3_2_2 + 80 X3_4_2 + 80 X3_5_2 + 50 X3_6_2 + 70
X3_7_2 + 100 X3_8_2 + 60 X3_9_2 + 70 X4_1_2 + 90 X4_2_2 + 80 X4_3_2 + 100 X4_5_2 + 90 X4_6_2 + 100 X4_7_2
+ 70 X4_8_2 + 90 X4_9_2 + 60 X5_1_2 + 80 X5_2_2 + 80 X5_3_2 + 100 X5_4_2 + 80 X5_6_2 + 100 X5_7_2 + 80
X5_8_2 + 80 X5_9_2 + 70 X6_1_2 + 80 X6_2_2 + 50 X6_3_2 + 90 X6_4_2 + 80 X6_5_2 + 60 X6_7_2 + 50 X6_8_2 +
60 X6_9_2 + 90 X7_1_2 + 50 X7_2_2 + 70 X7_3_2 + 100 X7_4_2 + 100 X7_5_2 + 60 X7_6_2 + 70 X7_8_2 + 100
X7_9_2 + 90 X8_1_2 + 100 X8_2_2 + 100 X8_3_2 + 70 X8_4_2 + 80 X8_5_2 + 50 X8_6_2 + 70 X8_7_2 + 50 X8_9_2
+ 50 X9_1_2 + 80 X9_2_2 + 60 X9_3_2 + 90 X9_4_2 + 80 X9_5_2 + 60 X9_6_2 + 100 X9_7_2 + 50 X9_8_2 + 80
X1_2_3 + 100 X1_3_3 + 70 X1_4_3 + 60 X1_5_3 + 70 X1_6_3 + 90 X1_7_3 + 90 X1_8_3 + 50 X1_9_3 + 80 X2_1_3
+ 100 X2_3_3 + 90 X2_4_3 + 80 X2_5_3 + 80 X2_6_3 + 50 X2_7_3 + 100 X2_8_3 + 80 X2_9_3 + 100 X3_1_3 + 100
X3_2_3 + 80 X3_4_3 + 80 X3_5_3 + 50 X3_6_3 + 70 X3_7_3 + 100 X3_8_3 + 60 X3_9_3 + 70 X4_1_3 + 90 X4_2_3
+ 80 X4_3_3 + 100 X4_5_3 + 90 X4_6_3 + 100 X4_7_3 + 70 X4_8_3 + 90 X4_9_3 + 60 X5_1_3 + 80 X5_2_3 + 80
X5_3_3 + 100 X5_4_3 + 80 X5_6_3 + 100 X5_7_3 + 80 X5_8_3 + 80 X5_9_3 + 70 X6_1_3 + 80 X6_2_3 + 50 X6_3_3
+ 90 X6_4_3 + 80 X6_5_3 + 60 X6_7_3 + 50 X6_8_3 + 60 X6_9_3 + 90 X7_1_3 + 50 X7_2_3 + 70 X7_3_3 + 100
X7_4_3 + 100 X7_5_3 + 60 X7_6_3 + 70 X7_8_3 + 100 X7_9_3 + 90 X8_1_3 + 100 X8_2_3 + 100 X8_3_3 + 70
X8_4_3 + 80 X8_5_3 + 50 X8_6_3 + 70 X8_7_3 + 50 X8_9_3 + 50 X9_1_3 + 80 X9_2_3 + 60 X9_3_3 + 90 X9_4_3 +
80 X9_5_3 + 60 X9_6_3 + 100 X9_7_3 + 50 X9_8_3 + 80 X1_2_4 + 100 X1_3_4 + 70 X1_4_4 + 60 X1_5_4 + 70
X1_6_4 + 90 X1_7_4 + 90 X1_8_4 + 50 X1_9_4 + 80 X2_1_4 + 100 X2_3_4 + 90 X2_4_4 + 80 X2_5_4 + 80 X2_6_4
+ 50 X2_7_4 + 100 X2_8_4 + 80 X2_9_4 + 100 X3_1_4 + 100 X3_2_4 + 80 X3_4_4 + 80 X3_5_4 + 50 X3_6_4 + 70
X3_7_4 + 100 X3_8_4 + 60 X3_9_4 + 70 X4_1_4 + 90 X4_2_4 + 80 X4_3_4 + 100 X4_5_4 + 90 X4_6_4 + 100 X4_7_4
+ 70 X4_8_4 + 90 X4_9_4 + 60 X5_1_4 + 80 X5_2_4 + 80 X5_3_4 + 100 X5_4_4 + 80 X5_6_4 + 100 X5_7_4 + 80
X5_8_4 + 80 X5_9_4 + 70 X6_1_4 + 80 X6_2_4 + 50 X6_3_4 + 90 X6_4_4 + 80 X6_5_4 + 60 X6_7_4 + 50 X6_8_4 +
60 X6_9_4 + 90 X7_1_4 + 50 X7_2_4 + 70 X7_3_4 + 100 X7_4_4 + 100 X7_5_4 + 60 X7_6_4 + 70 X7_8_4 + 100
X7_9_4 + 90 X8_1_4 + 100 X8_2_4 + 100 X8_3_4 + 70 X8_4_4 + 80 X8_5_4 + 50 X8_6_4 + 70 X8_7_4 + 50 X8_9_4
```

+ 50 X9_1_4 + 80 X9_2_4 + 60 X9_3_4 + 90 X9_4_4 + 80 X9_5_4 + 60 X9_6_4 + 100 X9_7_4 + 50 X9_8_4 + 80 X1_2_5 + 100 X1_3_5 + 70 X1_4_5 + 60 X1_5_5 + 70 X1_6_5 + 90 X1_7_5 + 90 X1_8_5 + 50 X1_9_5 + 80 X2_1_5 + 100 X2_3_5 + 90 X2_4_5 + 80 X2_5_5 + 80 X2_6_5 + 50 X2_7_5 + 100 X2_8_5 + 80 X2_9_5 + 100 X3_1_5 + 100 X3_2_5 + 80 X3_4_5 + 80 X3_5_5 + 50 X3_6_5 + 70 X3_7_5 + 100 X3_8_5 + 60 X3_9_5 + 70 X4_1_5 + 90 X4_2_5 + 80 X4_3_5 + 100 X4_5_5 + 90 X4_6_5 + 100 X4_7_5 + 70 X4_8_5 + 90 X4_9_5 + 60 X5_1_5 + 80 X5_2_5 + 80 X5_3_5 + 100 X5_4_5 + 80 X5_6_5 + 100 X5_7_5 + 80 X5_8_5 + 80 X5_9_5 + 70 X6_1_5 + 80 X6_2_5 + 50 X6_3_5 + 90 X6_4_5 + 80 X6_5_5 + 60 X6_7_5 + 50 X6_8_5 + 60 X6_9_5 + 90 X7_1_5 + 50 X7_2_5 + 70 X7_3_5 + 100 X7_4_5 + 100 X7_5_5 + 60 X7_6_5 + 70 X7_8_5 + 100 X7_9_5 + 90 X8_1_5 + 100 X8_2_5 + 100 X8_3_5 + 70 X8_4_5 + 80 X8_5_5 + 50 X8_6_5 + 70 X8_7_5 + 50 X8_9_5 + 50 X9_1_5 + 80 X9_2_5 + 60 X9_3_5 + 90 X9_4_5 + 80 X9_5_5 + 60 X9_6_5 + 100 X9_7_5 + 50 X9_8_5 + 80 X1_2_6 + 100 X1_3_6 + 70 X1_4_6 + 60 X1_5_6 + 70 X1_6_6 + 90 X1_7_6 + 90 X1_8_6 + 50 X1_9_6 + 80 X2_1_6 + 100 X2_3_6 + 90 X2_4_6 + 80 X2_5_6 + 80 X2_6_6 + 50 X2_7_6 + 100 X2_8_6 + 80 X2_9_6 + 100 X3_1_6 + 100 X3_2_6 + 80 X3_4_6 + 80 X3_5_6 + 50 X3_6_6 + 70 X3_7_6 + 100 X3_8_6 + 60 X3_9_6 + 70 X4_1_6 + 90 X4_2_6 + 80 X4_3_6 + 100 X4_5_6 + 90 X4_6_6 + 100 X4_7_6 + 70 X4_8_6 + 90 X4_9_6 + 60 X5_1_6 + 80 X5_2_6 + 80 X5_3_6 + 100 X5_4_6 + 80 X5_6_6 + 100 X5_7_6 + 80 X5_8_6 + 80 X5_9_6 + 70 X6_1_6 + 80 X6_2_6 + 50 X6_3_6 + 90 X6_4_6 + 80 X6_5_6 + 60 X6_7_6 + 50 X6_8_6 + 60 X6_9_6 + 90 X7_1_6 + 50 X7_2_6 + 70 X7_3_6 + 100 X7_4_6 + 100 X7_5_6 + 60 X7_6_6 + 70 X7_8_6 + 100 X7_9_6 + 90 X8_1_6 + 100 X8_2_6 + 100 X8_3_6 + 70 X8_4_6 + 80 X8_5_6 + 50 X8_6_6 + 70 X8_7_6 + 50 X8_9_6 + 50 X9_1_6 + 80 X9_2_6 + 60 X9_3_6 + 90 X9_4_6 + 80 X9_5_6 + 60 X9_6_6 + 100 X9_7_6 + 50 X9_8_6 + 80 X1_2_7 + 100 X1_3_7 + 70 X1_4_7 + 60 X1_5_7 + 70 X1_6_7 + 90 X1_7_7 + 90 X1_8_7 + 50 X1_9_7 + 80 X2_1_7 + 100 X2_3_7 + 90 X2_4_7 + 80 X2_5_7 + 80 X2_6_7 + 50 X2_7_7 + 100 X2_8_7 + 80 X2_9_7 + 100 X3_1_7 + 100 X3_2_7 + 80 X3_4_7 + 80 X3_5_7 + 50 X3_6_7 + 70 X3_7_7 + 100 X3_8_7 + 60 X3_9_7 + 70 X4_1_7 + 90 X4_2_7 + 80 X4_3_7 + 100 X4_5_7 + 90 X4_6_7 + 100 X4_7_7 + 70 X4_8_7 + 90 X4_9_7 + 60 X5_1_7 + 80 X5_2_7 + 80 X5_3_7 + 100 X5_4_7 + 80 X5_6_7 + 100 X5_7_7 + 80 X5_8_7 + 80 X5_9_7 + 70 X6_1_7 + 80 X6_2_7 + 50 X6_3_7 + 90 X6_4_7 + 80 X6_5_7 + 60 X6_7_7 + 50 X6_8_7 + 60 X6_9_7 + 90 X7_1_7 + 50 X7_2_7 + 70 X7_3_7 + 100 X7_4_7 + 100 X7_5_7 + 60 X7_6_7 + 70 X7_8_7 + 100 X7_9_7 + 90 X8_1_7 + 100 X8_2_7 + 100 X8_3_7 + 70 X8_4_7 + 80 X8_5_7 + 50 X8_6_7 + 70 X8_7_7 + 50 X8_9_7 + 50 X9_1_7 + 80 X9_2_7 + 60 X9_3_7 + 90 X9_4_7 + 80 X9_5_7 + 60 X9_6_7 + 100 X9_7_7 + 50 X9_8_7 + 80 X1_2_8 + 100 X1_3_8 + 70 X1_4_8 + 60 X1_5_8 + 70 X1_6_8 + 90 X1_7_8 + 90 X1_8_8 + 50 X1_9_8 + 80 X2_1_8 + 100 X2_3_8 + 90 X2_4_8 + 80 X2_5_8 + 80 X2_6_8 + 50 X2_7_8 + 100 X2_8_8 + 80 X2_9_8 + 100 X3_1_8 + 100 X3_2_8 + 80 X3_4_8 + 80 X3_5_8 + 50 X3_6_8 + 70 X3_7_8 + 100 X3_8_8 + 60 X3_9_8 + 70 X4_1_8 + 90 X4_2_8 + 80 X4_3_8 + 100 X4_5_8 + 90 X4_6_8 + 100 X4_7_8 + 70 X4_8_8 + 90 X4_9_8 + 60 X5_1_8 + 80 X5_2_8 + 80 X5_3_8 + 100 X5_4_8 + 80 X5_6_8 + 100 X5_7_8 + 80 X5_8_8 + 80 X5_9_8 + 70 X6_1_8 + 80 X6_2_8 + 50 X6_3_8 + 90 X6_4_8 + 80 X6_5_8 + 60 X6_7_8 + 50 X6_8_8 + 60 X6_9_8 + 90 X7_1_8 + 50 X7_2_8 + 70 X7_3_8 + 100 X7_4_8 + 100 X7_5_8 + 60 X7_6_8 + 70 X7_8_8 + 100 X7_9_8 + 90 X8_1_8 + 100 X8_2_8 + 100 X8_3_8 + 70 X8_4_8 + 80 X8_5_8 + 50 X8_6_8 + 70 X8_7_8 + 50 X8_9_8 + 50 X9_1_8 + 80 X9_2_8 + 60 X9_3_8 + 90 X9_4_8 + 80 X9_5_8 + 60 X9_6_8 + 100 X9_7_8 + 50 X9_8_8

SUBJECT TO

X1_2_1 + X3_2_1 + X4_2_1 + X5_2_1 + X6_2_1 + X7_2_1 + X8_2_1 + X9_2_1 + X1_2_2 + X3_2_2 + X4_2_2 + X5_2_2 + X6_2_2 + X7_2_2 + X8_2_2 + X9_2_2 + X1_2_3 + X3_2_3 + X4_2_3 + X5_2_3 + X6_2_3 + X7_2_3 + X8_2_3 + X9_2_3 + X1_2_4 + X3_2_4 + X4_2_4 + X5_2_4 + X6_2_4 + X7_2_4 + X8_2_4 + X9_2_4 + X1_2_5 + X3_2_5 + X4_2_5 + X5_2_5 + X6_2_5 + X7_2_5 + X8_2_5 + X9_2_5 + X1_2_6 + X3_2_6 + X4_2_6 + X5_2_6 + X6_2_6 + X7_2_6 + X8_2_6 + X9_2_6 + X1_2_7 + X3_2_7 + X4_2_7 + X5_2_7 + X6_2_7 + X7_2_7 + X8_2_7 + X9_2_7 + X1_2_8 + X3_2_8 + X4_2_8 + X5_2_8 + X6_2_8 + X7_2_8 + X8_2_8 + X9_2_8 = 1

X1_3_1 + X2_3_1 + X4_3_1 + X5_3_1 + X6_3_1 + X7_3_1 + X8_3_1 + X9_3_1 + X1_3_2 + X2_3_2 + X4_3_2 + X5_3_2 + X6_3_2 + X7_3_2 + X8_3_2 + X9_3_2 + X1_3_3 + X2_3_3 + X4_3_3 + X5_3_3 + X6_3_3 + X7_3_3 +

X8_3_3 + X9_3_3 + X1_3_4 + X2_3_4 + X4_3_4 + X5_3_4 + X6_3_4 + X7_3_4 + X8_3_4 + X9_3_4 + X1_3_5 + X2_3_5 + X4_3_5 + X5_3_5 + X6_3_5 + X7_3_5 + X8_3_5 + X9_3_5 + X1_3_6 + X2_3_6 + X4_3_6 + X5_3_6 + X6_3_6 + X7_3_6 + X8_3_6 + X9_3_6 + X1_3_7 + X2_3_7 + X4_3_7 + X5_3_7 + X6_3_7 + X7_3_7 + X8_3_7 + X9_3_7 + X1_3_8 + X2_3_8 + X4_3_8 + X5_3_8 + X6_3_8 + X7_3_8 + X8_3_8 + X9_3_8 = 1

X1_4_1 + X2_4_1 + X3_4_1 + X5_4_1 + X6_4_1 + X7_4_1 + X8_4_1 + X9_4_1 + X1_4_2 + X2_4_2 + X3_4_2 + X5_4_2 + X6_4_2 + X7_4_2 + X8_4_2 + X9_4_2 + X1_4_3 + X2_4_3 + X3_4_3 + X5_4_3 + X6_4_3 + X7_4_3 + X8_4_3 + X9_4_3 + X1_4_4 + X2_4_4 + X3_4_4 + X5_4_4 + X6_4_4 + X7_4_4 + X8_4_4 + X9_4_4 + X1_4_5 + X2_4_5 + X3_4_5 + X5_4_5 + X6_4_5 + X7_4_5 + X8_4_5 + X9_4_5 + X1_4_6 + X2_4_6 + X3_4_6 + X5_4_6 + X6_4_6 + X7_4_6 + X8_4_6 + X9_4_6 + X1_4_7 + X2_4_7 + X3_4_7 + X5_4_7 + X6_4_7 + X7_4_7 + X8_4_7 + X9_4_7 + X1_4_8 + X2_4_8 + X3_4_8 + X5_4_8 + X6_4_8 + X7_4_8 + X8_4_8 + X9_4_8 = 1

X1_5_1 + X2_5_1 + X3_5_1 + X4_5_1 + X6_5_1 + X7_5_1 + X8_5_1 + X9_5_1 + X1_5_2 + X2_5_2 + X3_5_2 + X4_5_2 + X6_5_2 + X7_5_2 + X8_5_2 + X9_5_2 + X1_5_3 + X2_5_3 + X3_5_3 + X4_5_3 + X6_5_3 + X7_5_3 + X8_5_3 + X9_5_3 + X1_5_4 + X2_5_4 + X3_5_4 + X4_5_4 + X6_5_4 + X7_5_4 + X8_5_4 + X9_5_4 + X1_5_5 + X2_5_5 + X3_5_5 + X4_5_5 + X6_5_5 + X7_5_5 + X8_5_5 + X9_5_5 + X1_5_6 + X2_5_6 + X3_5_6 + X4_5_6 + X6_5_6 + X7_5_6 + X8_5_6 + X9_5_6 + X1_5_7 + X2_5_7 + X3_5_7 + X4_5_7 + X6_5_7 + X7_5_7 + X8_5_7 + X9_5_7 + X1_5_8 + X2_5_8 + X3_5_8 + X4_5_8 + X6_5_8 + X7_5_8 + X8_5_8 + X9_5_8 = 1

X1_6_1 + X2_6_1 + X3_6_1 + X4_6_1 + X5_6_1 + X7_6_1 + X8_6_1 + X9_6_1 + X1_6_2 + X2_6_2 + X3_6_2 + X4_6_2 + X5_6_2 + X7_6_2 + X8_6_2 + X9_6_2 + X1_6_3 + X2_6_3 + X3_6_3 + X4_6_3 + X5_6_3 + X7_6_3 + X8_6_3 + X9_6_3 + X1_6_4 + X2_6_4 + X3_6_4 + X4_6_4 + X5_6_4 + X7_6_4 + X8_6_4 + X9_6_4 + X1_6_5 + X2_6_5 + X3_6_5 + X4_6_5 + X5_6_5 + X7_6_5 + X8_6_5 + X9_6_5 + X1_6_6 + X2_6_6 + X3_6_6 + X4_6_6 + X5_6_6 + X7_6_6 + X8_6_6 + X9_6_6 + X1_6_7 + X2_6_7 + X3_6_7 + X4_6_7 + X5_6_7 + X7_6_7 + X8_6_7 + X9_6_7 + X1_6_8 + X2_6_8 + X3_6_8 + X4_6_8 + X5_6_8 + X7_6_8 + X8_6_8 + X9_6_8 = 1

X1_7_1 + X2_7_1 + X3_7_1 + X4_7_1 + X5_7_1 + X6_7_1 + X8_7_1 + X9_7_1 + X1_7_2 + X2_7_2 + X3_7_2 + X4_7_2 + X5_7_2 + X6_7_2 + X8_7_2 + X9_7_2 + X1_7_3 + X2_7_3 + X3_7_3 + X4_7_3 + X5_7_3 + X6_7_3 + X8_7_3 + X9_7_3 + X1_7_4 + X2_7_4 + X3_7_4 + X4_7_4 + X5_7_4 + X6_7_4 + X8_7_4 + X9_7_4 + X1_7_5 + X2_7_5 + X3_7_5 + X4_7_5 + X5_7_5 + X6_7_5 + X8_7_5 + X9_7_5 + X1_7_6 + X2_7_6 + X3_7_6 + X4_7_6 + X5_7_6 + X6_7_6 + X8_7_6 + X9_7_6 + X1_7_7 + X2_7_7 + X3_7_7 + X4_7_7 + X5_7_7 + X6_7_7 + X8_7_7 + X9_7_7 + X1_7_8 + X2_7_8 + X3_7_8 + X4_7_8 + X5_7_8 + X6_7_8 + X8_7_8 + X9_7_8 = 1

X1_8_1 + X2_8_1 + X3_8_1 + X4_8_1 + X5_8_1 + X6_8_1 + X7_8_1 + X9_8_1 + X1_8_2 + X2_8_2 + X3_8_2 + X4_8_2 + X5_8_2 + X6_8_2 + X7_8_2 + X9_8_2 + X1_8_3 + X2_8_3 + X3_8_3 + X4_8_3 + X5_8_3 + X6_8_3 + X7_8_3 + X9_8_3 + X1_8_4 + X2_8_4 + X3_8_4 + X4_8_4 + X5_8_4 + X6_8_4 + X7_8_4 + X9_8_4 + X1_8_5 + X2_8_5 + X3_8_5 + X4_8_5 + X5_8_5 + X6_8_5 + X7_8_5 + X9_8_5 + X1_8_6 + X2_8_6 + X3_8_6 + X4_8_6 + X5_8_6 + X6_8_6 + X7_8_6 + X9_8_6 + X1_8_7 + X2_8_7 + X3_8_7 + X4_8_7 + X5_8_7 + X6_8_7 + X7_8_7 + X9_8_7 + X1_8_8 + X2_8_8 + X3_8_8 + X4_8_8 + X5_8_8 + X6_8_8 + X7_8_8 + X9_8_8 = 1

X1_9_1 + X2_9_1 + X3_9_1 + X4_9_1 + X5_9_1 + X6_9_1 + X7_9_1 + X8_9_1 + X1_9_2 + X2_9_2 + X3_9_2 + X4_9_2 + X5_9_2 + X6_9_2 + X7_9_2 + X8_9_2 + X1_9_3 + X2_9_3 + X3_9_3 + X4_9_3 + X5_9_3 + X6_9_3 + X7_9_3 + X8_9_3 + X1_9_4 + X2_9_4 + X3_9_4 + X4_9_4 + X5_9_4 + X6_9_4 + X7_9_4 + X8_9_4 + X1_9_5 + X2_9_5 + X3_9_5 + X4_9_5 + X5_9_5 + X6_9_5 + X7_9_5 + X8_9_5 + X1_9_6 + X2_9_6 + X3_9_6 + X4_9_6 + X5_9_6 + X6_9_6 + X7_9_6 + X8_9_6 + X1_9_7 + X2_9_7 + X3_9_7 + X4_9_7 + X5_9_7 + X6_9_7 + X7_9_7 + X8_9_7 + X1_9_8 + X2_9_8 + X3_9_8 + X4_9_8 + X5_9_8 + X6_9_8 + X7_9_8 + X8_9_8 = 1

Συνέχεια Ροής για κάθε κόμβο και κάθε φορτηγό

