



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ
ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΣΕΩΝ**



ΚΛΕΙΤΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ
18708

Επιβλέπων:

Κωνσταντίνος Γκιοτσαλίτης / Επίκουρος Καθηγητής,
ΕΜΠ Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών,
ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2025



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING
RAILWAYS AND TRANSPORT LABORATORY

DIPLOMA THESIS

**SCHEDULING OF MODULAR AND ELECTRIC BUSES WITH OPTION FOR VARIABLE
NUMBER OF SERVED STOPS**



KLEITOS CHRISTODOULOU
18708

Supervisor:

Konstantinos Gkiotsalitis / Assistant Professor,

NTUA Dept. of Transportation Planning and Engineering, School of Civil Engineering,
NTUA

Athens, November 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά, εκφράζω τα θερμά μου ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Γκιοτσαλίτη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη, την πολύτιμη καθοδήγηση και τη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά την Αλεξάνδρα Βασιλειάδου, Ερευνήτρια και Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π, για την αδιάλειπτη βοήθεια, τις επιστημονικές της συμβουλές και το ενδιαφέρον που έδειξε σε όλη την διάρκεια της προετοιμασίας και συγγραφής, που ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για τον χρόνο και το ενδιαφέρον τους.

Εκφράζω, ακόμη, την βαθιά μου ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου για τη συνεχή ηθική και συναισθηματική στήριξη, την υπομονή και την αγάπη τους κατά τη διάρκεια όλης της φοίτησής μου.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην αρραβωνιαστικιά μου για την απέραντη υπομονή της, τη συνεχή ενθάρρυνση και την ακλόνητη στήριξή της σε όλη αυτή τη διαδρομή.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025
Χριστοδούλου Κλείτος,
Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων (modular bus), και τη πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, αποσκοπώντας στην αποτελεσματικότερη κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών μετακίνησης στις σύγχρονες πόλεις. Το κύριο αντικείμενο της έρευνας επικεντρώνεται στη λύση του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων (modular bus scheduling problem), με κύριο ενδιαφέρον τη μείωση του λειτουργικού κόστους, αξιοποιώντας παράλληλα την ανάπτυξη και τεκμηρίωση του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου, σε κώδικα Python, αλλά και τη μέθοδο επίλυσης μέσω του λογισμικού επίλυσης Gurobi. Στο προτεινόμενο μοντέλο συνυπολογίζονται παράμετροι όπως η δυναμική σύζευξη και αποσύζευξη λεωφορειακών μονάδων (modular units), η διαρκής κάλυψη της ζήτησης, η αποφυγή συνεχόμενων μη εξυπηρετήσεων της ίδιας στάσης και η πλήρης αυτόνομη λειτουργία του στόλου. Τα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία υποστηρίζουν την ευέλικτη διαχείριση της διαθέσιμης χωρητικότητας του στόλου και η δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων επιτρέπει την επικέντρωση της εξυπηρέτησης σε ζώνες υψηλής ζήτησης, ενώ το πρόβλημα δρομολόγησης λεωφορείων αφορά τον βέλτιστο προγραμματισμό των διαδρομών με γνώμονα τη μείωση του λειτουργικού κόστους.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που αναδεικνύει τις δυνατότητες των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στη μείωση του λειτουργικού κόστους και στη στοχευμένη διαχείριση της μεταβαλλόμενης ζήτησης, ενώ ακολουθεί αναλυτική αναφορά στην πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, η οποία αποσκοπεί στην καλύτερη εξυπηρέτηση σε περιοχές με υψηλή κίνηση και μεταβαλλόμενης ζήτησης μεταξύ διαδοχικών ταξιδιών.

Στη συνέχεια, ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίασης των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών, καθώς και των διαδικασιών βελτιστοποίησης που επιτρέπουν την εξοικονόμηση πόρων και την αύξηση της συχνότητας των δρομολογίων σε ώρες αιχμής. Μέσα από πειραματικό σενάριο, τεκμηριώνεται η αποτελεσματικότητα του μοντέλου, επιδεικνύοντας σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους και βελτιωμένη αξιοποίηση του στόλου. Ως μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε το αστικό δίκτυο της Λεμεσού, και ειδικότερα η λεωφορειακή γραμμή 31, η οποία εξυπηρετεί 9 στάσεις και εκτελεί 15 δρομολόγια. Η γραμμή 31 αποτελεί έναν από τους κύριους άξονες μετακίνησης της πόλης με έντονη ζήτηση για ολόκληρη τη διάρκεια της μέρας.

Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για την περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου σε δεδομένα πραγματικού δικτύου, αξιοποιώντας τις πληροφορίες λειτουργίας αστικών συγκοινωνιών σε πραγματικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για κατάλληλες υποδομές, πιο προηγμένους αλγόριθμους πρόβλεψης ζήτησης και ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης του στόλου. Τα συμπεράσματα επιβεβαιώνουν ότι ο συνδυασμός ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης

μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων και αυτόνομης οδήγησης μπορεί να αποτελέσει μία πολλά υποσχόμενη πρακτική για τη δημιουργία βιώσιμων, οικονομικά αποδοτικών και ανθρώπινων αστικών συγκοινωνιών.