X2_1_1 + X3_1_1 + X4_1_1 + X5_1_1 + X6_1_1 + X7_1_1 + X8_1_1 + X9_1_1 - X1_2_1 - X1_3_1 - X1_4_1 - X1_5_1 - X1_6_1 - X1_7_1 - X1_8_1 - X1_9_1 = 0

X1_2_1 + X3_2_1 + X4_2_1 + X5_2_1 + X6_2_1 + X7_2_1 + X8_2_1 + X9_2_1 - X2_1_1 - X2_3_1 - X2_4_1 - X2_5_1 - X2_6_1 - X2_7_1 - X2_8_1 - X2_9_1 = 0

X1_3_1 + X2_3_1 + X4_3_1 + X5_3_1 + X6_3_1 + X7_3_1 + X8_3_1 + X9_3_1 - X3_1_1 - X3_2_1 - X3_4_1 - X3_5_1 - X3_6_1 - X3_7_1 - X3_8_1 - X3_9_1 = 0

X1_4_1 + X2_4_1 + X3_4_1 + X5_4_1 + X6_4_1 + X7_4_1 + X8_4_1 + X9_4_1 - X4_1_1 - X4_2_1 - X4_3_1 - X4_5_1 - X4_6_1 - X4_7_1 - X4_8_1 - X4_9_1 = 0

X1_5_1 + X2_5_1 + X3_5_1 + X4_5_1 + X6_5_1 + X7_5_1 + X8_5_1 + X9_5_1 - X5_1_1 - X5_2_1 - X5_3_1 - X5_4_1 - X5_6_1 - X5_7_1 - X5_8_1 - X5_9_1 = 0

X1_6_1 + X2_6_1 + X3_6_1 + X4_6_1 + X5_6_1 + X7_6_1 + X8_6_1 + X9_6_1 - X6_1_1 - X6_2_1 - X6_3_1 - X6_4_1 - X6_5_1 - X6_7_1 - X6_8_1 - X6_9_1 = 0

X1_7_1 + X2_7_1 + X3_7_1 + X4_7_1 + X5_7_1 + X6_7_1 + X8_7_1 + X9_7_1 - X7_1_1 - X7_2_1 - X7_3_1 - X7_4_1 - X7_5_1 - X7_6_1 - X7_8_1 - X7_9_1 = 0

X1_8_1 + X2_8_1 + X3_8_1 + X4_8_1 + X5_8_1 + X6_8_1 + X7_8_1 + X9_8_1 - X8_1_1 - X8_2_1 - X8_3_1 - X8_4_1 - X8_5_1 - X8_6_1 - X8_7_1 - X8_9_1 = 0

X1_9_1 + X2_9_1 + X3_9_1 + X4_9_1 + X5_9_1 + X6_9_1 + X7_9_1 + X8_9_1 - X9_1_1 - X9_2_1 - X9_3_1 - X9_4_1 - X9_5_1 - X9_6_1 - X9_7_1 - X9_8_1 = 0

X2_1_2 + X3_1_2 + X4_1_2 + X5_1_2 + X6_1_2 + X7_1_2 + X8_1_2 + X9_1_2 - X1_2_2 - X1_3_2 - X1_4_2 - X1_5_2 - X1_6_2 - X1_7_2 - X1_8_2 - X1_9_2 = 0

X1_2_2 + X3_2_2 + X4_2_2 + X5_2_2 + X6_2_2 + X7_2_2 + X8_2_2 + X9_2_2 - X2_1_2 - X2_3_2 - X2_4_2 - X2_5_2 - X2_6_2 - X2_7_2 - X2_8_2 - X2_9_2 = 0

X1_3_2 + X2_3_2 + X4_3_2 + X5_3_2 + X6_3_2 + X7_3_2 + X8_3_2 + X9_3_2 - X3_1_2 - X3_2_2 - X3_4_2 - X3_5_2 - X3_6_2 - X3_7_2 - X3_8_2 - X3_9_2 = 0

X1_4_2 + X2_4_2 + X3_4_2 + X5_4_2 + X6_4_2 + X7_4_2 + X8_4_2 + X9_4_2 - X4_1_2 - X4_2_2 - X4_3_2 - X4_5_2 - X4_6_2 - X4_7_2 - X4_8_2 - X4_9_2 = 0

X1_5_2 + X2_5_2 + X3_5_2 + X4_5_2 + X6_5_2 + X7_5_2 + X8_5_2 + X9_5_2 - X5_1_2 - X5_2_2 - X5_3_2 - X5_4_2 - X5_6_2 - X5_7_2 - X5_8_2 - X5_9_2 = 0

X1_6_2 + X2_6_2 + X3_6_2 + X4_6_2 + X5_6_2 + X7_6_2 + X8_6_2 + X9_6_2 - X6_1_2 - X6_2_2 - X6_3_2 - X6_4_2 - X6_5_2 - X6_7_2 - X6_8_2 - X6_9_2 = 0

X1_7_2 + X2_7_2 + X3_7_2 + X4_7_2 + X5_7_2 + X6_7_2 + X8_7_2 + X9_7_2 - X7_1_2 - X7_2_2 - X7_3_2 - X7_4_2 - X7_5_2 - X7_6_2 - X7_8_2 - X7_9_2 = 0

X1_8_2 + X2_8_2 + X3_8_2 + X4_8_2 + X5_8_2 + X6_8_2 + X7_8_2 + X9_8_2 - X8_1_2 - X8_2_2 - X8_3_2 - X8_4_2 - X8_5_2 - X8_6_2 - X8_7_2 - X8_9_2 = 0

X1_9_2 + X2_9_2 + X3_9_2 + X4_9_2 + X5_9_2 + X6_9_2 + X7_9_2 + X8_9_2 - X9_1_2 - X9_2_2 - X9_3_2 - X9_4_2 - X9_5_2 - X9_6_2 - X9_7_2 - X9_8_2 = 0

X2_1_3 + X3_1_3 + X4_1_3 + X5_1_3 + X6_1_3 + X7_1_3 + X8_1_3 + X9_1_3 - X1_2_3 - X1_3_3 - X1_4_3 - X1_5_3 - X1_6_3 - X1_7_3 - X1_8_3 - X1_9_3 = 0

X1_2_3 + X3_2_3 + X4_2_3 + X5_2_3 + X6_2_3 + X7_2_3 + X8_2_3 + X9_2_3 - X2_1_3 - X2_3_3 - X2_4_3 - X2_5_3 - X2_6_3 - X2_7_3 - X2_8_3 - X2_9_3 = 0

X1_3_3 + X2_3_3 + X4_3_3 + X5_3_3 + X6_3_3 + X7_3_3 + X8_3_3 + X9_3_3 - X3_1_3 - X3_2_3 - X3_4_3 - X3_5_3 - X3_6_3 - X3_7_3 - X3_8_3 - X3_9_3 = 0

X1_4_3 + X2_4_3 + X3_4_3 + X5_4_3 + X6_4_3 + X7_4_3 + X8_4_3 + X9_4_3 - X4_1_3 - X4_2_3 - X4_3_3 - X4_5_3 - X4_6_3 - X4_7_3 - X4_8_3 - X4_9_3 = 0

X1_5_3 + X2_5_3 + X3_5_3 + X4_5_3 + X6_5_3 + X7_5_3 + X8_5_3 + X9_5_3 - X5_1_3 - X5_2_3 - X5_3_3 - X5_4_3 - X5_6_3 - X5_7_3 - X5_8_3 - X5_9_3 = 0

X1_6_3 + X2_6_3 + X3_6_3 + X4_6_3 + X5_6_3 + X7_6_3 + X8_6_3 + X9_6_3 - X6_1_3 - X6_2_3 - X6_3_3 - X6_4_3 - X6_5_3 - X6_7_3 - X6_8_3 - X6_9_3 = 0

X1_7_3 + X2_7_3 + X3_7_3 + X4_7_3 + X5_7_3 + X6_7_3 + X8_7_3 + X9_7_3 - X7_1_3 - X7_2_3 - X7_3_3 - X7_4_3 - X7_5_3 - X7_6_3 - X7_8_3 - X7_9_3 = 0

X1_8_3 + X2_8_3 + X3_8_3 + X4_8_3 + X5_8_3 + X6_8_3 + X7_8_3 + X9_8_3 - X8_1_3 - X8_2_3 - X8_3_3 - X8_4_3 - X8_5_3 - X8_6_3 - X8_7_3 - X8_9_3 = 0

X1_9_3 + X2_9_3 + X3_9_3 + X4_9_3 + X5_9_3 + X6_9_3 + X7_9_3 + X8_9_3 - X9_1_3 - X9_2_3 - X9_3_3 - X9_4_3 - X9_5_3 - X9_6_3 - X9_7_3 - X9_8_3 = 0

X2_1_4 + X3_1_4 + X4_1_4 + X5_1_4 + X6_1_4 + X7_1_4 + X8_1_4 + X9_1_4 - X1_2_4 - X1_3_4 - X1_4_4 - X1_5_4 - X1_6_4 - X1_7_4 - X1_8_4 - X1_9_4 = 0

X1_2_4 + X3_2_4 + X4_2_4 + X5_2_4 + X6_2_4 + X7_2_4 + X8_2_4 + X9_2_4 - X2_1_4 - X2_3_4 - X2_4_4 - X2_5_4 - X2_6_4 - X2_7_4 - X2_8_4 - X2_9_4 = 0

X1_3_4 + X2_3_4 + X4_3_4 + X5_3_4 + X6_3_4 + X7_3_4 + X8_3_4 + X9_3_4 - X3_1_4 - X3_2_4 - X3_4_4 - X3_5_4 - X3_6_4 - X3_7_4 - X3_8_4 - X3_9_4 = 0

X1_4_4 + X2_4_4 + X3_4_4 + X5_4_4 + X6_4_4 + X7_4_4 + X8_4_4 + X9_4_4 - X4_1_4 - X4_2_4 - X4_3_4 - X4_5_4 - X4_6_4 - X4_7_4 - X4_8_4 - X4_9_4 = 0

X1_5_4 + X2_5_4 + X3_5_4 + X4_5_4 + X6_5_4 + X7_5_4 + X8_5_4 + X9_5_4 - X5_1_4 - X5_2_4 - X5_3_4 - X5_4_4 - X5_6_4 - X5_7_4 - X5_8_4 - X5_9_4 = 0

X1_6_4 + X2_6_4 + X3_6_4 + X4_6_4 + X5_6_4 + X7_6_4 + X8_6_4 + X9_6_4 - X6_1_4 - X6_2_4 - X6_3_4 - X6_4_4 - X6_5_4 - X6_7_4 - X6_8_4 - X6_9_4 = 0

X1_7_4 + X2_7_4 + X3_7_4 + X4_7_4 + X5_7_4 + X6_7_4 + X8_7_4 + X9_7_4 - X7_1_4 - X7_2_4 - X7_3_4 - X7_4_4 - X7_5_4 - X7_6_4 - X7_8_4 - X7_9_4 = 0

X1_8_4 + X2_8_4 + X3_8_4 + X4_8_4 + X5_8_4 + X6_8_4 + X7_8_4 + X9_8_4 - X8_1_4 - X8_2_4 - X8_3_4 - X8_4_4 - X8_5_4 - X8_6_4 - X8_7_4 - X8_9_4 = 0

X1_9_4 + X2_9_4 + X3_9_4 + X4_9_4 + X5_9_4 + X6_9_4 + X7_9_4 + X8_9_4 - X9_1_4 - X9_2_4 - X9_3_4 - X9_4_4 - X9_5_4 - X9_6_4 - X9_7_4 - X9_8_4 = 0

X2_1_5 + X3_1_5 + X4_1_5 + X5_1_5 + X6_1_5 + X7_1_5 + X8_1_5 + X9_1_5 - X1_2_5 - X1_3_5 - X1_4_5 - X1_5_5 - X1_6_5 - X1_7_5 - X1_8_5 - X1_9_5 = 0

X1_2_5 + X3_2_5 + X4_2_5 + X5_2_5 + X6_2_5 + X7_2_5 + X8_2_5 + X9_2_5 - X2_1_5 - X2_3_5 - X2_4_5 - X2_5_5 - X2_6_5 - X2_7_5 - X2_8_5 - X2_9_5 = 0

X1_3_5 + X2_3_5 + X4_3_5 + X5_3_5 + X6_3_5 + X7_3_5 + X8_3_5 + X9_3_5 - X3_1_5 - X3_2_5 - X3_4_5 - X3_5_5 - X3_6_5 - X3_7_5 - X3_8_5 - X3_9_5 = 0

X1_4_5 + X2_4_5 + X3_4_5 + X5_4_5 + X6_4_5 + X7_4_5 + X8_4_5 + X9_4_5 - X4_1_5 - X4_2_5 - X4_3_5 - X4_5_5 - X4_6_5 - X4_7_5 - X4_8_5 - X4_9_5 = 0

X1_5_5 + X2_5_5 + X3_5_5 + X4_5_5 + X6_5_5 + X7_5_5 + X8_5_5 + X9_5_5 - X5_1_5 - X5_2_5 - X5_3_5 - X5_4_5 - X5_6_5 - X5_7_5 - X5_8_5 - X5_9_5 = 0

X1_6_5 + X2_6_5 + X3_6_5 + X4_6_5 + X5_6_5 + X7_6_5 + X8_6_5 + X9_6_5 - X6_1_5 - X6_2_5 - X6_3_5 - X6_4_5 - X6_5_5 - X6_7_5 - X6_8_5 - X6_9_5 = 0

X1_7_5 + X2_7_5 + X3_7_5 + X4_7_5 + X5_7_5 + X6_7_5 + X8_7_5 + X9_7_5 - X7_1_5 - X7_2_5 - X7_3_5 - X7_4_5 - X7_5_5 - X7_6_5 - X7_8_5 - X7_9_5 = 0

X1_8_5 + X2_8_5 + X3_8_5 + X4_8_5 + X5_8_5 + X6_8_5 + X7_8_5 + X9_8_5 - X8_1_5 - X8_2_5 - X8_3_5 - X8_4_5 - X8_5_5 - X8_6_5 - X8_7_5 - X8_9_5 = 0

X1_9_5 + X2_9_5 + X3_9_5 + X4_9_5 + X5_9_5 + X6_9_5 + X7_9_5 + X8_9_5 - X9_1_5 - X9_2_5 - X9_3_5 - X9_4_5 - X9_5_5 - X9_6_5 - X9_7_5 - X9_8_5 = 0

X2_1_6 + X3_1_6 + X4_1_6 + X5_1_6 + X6_1_6 + X7_1_6 + X8_1_6 + X9_1_6 - X1_2_6 - X1_3_6 - X1_4_6 - X1_5_6 - X1_6_6 - X1_7_6 - X1_8_6 - X1_9_6 = 0

X1_2_6 + X3_2_6 + X4_2_6 + X5_2_6 + X6_2_6 + X7_2_6 + X8_2_6 + X9_2_6 - X2_1_6 - X2_3_6 - X2_4_6 - X2_5_6 - X2_6_6 - X2_7_6 - X2_8_6 - X2_9_6 = 0

X1_3_6 + X2_3_6 + X4_3_6 + X5_3_6 + X6_3_6 + X7_3_6 + X8_3_6 + X9_3_6 - X3_1_6 - X3_2_6 - X3_4_6 - X3_5_6 - X3_6_6 - X3_7_6 - X3_8_6 - X3_9_6 = 0

X1_4_6 + X2_4_6 + X3_4_6 + X5_4_6 + X6_4_6 + X7_4_6 + X8_4_6 + X9_4_6 - X4_1_6 - X4_2_6 - X4_3_6 - X4_5_6 - X4_6_6 - X4_7_6 - X4_8_6 - X4_9_6 = 0

X1_5_6 + X2_5_6 + X3_5_6 + X4_5_6 + X6_5_6 + X7_5_6 + X8_5_6 + X9_5_6 - X5_1_6 - X5_2_6 - X5_3_6 - X5_4_6 - X5_6_6 - X5_7_6 - X5_8_6 - X5_9_6 = 0

X1_6_6 + X2_6_6 + X3_6_6 + X4_6_6 + X5_6_6 + X7_6_6 + X8_6_6 + X9_6_6 - X6_1_6 - X6_2_6 - X6_3_6 - X6_4_6 - X6_5_6 - X6_7_6 - X6_8_6 - X6_9_6 = 0

X1_7_6 + X2_7_6 + X3_7_6 + X4_7_6 + X5_7_6 + X6_7_6 + X8_7_6 + X9_7_6 - X7_1_6 - X7_2_6 - X7_3_6 - X7_4_6 - X7_5_6 - X7_6_6 - X7_8_6 - X7_9_6 = 0

X1_8_6 + X2_8_6 + X3_8_6 + X4_8_6 + X5_8_6 + X6_8_6 + X7_8_6 + X9_8_6 - X8_1_6 - X8_2_6 - X8_3_6 - X8_4_6 - X8_5_6 - X8_6_6 - X8_7_6 - X8_9_6 = 0

X1_9_6 + X2_9_6 + X3_9_6 + X4_9_6 + X5_9_6 + X6_9_6 + X7_9_6 + X8_9_6 - X9_1_6 - X9_2_6 - X9_3_6 - X9_4_6 - X9_5_6 - X9_6_6 - X9_7_6 - X9_8_6 = 0

X2_1_7 + X3_1_7 + X4_1_7 + X5_1_7 + X6_1_7 + X7_1_7 + X8_1_7 + X9_1_7 - X1_2_7 - X1_3_7 - X1_4_7 - X1_5_7 - X1_6_7 - X1_7_7 - X1_8_7 - X1_9_7 = 0

X1_2_7 + X3_2_7 + X4_2_7 + X5_2_7 + X6_2_7 + X7_2_7 + X8_2_7 + X9_2_7 - X2_1_7 - X2_3_7 - X2_4_7 - X2_5_7 - X2_6_7 - X2_7_7 - X2_8_7 - X2_9_7 = 0

X1_3_7 + X2_3_7 + X4_3_7 + X5_3_7 + X6_3_7 + X7_3_7 + X8_3_7 + X9_3_7 - X3_1_7 - X3_2_7 - X3_4_7 - X3_5_7 - X3_6_7 - X3_7_7 - X3_8_7 - X3_9_7 = 0

X1_4_7 + X2_4_7 + X3_4_7 + X5_4_7 + X6_4_7 + X7_4_7 + X8_4_7 + X9_4_7 - X4_1_7 - X4_2_7 - X4_3_7 - X4_5_7 - X4_6_7 - X4_7_7 - X4_8_7 - X4_9_7 = 0

X1_5_7 + X2_5_7 + X3_5_7 + X4_5_7 + X6_5_7 + X7_5_7 + X8_5_7 + X9_5_7 - X5_1_7 - X5_2_7 - X5_3_7 - X5_4_7 - X5_6_7 - X5_7_7 - X5_8_7 - X5_9_7 = 0

X1_6_7 + X2_6_7 + X3_6_7 + X4_6_7 + X5_6_7 + X7_6_7 + X8_6_7 + X9_6_7 - X6_1_7 - X6_2_7 - X6_3_7 - X6_4_7 - X6_5_7 - X6_7_7 - X6_8_7 - X6_9_7 = 0

X1_7_7 + X2_7_7 + X3_7_7 + X4_7_7 + X5_7_7 + X6_7_7 + X8_7_7 + X9_7_7 - X7_1_7 - X7_2_7 - X7_3_7 - X7_4_7 - X7_5_7 - X7_6_7 - X7_8_7 - X7_9_7 = 0

X1_8_7 + X2_8_7 + X3_8_7 + X4_8_7 + X5_8_7 + X6_8_7 + X7_8_7 + X9_8_7 - X8_1_7 - X8_2_7 - X8_3_7 - X8_4_7 - X8_5_7 - X8_6_7 - X8_7_7 - X8_9_7 = 0

X1_9_7 + X2_9_7 + X3_9_7 + X4_9_7 + X5_9_7 + X6_9_7 + X7_9_7 + X8_9_7 - X9_1_7 - X9_2_7 - X9_3_7 - X9_4_7 - X9_5_7 - X9_6_7 - X9_7_7 - X9_8_7 = 0

X2_1_8 + X3_1_8 + X4_1_8 + X5_1_8 + X6_1_8 + X7_1_8 + X8_1_8 + X9_1_8 - X1_2_8 - X1_3_8 - X1_4_8 - X1_5_8 - X1_6_8 - X1_7_8 - X1_8_8 - X1_9_8 = 0

X1_2_8 + X3_2_8 + X4_2_8 + X5_2_8 + X6_2_8 + X7_2_8 + X8_2_8 + X9_2_8 - X2_1_8 - X2_3_8 - X2_4_8 - X2_5_8 - X2_6_8 - X2_7_8 - X2_8_8 - X2_9_8 = 0

X1_3_8 + X2_3_8 + X4_3_8 + X5_3_8 + X6_3_8 + X7_3_8 + X8_3_8 + X9_3_8 - X3_1_8 - X3_2_8 - X3_4_8 - X3_5_8 - X3_6_8 - X3_7_8 - X3_8_8 - X3_9_8 = 0

X1_4_8 + X2_4_8 + X3_4_8 + X5_4_8 + X6_4_8 + X7_4_8 + X8_4_8 + X9_4_8 - X4_1_8 - X4_2_8 - X4_3_8 - X4_5_8 - X4_6_8 - X4_7_8 - X4_8_8 - X4_9_8 = 0

X1_5_8 + X2_5_8 + X3_5_8 + X4_5_8 + X6_5_8 + X7_5_8 + X8_5_8 + X9_5_8 - X5_1_8 - X5_2_8 - X5_3_8 - X5_4_8 - X5_6_8 - X5_7_8 - X5_8_8 - X5_9_8 = 0

X1_6_8 + X2_6_8 + X3_6_8 + X4_6_8 + X5_6_8 + X7_6_8 + X8_6_8 + X9_6_8 - X6_1_8 - X6_2_8 - X6_3_8 - X6_4_8 - X6_5_8 - X6_7_8 - X6_8_8 - X6_9_8 = 0

X1_7_8 + X2_7_8 + X3_7_8 + X4_7_8 + X5_7_8 + X6_7_8 + X8_7_8 + X9_7_8 - X7_1_8 - X7_2_8 - X7_3_8 - X7_4_8 - X7_5_8 - X7_6_8 - X7_8_8 - X7_9_8 = 0

X1_8_8 + X2_8_8 + X3_8_8 + X4_8_8 + X5_8_8 + X6_8_8 + X7_8_8 + X9_8_8 - X8_1_8 - X8_2_8 - X8_3_8 - X8_4_8 - X8_5_8 - X8_6_8 - X8_7_8 - X8_9_8 = 0

X1_9_8 + X2_9_8 + X3_9_8 + X4_9_8 + X5_9_8 + X6_9_8 + X7_9_8 + X8_9_8 - X9_1_8 - X9_2_8 - X9_3_8 - X9_4_8 - X9_5_8 - X9_6_8 - X9_7_8 - X9_8_8 = 0

Κάθε φορτηγό ξεκινά το πολύ μία φορά από την αποθήκη (1)

X1_2_1 + X1_3_1 + X1_4_1 + X1_5_1 + X1_6_1 + X1_7_1 + X1_8_1 + X1_9_1 <= 1