Πίνακας Περιεχομένων	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
Σύνοψη.....	9
1. Εισαγωγή.....	10
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	14
2.1 Η Δρομολόγηση στον Τακτικό Σχεδιασμό των Αστικών Λεωφορείων (scheduling)	14
2.2 Πλαίσιο και Σημασία των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στην Δρομολόγηση αστικών λεωφορείων	15
2.3 Οφέλη της Εφαρμογής των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στη Δρομολόγηση.	16
2.4 Οικονομική και Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων	17
2.5 Προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στα χειρσαία συστήματα αστικών λεωφορείων.....	18
2.6 Ενδεικτικά Διεθνή Παραδείγματα Εφαρμογών στην Δρομολόγηση (scheduling)	19
2.6.1 Αυτόνομα λεωφορεία	20
2.6.2 Αυτόνομα λεωφορεία με Δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων διαδρομής.....	20
2.6.3 Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία.....	21
2.6.4 Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία με Δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων διαδρομής.....	21
2.7 Μοντέλα στα Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία	22
3. Ηλεκτροκίνηση και Βελτιστοποίηση Κόστους στα Συστήματα Ηλεκτρικών και Αυτόνομων Λεωφορείων.....	24
4. Μεθοδολογία Μοντέλου.....	28
4.1 Μοντέλο και Παραδείγματα Χρήσης.....	28
4.2 Γενική Λογική και Υποθέσεις του Μαθηματικού Μοντέλου	29
4.3 Ενδεικτικός Κώδικας Python/Gurobi και Αρχική Λογική	29
4.4 Σημαντικές Υποθέσεις στο Πλαίσιο του Μοντέλου	30
4.5 Γραμμικοποίηση σε Μεικτά Ακέραια Μη Γραμμικά Μοντέλα Δημοσίων Συγκοινωνιών	31
4.6 Συμβολισμοί μοντέλου	33
4.7 Κατασκευή Μαθηματικού Μοντέλου	34
5. Μέθοδος Επίλυσης	41
6. Μελέτη Εφαρμογής και Αποτελέσματα.....	41

7. Συμπεράσματα.....	47
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	49

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1:Σύζευξη μονάδων αυτόνομου λεωφορείου	19
Εικόνα 2:Διαδρομές ανά πολιτική εξυπηρέτησης	44

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1:Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	25
Πίνακας 2:Επίβατικός φόρτος αυτόνομου λεωφορείου στα 15 ταξίδια	42
Πίνακας 3:Επίβατικός φόρτος συμβατικού λεωφορείου στα 15 ταξίδια	42
Πίνακας 4:Συνεισφορά πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων	44
Πίνακας 5:Συνεισφορά του σεναρίου αναφοράς	45
Πίνακας 6:Συνολικός πίνακας Ελαχιστοποίησης λειτουργικού κόστους	46
Πίνακας 7:Βελτιστοποίηση του συστήματος αυτόνομου λεωφορείου	47

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Φόρτος Επιβατών σε κάθε στάση του ταξιδιού 1 για τα δύο σενάρια	43
Διάγραμμα 2: Αριθμός μονάδων λεωφορείου για τα δύο σενάρια	46

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΣΕΩΝ

Κλείτος Χριστοδούλου

^a Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα, Ελλάδα

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης στα αστικά λεωφορεία, μέσω της ενσωμάτωσης ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, όπως και την εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων σε πλήρως αυτόνομα συστήματα μεταφοράς. Το ζήτημα αυτό καθίσταται ιδιαίτερα επίκαιρο λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για βιώσιμες, ευέλικτες και αποδοτικές υπηρεσίες σε περιβάλλοντα έντονης αστικοποίησης και ετερογενούς ζήτησης.

Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (ΜΑΜΓΠ), το οποίο υλοποιήθηκε σε Python και επιλύθηκε με το λογισμικό Gurobi. Το μοντέλο ενσωματώνει δυναμικά τη σύζευξη και αποσύζευξη μονάδων του αυτόνομου λεωφορείου, την εφαρμογή πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων σε επιλεγμένες στάσεις βάσει ζήτησης, τους ενεργειακούς περιορισμούς (διαχείριση κατάστασης φόρτισης - SOC), καθώς και περιορισμούς που αφορούν τη δρομολόγηση του αυτόνομου και ηλεκτρικού λεωφορείου με τη χρήση της επιβατικής ζήτησης.