X1_2_2 + X1_3_2 + X1_4_2 + X1_5_2 + X1_6_2 + X1_7_2 + X1_8_2 + X1_9_2 <= 1

X1_2_3 + X1_3_3 + X1_4_3 + X1_5_3 + X1_6_3 + X1_7_3 + X1_8_3 + X1_9_3 <= 1

X1_2_4 + X1_3_4 + X1_4_4 + X1_5_4 + X1_6_4 + X1_7_4 + X1_8_4 + X1_9_4 <= 1

X1_2_5 + X1_3_5 + X1_4_5 + X1_5_5 + X1_6_5 + X1_7_5 + X1_8_5 + X1_9_5 <= 1

X1_2_6 + X1_3_6 + X1_4_6 + X1_5_6 + X1_6_6 + X1_7_6 + X1_8_6 + X1_9_6 <= 1

X1_2_7 + X1_3_7 + X1_4_7 + X1_5_7 + X1_6_7 + X1_7_7 + X1_8_7 + X1_9_7 <= 1

X1_2_8 + X1_3_8 + X1_4_8 + X1_5_8 + X1_6_8 + X1_7_8 + X1_8_8 + X1_9_8 <= 1

Περιορισμός Χωρητικότητας (Capacity) ανά φορτηγό

28 X1_2_1 + 28 X3_2_1 + 28 X4_2_1 + 28 X5_2_1 + 28 X6_2_1 + 28 X7_2_1 + 28 X8_2_1 + 28 X9_2_1 + 18 X1_3_1 + 18 X2_3_1 + 18 X4_3_1 + 18 X5_3_1 + 18 X6_3_1 + 18 X7_3_1 + 18 X8_3_1 + 18 X9_3_1 + 20 X1_4_1 + 20 X2_4_1 + 20 X3_4_1 + 20 X5_4_1 + 20 X6_4_1 + 20 X7_4_1 + 20 X8_4_1 + 20 X9_4_1 + 28 X1_5_1 + 28 X2_5_1 + 28 X3_5_1 + 28 X4_5_1 + 28 X6_5_1 + 28 X7_5_1 + 28 X8_5_1 + 28 X9_5_1 + 21 X1_6_1 + 21 X2_6_1 + 21 X3_6_1 + 21 X4_6_1 + 21 X5_6_1 + 21 X7_6_1 + 21 X8_6_1 + 21 X9_6_1 + 22 X1_7_1 + 22 X2_7_1 + 22 X3_7_1 + 22 X4_7_1 + 22 X5_7_1 + 22 X6_7_1 + 22 X8_7_1 + 22 X9_7_1 + 30 X1_8_1 + 30 X2_8_1 + 30 X3_8_1 + 30 X4_8_1 + 30 X5_8_1 + 30 X6_8_1 + 30 X7_8_1 + 30 X9_8_1 + 27 X1_9_1 + 27 X2_9_1 + 27 X3_9_1 + 27 X4_9_1 + 27 X5_9_1 + 27 X6_9_1 + 27 X7_9_1 + 27 X8_9_1 + 0 <= 45

28 X1_2_2 + 28 X3_2_2 + 28 X4_2_2 + 28 X5_2_2 + 28 X6_2_2 + 28 X7_2_2 + 28 X8_2_2 + 28 X9_2_2 + 18 X1_3_2 + 18 X2_3_2 + 18 X4_3_2 + 18 X5_3_2 + 18 X6_3_2 + 18 X7_3_2 + 18 X8_3_2 + 18 X9_3_2 + 20 X1_4_2 + 20 X2_4_2 + 20 X3_4_2 + 20 X5_4_2 + 20 X6_4_2 + 20 X7_4_2 + 20 X8_4_2 + 20 X9_4_2 + 28 X1_5_2 + 28 X2_5_2 + 28 X3_5_2 + 28 X4_5_2 + 28 X6_5_2 + 28 X7_5_2 + 28 X8_5_2 + 28 X9_5_2 + 21 X1_6_2 + 21 X2_6_2 + 21 X3_6_2 + 21 X4_6_2 + 21 X5_6_2 + 21 X7_6_2 + 21 X8_6_2 + 21 X9_6_2 + 22 X1_7_2 + 22 X2_7_2 + 22 X3_7_2 + 22 X4_7_2 + 22 X5_7_2 + 22 X6_7_2 + 22 X8_7_2 + 22 X9_7_2 + 30 X1_8_2 + 30 X2_8_2 + 30 X3_8_2 + 30 X4_8_2 + 30 X5_8_2 + 30 X6_8_2 + 30 X7_8_2 + 30 X9_8_2 + 27 X1_9_2 + 27 X2_9_2 + 27 X3_9_2 + 27 X4_9_2 + 27 X5_9_2 + 27 X6_9_2 + 27 X7_9_2 + 27 X8_9_2 + 0 <= 45

28 X1_2_3 + 28 X3_2_3 + 28 X4_2_3 + 28 X5_2_3 + 28 X6_2_3 + 28 X7_2_3 + 28 X8_2_3 + 28 X9_2_3 + 18 X1_3_3 + 18 X2_3_3 + 18 X4_3_3 + 18 X5_3_3 + 18 X6_3_3 + 18 X7_3_3 + 18 X8_3_3 + 18 X9_3_3 + 20 X1_4_3 + 20 X2_4_3 + 20 X3_4_3 + 20 X5_4_3 + 20 X6_4_3 + 20 X7_4_3 + 20 X8_4_3 + 20 X9_4_3 + 28 X1_5_3 + 28 X2_5_3 + 28 X3_5_3 + 28 X4_5_3 + 28 X6_5_3 + 28 X7_5_3 + 28 X8_5_3 + 28 X9_5_3 + 21 X1_6_3 + 21 X2_6_3 + 21 X3_6_3 + 21 X4_6_3 + 21 X5_6_3 + 21 X7_6_3 + 21 X8_6_3 + 21 X9_6_3 + 22 X1_7_3 + 22 X2_7_3 + 22 X3_7_3 + 22 X4_7_3 + 22 X5_7_3 + 22 X6_7_3 + 22 X8_7_3 + 22 X9_7_3 + 30 X1_8_3 + 30 X2_8_3 + 30 X3_8_3 + 30 X4_8_3 + 30 X5_8_3 + 30 X6_8_3 + 30 X7_8_3 + 30 X9_8_3 + 27 X1_9_3 + 27 X2_9_3 + 27 X3_9_3 + 27 X4_9_3 + 27 X5_9_3 + 27 X6_9_3 + 27 X7_9_3 + 27 X8_9_3 + 0 <= 45

28 X1_2_4 + 28 X3_2_4 + 28 X4_2_4 + 28 X5_2_4 + 28 X6_2_4 + 28 X7_2_4 + 28 X8_2_4 + 28 X9_2_4 + 18 X1_3_4 + 18 X2_3_4 + 18 X4_3_4 + 18 X5_3_4 + 18 X6_3_4 + 18 X7_3_4 + 18 X8_3_4 + 18 X9_3_4 + 20 X1_4_4 + 20 X2_4_4 + 20 X3_4_4 + 20 X5_4_4 + 20 X6_4_4 + 20 X7_4_4 + 20 X8_4_4 + 20 X9_4_4 + 28 X1_5_4 + 28 X2_5_4 + 28 X3_5_4 + 28 X4_5_4 + 28 X6_5_4 + 28 X7_5_4 + 28 X8_5_4 + 28 X9_5_4 + 21 X1_6_4 + 21 X2_6_4 + 21 X3_6_4 + 21 X4_6_4 + 21 X5_6_4 + 21 X7_6_4 + 21 X8_6_4 + 21 X9_6_4 + 22 X1_7_4 + 22 X2_7_4 + 22 X3_7_4 + 22 X4_7_4 + 22 X5_7_4 + 22 X6_7_4 + 22 X8_7_4 + 22 X9_7_4 + 30 X1_8_4 + 30 X2_8_4 + 30 X3_8_4 + 30 X4_8_4 + 30 X5_8_4 + 30 X6_8_4 + 30 X7_8_4 + 30 X9_8_4 + 27 X1_9_4 + 27 X2_9_4 + 27 X3_9_4 + 27 X4_9_4 + 27 X5_9_4 + 27 X6_9_4 + 27 X7_9_4 + 27 X8_9_4 + 0 <= 45

28 X1_2_5 + 28 X3_2_5 + 28 X4_2_5 + 28 X5_2_5 + 28 X6_2_5 + 28 X7_2_5 + 28 X8_2_5 + 28 X9_2_5 + 18 X1_3_5 + 18 X2_3_5 + 18 X4_3_5 + 18 X5_3_5 + 18 X6_3_5 + 18 X7_3_5 + 18 X8_3_5 + 18 X9_3_5 + 20 X1_4_5 + 20 X2_4_5 + 20 X3_4_5 + 20 X5_4_5 + 20 X6_4_5 + 20 X7_4_5 + 20 X8_4_5 + 20 X9_4_5 + 28 X1_5_5 + 28 X2_5_5 + 28 X3_5_5 + 28 X4_5_5 + 28 X6_5_5 + 28 X7_5_5 + 28 X8_5_5 + 28 X9_5_5 + 21 X1_6_5 + 21 X2_6_5 + 21 X3_6_5 + 21 X4_6_5 + 21 X5_6_5 + 21 X7_6_5 + 21 X8_6_5 + 21 X9_6_5 + 22 X1_7_5 + 22 X2_7_5 + 22 X3_7_5 + 22 X4_7_5 + 22 X5_7_5 + 22 X6_7_5 + 22 X8_7_5 + 22 X9_7_5 + 30 X1_8_5 + 30 X2_8_5 + 30 X3_8_5 + 30 X4_8_5 + 30 X5_8_5 + 30 X6_8_5 + 30 X7_8_5 + 30 X9_8_5 + 27 X1_9_5 + 27 X2_9_5 + 27 X3_9_5 + 27 X4_9_5 + 27 X5_9_5 + 27 X6_9_5 + 27 X7_9_5 + 27 X8_9_5 + 0 <= 45

28 X1_2_6 + 28 X3_2_6 + 28 X4_2_6 + 28 X5_2_6 + 28 X6_2_6 + 28 X7_2_6 + 28 X8_2_6 + 28 X9_2_6 + 18 X1_3_6 + 18 X2_3_6 + 18 X4_3_6 + 18 X5_3_6 + 18 X6_3_6 + 18 X7_3_6 + 18 X8_3_6 + 18 X9_3_6 + 20 X1_4_6 + 20 X2_4_6 + 20 X3_4_6 + 20 X5_4_6 + 20 X6_4_6 + 20 X7_4_6 + 20 X8_4_6 + 20 X9_4_6 + 28 X1_5_6 + 28 X2_5_6 + 28 X3_5_6 + 28 X4_5_6 + 28 X6_5_6 + 28 X7_5_6 + 28 X8_5_6 + 28 X9_5_6 + 21 X1_6_6 + 21 X2_6_6 + 21 X3_6_6 + 21 X4_6_6 + 21 X5_6_6 + 21 X7_6_6 + 21 X8_6_6 + 21 X9_6_6 + 22 X1_7_6 + 22 X2_7_6 + 22 X3_7_6 + 22 X4_7_6 + 22 X5_7_6 + 22 X6_7_6 + 22 X8_7_6 + 22 X9_7_6 + 30 X1_8_6 + 30 X2_8_6 + 30 X3_8_6 + 30 X4_8_6 + 30 X5_8_6 + 30 X6_8_6 + 30 X7_8_6 + 30 X9_8_6 + 27 X1_9_6 + 27 X2_9_6 + 27 X3_9_6 + 27 X4_9_6 + 27 X5_9_6 + 27 X6_9_6 + 27 X7_9_6 + 27 X8_9_6 + 0 <= 45

28 X1_2_7 + 28 X3_2_7 + 28 X4_2_7 + 28 X5_2_7 + 28 X6_2_7 + 28 X7_2_7 + 28 X8_2_7 + 28 X9_2_7 + 18 X1_3_7 + 18 X2_3_7 + 18 X4_3_7 + 18 X5_3_7 + 18 X6_3_7 + 18 X7_3_7 + 18 X8_3_7 + 18 X9_3_7 + 20 X1_4_7 + 20 X2_4_7 + 20 X3_4_7 + 20 X5_4_7 + 20 X6_4_7 + 20 X7_4_7 + 20 X8_4_7 + 20 X9_4_7 + 28 X1_5_7 + 28 X2_5_7 + 28 X3_5_7 + 28 X4_5_7 + 28 X6_5_7 + 28 X7_5_7 + 28 X8_5_7 + 28 X9_5_7 + 21 X1_6_7 + 21 X2_6_7 + 21 X3_6_7 + 21 X4_6_7 + 21 X5_6_7 + 21 X7_6_7 + 21 X8_6_7 + 21 X9_6_7 + 22 X1_7_7 + 22 X2_7_7 + 22 X3_7_7 + 22 X4_7_7 + 22 X5_7_7 + 22 X6_7_7 + 22 X8_7_7 + 22 X9_7_7 + 30 X1_8_7 + 30 X2_8_7 + 30 X3_8_7 + 30 X4_8_7 + 30 X5_8_7 + 30 X6_8_7 + 30 X7_8_7 + 30 X9_8_7 + 27 X1_9_7 + 27 X2_9_7 + 27 X3_9_7 + 27 X4_9_7 + 27 X5_9_7 + 27 X6_9_7 + 27 X7_9_7 + 27 X8_9_7 + 0 <= 45

28 X1_2_8 + 28 X3_2_8 + 28 X4_2_8 + 28 X5_2_8 + 28 X6_2_8 + 28 X7_2_8 + 28 X8_2_8 + 28 X9_2_8 + 18 X1_3_8 + 18 X2_3_8 + 18 X4_3_8 + 18 X5_3_8 + 18 X6_3_8 + 18 X7_3_8 + 18 X8_3_8 + 18 X9_3_8 + 20 X1_4_8 + 20 X2_4_8 + 20 X3_4_8 + 20 X5_4_8 + 20 X6_4_8 + 20 X7_4_8 + 20 X8_4_8 + 20 X9_4_8 + 28 X1_5_8 + 28 X2_5_8 + 28 X3_5_8 + 28 X4_5_8 + 28 X6_5_8 + 28 X7_5_8 + 28 X8_5_8 + 28 X9_5_8 + 21 X1_6_8 + 21 X2_6_8 + 21 X3_6_8 + 21 X4_6_8 + 21 X5_6_8 + 21 X7_6_8 + 21 X8_6_8 + 21 X9_6_8 + 22 X1_7_8 + 22 X2_7_8 + 22 X3_7_8 + 22 X4_7_8 + 22 X5_7_8 + 22 X6_7_8 + 22 X8_7_8 + 22 X9_7_8 + 30 X1_8_8 + 30 X2_8_8 + 30 X3_8_8 + 30 X4_8_8 + 30 X5_8_8 + 30 X6_8_8 + 30 X7_8_8 + 30 X9_8_8 + 27 X1_9_8 + 27 X2_9_8 + 27 X3_9_8 + 27 X4_9_8 + 27 X5_9_8 + 27 X6_9_8 + 27 X7_9_8 + 27 X8_9_8 + 0 <= 45

Περιορισμός Αυτονομίας ανά φορτηγό

80 X1_2_1 + 100 X1_3_1 + 70 X1_4_1 + 60 X1_5_1 + 70 X1_6_1 + 90 X1_7_1 + 90 X1_8_1 + 50 X1_9_1 + 80 X2_1_1 + 100 X2_3_1 + 90 X2_4_1 + 80 X2_5_1 + 80 X2_6_1 + 50 X2_7_1 + 100 X2_8_1 + 80 X2_9_1 + 100 X3_1_1 + 100 X3_2_1 + 80 X3_4_1 + 80 X3_5_1 + 50 X3_6_1 + 70 X3_7_1 + 100 X3_8_1 + 60 X3_9_1 + 70 X4_1_1 + 90 X4_2_1 + 80 X4_3_1 + 100 X4_5_1 + 90 X4_6_1 + 100 X4_7_1 + 70 X4_8_1 + 90 X4_9_1 + 60 X5_1_1 + 80 X5_2_1 + 80 X5_3_1 + 100 X5_4_1 + 80 X5_6_1 + 100 X5_7_1 + 80 X5_8_1 + 80 X5_9_1 + 70 X6_1_1 + 80 X6_2_1 + 50 X6_3_1 + 90 X6_4_1 + 80 X6_5_1 + 60 X6_7_1 + 50 X6_8_1 + 60 X6_9_1 + 90 X7_1_1 + 50 X7_2_1 + 70 X7_3_1 + 100 X7_4_1 + 100 X7_5_1 + 60 X7_6_1 + 70 X7_8_1 + 100 X7_9_1 + 90 X8_1_1 + 100 X8_2_1 + 100 X8_3_1 + 70 X8_4_1 + 80 X8_5_1 + 50 X8_6_1 + 70 X8_7_1 + 50 X8_9_1 + 50 X9_1_1 + 80 X9_2_1 + 60 X9_3_1 + 90 X9_4_1 + 80 X9_5_1 + 60 X9_6_1 + 100 X9_7_1 + 50 X9_8_1 <= 200

80 X1_2_2 + 100 X1_3_2 + 70 X1_4_2 + 60 X1_5_2 + 70 X1_6_2 + 90 X1_7_2 + 90 X1_8_2 + 50 X1_9_2 + 80 X2_1_2 + 100 X2_3_2 + 90 X2_4_2 + 80 X2_5_2 + 80 X2_6_2 + 50 X2_7_2 + 100 X2_8_2 + 80 X2_9_2 + 100 X3_1_2 + 100 X3_2_2 + 80 X3_4_2 + 80 X3_5_2 + 50 X3_6_2 + 70 X3_7_2 + 100 X3_8_2 + 60 X3_9_2 + 70 X4_1_2 + 90 X4_2_2 + 80 X4_3_2 + 100 X4_5_2 + 90 X4_6_2 + 100 X4_7_2 + 70 X4_8_2 + 90 X4_9_2 + 60 X5_1_2 + 80 X5_2_2 + 80 X5_3_2 + 100 X5_4_2 + 80 X5_6_2 + 100 X5_7_2 + 80 X5_8_2 + 80 X5_9_2 + 70 X6_1_2 + 80 X6_2_2 + 50 X6_3_2 + 90 X6_4_2 + 80 X6_5_2 + 60 X6_7_2 + 50 X6_8_2 + 60 X6_9_2 + 90 X7_1_2 + 50 X7_2_2 + 70 X7_3_2 + 100 X7_4_2 + 100 X7_5_2 + 60 X7_6_2 + 70 X7_8_2 + 100 X7_9_2 + 90 X8_1_2 + 100 X8_2_2 + 100 X8_3_2 + 70 X8_4_2 + 80 X8_5_2 + 50 X8_6_2 + 70 X8_7_2 + 50 X8_9_2 + 50 X9_1_2 + 80 X9_2_2 + 60 X9_3_2 + 90 X9_4_2 + 80 X9_5_2 + 60 X9_6_2 + 100 X9_7_2 + 50 X9_8_2 <= 200

80 X1_2_3 + 100 X1_3_3 + 70 X1_4_3 + 60 X1_5_3 + 70 X1_6_3 + 90 X1_7_3 + 90 X1_8_3 + 50 X1_9_3 + 80 X2_1_3 + 100 X2_3_3 + 90 X2_4_3 + 80 X2_5_3 + 80 X2_6_3 + 50 X2_7_3 + 100 X2_8_3 + 80 X2_9_3 + 100 X3_1_3 + 100 X3_2_3 + 80 X3_4_3 + 80 X3_5_3 + 50 X3_6_3 + 70 X3_7_3 + 100 X3_8_3 + 60 X3_9_3 + 70 X4_1_3 + 90 X4_2_3 + 80 X4_3_3 + 100 X4_5_3 + 90 X4_6_3 + 100 X4_7_3 + 70 X4_8_3 + 90 X4_9_3 + 60 X5_1_3 + 80 X5_2_3 + 80 X5_3_3 + 100 X5_4_3 + 80 X5_6_3 + 100 X5_7_3 + 80 X5_8_3 + 80 X5_9_3 + 70 X6_1_3 + 80 X6_2_3 + 50 X6_3_3 + 90 X6_4_3 + 80 X6_5_3 + 60 X6_7_3 + 50 X6_8_3 + 60 X6_9_3 + 90 X7_1_3 + 50 X7_2_3 + 70 X7_3_3 + 100 X7_4_3 + 100 X7_5_3 + 60 X7_6_3 + 70 X7_8_3 + 100 X7_9_3 + 90 X8_1_3 + 100 X8_2_3 + 100 X8_3_3 + 70 X8_4_3 + 80 X8_5_3 + 50 X8_6_3 + 70 X8_7_3 + 50 X8_9_3 + 50 X9_1_3 + 80 X9_2_3 + 60 X9_3_3 + 90 X9_4_3 + 80 X9_5_3 + 60 X9_6_3 + 100 X9_7_3 + 50 X9_8_3 <= 200

80 X1_2_4 + 100 X1_3_4 + 70 X1_4_4 + 60 X1_5_4 + 70 X1_6_4 + 90 X1_7_4 + 90 X1_8_4 + 50 X1_9_4 + 80 X2_1_4 + 100 X2_3_4 + 90 X2_4_4 + 80 X2_5_4 + 80 X2_6_4 + 50 X2_7_4 + 100 X2_8_4 + 80 X2_9_4 + 100 X3_1_4 + 100 X3_2_4 + 80 X3_4_4 + 80 X3_5_4 + 50 X3_6_4 + 70 X3_7_4 + 100 X3_8_4 + 60 X3_9_4 + 70 X4_1_4 + 90 X4_2_4 + 80 X4_3_4 + 100 X4_5_4 + 90 X4_6_4 + 100 X4_7_4 + 70 X4_8_4 + 90 X4_9_4 + 60 X5_1_4 + 80 X5_2_4 + 80 X5_3_4 + 100 X5_4_4 + 80 X5_6_4 + 100 X5_7_4 + 80 X5_8_4 + 80 X5_9_4 + 70 X6_1_4 + 80 X6_2_4 + 50 X6_3_4 + 90 X6_4_4 + 80 X6_5_4 + 60 X6_7_4 + 50 X6_8_4 + 60 X6_9_4 + 90 X7_1_4 + 50 X7_2_4 + 70 X7_3_4 + 100 X7_4_4 + 100 X7_5_4 + 60 X7_6_4 + 70 X7_8_4 + 100 X7_9_4 + 90 X8_1_4 + 100 X8_2_4 + 100 X8_3_4 + 70 X8_4_4 + 80 X8_5_4 + 50 X8_6_4 + 70 X8_7_4 + 50 X8_9_4 + 50 X9_1_4 + 80 X9_2_4 + 60 X9_3_4 + 90 X9_4_4 + 80 X9_5_4 + 60 X9_6_4 + 100 X9_7_4 + 50 X9_8_4 <= 200

80 X1_2_5 + 100 X1_3_5 + 70 X1_4_5 + 60 X1_5_5 + 70 X1_6_5 + 90 X1_7_5 + 90 X1_8_5 + 50 X1_9_5 + 80 X2_1_5 + 100 X2_3_5 + 90 X2_4_5 + 80 X2_5_5 + 80 X2_6_5 + 50 X2_7_5 + 100 X2_8_5 + 80 X2_9_5 + 100 X3_1_5 + 100 X3_2_5 + 80 X3_4_5 + 80 X3_5_5 + 50 X3_6_5 + 70 X3_7_5 + 100 X3_8_5 + 60 X3_9_5 + 70 X4_1_5 + 90 X4_2_5 + 80 X4_3_5 + 100 X4_5_5 + 90 X4_6_5 + 100 X4_7_5 + 70 X4_8_5 + 90 X4_9_5 + 60 X5_1_5 + 80 X5_2_5 + 80 X5_3_5 + 100 X5_4_5 + 80 X5_6_5 + 100 X5_7_5 + 80 X5_8_5 + 80 X5_9_5 + 70 X6_1_5 + 80 X6_2_5 + 50 X6_3_5 + 90 X6_4_5 + 80 X6_5_5 + 60 X6_7_5 + 50 X6_8_5 + 60 X6_9_5 + 90 X7_1_5 + 50 X7_2_5 + 70 X7_3_5 + 100 X7_4_5 + 100 X7_5_5 + 60 X7_6_5 + 70 X7_8_5 + 100 X7_9_5 + 90 X8_1_5 + 100 X8_2_5 + 100 X8_3_5 + 70 X8_4_5 + 80 X8_5_5 + 50 X8_6_5 + 70 X8_7_5 + 50 X8_9_5 + 50 X9_1_5 + 80 X9_2_5 + 60 X9_3_5 + 90 X9_4_5 + 80 X9_5_5 + 60 X9_6_5 + 100 X9_7_5 + 50 X9_8_5 <= 200

80 X1_2_6 + 100 X1_3_6 + 70 X1_4_6 + 60 X1_5_6 + 70 X1_6_6 + 90 X1_7_6 + 90 X1_8_6 + 50 X1_9_6 + 80 X2_1_6 + 100 X2_3_6 + 90 X2_4_6 + 80 X2_5_6 + 80 X2_6_6 + 50 X2_7_6 + 100 X2_8_6 + 80 X2_9_6 + 100 X3_1_6 + 100 X3_2_6 + 80 X3_4_6 + 80 X3_5_6 + 50 X3_6_6 + 70 X3_7_6 + 100 X3_8_6 + 60 X3_9_6 + 70 X4_1_6 + 90 X4_2_6 + 80 X4_3_6 + 100 X4_5_6 + 90 X4_6_6 + 100 X4_7_6 + 70 X4_8_6 + 90 X4_9_6 + 60 X5_1_6 + 80 X5_2_6 + 80 X5_3_6 + 100 X5_4_6 + 80 X5_6_6 + 100 X5_7_6 + 80 X5_8_6 + 80 X5_9_6 + 70 X6_1_6 + 80 X6_2_6 + 50 X6_3_6 + 90 X6_4_6 + 80 X6_5_6 + 60 X6_7_6 + 50 X6_8_6 + 60 X6_9_6 + 90 X7_1_6 + 50 X7_2_6 + 70 X7_3_6 + 100 X7_4_6 + 100 X7_5_6 + 60 X7_6_6 + 70 X7_8_6 + 100 X7_9_6 + 90 X8_1_6 + 100 X8_2_6 + 100 X8_3_6 + 70 X8_4_6 + 80 X8_5_6 + 50 X8_6_6 + 70 X8_7_6 + 50 X8_9_6 + 50 X9_1_6 + 80 X9_2_6 + 60 X9_3_6 + 90 X9_4_6 + 80 X9_5_6 + 60 X9_6_6 + 100 X9_7_6 + 50 X9_8_6 <= 200

80 X1_2_7 + 100 X1_3_7 + 70 X1_4_7 + 60 X1_5_7 + 70 X1_6_7 + 90 X1_7_7 + 90 X1_8_7 + 50 X1_9_7 + 80 X2_1_7 + 100 X2_3_7 + 90 X2_4_7 + 80 X2_5_7 + 80 X2_6_7 + 50 X2_7_7 + 100 X2_8_7 + 80 X2_9_7 + 100 X3_1_7 + 100 X3_2_7 + 80 X3_4_7 + 80 X3_5_7 + 50 X3_6_7 + 70 X3_7_7 + 100 X3_8_7 + 60 X3_9_7 + 70 X4_1_7 + 90 X4_2_7 + 80 X4_3_7 + 100 X4_5_7 + 90 X4_6_7 + 100 X4_7_7 + 70 X4_8_7 + 90 X4_9_7 + 60 X5_1_7 + 80 X5_2_7 + 80 X5_3_7 + 100 X5_4_7 + 80 X5_6_7 + 100 X5_7_7 + 80 X5_8_7 + 80 X5_9_7 + 70 X6_1_7 + 80 X6_2_7 + 50 X6_3_7 + 90 X6_4_7 + 80 X6_5_7 + 60 X6_7_7 + 50 X6_8_7 + 60 X6_9_7 + 90 X7_1_7 + 50 X7_2_7 + 70 X7_3_7 + 100 X7_4_7 + 100 X7_5_7 + 60 X7_6_7 + 70 X7_8_7 + 100 X7_9_7 + 90 X8_1_7 + 100 X8_2_7 + 100 X8_3_7 + 70 X8_4_7 + 80 X8_5_7 + 50 X8_6_7 + 70 X8_7_7 + 50 X8_9_7 + 50 X9_1_7 + 80 X9_2_7 + 60 X9_3_7 + 90 X9_4_7 + 80 X9_5_7 + 60 X9_6_7 + 100 X9_7_7 + 50 X9_8_7 <= 200

80 X1_2_8 + 100 X1_3_8 + 70 X1_4_8 + 60 X1_5_8 + 70 X1_6_8 + 90 X1_7_8 + 90 X1_8_8 + 50 X1_9_8 + 80 X2_1_8 + 100 X2_3_8 + 90 X2_4_8 + 80 X2_5_8 + 80 X2_6_8 + 50 X2_7_8 + 100 X2_8_8 + 80 X2_9_8 + 100 X3_1_8 + 100 X3_2_8 + 80 X3_4_8 + 80 X3_5_8 + 50 X3_6_8 + 70 X3_7_8 + 100 X3_8_8 + 60 X3_9_8 + 70 X4_1_8 + 90 X4_2_8 + 80 X4_3_8 + 100 X4_5_8 + 90 X4_6_8 + 100 X4_7_8 + 70 X4_8_8 + 90 X4_9_8 + 60 X5_1_8 + 80 X5_2_8 + 80 X5_3_8 + 100 X5_4_8 + 80 X5_6_8 + 100 X5_7_8 + 80 X5_8_8 + 80 X5_9_8 + 70 X6_1_8 + 80 X6_2_8 + 50 X6_3_8 + 90 X6_4_8 + 80 X6_5_8 + 60 X6_7_8 + 50 X6_8_8 + 60 X6_9_8 + 90 X7_1_8 + 50 X7_2_8 + 70 X7_3_8 + 100 X7_4_8 + 100 X7_5_8 + 60 X7_6_8 + 70 X7_8_8 + 100 X7_9_8 + 90 X8_1_8 + 100 X8_2_8 + 100 X8_3_8 + 70 X8_4_8 + 80 X8_5_8 + 50 X8_6_8 + 70 X8_7_8 + 50 X8_9_8 + 50 X9_1_8 + 80 X9_2_8 + 60 X9_3_8 + 90 X9_4_8 + 80 X9_5_8 + 60 X9_6_8 + 100 X9_7_8 + 50 X9_8_8 <= 200

3. ΟΡΙΣΜΟΣ BINARY ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

INTE X1_2_1	INTE X7_1_3	INTE X4_1_6
INTE X1_3_1	INTE X7_2_3	INTE X4_2_6
INTE X1_4_1	INTE X7_3_3	INTE X4_3_6
INTE X1_5_1	INTE X7_4_3	INTE X4_5_6
INTE X1_6_1	INTE X7_5_3	INTE X4_6_6
INTE X1_7_1	INTE X7_6_3	INTE X4_7_6
INTE X1_8_1	INTE X7_8_3	INTE X4_8_6
INTE X1_9_1	INTE X7_9_3	INTE X4_9_6
INTE X2_1_1	INTE X8_1_3	INTE X5_1_6
INTE X2_3_1	INTE X8_2_3	INTE X5_2_6
INTE X2_4_1	INTE X8_3_3	INTE X5_3_6
INTE X2_5_1	INTE X8_4_3	INTE X5_4_6
INTE X2_6_1	INTE X8_5_3	INTE X5_6_6
INTE X2_7_1	INTE X8_6_3	INTE X5_7_6
INTE X2_8_1	INTE X8_7_3	INTE X5_8_6
INTE X2_9_1	INTE X8_9_3	INTE X5_9_6
INTE X3_1_1	INTE X9_1_3	INTE X6_1_6
INTE X3_2_1	INTE X9_2_3	INTE X6_2_6
INTE X3_4_1	INTE X9_3_3	INTE X6_3_6
INTE X3_5_1	INTE X9_4_3	INTE X6_4_6
INTE X3_6_1	INTE X9_5_3	INTE X6_5_6
INTE X3_7_1	INTE X9_6_3	INTE X6_7_6
INTE X3_8_1	INTE X9_7_3	INTE X6_8_6
INTE X3_9_1	INTE X9_8_3	INTE X6_9_6

INTE X4_1_1
INTE X4_2_1
INTE X4_3_1
INTE X4_5_1
INTE X4_6_1
INTE X4_7_1
INTE X4_8_1
INTE X4_9_1
INTE X5_1_1
INTE X5_2_1
INTE X5_3_1
INTE X5_4_1
INTE X5_6_1
INTE X5_7_1
INTE X5_8_1
INTE X5_9_1
INTE X6_1_1
INTE X6_2_1
INTE X6_3_1
INTE X6_4_1
INTE X6_5_1
INTE X6_7_1
INTE X6_8_1
INTE X6_9_1
INTE X7_1_1
INTE X7_2_1
INTE X7_3_1
INTE X7_4_1
INTE X7_5_1
INTE X7_6_1
INTE X7_8_1
INTE X7_9_1
INTE X8_1_1
INTE X1_2_4
INTE X1_3_4
INTE X1_4_4
INTE X1_5_4
INTE X1_6_4
INTE X1_7_4
INTE X1_8_4
INTE X1_9_4
INTE X2_1_4
INTE X2_3_4
INTE X2_4_4
INTE X2_5_4
INTE X2_6_4
INTE X2_7_4
INTE X2_8_4
INTE X2_9_4
INTE X3_1_4
INTE X3_2_4
INTE X3_4_4
INTE X3_5_4
INTE X3_6_4
INTE X3_7_4
INTE X3_8_4
INTE X3_9_4
INTE X4_1_4
INTE X4_2_4
INTE X4_3_4
INTE X4_5_4
INTE X4_6_4
INTE X4_7_4
INTE X4_8_4
INTE X4_9_4
INTE X5_1_4
INTE X7_1_6
INTE X7_2_6
INTE X7_3_6
INTE X7_4_6
INTE X7_5_6
INTE X7_6_6
INTE X7_8_6
INTE X7_9_6
INTE X8_1_6
INTE X8_2_6
INTE X8_3_6
INTE X8_4_6
INTE X8_5_6
INTE X8_6_6
INTE X8_7_6
INTE X8_9_6
INTE X9_1_6
INTE X9_2_6
INTE X9_3_6
INTE X9_4_6
INTE X9_5_6
INTE X9_6_6
INTE X9_7_6
INTE X9_8_6
INTE X1_2_7
INTE X1_3_7
INTE X1_4_7
INTE X1_5_7
INTE X1_6_7
INTE X1_7_7
INTE X1_8_7
INTE X1_9_7
INTE X2_1_7

INTE X8_2_1
INTE X8_3_1
INTE X8_4_1
INTE X8_5_1
INTE X8_6_1
INTE X8_7_1
INTE X8_9_1
INTE X9_1_1
INTE X9_2_1
INTE X9_3_1
INTE X9_4_1
INTE X9_5_1
INTE X9_6_1
INTE X9_7_1
INTE X9_8_1
INTE X1_2_2
INTE X1_3_2
INTE X1_4_2
INTE X1_5_2
INTE X1_6_2
INTE X1_7_2
INTE X1_8_2
INTE X1_9_2
INTE X2_1_2
INTE X2_3_2
INTE X2_4_2
INTE X2_5_2
INTE X2_6_2
INTE X2_7_2
INTE X2_8_2
INTE X2_9_2
INTE X3_1_2
INTE X3_2_2
INTE X5_2_4
INTE X5_3_4
INTE X5_4_4
INTE X5_6_4
INTE X5_7_4
INTE X5_8_4
INTE X5_9_4
INTE X6_1_4
INTE X6_2_4
INTE X6_3_4
INTE X6_4_4
INTE X6_5_4
INTE X6_7_4
INTE X6_8_4
INTE X6_9_4
INTE X7_1_4
INTE X7_2_4
INTE X7_3_4
INTE X7_4_4
INTE X7_5_4
INTE X7_6_4
INTE X7_8_4
INTE X7_9_4
INTE X8_1_4
INTE X8_2_4
INTE X8_3_4
INTE X8_4_4
INTE X8_5_4
INTE X8_6_4
INTE X8_7_4
INTE X8_9_4
INTE X9_1_4
INTE X9_2_4
INTE X2_3_7
INTE X2_4_7
INTE X2_5_7
INTE X2_6_7
INTE X2_7_7
INTE X2_8_7
INTE X2_9_7
INTE X3_1_7
INTE X3_2_7
INTE X3_4_7
INTE X3_5_7
INTE X3_6_7
INTE X3_7_7
INTE X3_8_7
INTE X3_9_7
INTE X4_1_7
INTE X4_2_7
INTE X4_3_7
INTE X4_5_7
INTE X4_6_7
INTE X4_7_7
INTE X4_8_7
INTE X4_9_7
INTE X5_1_7
INTE X5_2_7
INTE X5_3_7
INTE X5_4_7
INTE X5_6_7
INTE X5_7_7
INTE X5_8_7
INTE X5_9_7
INTE X6_1_7
INTE X6_2_7

INTE X3_4_2
INTE X3_5_2
INTE X3_6_2
INTE X3_7_2
INTE X3_8_2
INTE X3_9_2
INTE X4_1_2
INTE X4_2_2
INTE X4_3_2
INTE X4_5_2
INTE X4_6_2
INTE X4_7_2
INTE X4_8_2
INTE X4_9_2
INTE X5_1_2
INTE X5_2_2
INTE X5_3_2
INTE X5_4_2
INTE X5_6_2
INTE X5_7_2
INTE X5_8_2
INTE X5_9_2
INTE X6_1_2
INTE X6_2_2
INTE X6_3_2
INTE X6_4_2
INTE X6_5_2
INTE X6_7_2
INTE X6_8_2
INTE X6_9_2
INTE X7_1_2
INTE X7_2_2
INTE X7_3_2
INTE X9_3_4
INTE X9_4_4
INTE X9_5_4
INTE X9_6_4
INTE X9_7_4
INTE X9_8_4
INTE X1_2_5
INTE X1_3_5
INTE X1_4_5
INTE X1_5_5
INTE X1_6_5
INTE X1_7_5
INTE X1_8_5
INTE X1_9_5
INTE X2_1_5
INTE X2_3_5
INTE X2_4_5
INTE X2_5_5
INTE X2_6_5
INTE X2_7_5
INTE X2_8_5
INTE X2_9_5
INTE X3_1_5
INTE X3_2_5
INTE X3_4_5
INTE X3_5_5
INTE X3_6_5
INTE X3_7_5
INTE X3_8_5
INTE X3_9_5
INTE X4_1_5
INTE X4_2_5
INTE X4_3_5
INTE X6_3_7
INTE X6_4_7
INTE X6_5_7
INTE X6_7_7
INTE X6_8_7
INTE X6_9_7
INTE X7_1_7
INTE X7_2_7
INTE X7_3_7
INTE X7_4_7
INTE X7_5_7
INTE X7_6_7
INTE X7_8_7
INTE X7_9_7
INTE X8_1_7
INTE X8_2_7
INTE X8_3_7
INTE X8_4_7
INTE X8_5_7
INTE X8_6_7
INTE X8_7_7
INTE X8_9_7
INTE X9_1_7
INTE X9_2_7
INTE X9_3_7
INTE X9_4_7
INTE X9_5_7
INTE X9_6_7
INTE X9_7_7
INTE X9_8_7
INTE X1_2_8
INTE X1_3_8
INTE X1_4_8

INTE X7_4_2
INTE X7_5_2
INTE X7_6_2
INTE X7_8_2
INTE X7_9_2
INTE X8_1_2
INTE X8_2_2
INTE X8_3_2
INTE X8_4_2
INTE X8_5_2
INTE X8_6_2
INTE X8_7_2
INTE X8_9_2
INTE X9_1_2
INTE X9_2_2
INTE X9_3_2
INTE X9_4_2
INTE X9_5_2
INTE X9_6_2
INTE X9_7_2
INTE X9_8_2
INTE X1_2_3
INTE X1_3_3
INTE X1_4_3
INTE X1_5_3
INTE X1_6_3
INTE X1_7_3
INTE X1_8_3
INTE X1_9_3
INTE X2_1_3
INTE X2_3_3
INTE X2_4_3
INTE X2_5_3
INTE X4_5_5
INTE X4_6_5
INTE X4_7_5
INTE X4_8_5
INTE X4_9_5
INTE X5_1_5
INTE X5_2_5
INTE X5_3_5
INTE X5_4_5
INTE X5_6_5
INTE X5_7_5
INTE X5_8_5
INTE X5_9_5
INTE X6_1_5
INTE X6_2_5
INTE X6_3_5
INTE X6_4_5
INTE X6_5_5
INTE X6_7_5
INTE X6_8_5
INTE X6_9_5
INTE X7_1_5
INTE X7_2_5
INTE X7_3_5
INTE X7_4_5
INTE X7_5_5
INTE X7_6_5
INTE X7_8_5
INTE X7_9_5
INTE X8_1_5
INTE X8_2_5
INTE X8_3_5
INTE X8_4_5
INTE X1_5_8
INTE X1_6_8
INTE X1_7_8
INTE X1_8_8
INTE X1_9_8
INTE X2_1_8
INTE X2_3_8
INTE X2_4_8
INTE X2_5_8
INTE X2_6_8
INTE X2_7_8
INTE X2_8_8
INTE X2_9_8
INTE X3_1_8
INTE X3_2_8
INTE X3_4_8
INTE X3_5_8
INTE X3_6_8
INTE X3_7_8
INTE X3_8_8
INTE X3_9_8
INTE X4_1_8
INTE X4_2_8
INTE X4_3_8
INTE X4_5_8
INTE X4_6_8
INTE X4_7_8
INTE X4_8_8
INTE X4_9_8
INTE X5_1_8
INTE X5_2_8
INTE X5_3_8
INTE X5_4_8

INTE X2_6_3
INTE X2_7_3
INTE X2_8_3
INTE X2_9_3
INTE X3_1_3
INTE X3_2_3
INTE X3_4_3
INTE X3_5_3
INTE X3_6_3
INTE X3_7_3
INTE X3_8_3
INTE X3_9_3
INTE X4_1_3
INTE X4_2_3
INTE X4_3_3
INTE X4_5_3
INTE X4_6_3
INTE X4_7_3
INTE X4_8_3
INTE X4_9_3
INTE X5_1_3
INTE X5_2_3
INTE X5_3_3
INTE X5_4_3
INTE X5_6_3
INTE X5_7_3
INTE X5_8_3
INTE X5_9_3
INTE X6_1_3
INTE X6_2_3
INTE X6_3_3
INTE X6_4_3
INTE X6_5_3
INTE X8_5_5
INTE X8_6_5
INTE X8_7_5
INTE X8_9_5
INTE X9_1_5
INTE X9_2_5
INTE X9_3_5
INTE X9_4_5
INTE X9_5_5
INTE X9_6_5
INTE X9_7_5
INTE X9_8_5
INTE X1_2_6
INTE X1_3_6
INTE X1_4_6
INTE X1_5_6
INTE X1_6_6
INTE X1_7_6
INTE X1_8_6
INTE X1_9_6
INTE X2_1_6
INTE X2_3_6
INTE X2_4_6
INTE X2_5_6
INTE X2_6_6
INTE X2_7_6
INTE X2_8_6
INTE X2_9_6
INTE X3_1_6
INTE X3_2_6
INTE X3_4_6
INTE X3_5_6
INTE X3_6_6
INTE X5_6_8
INTE X5_7_8
INTE X5_8_8
INTE X5_9_8
INTE X6_1_8
INTE X6_2_8
INTE X6_3_8
INTE X6_4_8
INTE X6_5_8
INTE X6_7_8
INTE X6_8_8
INTE X6_9_8
INTE X7_1_8
INTE X7_2_8
INTE X7_3_8
INTE X7_4_8
INTE X7_5_8
INTE X7_6_8
INTE X7_8_8
INTE X7_9_8
INTE X8_1_8
INTE X8_2_8
INTE X8_3_8
INTE X8_4_8
INTE X8_5_8
INTE X8_6_8
INTE X8_7_8
INTE X8_9_8
INTE X9_1_8
INTE X9_2_8
INTE X9_3_8
INTE X9_4_8
INTE X9_5_8

INTE X6_7_3	INTE X3_7_6	INTE X9_6_8
INTE X6_8_3	INTE X3_8_6	INTE X9_7_8
INTE X6_9_3	INTE X3_9_6	INTE X9_8_8

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) για το Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (EVRP). Λαμβάνοντας υπόψη ρεαλιστικούς περιορισμούς, όπως η πεπερασμένη χωρητικότητα των σταθμών φόρτισης και η τήρηση του κανόνα First-Come-First-Served (FCFS), το μοντέλο γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της θεωρητικής βελτιστοποίησης και των πρακτικών προκλήσεων της ηλεκτροκίνησης στην αστική διανομή.

4.2. Θεωρητικό και Ερευνητικό Πλαίσιο: Ανάλυση Ευρημάτων

Από την εκτέλεση του μοντέλου στο περιβάλλον του R Studio, προέκυψαν σημαντικά θεωρητικά και ερευνητικά συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του δικτύου διανομής:

- **Η Υπολογιστική Αποτελεσματικότητα μέσω Γραμμικοποίησης:** Παραδοσιακά, η ενσωμάτωση κανόνων ουράς (όπως το FCFS) και η διαχείριση της φόρτισης εισάγουν μη-γραμμικότητα, καθιστώντας τα μοντέλα εξαιρετικά βαριά υπολογιστικά. Ωστόσο, οι απλοποιήσεις που υιοθετήθηκαν (όπως η σταθερή ταχύτητα 40 χλμ/ώρα και η αποκλειστική φόρτιση στο κέντρο διανομής στο τέλος της βάρδιας) επέτρεψαν στο μοντέλο να μετατρέψει ένα πολύπλοκο πρόβλημα δρομολόγησης σε ένα διαχειρίσιμο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού μηχανών (Job-Shop Scheduling). Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος εκτέλεσης (solver time) για την πλειοψηφία των σεναρίων διατηρήθηκε σε λιγότερο από 1 λεπτό, αποδεικνύοντας την ευρωστία του μοντέλου MILP.
- **Η Ευαισθησία στη Χωρητικότητα Φορτίου:** Η συγκριτική ανάλυση των δύο σεναρίων ανέδειξε τη δραματική επίδραση της χωρητικότητας των φορτηγών (Q). Στο Σενάριο 1 (35 κιβώτια), η εξυπηρέτηση 6 πόλεων με 5 φορτηγά κατέστη "Μη εφικτή λύση"

(infeasible). Αντίθετα, στο Σενάριο 2 (45 κιβώτια), η ίδια ακριβώς διαμόρφωση όχι μόνο κατέστη εφικτή, αλλά απαίτησε μόλις 4 φορτηγά και 560 διανυθέντα χιλιόμετρα. Η μεταβολή αυτής της παραμέτρου αποδείχθηκε καθοριστική για τη βιωσιμότητα του πλάνου διανομής.

4.3. Πρακτικές Εφαρμογές στον Πραγματικό Κόσμο (Logistics & Supply Chain)

Η μετάβαση των ευρημάτων από το ακαδημαϊκό επίπεδο στην καθημερινή λειτουργία μιας εταιρείας logistics (real-world applications) προσφέρει κρίσιμες διαχειριστικές (managerial) πληροφορίες:

1. Διαχείριση Στόλου και Αποφυγή Συμφόρησης Υποδομών (Staggered Arrivals)

Στον πραγματικό κόσμο, η υποδομή φόρτισης είναι εξαιρετικά δαπανηρή. Στο εξεταζόμενο σενάριο, 5 φορτηγά πρέπει να εξυπηρετηθούν από 4 φορτιστές εντός ενός αυστηρού παραθύρου 2 ωρών (μετά την 8ωρη βάρδια), με ελάχιστο χρόνο φόρτισης 1,5 ώρα. Το μοντέλο αναγκάζει ουσιαστικά τον διαχειριστή του στόλου (Fleet Manager) να σχεδιάσει δρομολόγια κλιμακωτής επιστροφής (staggered arrivals). Αν όλα τα οχήματα επέστρεφαν ταυτόχρονα στην 8η ώρα, το 5ο φορτηγό θα παραβίαζε το όριο των 10 ωρών συνολικής λειτουργίας. Σε πραγματικές εφαρμογές, αυτό σημαίνει ότι οι εταιρείες πρέπει να δρομολογούν σκόπιμα κάποια οχήματα σε μικρότερες (ταχύτερες) διαδρομές, ώστε να επιστρέφουν νωρίτερα και να δεσμεύουν τους φορτιστές χωρίς να δημιουργούν "μποτιλιάρισμα".

2. Στρατηγικές Επενδύσεις: Μέγεθος Οχήματος vs Πλήθος Οχημάτων

Από τα αποτελέσματα (Σενάριο 1 έναντι Σεναρίου 2), προκύπτει ένα σαφές μήνυμα για τον σχεδιασμό του CAPEX (Κεφαλαιουχικές Δαπάνες). Η αύξηση της χωρητικότητας από 35 σε 45 κιβώτια μείωσε κατακόρυφα την ανάγκη για επιπλέον οχήματα (π.χ. για 8 πόλεις απαιτήθηκαν 1220 χλμ. με 8 φορτηγά στο Σενάριο 1, ενώ στο Σενάριο 2 επιτεύχθηκε το ίδιο αποτέλεσμα με 6 φορτηγά και μόλις 840 χλμ.). Μια εταιρεία 3PL αντιλαμβάνεται πρακτικά ότι η επένδυση σε λιγότερα οχήματα ελαφρώς μεγαλύτερης χωρητικότητας

είναι οικονομικά και επιχειρησιακά προτιμότερη από τη συντήρηση ενός πολυπληθέστερου στόλου μικρότερων οχημάτων, καθώς μειώνει και τα χιλιόμετρα (άρα την κατανάλωση ενέργειας/κόστος) αλλά και την πίεση στους περιορισμένους φορτιστές.

3. Προσαρμογή στα Εργασιακά Χρονικά Πλαίσια

Η οριοθέτηση του προβλήματος σε ένα άκαμπτο χρονικό παράθυρο 8 ωρών διανομής και 2 ωρών φόρτισης (Toper = 10 ώρες) δεν είναι μια αυθαίρετη μαθηματική παράμετρος, αλλά αντικατοπτρίζει πιστά τη νομοθεσία περί ωραρίων εργασίας των οδηγών και τον προγραμματισμό των βαρδιών του προσωπικού της αποθήκης. Οποιοδήποτε πλάνο βγάζει τα φορτηγά εκτός αυτού του ορίου κοστίζει σε υπερωρίες και διαταράσσει τη λειτουργία του Κέντρου Διανομής.

4.4. Περιορισμοί του Μοντέλου και Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας

Αν και το προτεινόμενο μοντέλο είναι εξαιρετικά λειτουργικό, είναι ζωτικής σημασίας για έναν επαγγελματία της εφοδιαστικής αλυσίδας να κατανοήσει τους περιορισμούς των απλοποιήσεων που έγιναν:

- **Μη-γραμμικότητα Πραγματικού Κόσμου:** Η διατήρηση σταθερής ταχύτητας (40 χλμ/ώρα) και ομαλοποιημένου ρυθμού φόρτισης απλοποίησε την επίλυση. Στην πραγματικότητα, η κίνηση στις πόλεις είναι μεταβλητή (κυκλοφοριακή συμφόρηση) και η καμπύλη φόρτισης των μπαταριών είναι μη γραμμική (η ταχύτητα φόρτισης μειώνεται δραματικά όταν η μπαταρία ξεπεράσει το 80%).
- **Ετερογένεια Φορτίου:** Το μοντέλο υπέθεσε κοινό, μοναδιαίο φορτίο ίσων διαστάσεων (π.χ. παλέτες/κιβώτια), παρακάμπτοντας προβλήματα πολυδιάστατης χωρητικότητας (όπως βάρος έναντι όγκου), τα οποία συναντώνται συχνά στις ταχυμεταφορές (courier).

Στο πλαίσιο μελλοντικών επεκτάσεων, τα συστήματα δρομολόγησης θα πρέπει να άρουν ορισμένους από αυτούς τους περιορισμούς ενσωματώνοντας στοχαστικά δεδομένα (π.χ. πραγματική κίνηση μέσω GPS) ή επιτρέποντας τη φόρτιση σε ενδιάμεσους δημόσιους σταθμούς κατά τη διάρκεια της διαδρομής (en-route charging), παρά το γεγονός ότι αυτό θα εκτόξευε την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

4.5. Ενδεδειγμένες ενέργειες/μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση πολυπλοκότητας σε πρακτικά μοντέλα

Ακολουθούν οι πρακτικές δυσκολίες που εμφανίζονται ανά ζήτημα σε μοντέλα που θα εφαρμοστούν σε πραγματικά περιστατικά, καθώς και οι ενδεδειγμένες ενέργειες/μεθοδολογίες για την αντιμετώπισή τους:

1. Πολλαπλά κέντρα διανομής (Multi-Depot EVRP)

- Η δυσκολία: τα οχήματα δεν ξεκινούν και δεν καταλήγουν στο ίδιο σημείο. Αυτό αυξάνει εκθετικά τις μεταβλητές απόφασης, καθώς πρέπει να αποφασιστεί η αρχική κατανομή του στόλου και η βέλτιστη επιστροφή, ενώ η παρακολούθηση της ροής των οχημάτων περιπλέκεται.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: εφαρμογή τεχνικών διαμερισμού (Cluster-First, Route-Second). Το πρόβλημα χωρίζεται σε γεωγραφικές ζώνες ανά κέντρο διανομής, μετατρέποντας το Multi-Depot σε πολλά ανεξάρτητα Single-Depot προβλήματα.

2. Ετερογενής στόλος (Heterogeneous Fleet EVRP)

- Η δυσκολία: τα 5 φορτηγά αντικαθίστανται από οχήματα διαφορετικού μεγέθους, βάρους, χωρητικότητας μπαταρίας και ρυθμού κατανάλωσης.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: εισαγωγή επιπλέον δεικτών (k) στις παραμέτρους (Q_k, B_k, h_k). Για την επίλυση χρησιμοποιούνται Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), όπου κάθε "χρωμόσωμα" αντιπροσωπεύει όχι μόνο τη σειρά των πόλεων αλλά και τον τύπο του οχήματος που επιλέγεται.

3. Ετερογενή και πολυδιάστατα φορτία (3D Loading Constraints)

- Η δυσκολία: τα προϊόντα έχουν διαφορετικά σχήματα, βάρη και όγκους (όχι πλέον ομοιογενείς παλέτες). Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι χωράνε γεωμετρικά στο φορτηγό και ότι τηρείται η σειρά εκφόρτωσης (LIFO - Last In, First Out) για να μην εμποδίζει το ένα δέμα το άλλο.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: ενσωμάτωση αλγορίθμων Heuristic Packing (π.χ. Bottom-Left-Fill) μέσα στον αλγόριθμο δρομολόγησης, δημιουργώντας ένα υβριδικό μοντέλο 3D-Vehicle Routing.

4. Δυναμική κατανάλωση βάσει φορτίου & ανάγλυφου (Load/Terrain-Dependent EVRP)

- Η δυσκολία: η άρση της σταθερής χωρητικότητας και κατανάλωσης σημαίνει ότι όσο αδειάζει το φορτηγό, τόσο λιγότερη ενέργεια καίει. Επίσης, οι ανηφόρες καταναλώνουν ενέργεια, ενώ οι κατηφόρες προσφέρουν ανάκτηση ενέργειας (regenerative braking). Η κατανάλωση γίνεται μη γραμμική.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: χρήση φυσικών μοντέλων κατανάλωσης (Comprehensive Emissions Model - CMEM), όπου η ενέργεια υπολογίζεται ως συνάρτηση του στιγμιαίου βάρους και της κλίσης. Οι σταθερές αντικαθίστανται από συναρτήσεις.

5. Μεταβλητή ταχύτητα & κυκλοφοριακή συμφόρηση (Time-Dependent EVRP)

- Η δυσκολία: η ταχύτητα δεν είναι 50 χλμ/ώρα σταθερά, αλλά αλλάζει ανάλογα με την ώρα της ημέρας (ώρες αιχμής). Οι χρόνοι διαδρομής γίνονται στοχαστικοί.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: ενσωμάτωση πινάκων ταχύτητας ανά χρονική ζώνη (Time-and-Space-Dependent Speed Matrices). Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι όπως ο Tabu Search με δυναμικό προγραμματισμό για τον διαρκή επανυπολογισμό των βέλτιστων χρόνων αναχώρησης.

6. Μεγάλη κλίμακα πελατών (Large-Scale EVRP)

- Η δυσκολία: Αν οι πόλεις/σημεία από 10 γίνουν 100 ή 1000, ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών προκαλεί τη λεγόμενη "κατάρα της συνδυαστικότητας" (combinatorial explosion).

- Ενδεδειγμένη ενέργεια: πλήρης εγκατάλειψη των ακριβών μεθόδων (solvers). Η μόνη λύση είναι οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι (Metaheuristics), με κορυφαίο τον Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), ο οποίος καταστρέφει και αναδομεί τμήματα των δρομολογίων για να βρει εξαιρετικές λύσεις σε λίγα λεπτά.

7. Στοχαστικό κόστος και διακυμάνσεις (Stochastic VRP)

- Η δυσκολία: το κόστος της διαδρομής (π.χ. τιμές ενέργειας, διόδια, έκτακτα έξοδα) δεν είναι σταθερό αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: εφαρμογή μοντέλων στοχαστικού προγραμματισμού (Stochastic Programming with Recourse) ή ανθεκτικής βελτιστοποίησης (Robust Optimization), που σχεδιάζουν δρομολόγια προετοιμασμένα για το "χειρότερο δυνατό σενάριο" κόστους.

8. Στενά και δυναμικά χρονικά παράθυρα (VRPTW)

- Η δυσκολία: οι 8 ώρες δεν είναι πλέον ένας ενιαίος χρόνος, αλλά κάθε πελάτης έχει το δικό του αυστηρό 2ωρο παράθυρο παράδοσης, το οποίο μπορεί να αλλάξει δυναμικά κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: χρήση δυναμικής δρομολόγησης (Dynamic/Online Routing). Το όχημα λαμβάνει ενημερώσεις τηλεματικής στο tablet του οδηγού και ο αλγόριθμος τρέχει ξανά σε "rolling horizon", τροποποιώντας το δρομολόγιο εν κινήσει.

9. Διάσπαρτοι σταθμοί φόρτισης στο δίκτυο (En-Route Charging)

- Η δυσκολία: οι σταθμοί δεν είναι στο Depot, αλλά διάσπαρτοι στην πόλη. Το όχημα πρέπει να σταματήσει *κατά τη διάρκεια* του δρομολογίου για να φορτίσει, επιλέγοντας ανάμεσα σε πολλούς σταθμούς.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: εισαγωγή "εικονικών κόμβων" (dummy nodes) για τους σταθμούς, επιτρέποντας στο μοντέλο να επισκεφθεί τον ίδιο σταθμό πολλαπλές φορές αν χρειαστεί.

10. Μη γραμμική φόρτιση (Non-Linear Charging Function)

- Η δυσκολία: η φόρτιση δεν διαρκεί σταθερά 2 ώρες, αλλά εξαρτάται από το πόση

ενέργεια έχει απομείνει. Επιπλέον, ο ρυθμός επιβραδύνεται όσο γεμίζει η μπαταρία.

- Ενδεδειγμένη ενέργεια: γραμμικοποίηση της καμπύλης ανά τμήματα (Piecewise-Linear Approximation). Το μοντέλο σπάει τη φόρτιση σε 3-4 γραμμικά στάδια (π.χ. 0-50%, 50-80%, 80-100%) για να διατηρήσει τη μαθηματική εφικτότητα.

11. Περιορισμένοι φορτιστές & διαχείριση ουρών (Queueing at Charging Stations)

- Η δυσκολία: αν οι σταθμοί έχουν περιορισμένες θέσεις και πολλά οχήματα φτάσουν ταυτόχρονα, δημιουργούνται αναμονές που καταστρέφουν τα χρονικά παράθυρα των επόμενων παραδόσεων.
- Ενδεδειγμένη ενέργεια: ενσωμάτωση μοντέλων θεωρίας ουρών (Queueing Theory) ή Time-Slot Reservation Systems στο μοντέλο, όπου το όχημα "κλείνει" ραντεβού στον φορτιστή πριν ξεκινήσει το δρομολόγιο.

4.6. Υπολογιστική πολυπλοκότητα και στρατηγικές επίλυσης

Το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) ταξινομείται ως ένα NP-Hard πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος που απαιτείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με το μέγεθος του προβλήματος (αριθμός πόλεων, οχημάτων και σταθμών φόρτισης).

Η ύπαρξη των περιορισμών Big-M, όπως αυτοί που διατυπώθηκαν για τον έλεγχο υποκυκλωμάτων (MTZ) και την εξυπηρέτηση FCFS, επιτείνει την πολυπλοκότητα. Οι επιλυτές MILP (εμπορικά λογισμικά όπως το Gurobi ή το IBM ILOG CPLEX) βασίζονται στον αλγόριθμο Branch-and-Cut, ο οποίος επιλύει συνεχείς γραμμικές χαλαρώσεις (linear relaxations) του προβλήματος. Ένας μεγάλος αριθμός M οδηγεί σε "χαλαρά" (weak) όρια χαλάρωσης, επιβραδύνοντας τη διαδικασία κλαδέματος του δέντρου αναζήτησης (pruning the search tree).

Ωστόσο, για το συγκεκριμένο υπό εξέταση σενάριο – το οποίο περιορίζεται σε δέκα πόλεις ($N = 10$), πέντε οχήματα και τέσσερις φορτιστές – ο χώρος αναζήτησης είναι

σχετικά μικρός. Ο αριθμός των δυαδικών μεταβλητών διαδρομής x_{ijk} προσεγγίζει τις $12 \times 12 \times 5 = 720$, ενώ οι μεταβλητές FCFS $\beta_{kk'}$ είναι μόνο 10 (όλοι οι μοναδικοί συνδυασμοί 2 ανά 5). Συνεπώς, ένα άμεσο MILP μοντέλο, όπως το προτεινόμενο, επιλύεται αποδοτικά (efficiently) από σύγχρονους commercial solvers παρέχοντας την εγγυημένη Παγκόσμια Βέλτιστη Λύση (Global Optimum) σε ρεαλιστικούς χρόνους.

Για σημαντικά μεγαλύτερα δίκτυα (π.χ. 50-100 πόλεις), οι αυστηρά ακριβείς (exact) μέθοδοι, όπως το MILP, καθίστανται υπολογιστικά απαγορευτικές (computationally intractable). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η βιβλιογραφία προκρίνει τη χρήση Ευρετικών (Heuristics) και Μετα-Ευρετικών (Metaheuristics) αλγορίθμων. Προσεγγίσεις όπως ο Αλγόριθμος Προσαρμοστικής Αναζήτησης Μεγάλης Γειτονιάς (Adaptive Large Neighborhood Search - ALNS) ή Γενετικοί Αλγόριθμοι (NSGA-II) αναλαμβάνουν την ταχεία παραγωγή ικανοποιητικών (near-optimal) λύσεων. Ακόμη και τότε, το μοντέλο MILP παραμένει απαραίτητο: χρησιμοποιείται είτε ως θεωρητικό μέτρο σύγκρισης (benchmark) για την αξιολόγηση των ευρετικών προσεγγίσεων, είτε διασπάται (decomposition) όπου η δρομολόγηση λύνεται ευρετικά και ο χρονοπρογραμματισμός των φορτιστών (FCFS scheduling) λύνεται με μικρά στιγμιότυπα MILP (Matheuristics).

4.7. Επιχειρησιακές προεκτάσεις (Managerial Insights)

Η αξία αυτού του μαθηματικού μοντέλου υπερβαίνει την απλή δημιουργία ενός πλάνου πλοήγησης. Η συσχέτιση των απαιτήσεων εφοδιαστικής (διανομή σε 5 πόλεις εντός 8 ωρών) με τους περιορισμούς ενεργειακών πόρων (3 φορτιστές για 3 οχήματα με κανόνες FCFS) παράγει δευτερογενείς επιχειρησιακές γνώσεις.

1. Έμμεσος συγχρονισμός και αποφυγή συμφόρησης (Implicit Synchronization):

   Σε μια παραδοσιακή επιχείρηση στόλου, οι διαχειριστές αποστέλλουν τα οχήματα με βάση μόνο τις ανάγκες των πελατών. Εδώ, το MILP αντιλαμβάνεται ότι η ταυτόχρονη επιστροφή όλων των φορτηγών θα δημιουργήσει μια συμφόρηση (bottleneck) στους

σταθμούς φόρτισης, οδηγώντας σε παραβίαση του ορίου των 10 ωρών. Για να το αποφύγει αυτό, το μοντέλο δρα προδραστικά: τροποποιεί (επιμηκύνει ή συντομεύει) τις ακολουθίες των πελατών, δημιουργώντας ενδογενώς κλιμακωτές αφίξεις (staggered arrivals) στο κέντρο διανομής. Αυτό καταδεικνύει την ανωτερότητα των συζευγμένων μοντέλων έναντι της τμηματικής βελτιστοποίησης.

2. Μείωση απαιτήσεων κεφαλαίου (CAPEX Reduction):

   Αν η εταιρεία χρησιμοποιούσε ένα απλό VRP, θα κατέληγε ίσως στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται απαραίτητα 5 φορτιστές (έναν για κάθε όχημα) προκειμένου να μην υπάρχουν καθυστερήσεις. Η χρήση αυτού του MILP μοντέλου αποδεικνύει μαθηματικά εάν το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί απρόσκοπτα με 4 (ή και λιγότερους) φορτιστές, εξοικονομώντας χιλιάδες ευρώ σε κόστος εγκατάστασης σταθμών (Siting and Sizing optimization).

3. Ενεργειακή ανθεκτικότητα (Grid Resilience):

   Η απαίτηση για ελάχιστο χρόνο φόρτισης (1,5 ώρα) αποτρέπει τα φαινόμενα "μικρο-φορτίσεων" (micro-charging spikes) που καταπονούν τη μπαταρία και δημιουργούν αστάθεια στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (grid-support issues). Ο στόλος λειτουργεί με προγραμματισμένη, ομαλή απορρόφηση ισχύος.

4.8. Πρόταση χρήσης εργαλείων AI για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων διανομών και δρομολόγησης ηλεκτρικών φορτηγών

Η υιοθέτηση ενός συστήματος Τεχνητής Νοημοσύνης (AI-driven EVRP & Load Packing Workflow) προσφέρει απτά επιχειρησιακά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η συγκεκριμένη λύση προκρίνεται έναντι των παραδοσιακών μεθόδων (όπως η χειροκίνητη σχεδίαση ή τα απλά, στατικά συστήματα τηλεματικής), διότι γεφυρώνει δύο διαφορετικά προβλήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας που μέχρι σήμερα λύνονταν ανεξάρτητα: τη δρομολόγηση και τη χωροθέτηση φορτίου.

4.8.1. Τα κύρια οφέλη χρήσης του συστήματος ΤΝ (AI)

Αναλυτικότερα, τα οφέλη και οι λόγοι πρόκρισης αυτής της λύσης συνοψίζονται στους εξής άξονες:

Α. Δραστική μείωση του λειτουργικού κόστους (OPEX)

- Βελτιστοποίηση διαδρομών: Το σύστημα εξαλείφει τα περιττά χιλιόμετρα, βρίσκοντας τον ιδανικό συνδυασμό στάσεων για όλα τα φορτηγά.
- Μείωση κόστους ενέργειας: Λαμβάνοντας υπόψη ότι το βάρος του φορτίου μειώνεται σταδιακά καθώς γίνονται οι παραδόσεις, το σύστημα σχεδιάζει το δρομολόγιο έτσι ώστε το φορτηγό να κάνει τις "βαριές" παραδόσεις κοντά στο Κέντρο Διανομής, εξοικονομώντας πολύτιμες κιλοβατώρες (kWh) για τη συνέχεια.

Β. Εξάλειψη του ρίσκου ακινητοποίησης (Battery Anxiety & Safety)

- Το AI εγγυάται μαθηματικά ότι κανένα φορτηγό δεν θα ξεμείνει από μπαταρία στον δρόμο. Υπολογίζοντας δυναμικά την κατανάλωση βάσει του βάρους των κιβωτίων, εξασφαλίζει ότι κάθε όχημα θα επιστρέψει στην αποθήκη με το επιθυμητό απόθεμα ασφαλείας (π.χ. SoC > 10%).

Γ. Μέγιστη αξιοποίηση της χωρητικότητας του στόλου (Capacity Utilization)

- Αντί οι οδηγοί ή οι αποθηκάριοι να μαντεύουν αν "χωράνε τα κιβώτια", το AI εκτελεί έναν αλγόριθμο Packing (τρισδιάστατης πλήρωσης). Αυτό επιτρέπει στα φορτηγά να ταξιδεύουν με τη μέγιστη δυνατή πληρότητα, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον δρομολόγια ή μίσθωση εξωτερικών οχημάτων.

Δ. Ταχύτητα στη λήψη αποφάσεων (Agility)

- Η χειροκίνητη σχεδίαση δρομολογίων για μεγάλο πλήθος προορισμών με περιορισμούς μπαταρίας και χρονικών παραθύρων μπορεί να απαιτεί ώρες εργασίας καθημερινά. Το σύστημα AI παράγει το βέλτιστο πλάνο (δρομολόγιο + σειρά φόρτωσης) σε μερικά δευτερόλεπτα, επιτρέποντας στην εταιρεία να αντιδρά άμεσα σε έκτακτες παραγγελίες ή αλλαγές της τελευταίας στιγμής.

4.8.2. Γιατί προκρίνεται η λύση ΤΝ

Η συγκεκριμένη προσέγγιση της τεχνητής νοημοσύνης προκρίνεται ως η βέλτιστη για τους εξής κρίσιμους λόγους:

1. Ταυτόχρονος συγχρονισμός δρομολόγησης και φόρτωσης (Integrated LIFO)

   Στις παραδοσιακές μεταφορές, το πλάνο δρομολόγησης (routing) και το πλάνο φόρτωσης (loading) γίνονται ξεχωριστά. Αυτό συχνά οδηγεί στο εξής πρόβλημα: το φορτηγό φτάνει στον πρώτο πελάτη, αλλά τα εμπορεύματά του βρίσκονται στο βάθος της καρότσας, αναγκάζοντας τον οδηγό να ξεφορτώσει όλο το όχημα στο πεζοδρόμιο.

   Γιατί προκρίνεται: Η AI λύση επιβάλλει τον περιορισμό LIFO (Last-In, First-Out). Σχεδιάζει τη διαδρομή και ταυτόχρονα λέει στην αποθήκη: "Το κιβώτιο της τελευταίας πόλης θα φορτωθεί πρώτο στο βάθος, και της πρώτης πόλης θα μπει τελευταίο δίπλα στην πόρτα".

2. Μετάβαση από την εμπειρική στη δεδομενοκεντρική διαχείριση (Data-Driven Logistics)

   Οι παραδοσιακοί διανομείς βασίζονται στην εμπειρία των οδηγών ("know-how"). Όμως, η ηλεκτροκίνηση εισάγει μεταβλητές που η ανθρώπινη διαίσθηση αδυνατεί να υπολογίσει με ακρίβεια, όπως η μη γραμμική σχέση μεταξύ "Βάρους Φορτίου - Απόστασης - Πτώσης Μπαταρίας".

   Γιατί προκρίνεται: Η λύση μετατρέπει την εμπειρία σε ακριβή μαθηματικά, εκμηδενίζοντας το ανθρώπινο λάθος.

3. Χαμηλό κόστος υλοποίησης μέσω LLM / Gemini (Zero-Code / Low-Cost Infrastructure)

   Για να αποκτήσει μια εταιρεία ένα κλασικό λογισμικό Fleet Management (TMS) που να υποστηρίζει ηλεκτρικά οχήματα και 3D packing, απαιτούνται πανάκριβες άδειες χρήσης (software licenses) και μεγάλοι χρόνοι παραμετροποίησης.

   Γιατί προκρίνεται: Η χρήση ενός περιβάλλοντος εργασίας εντός του AI (με Python Advanced Data Analysis) επιτρέπει στην επιχείρηση να έχει έναν εξατομικευμένο optimizer παγκόσμιας κλάσης, χρησιμοποιώντας απλά αρχεία Excel που ήδη διαθέτει,

χωρίς ανάγκη για αγορά εξειδικευμένου λογισμικού ή υποδομών IT.

4. Ετοιμότητα για το ESG και την Πράσινη Μετάβαση

Οι σύγχρονες επιχειρήσεις υποχρεούνται πλέον να αναφέρουν και να μειώνουν το ανθρακικό τους αποτύπωμα.

Γιατί προκρίνεται: Η λύση αυτή αποτελεί το απόλυτο εργαλείο Green Logistics, καθώς αποδεικνύει στην πράξη τη βέλτιστη διαχείριση ενός "καθαρού" στόλου, επιτυγχάνοντας zero-emission διανομές με τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

4.8.3. Δημιουργία περιβάλλοντος ΤΝ για επίλυση

Η δημιουργία ενός σταθερού, λειτουργικού και επαγγελματικού περιβάλλοντος εργασίας (Workflow) εντός ενός AI (όπως είναι το Gemini), η καλύτερη προσέγγιση είναι η χρήση της λειτουργίας των Gems (επαναλαμβανόμενες εντολές ή η δημιουργία ενός εξειδικευμένου chat prompt) και η οργάνωση των δεδομένων σε δομημένα αρχεία Excel/CSV ή JSON.

Για παράδειγμα το Gemini υπερέχει στην επεξεργασία δομημένων πινάκων και μπορεί να διαβάσει άριστα αρχεία .xlsx ή .csv.

Η ιδανική αρχιτεκτονική των αρχείων, η μορφή τους και οι πληροφορίες που πρέπει να καταχωρούνται σε καθένα από αυτά, ώστε το μοντέλο να μπορεί να εκτελεί ταυτόχρονα τη Δρομολόγηση (EVRP) και το Πλάνο Φόρτωσης (Packing Plan) παρουσιάζονται στα επόμενα βήματα:

1. Δομή και περιεχόμενο των αρχείων δεδομένων

Συνιστάται ο διαχωρισμός των δεδομένων σε 3 διακριτά αρχεία (ή 3 φύλλα εργασίας στο ίδιο Excel) για να μην μπερδεύεται το μοντέλο με τις οντότητες.

Α. Αρχείο 1: στόλος οχημάτων (Fleet_Data.csv ή .xlsx)

Αυτό το αρχείο περιλαμβάνει τις τεχνικές προδιαγραφές των ηλεκτρικών φορτηγών.

Πίνακας 7.8.3.1: παράμετροι μοντέλου και τύπος δεδομένων

Όνομα Στήλης	**Τύπος Δεδομένων**	**Παράδειγμα / Περιγραφή**
Truck_ID	Κείμενο / ID	Truck_01, Truck_02
Max_Volume_Cap	Αριθμός	Μέγιστη χωρητικότητα σε όγκο (π.χ. σε m^3 ή πλήθος παλετών)
Max_Weight_Cap	Αριθμός	Μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος φορτίου (σε κιλά)
Battery_Capacity	Αριθμός	Μέγεθος μπαταρίας σε kWh (π.χ. 100)
Base_Consumption	Αριθμός	Κατανάλωση άδειου οχήματος (kWh ανά χιλιόμετρο, π.χ. 0.4)
Load_Consumption_Factor	Αριθμός	Πρόσθετη κατανάλωση ανά κιλό φορτίου (kWh/χλμ/κιλό, π.χ. 0.00005)
Max_Operating_Hours	Αριθμός	Διαθέσιμος χρόνος λειτουργίας οδηγού/οχήματος (π.χ. 8 ώρες)

Β. Αρχείο 2: δεδομένα πελατών & ζήτησης (Customer_Orders.csv ή .xlsx)

Εδώ καταχωρούνται οι πληροφορίες για τις πόλεις/σημεία πώλησης και τι ακριβώς περιμένουν να παραλάβουν οι πελάτες.

Πίνακας 7.8.3.2: δεδομένα πελατών και ζήτησης και τύποι δεδομένων

Όνομα Στήλης	**Τύπος Δεδομένων**	**Παράδειγμα / Περιγραφή**
Customer_ID	Κείμενο / ID	Cust_01 (ή Όνομα Πόλης)
Latitude	Αριθμός (Δεκαδικός)	Γεωγραφικό πλάτος (π.χ. 37.9431 για Πειραιά)
Longitude	Αριθμός (Δεκαδικός)	Γεωγραφικό μήκος (π.χ. 23.6470)
Total_Boxes	Αριθμός	Συνολικό πλήθος κιβωτίων
Total_Weight	Αριθμός	Συνολικό βάρος κιβωτίων της παραγγελίας (σε κιλά)
Total_Volume	Αριθμός	Συνολικός όγκος παραγγελίας (σε m^3)
Time_Window_Start	Ώρα (HH:MM)	Η νωρίτερη δυνατή ώρα παράδοσης (π.χ. 08:00)
Time_Window_End	Ώρα (HH:MM)	Η αργότερη δυνατή ώρα παράδοσης (π.χ. 11:00)
Service_Time	Αριθμός	Χρόνος που απαιτείται για το ξεφόρτωμα

Γ. Αρχείο 3: μήτρα αποστάσεων και χρόνων (Distance_Matrix.csv) – Προαιρετικό αλλά προτεινόμενο

Αν και το Gemini μπορεί να υπολογίσει προσεγγιστικά αποστάσεις με βάση το στίγμα (συντεταγμένες), για απόλυτη ακρίβεια επαγγελματικού επιπέδου, είναι καλύτερο να δοθεί έτοιμη η μήτρα αποστάσεων που έχει εξαχθεί από ένα GIS ή Google Maps API.

Πίνακας 7.8.3.3: μήτρα αποστάσεων

Από Κόμβο (From)	Προς Κόμβο (To)	Απόσταση (Distance_km)	Χρόνος Διαδρομής (Time_min)
Depot	Cust_01	12.5	15
Cust_01	Cust_02	5.2	8

2. Οδηγίες για το "System Prompt" (πως θα «εκπαιδευθεί» το Gemini)

Στο περιβάλλον εργασίας, θα δοθεί ένα Master Prompt (ανεβάζοντας ταυτόχρονα τα αρχεία).

Το Prompt μπορεί να δομηθεί ως εξής:

> Ρόλος: Λειτουργείς ως Advanced Logistics AI & Supply Chain Optimizer, εξειδικευμένος σε προβλήματα EVRP (Electric Vehicle Routing) και 3D Load Packing.

Διαδικασία υλοποίησης:

1. Ανάγνωση Δεδομένων: Διάβασε τα αρχεία στόλου και πελατών. Υπολόγισε τη δυναμική κατανάλωση για κάθε τόξο με τον τύπο:

   Συνολική Κατανάλωση = Απόσταση x (Base_Consumption + (Load_Consumption_Factor x Τρέχον_Βάρος_Φορτίου)).

2. Βελτιστοποίηση Δρομολόγησης: Ομαδοποίησε τους πελάτες στα φορτηγά χωρίς να παραβιάζονται: α) Το Max_Weight/Volume, β) Τα Time Windows, γ) Οι Max Operating Hours και δ) Η μπαταρία (το SoC κατά την επιστροφή στο Depot πρέπει να είναι τουλάχιστον 10%).

3. Σχεδιασμός Πλάνου Φόρτωσης: Για κάθε φορτηγό, δημιούργησε τη σειρά φόρτωσης (αντίστροφη από τη σειρά παράδοσης - LIFO).

3. Πώς θα μοιάζει η λύση που θα δώσει το Gemini

Το Gemini θα επιστρέφει μια δομημένη απάντηση σε μορφή κειμένου και πινάκων (Markdown), με την ακόλουθη μορφή:

Παράδειγμα Output για το "Φορτηγό 1":

- Όχημα: Truck_01 (Χωρητικότητα: 2000kg, Μπαταρία: 100kWh)
- Δρομολόγιο: Depot -> Cust_03 -> Cust_01 -> Depot
- Ανάλυση Ενέργειας & Χρόνου:
    - Αναχώρηση από Depot: 08:00 (Μπαταρία 100%)
    - Άφιξη σε Cust_03: 08:25 (Μπαταρία 88%) - Παράδοση 400kg
    - Άφιξη σε Cust_01: 09:10 (Μπαταρία 76%) - Παράδοση 600kg
    - Επιστροφή στο Depot: 10:00 (Τελική Μπαταρία: 62% -> Εφικτή Λύση)
- Πλάνο Φόρτωσης (Packing Plan - LIFO):
    1. *Πρώτα στο βάθος του φορτηγού:* Κιβώτια για Cust_01 (Βάρος: 600kg, 15 κιβώτια)
    2. *Τελευταία κοντά στην πόρτα:* Κιβώτια για Cust_03 (Βάρος: 400kg, 10 κιβώτια)

Συμβουλή για την υλοποίηση:

Για να λειτουργεί με απόλυτη μαθηματική ακρίβεια (και όχι με προσεγγίσεις LLM), μπορούμε να ζητήσουμε από το Gemini στο Master Prompt να γράψει και να εκτελέσει κώδικα Python (μέσω του ενσωματωμένου Advanced Data Analysis) χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη scipy.optimize ή την OR-Tools της Google. Θα φορτώνει τα αρχεία, θα εκτελεί τον αλγόριθμο στο παρασκήνιο και θα δίνει αμέσως τα έτοιμα δρομολόγια.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση που προηγήθηκε και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου, τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στους εξής βασικούς άξονες:

1. Η καθοριστική επίδραση της χωρητικότητας του στόλου (Sensitivity Analysis)

Το πιο κρίσιμο εύρημα της μελέτης προήλθε από τη συγκριτική ανάλυση των δύο σεναρίων. Η μέγιστη χωρητικότητα της καρότσας (Q) των ηλεκτρικών φορτηγών αποδείχθηκε η παράμετρος με τη μεγαλύτερη βαρύτητα στη βιωσιμότητα των δρομολογίων. Συγκεκριμένα:

- Στο **Σενάριο 1 (35 κιβώτια)**, η προσπάθεια εξυπηρέτησης 6 πόλεων με 5 διαθέσιμα φορτηγά οδήγησε σε "Μη εφικτή λύση" (infeasible). Επιπλέον, για την εξυπηρέτηση 8 πόλεων απαιτήθηκε η κινητοποίηση 8 φορτηγών με συνολική απόσταση 1.220 χιλιομέτρων.
- Στο **Σενάριο 2 (45 κιβώτια)**, η εικόνα άλλαξε δραματικά. Η εξυπηρέτηση 6 πόλεων με 5 (ή και περισσότερα) διαθέσιμα φορτηγά όχι μόνο έγινε εφικτή, αλλά απαίτησε τελικά τη χρήση μόλις 4 φορτηγών, μειώνοντας την απόσταση στα 560 χιλιόμετρα. Αντίστοιχα, το δίκτυο των 8 πόλεων εξυπηρετήθηκε με 6 φορτηγά διανύοντας 840 χιλιόμετρα.
- **Συμπέρασμα:** Μια σχετικά μικρή αύξηση στη χωρητικότητα του οχήματος εξαλείφει την ανάγκη για μεγαλύτερο στόλο, μειώνει κατακόρυφα τα διανυθέντα χιλιόμετρα (και άρα την κατανάλωση ενέργειας) και καθιστά εφικτά πολύπλοκα δρομολόγια.

2. Υπολογιστική αποδοτικότητα μέσω ρεαλιστικών απλοποιήσεων (Γραμμικοποίηση)

Η ενσωμάτωση του κανόνα First-Come-First-Served (FCFS) σε σταθμούς φόρτισης πεπερασμένης χωρητικότητας μετατρέπει συνήθως το EVRP σε ένα μη-γραμμικό και υπολογιστικά δυσβάσταχτο πρόβλημα θεωρίας ουρών. Ωστόσο, η εργασία απέδειξε ότι με

στοχευμένες παραδοχές —όπως η σταθερή ταχύτητα 40 χλμ/ώρα, το κοινό μοναδιαίο φορτίο (κιβώτια ιδίων διαστάσεων) και η μετατροπή των χρόνων φόρτισης/μετακίνησης σε σταθερές παραμέτρους— το πρόβλημα γραμμικοποιείται επιτυχώς (MILP). Αυτή η "γέφυρα" μεταξύ θεωρίας και πράξης επέτρεψε στο λογισμικό R Studio (μέσω του solver GLPK) να επιλύσει τα περισσότερα σενάρια σε χρόνο ρεκόρ, συνήθως κάτω του 1 λεπτού, προσφέροντας άμεσα βέλτιστες λύσεις.

3. Επιτυχής διαχείριση της συμφόρησης στις υποδομές φόρτισης

Ένα από τα κύρια επιτεύγματα του μοντέλου ήταν η τήρηση των αυστηρών χρονικών παραθύρων του προσωπικού: 8 ώρες μέγιστος χρόνος διανομών (Tdeliv) και 2 επιπλέον ώρες για τη φόρτιση, θέτοντας τον μέγιστο χρόνο λειτουργίας (Toper) στις 10 ώρες. Επειδή τα φορτηγά (έως 10) υπερβαίνουν τις θέσεις φόρτισης (5 θέσεις), το μοντέλο έλυσε ουσιαστικά ένα κρυφό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού μηχανών (Job-Shop Scheduling). Αναγκάστηκε από τους μαθηματικούς περιορισμούς να δημιουργήσει πλάνα κλιμακωτών αφίξεων (staggered arrivals), αποτρέποντας την ταυτόχρονη επιστροφή όλων των φορτηγών στην αποθήκη, διασφαλίζοντας ότι όλα τα οχήματα θα λάβουν τον ελάχιστο χρόνο φόρτισης της 1,5 ώρας χωρίς να παραβιάσουν το δεκάωρο.

4. Στρατηγική αξία του μοντέλου για την Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η εφαρμογή αυτού του μαθηματικού μοντέλου αποδεικνύει ότι τα εργαλεία επιχειρησιακής έρευνας ανοικτού κώδικα (όπως το R Studio) μπορούν να διαχειριστούν πολύπλοκα προβλήματα logistics εξαιρετικά αξιόπιστα. Προσφέρει στη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας τη δυνατότητα να αξιολογεί άμεσα σενάρια κόστους (διανυόμενα χιλιόμετρα), να σχεδιάζει βέλτιστα δρομολόγια και να αποφασίζει με δεδομένα (data-driven) για το μέγεθος (CAPEX) και τα χαρακτηριστικά (μπαταρία, χωρητικότητα) του ηλεκτρικού της στόλου.

5. Απαιτήσεις επεξεργαστικής ισχύος υπολογιστών και εργαλεία ΤΝ

Η εργασία αναδεικνύει ξεκάθαρα το όριο των σημερινών παραδοσιακών εργαλείων βελτιστοποίησης, το οποίο πρακτικά "ανοίγει τον δρόμο" για τη μελλοντική ανάγκη χρήσης πιο προηγμένων τεχνολογιών, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη. Συγκεκριμένα:

- Για να μπορέσει το παρόν μαθηματικό μοντέλο να επιλυθεί (και μάλιστα σε χρόνο κάτω του 1 λεπτού), χρειάστηκε να γίνουν σημαντικές απλοποιήσεις που "γραμμικοποίησαν" το πρόβλημα, όπως η παραδοχή σταθερής ταχύτητας (40 χλμ/ώρα) και η παραδοχή σταθερού ρυθμού φόρτισης, αποφεύγοντας τις πολύπλοκες διαφορικές εξισώσεις.
- Αν θεωρητικά προχωρήσουμε στην άρση αυτών των περιορισμών προκειμένου το μοντέλο να προσομοιώσει τον πραγματικό κόσμο (όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται λόγω κίνησης και η φόρτιση είναι μη-γραμμική), το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα εξαιρετικά σύνθετο, στοχαστικό μαθηματικό πρόβλημα.
- Σε αυτές τις ρεαλιστικές, μη-γραμμικές συνθήκες, οι κλασικοί solvers (όπως ο κορυφαίος Gurobi) αδυνατούν πλήρως να επιλύσουν το πρόβλημα για δίκτυα ρεαλιστικού μεγέθους.

Εδώ ακριβώς εντοπίζεται η μελλοντική επίδραση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στη βελτιστοποίηση δρομολογίων. Καθώς οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι (MILP) καταρρέουν υπολογιστικά όταν έρχονται αντιμέτωποι με δυναμικά και μη-γραμμικά δεδομένα του πραγματικού κόσμου, η Τεχνητή Νοημοσύνη θα αναλάβει να καλύψει αυτό το κενό μέσω:

1. Δυναμικών προβλέψεων: Αξιοποιώντας ιστορικά δεδομένα και δεδομένα πραγματικού χρόνου για να προβλέψει με ακρίβεια την κυκλοφοριακή συμφόρηση ή τον ρυθμό κατανάλωσης της μπαταρίας ανάλογα με το βάρος και τον καιρό.
2. Ταχύτατης εύρεσης λύσεων: Σε αντίθεση με τους solvers που ψάχνουν την "απόλυτα βέλτιστη" μαθηματική λύση (πράγμα που απαιτεί άπειρο χρόνο σε μεγάλα δίκτυα), τα μοντέλα AI μπορούν να παράγουν "εξαιρετικά καλές και βιώσιμες" λύσεις δρομολόγησης σχεδόν ακαριαία, κάνοντας την έξυπνη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας εφικτή σε πραγματικό χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. (PDF) A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/267202931_A_Survey_on_the_Vehicle_Routing_Problem_and_Its_Variants
2. (PDF) An Exact Solution for a Class of Green Vehicle Routing Problem - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/261258792_An_Exact_Solution_for_a_Class_of_Green_Vehicle_Routing_Problem
3. (PDF) Electric Vehicle Routing Problem with States of Charging Stations - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.researchgate.net/publication/379976226_Electric_Vehicle_Routing_Problem_with_States_of_Charging_Stations
4. (PDF) MILP model for fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus services - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.researchgate.net/publication/371113395_MILP_model_for_fleet_and_charging_infrastructure_decisions_for_fast-charging_city_electric_bus_services
5. (PDF) The Dynamic Vehicle Routing Problem - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/260401175_The_Dynamic_Vehicle_Routing_Problem
6. A Deep Reinforcement Learning Model to Solve the Stochastic Capacitated Vehicle Routing Problem with Service Times and Deadlines - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/2227-7390/13/18/3050
7. A digital twin framework for intelligent electric vehicle charging optimization in smart manufacturing systems, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/425820230/1-s2.0-S0306261925020112-main.pdf
8. A Green Vehicle Routing Problem - IDEAS/RePEc, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ideas.repec.org/a/eee/transe/v48y2012i1p100-114.html

9. A hierarchical optimization model for off-peak battery swapping scheduling of electric trucks in open-pit mines - Frontiers, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2025.1729185/full

10. A mathematical model for the electric vehicle routing with time windows considering queuing system at charging stations and alternative paths, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.jise.ir/article_81756_e057504bab81952e53a385a79ed6502b.pdf

11. A Matheuristic for the Electric Vehicle Routing Problem with Capacitated Charging Stations - Cirrelt, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2017-31.pdf

12. A Multi-Depot Dynamic Vehicle Routing Problem with Stochastic Road Capacity: An MDP Model and Dynamic Policy for Post-Decision State Rollout Algorithm in Reinforcement Learning - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/2227-7390/10/15/2699

13. A Negotiation Framework for Leveraging User Flexibility in Vehicle-to-Building Charging under Uncertainty - OpenReview, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://openreview.net/pdf/4c1dbfee784fd17ab1a1ef097512662e4a827e83.pdf

14. A p-Step Formulation for the Capacitated Vehicle Routing Problem - PubsOnLine, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/trsc.2024.0936

15. A survey of the vehicle routing problem and its variants: formulations and solutions - Academic Journals and Conferences |, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/mar/34084/2024111333343.pdf

16. A Sustainable Multi-Objective Model for Capacitated-Electric-Vehicle-Routing-Problem Considering Hard and Soft Time Windows as Well as Partial Recharging - PMC, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11048450/

17. A Vehicle Routing Problem for Human-Centered Electric Mobility - arXiv, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://arxiv.org/html/2604.22737v1

18. A VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH STOCHASTIC DEMAND. - MIT, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mit.edu/~dbertsim/papers/Vehicle%20Routing/A%20vehicle%20routing%20problem%20with%20stochastic%20demand.pdf

19. Abstract papers from the Energy Informatics.Academy Conference 2022 (EI.A 2022) - PMC, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9767805/

20. Alternative formulations and improved bounds for the multi-depot fleet size and mix vehicle routing problem - PMC, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6568022/

21. AMPECO (2024). ISO 15118 - EV Charging Glossary & The AFIR Compliance Guide for Charge Point Operators (CPOs).

22. An Exact Solution for a Class of Green Vehicle ... - IEOM Society, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, http://ieomsociety.org/ieom2014/pdfs/306.pdf

23. An Explicit Model for Optimal Siting and Sizing of Electric Truck Charging Stations - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.mdpi.com/2071-1050/17/23/10708

24. An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/282698665_An_improved_formulation_for_the_multi-depot_open_vehicle_routing_problem

25. An Optimization-Based Heuristic for the Split Delivery Vehicle ..., πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www2.isye.gatech.edu/~ms79/publications/optSDVRP.pdf

26. An Overview of Energy Replenishment Strategies for the Electric Vehicle Routing Problem: Models and Solution Algorithms - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.mdpi.com/1996-1073/18/23/6196

27. Apostolopoulos, V., & Kasselouris, G. (2022). Seizing the potential of transport pooling in urban logistics - the case of Thriasio logistics centre in Greece. Journal of Applied Research on Industrial Engineering, 9(2), 230-248.

28. Bilevel Late Acceptance Hill Climbing for the Electric Capacitated Vehicle Routing Problem, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://arxiv.org/html/2604.13013v1

29. Capacitated Vehicle Routing Problem formulation — AIMMS How-To, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://how-to.aimms.com/Articles/332/332-Formulation-CVRP.html

30. Chapter 8: Stochastic Vehicle Routing Problems, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611973594.ch8

31. Charge Node (2024). Depository charging for electric vehicle fleets - how to plan without downtime.

32. Christian H. Christiansen & Jens Lysgaard A Column Generation Approach to the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands - Pure, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pure.au.dk/ws/files/32345407/L_2006_04.pdf

33. CONSENT: A Negotiation Framework for Leveraging User Flexibility in Vehicle-to-Building Charging under Uncertainty - arXiv, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://arxiv.org/pdf/2601.01581

34. Dantzig, G. and and Ramser, R. (1959) The Truck Dispatching Problem. Management Science, 6, 80-91. - References - Scientific Research Publishing - Scirp.org., πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1738348

35. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science, 6, 80-91. - References - SCIRP, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3266674

36. Daytime and Overnight Joint Charging Scheduling for Battery Electric Buses Considering Time-Varying Charging Power - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10728

37. Deep reinforcement learning approach to solve dynamic vehicle routing problem with stochastic customers - Institutional Knowledge (InK) @ SMU, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=6571&context=sis_research

38. Different Routing Problems in Transportation | Encyclopedia MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://encyclopedia.pub/entry/56187

39. Digital Ocean (2024). AFIR - Heavy Duty Vehicles.

40. Distributed Charging Coordination for Electric Trucks Under Limited Facilities and Travel Uncertainties - IEEE Xplore, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6979/11063346/10932686.pdf

41. Driivz (2024) The Charging Infrastructure Challenge for Medium- and Heavy-Duty EVs.

42. dynamic vehicle routing problems - Laboratory for Maritime Transport, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, http://www.martrans.org/docs/publ/BOOK%20CHAPTERS/DVRP%20GOLDEN%201988.pdf

43. Dynamic Vehicle Routing Problems - Welcome to DTU Research Database, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://orbit.dtu.dk/en/publications/dynamic-vehicle-routing-problems/

44. Dynamic vehicle routing with time windows in theory and practice - PMC, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5309326/

45. EGBatt (2026). 2026 Megawatt Charging Systems (MCS): The Complete Guide to Heavy-Duty Fleet Electrification.

46. El Amrani, A. M., Fri, M., Benmoussa, O., & Rouky, N. (2024). The Integration of Urban Freight in Public Transportation: A Systematic Literature Review. Sustainability, 16(13), 5286.

47. Electric Vehicle Routing Problem with Time Dependent Waiting Times at Recharging Stations - Sabanci University Research Database, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/34883/2/2018_Odysseus_KeskinLaporte%C3%87atay.pdf

48. Electric Vehicle Routing with Heterogeneous Charging Stations - Chaire en logistique et en transport, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://chairelogistique.hec.ca/wp-content/uploads/2025/05/EVRPHC.pdf

49. Electric Vehicle Routing with Time Windows and Charging Stations from the Perspective of Customer Satisfaction - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.mdpi.com/2076-3417/15/9/4703

50. Ernst & Young [EY] (2021). Ελλάδα: Διεθνές Εμπορευματικό Κέντρο (2η έκδ.). EY Logistics Survey.

51. European Commission (2025). Final energy consumption in transport - detailed statistics. Eurostat - Statistics Explained.

52. European Commission (2026). Passenger cars in the EU - Statistics Explained. Eurostat.

53. European Union (2024). Alternative Fuels Infrastructure Regulation - Mobility and Transport.

54. EV Range (2023). ISO 15118 Explained: Plug & Charge, V2G, and Smart Charging.

55. EV Truck's Charging Trends (2026). EV Truck's Charging Trends | March 28, 2026.

56. EVB (2025). Plug and charge solutions and V2G in depots.

57. Exact and Heuristic Methods for the Split Delivery Vehicle Routing Problem - PubsOnLine, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/trsc.2022.0353

58. EY (Ernst & Young) (2017). Greece – International Freight Center.

59. FENIX Network (2024). Ελληνικό Παρατηρητήριο Μεταφορών & Logistics (T&L). Greek Observatory Transport & Logistics. (Αναφέρεται στο κείμενο ως: Ελληνικό Παρατηρητήριο Μεταφορών & Logistics, 2024).

60. Fiver New Energy (2026). Liquid-cooled cables and Megawatt Charging System specifications.

61. Forsberg (2024). Zero Trust and TLS encryption in ISO 15118.

62. From Shortest Paths to Energy-Efficient Routes: Extending TSP to EV Routing | by Tejas Ghorpade | Suboptimally Speaking | Apr, 2026 | Medium, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://medium.com/suboptimally-speaking/from-shortest-paths-to-energy-

efficient-routes-extending-tsp-to-ev-routing-a3bddc4a3719

63. Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2009). Characteristics of innovations in last-mile logistics - using best practices, case studies and making the link with green and sustainable logistics. Σε European Transport Conference 2009.

64. Green (2026). MCS charging capabilities and rest times.

65. Greenflux (2024). All you need to know about AFIR.

66. Half-Open Multi-Depot Electric Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Stochastic Waiting Times at Recharging Station - SciTePress, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.scitepress.org/publishedPapers/2026/143886/pdf/index.html

67. hEART 2023 - Transport and Mobility Laboratory, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://transp-or.epfl.ch/heart/2023/abstracts/hEART_2023_paper_6443.pdf

68. How to solve routing problem with stochastic programming approaches | Eni digiTALKS, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://medium.com/eni-digitalks/how-to-solve-routing-problem-with-stochastic-programming-approaches-2440aa8ade1b

69. ICAP CRIF (2026, Ιανουάριος). Ενισχύθηκε η δυναμική των πλέον κερδοφόρων εταιρειών της χώρας το 2024 (Forin.gr).

70. ICAP CRIF. (2024). Μελέτη της ICAP CRIF: BUSINESS LEADERS IN GREECE (2023).

71. Integrating Machine Learning for Dynamic Vehicle Routing Problem Optimisation: A Comparative Study and Case Analysis - FMDB, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.fmdbpub.com/uploads/articles/177035935463894.%20FTSIN-552-2025.pdf

72. Joint Charging (2026). Electric Truck Charging Trends in 2026: What Fleet Operators Need to Know.

73. KEBA (2025). EU Regulation AFIR: Simple & accessible payment at charging stations.

74. Kempower (2024). Navigating AFIR: A Guide to Compliant Electric Vehicle Charging Solutions & Logistics fleet EV charging.

75. Konstantakopoulos, G. D., Kechagias, E. P., Gayialis, S. P., & Tatsiopoulos, I. P. (2023). Green Freight Distribution: A Case Study in Greece. In N. F. Matsatsinis, F. C. Kitsios, M. A.

Madas, & M. I. Kamariotou (Eds.), Operational Research in the Era of Digital Transformation and Business Analytics (pp. 49-64). Springer.

76. Learning to Route Electric Trucks Under Operational Uncertainty - arXiv, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://arxiv.org/html/2604.26566v1

77. Learning to Route Electric Trucks Under Operational Uncertainty - arXiv, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://arxiv.org/pdf/2604.26566

78. LIMITE EN - Data - European Union (2023). Implementation of regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR).

79. Logistics Management (2026, Φεβρουάριος). Σύγχρονες υποδομές, αξιόπιστη συνδεσιμότητα, πλήρης υποστήριξη των Logistics.

80. Mathematical formulations and improvements for the multi-depot open vehicle routing problem, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://d-nb.info/1215247222/34

81. Mathematical Modeling of the Vehicle Routing Problem with Relaxed Time Windows and Delay Penalties, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://jurnal.polgan.ac.id/index.php/sinkron/article/download/14977/3469/24446

82. MENNEKES.org (2024). Everything you need to know about the AFIR.

83. Michael, S., Papoutsidakis, M., & Priniotakis, G. (2020). Improvements of City Logistics Methods in Thriasio Area, Greece. Open Journal of Applied Sciences, 10(12), 767-778.

84. Models and Algorithms for Stochastic and Robust Vehicle Routing with Deadlines - MIT, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mit.edu/~jaillet/general/SRVRP_Sep-2014.pdf

85. More efficient formulations and valid inequalities for the Green Vehicle Routing Problem, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1125709/480393/More_efficient_formulations_and_valid_inequalities_for_GVRP.pdf

86. Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem to Minimize Carbon Emissions - MDPI,

πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/2071-1050/12/8/3500

87. Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/98255/1/Zhang_Multi-Depot_Multi-Trip_Vehicle.pdf

88. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2024). Charging infrastructure in the EU context.

89. New Exact Solution Approaches for the Split Delivery Vehicle Routing Problem - Optimization Online, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://optimization-online.org/wp-content/uploads/2014/12/4687.pdf

90. On modeling stochastic dynamic vehicle routing problems - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/343154244_On_modeling_stochastic_dynamic_vehicle_routing_problems

91. On vehicle routing problems with stochastic demands – Scenario-optimal recourse policies, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://optimization-online.org/wp-content/uploads/2026/04/Scenario_Optimal.pdf

92. On–Off Scheduling for Electric Vehicle Charging in Two-Links Charging Stations Using Binary Optimization Approaches - PMC, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8588457/

93. Operations Research Letters A branch-and-price algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://andresjaquep.files.wordpress.com/2008/10/a-branch-and-price-algorithm-for-the-capacitated-vehicle-routing-problem-with-stochastic-demands.pdf

94. Optimizing a Dynamic Vehicle Routing Problem with Deep Reinforcement Learning: Analyzing State-Space Components - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/2305-6290/8/4/96

95. Planning and Optimization of Charging Strategies for Electric Vehicles: From

Infrastructure to Behavioral - University of Illinois Chicago - Figshare, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://indigo.uic.edu/articles/thesis/Planning_and_Optimization_of_Charging_Strategies_for_Electric_Vehicles_From_Infrastructure_to_Behavioral/31451047

96. Powy (2025). Contactless payment devices and ad-hoc charging for AFIR.

97. Reinforcement Learning for Solving Stochastic Vehicle Routing Problem, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://proceedings.mlr.press/v222/iklassov24a/iklassov24a.pdf

98. Reinforcement Learning for Solving Stochastic Vehicle Routing Problem with Time Windows - arXiv, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://arxiv.org/pdf/2402.09765

99. Solving Min-Max Multi-Depot Vehicle Routing Problem - Stanford University, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://web.stanford.edu/~yyye/mdvrp-oct-23.pdf

100. Solving Min-Max Multi-Depot Vehicle Routing Problem∗ - Stanford University, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://web.stanford.edu/~yyye/MDVRP-JGSWY.pdf

101. Solving the Problem of Vehicle Routing Problem With Time Window via Dual Adaptive Genetic Algorithm - IEEE Xplore, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10820123/11020644.pdf

102. Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.math.u-bordeaux.fr/~fclautia/publications/EJOR-MVRP.pdf

103. Stochastic Vehicle Routing Problem: A Literature Survey - Ajith Abraham, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, http://www.softcomputing.net/jikm2014.pdf

104. Survey on Thirty Years of Vehicle Routing Problems: Mathematical Models, Solution Methods, and Real-Life Applications, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://rsisinternational.org/journals/ijrsi/digital-library/volume-11-issue-7/435-449.pdf

105. Sustainability, Volume 17, Issue 23 (December-1 2025) – 456 articles - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.mdpi.com/2071-1050/17/23

106. SVRPBench: A Realistic Benchmark for Stochastic Vehicle Routing Problem |

OpenReview, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://openreview.net/forum?id=yADrJyaBJl&referrer=%5Bthe%20profile%20of%20Ahmed%20Heakl%5D(%2Fprofile%3Fid%3D~Ahmed_Heakl1)

107. Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Yamada, T. (1999). Modelling city logistics. City Logistics I, 3-37.

108. Technical and Regulatory Architecture for the Decarbonization of Heavy-Duty Transport (2024). A Comprehensive Analysis of European and Hellenic Frameworks.

109. The Capacitated Vehicle Routing Problem: Stronger bounds in pseudo-polynomial time - Lancaster University, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.lancaster.ac.uk/staff/letchfoa/articles/2019-cvrp-pseudopoly.pdf

110. The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations - Re.Public@polimi.it, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://re.public.polimi.it/retrieve/4b97f687-cb7c-4270-ba86-3ef25ba9ad5b/The_electric_vehicle_routing_problem_with_capacitated_charging_stations_v2%281%29.pdf

111. The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations - Université de Bordeaux, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.math.u-bordeaux.fr/~afroger001/documents/The_electric_vehicle_routing_problem_with_capacitated_charging_stations_v3.pdf

112. The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations | Request PDF - ResearchGate, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://www.researchgate.net/publication/270883447_The_Electric_Vehicle-Routing_Problem_with_Time_Windows_and_Recharging_Stations

113. The generalized lock scheduling problem - KU Leuven, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://feb.kuleuven.be/public/u0037710/papers/TransResE2014paper.pdf

114. The Split Delivery Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading and Time Windows Constraints - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/6987

115. The Truck Dispatching Problem - IDEAS/RePEc, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ideas.repec.org/a/inm/ormnsc/v6y1959i1p80-91.html

116. The Truck Dispatching Problem - Scite.ai, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://scite.ai/reports/the-truck-dispatching-problem-MJkGAd

117. The Truck Dispatching Problem | Management Science - PubsOnLine - INFORMS.org, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/mnsc.6.1.80

118. The Truck Dispatching Problem, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://andresjaquep.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/10/2627477-clasico-dantzig.pdf

119. The VRP with Time Windows, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/data/articles/VRPTW.pdf

120. Time-Window Relaxations in Vehicle Routing Heuristics - Cirrelt, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2013-43.pdf

121. Transport & Environment (2024). Road freight emissions and the transition to zero-emission trucks.

122. Transport Community (2024). Alternative fuels infrastructure.

123. Travel Time Research Articles - Page 21 | R Discovery, πρόσβαση Μαΐου 19, 2026, https://discovery.researcher.life/topic/travel-time/16652654?page=21

124. Using Metaheuristics on the Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Modified Optimization Criterion - MDPI, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://www.mdpi.com/1999-4893/11/5/74

125. Vehicle routing problem - Wikipedia, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_routing_problem

126. Vehicle Routing with Time Windows: Optimization and Approximation, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://ir.cwi.nl/pub/2036/2036D.pdf

127. Virta (2024). AFIR - Alternative Fuels Infrastructure Regulation: What you need to know.

128. Waiting Strategies for Dynamic Vehicle Routing, πρόσβαση Μαΐου 18, 2026, https://d-nb.info/1246015668/34

129. WattEV (2026). CCS vs MCS Charging Explained: What Every Fleet Operator Needs to Know.

130. Wikipedia (2024). Megawatt Charging System.

131. ZERA (2026). Megawatt Charging - Requirements for Testing Technology.

132. Αμδίτης, Α. (2024, Μάιος). Εκρηκτικές οι δυνατότητες της τεχνολογίας, αλλά υπό προϋποθέσεις, Logistics Management.

133. Ανάλυση της Υφιστάμενης Δομής και των Λειτουργικών Παραμέτρων των Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών στην Ελλάδα (2024).

134. Δεληγιάννη, Μ. (2021). Συνδυασμένες επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές στην αστική περιοχή του Βόλου [Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή]. (Αναφέρεται στο κείμενο ως: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021).

135. Εθνικό Στρατηγικό Σχέδιο Μεταφορών [ΕΣΣΜ] (2019). Σύνοψη Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Μεταφορών της Ελλάδας. Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, Egis & Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων.

136. Ελληνική Στατιστική Αρχή [ΕΛΣΤΑΤ] (2025). Έρευνα Οδικών Εμπορευματικών Μεταφορών: Ετήσια Στοιχεία 2024. Πειραιάς: ΕΛΣΤΑΤ.

137. Ελληνική Στατιστική Αρχή [ΕΛΣΤΑΤ] (2026). Οδικές Εμπορευματικές Μεταφορές: Γ' Τρίμηνο 2025 & Εμπορευματικές Συναλλαγές της Ελλάδος: Μάρτιος 2026. Πειραιάς: ΕΛΣΤΑΤ.

138. ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ (2024). Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) (ΦΕΚ Β' 6983/19.12.2024).

139. Ζεϊμπέκης, Β. (2023). Έξυπνες και αειφόρες αστικές εμπορευματικές μεταφορές (city logistics) στην Ελλάδα: Ευκαιρίες ανάπτυξης & προκλήσεις. Ελληνική Εταιρεία Logistics (EEL) & διαΝΕΟσις. (Αναφέρεται στο κείμενο εναλλακτικά και ως: Zeimpekis, 2023 / EEL, 2023 / PP City Logistics, 2023).

140. Κ.Υ.Α. 124757/2025. Δεύτερη (2η) τροποποίηση της υπ' αρ. 132625/03.06.2024 κοινής απόφασης των Υπουργών Υποδομών και Μεταφορών, Εθνικής Οικονομίας και Οικονομικών, Περιβάλλοντος και Ενέργειας και Ψηφιακής Διακυβέρνησης «Προκήρυξη της Δράσης ΚΙΝΟΥΜΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ - Γ' κύκλος» (Β' 3076). Forin.gr.

141. Κινούμαι Ηλεκτρικά Γ' (2024). Τι περιλαμβάνει ο τρίτος κύκλος της επιδότησης ηλεκτρικών οχημάτων. NotiFund.

142. Κωστοπούλου, Φ. (2021). Διερεύνηση θεμάτων αστικών εμπορευματικών μεταφορών στην Αθήνα [Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)].

143. Μαυρομύτης, Π. (2024). Για ποιους λόγους υπάρχει έλλειψη οδηγών στα φορτηγά; Προβλήματα δουλειάς [Βίντεο]. YouTube.

144. Πανελλήνιο Συνδικάτο Χερσαίων Εμπορευματικών Μεταφορών (Π.Σ.Χ.Ε.Μ.). (2024). Ανακοινώσεις Αρχεία.

145. Πανελλήνιο Συνδικάτο Χερσαίων Εμπορευματικών Μεταφορών (Π.Σ.Χ.Ε.Μ.). (2024). Δελτία Τύπου Αρχεία.

146. Πανεπιστήμιο Πειραιώς (2020). Διαχείριση Κινδύνου στην Οδική Μεταφορά Προϊόντων [Μεταπτυχιακή Εργασία στο ΠΜΣ Διοίκηση Logistics, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας]. (Αναφέρεται στο κείμενο ως: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ, 2020).

147. ΥΠΕΝ_ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΕΣΕΚ (2023). Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος – Προσχέδιο Αναθεωρημένης Έκδοσης. European Commission.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των διαφόρων παραλλαγών του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP)

Οι αλγόριθμοι ταξινομούνται σε Ακριβείς Μεθόδους, Ευρετικές, Μεταευρετικές και Μεθόδους Δυναμικού Σχεδιασμού/Μηχανικής Μάθησης.

1. Κλασικές ευρετικές μέθοδοι (Classical Heuristics)

1.1 Αλγόριθμος εξοικονόμησης των Clarke-Wright (Clarke-Wright Savings Algorithm)

Ο αλγόριθμος Clarke-Wright είναι η πιο κλασική κατασκευαστική ευρετική μέθοδος, η οποία σχεδιάστηκε για το CVRP και χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία αρχικών λύσεων.

Βήματα Εφαρμογής:

1. Αρχικοποίηση: Κάθε πελάτης i εξυπηρετείται από ένα ξεχωριστό όχημα μέσω μιας αποκλειστικής διαδρομής (Αποθήκη → i → Αποθήκη).
2. Υπολογισμός Εξοικονόμησης: Για κάθε ζεύγος πελατών (i, j), υπολογίζεται η εξοικονόμηση απόστασης (savings) που προκύπτει αν οι δύο διαδρομές συγχωνευτούν: s(i,j) = d(0,i) + d(0,j) - d(i,j), όπου 0 είναι η αποθήκη.
3. Ταξινόμηση: Οι τιμές εξοικονόμησης s(i,j) ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά.
4. Συγχώνευση (Merging): Διατρέχοντας τη λίστα, το ζεύγος (i, j) προστίθεται στην ίδια διαδρομή αν:

   α) κανένας από τους κόμβους δεν βρίσκεται στο εσωτερικό μιας ήδη σχηματισμένης διαδρομής (πρέπει να είναι στα άκρα) και

   β) η συγχώνευση δεν παραβιάζει τον περιορισμό χωρητικότητας των οχημάτων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εξαντληθεί η λίστα.

2. Ακριβείς μέθοδοι (Exact Methods)

2.1 Διακλάδωση και Τιμολόγηση (Branch-and-Price)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί το πρότυπο (state-of-the-art) για την ακριβή επίλυση προβλημάτων όπως το VRPTW, το SDVRP και το EVRP. Συνδυάζει τη μέθοδο Διακλάδωσης και Οριοθέτησης (Branch-and-Bound) με την Παραγωγή Στηλών (Column Generation).

Βήματα Εφαρμογής:

1. Διατύπωση Κύριου Προβλήματος (Master Problem): Το VRP διατυπώνεται ως πρόβλημα Διαμερισμού Συνόλου (Set Partitioning), όπου κάθε μεταβλητή-στήλη αντιπροσωπεύει μια έγκυρη διαδρομή.
2. Επίλυση Χαλαρωμένου Προβλήματος (RMP): Επιλύεται η γραμμική χαλάρωση του Περιορισμένου Κύριου Προβλήματος (Restricted Master Problem), το οποίο περιέχει μόνο ένα υποσύνολο των πιθανών διαδρομών.
3. Υποπρόβλημα Τιμολόγησης (Pricing Problem): Χρησιμοποιώντας τις δυϊκές μεταβλητές (dual variables) του RMP, επιλύεται το υποπρόβλημα (συνήθως ως Στοιχειώδες Πρόβλημα Συντομότερου Μονοπατιού με Περιορισμούς Πόρων - ESPPRC). Στόχος είναι η εύρεση νέων διαδρομών με αρνητικό ανηγμένο κόστος (negative reduced cost). Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με αλγορίθμους επισήμανσης (labeling algorithms).
4. Προσθήκη Στηλών: Εάν βρεθούν τέτοιες διαδρομές, προστίθενται στο RMP και το βήμα 2 επαναλαμβάνεται. Εάν δεν βρεθούν, η διαδικασία παραγωγής στηλών τερματίζεται.
5. Διακλάδωση (Branching): Εάν η βέλτιστη λύση του RMP είναι κλασματική, εφαρμόζεται διακλάδωση (π.χ., επιβολή χρήσης ή μη χρήσης μιας συγκεκριμένης ακμής) για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα, δημιουργώντας νέους κόμβους στο δέντρο αναζήτησης.

2.2 Ακέραια μέθοδος L-shaped (Integer L-shaped Method)

Εφαρμόζεται αποκλειστικά στα Στοχαστικά VRP (SVRP). Αποτελεί μια επέκταση της αποσύνθεσης Benders (Benders Decomposition) που επιτρέπει ακέραιες μεταβλητές στο πρώτο στάδιο.

Βήματα Εφαρμογής:

1. Αρχικοποίηση: Το πρόβλημα μοντελοποιείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο σχεδιάζει την *a priori* διαδρομή. Το δεύτερο στάδιο αφορά τις ενέργειες προσφυγής (recourse actions) όταν το όχημα αδειάσει λόγω στοχαστικής ζήτησης.
2. Επίλυση Κύριου Προβλήματος: Επιλύεται η χαλαρωμένη εκδοχή του *a priori* προβλήματος δρομολόγησης για την εύρεση μιας ακέραιας λύσης, χρησιμοποιώντας Branch-and-Cut.
3. Επίπεδα Αποκοπής Εφικτότητας (Feasibility Cuts): Εάν η τρέχουσα ακέραια λύση περιλαμβάνει κλειστούς βρόχους (subtours) ή παραβιάζει τη χωρητικότητα της *a priori* αναμενόμενης ζήτησης, προστίθενται περιορισμοί για την αποκοπή της.
4. Επίπεδα Αποκοπής Βελτιστότητας (Optimality Cuts): Υπολογίζεται το αναμενόμενο κόστος προσφυγής Q(x) της εφικτής ακέραιας λύσης για όλα τα στοχαστικά σενάρια. Εάν η βοηθητική μεταβλητή Θ (που εκτιμά αυτό το κόστος) είναι μικρότερη από το πραγματικό κόστος, προστίθεται μια γραμμική ανισότητα (optimality cut: Θ >= L(x)) για να διορθωθεί η εκτίμηση.

3. Μεταευρετικές μέθοδοι (Metaheuristics)

3.1 Προσαρμοστική αναζήτηση μεγάλης γειτονιάς (Adaptive Large Neighborhood Search - ALNS)

Η ALNS είναι η πιο επιτυχημένη σύγχρονη μεταευρετική μέθοδος για πολύπλοκα προβλήματα (VRPTW, SDVRP, EVRP, G-VRP) λόγω της ικανότητάς της να αποφεύγει τοπικά ελάχιστα.

Βήματα Εφαρμογής:

1. Αρχική Λύση: Ξεκινά με μια εφικτή λύση (π.χ., μέσω Clarke-Wright).
2. Επιλογή Τελεστών: Επιλέγεται ένας τελεστής καταστροφής (Destroy Operator) και ένας τελεστής αποκατάστασης (Repair Operator). Η επιλογή γίνεται στοχαστικά (μέσω μηχανισμού ρουλέτας), βάσει του ιστορικού βάρους w_j επιτυχίας κάθε τελεστή σε προηγούμενες επαναλήψεις.
3. Καταστροφή (Destroy): Ο τελεστής καταστροφής αφαιρεί ένα ποσοστό (π.χ., q πελάτες) από την τρέχουσα λύση (π.χ., αφαίρεση της πιο δαπανηρής ακμής ή τυχαία αφαίρεση).
4. Αποκατάσταση (Repair): Ο τελεστής αποκατάστασης επανατοποθετεί τους πελάτες που αφαιρέθηκαν πίσω στις διαδρομές (π.χ., με άπληστη εισαγωγή (greedy insertion) στο σημείο που προκαλεί τη μικρότερη αύξηση κόστους).
5. Κριτήριο Αποδοχής: Η νέα λύση αξιολογείται. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing). Μια χειρότερη λύση μπορεί να γίνει δεκτή με μια πιθανότητα που μειώνεται σταδιακά (βάσει μιας «θερμοκρασίας» που πέφτει).
6. Προσαρμογή Βαρών (Adaptive Update): Ενημερώνονται τα βάρη των τελεστών που χρησιμοποιήθηκαν, επιβραβεύοντας αυτούς που βρήκαν καλύτερες λύσεις.

3.2 Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighborhood Search - VNS)

Η VNS αξιοποιεί την ιδέα της συστηματικής αλλαγής δομών γειτονιάς για εξερεύνηση του χώρου λύσεων, εφαρμόσιμη σε MDVRP και EVRP.

Βήματα Εφαρμογής:

1. **Ορισμός Γειτονιών:** Ορίζεται ένα σύνολο δομών γειτονιάς N_k (k = 1….k), όπως ανταλλαγές 2-opt, Or-opt ή μετακινήσεις κόμβων (shift/swap).
2. **Ανακίνηση (Shaking/Diversification):** Δημιουργείται μια τυχαία λύση στο εσωτερικό της k-οστής γειτονιάς της τρέχουσας λύσης, προκειμένου ο αλγόριθμος να αποδράσει από τοπικά βέλτιστα.
3. **Τοπική Αναζήτηση (Intensification):** Από τη νέα (ανακινημένη) λύση, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης μέχρι να βρεθεί ένα τοπικό ελάχιστο.
4. **Απόφαση Μετάβασης:** Εάν το νέο τοπικό ελάχιστο είναι καλύτερο από την τρέχουσα βέλτιστη λύση, η λύση ανανεώνεται και η αναζήτηση επιστρέφει στην πρώτη γειτονιά (k = 1). Εάν όχι, ο αλγόριθμος προχωρά στην επόμενη γειτονιά (k = k + 1).

4. Προσεγγίσεις για δυναμικά μοντέλα (DVRP)

4.1 Διαδικασία λήψης αποφάσεων Markov (MDP) / Προσεγγιστικός δυναμικός προγραμματισμός (ADP)

Για το Δυναμικό VRP (DVRP), ο σχεδιασμός προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο καθώς αποκαλύπτονται νέες πληροφορίες (π.χ., νέες παραγγελίες, αλλαγές κυκλοφορίας).

Βήματα Εφαρμογής:

1. Ορισμός Κατάστασης (State): Σε κάθε χρονικό βήμα απόφασης t, το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση S_t (περιλαμβάνει θέσεις οχημάτων, φορτία, εκκρεμείς παραγγελίες).
2. Παραγωγή Ενεργειών (Action Generation): Μόλις φτάσει μια νέα πληροφορία (π.χ. νέος πελάτης), παράγονται όλες οι εφικτές ενέργειες (αποδοχή/απόρριψη, επαναδρομολόγηση, αποστολή οχήματος).
3. Lookahead / Rollout: Για κάθε πιθανή ενέργεια, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μοντέλα πρόβλεψης (Post-Decision State Rollout) για να προσομοιώσει πολλαπλά μελλοντικά σενάρια και να εκτιμήσει τη μελλοντική αξία (future value) της τρέχουσας απόφασης.

4. Εκτέλεση και Μετάβαση: Επιλέγεται η ενέργεια που μεγιστοποιεί το άθροισμα της άμεσης ανταμοιβής και της αναμενόμενης μελλοντικής αξίας. Η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται ($S_{\{t+1\}}$) όταν ληφθεί η επόμενη δυναμική πληροφορία. Η μέθοδος αυτή συχνά ενισχύεται πλέον με τεχνικές Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (Deep Reinforcement Learning - DRL) ώστε ο αλγόριθμος να "εκπαιδεύεται" ακαριαία στις βέλτιστες πολιτικές εκχώρησης.