Η βασική επιστημονική συμβολή της εργασίας έγκειται στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, το οποίο συνδυάζει τεχνικές πρόβλεψης ζήτησης, δυναμικής κατανομής πόρων και διαχείρισης ενέργειας, ενσωματώνοντας λειτουργικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις και μείωσης του λειτουργικού κόστους κατά 28% .

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο επιτυγχάνει σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους και βελτιωμένη κατανομή του στόλου, ιδιαίτερα σε σενάρια ανομοιόμορφης ή μεταβαλλόμενης ζήτησης, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα ενίσχυσης της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας του αστικού συγκοινωνιακού συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά: ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία (modular bus); πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων; Δρομολόγηση; Ηλεκτροκίνηση

1. Εισαγωγή

Η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού και η έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση δημιουργούν όλο και περισσότερο την αναγκαιότητα για βελτίωση της αποδοτικότητας των υπηρεσιών του αστικού λεωφορείου. Μολονότι οι τεχνολογικές εξελίξεις δίνουν τη δυνατότητα της βελτίωσης των υπηρεσιών του αστικού λεωφορείου, ταυτόχρονα έχουμε μεταβεί σε νέες τεχνολογίες λεωφορείων όπως είναι τα αυτόνομα και τα ηλεκτρικά, για τα οποία υπάρχει επείγουσα ανάγκη για την ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο, δηλαδή την δρομολόγησή τους. Στην παρούσα εργασία, ως μελέτη περίπτωσης εξετάζεται το αστικό δίκτυο της Λεμεσού, με έμφαση στη λεωφορειακή γραμμή 31, η οποία αποτελείται από 9 στάσεις και 15 δρομολόγια.

Το βασικό πρόβλημα που επιχειρεί να αντιμετωπιστεί στην παρούσα εργασία αφορά τον σχεδιασμό βέλτιστης δρομολόγησης των αυτόνομων και ηλεκτρικών λεωφορείων σε αστικά δίκτυα, με μεταβαλλόμενα πρότυπα ζήτησης. Σε περιβάλλοντα με έντονες μεταβολές στην επιβατική ζήτηση, η παραδοσιακή δρομολόγηση με στατικά χρονοδιαγράμματα και ομοιογενή οχήματα αποδεικνύεται ανεπαρκής για την αποτελεσματική κάλυψη της ζήτησης, οδηγώντας συχνά σε λειτουργικές ανισορροπίες και αυξημένο κόστος λειτουργίας (H. Gao et al., 2023; J. Wu et al., 2021b). Ως αποτέλεσμα, η ανάγκη για ευέλικτες μεθοδολογίες που ενσωματώνουν δεδομένα ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν την προσαρμογή της διαδρομής και της χωρητικότητας καθίσταται επιτακτική. Συνεπώς, προκύπτει η ερευνητική πρόκληση της ανάπτυξης μοντέλων δρομολόγησης τα οποία να ενσωματώνουν στρατηγικές όπως η δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων και η δυναμική διαχείριση αρθρωτών μονάδων λεωφορείων. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων και η μείωση του λειτουργικού κόστους, χωρίς να μειώνεται η ποιότητα εξυπηρέτησης.

Στο πλαίσιο της αντιμετώπισης των προαναφερθέντων περιορισμών, η παρούσα εργασία προτείνει την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου δρομολόγησης στόλου πλήρως αυτόνομων και ηλεκτρικών αστικών λεωφορείων, το οποίο ενσωματώνει τη πολιτική δυνατότητας εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Η καινοτομία της προσέγγισης συνίσταται στη συνδυασμένη βελτιστοποίηση της κατανομής χωρητικότητας μέσω μονάδων αυτόνομων λεωφορείων και της προσαρμογής των διαδρομών με βάση τη χώρο-χρονική κατανομή της ζήτησης. Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει περιορισμούς μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, διασφαλίζοντας λειτουργική ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας και ποιότητας εξυπηρέτησης. Με τον τρόπο αυτό, καλύπτεται ένα υφιστάμενο ερευνητικό κενό που αφορά τη μοντελοποίηση ευέλικτης δρομολόγησης σε αστικά δίκτυα, όπου η δυναμική διαχείριση στόλου συνδέεται με τεχνολογίες αυτόνομης οδήγησης και χρονικά ενημερωμένων δεδομένων ζήτησης.

Η αξιοποίηση των ηλεκτρικών και αυτόνομων αστικών λεωφορείων επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της χωρητικότητας του στόλου στις πραγματικές συνθήκες ζήτησης, μέσω της τεχνολογίας σύζευξη και αποσύζευξη επιμέρους μονάδων σε πραγματικό χρόνο. Κατά τις ώρες αιχμής, η ενίσχυση της σύνθεσης με επιπλέον μονάδες μεγιστοποιεί την εξυπηρέτηση, ενώ σε

περιόδους μειωμένης ζήτησης η μείωση του αριθμού των μονάδων περιορίζει την ενεργειακή σπατάλη και τον κύκλο λειτουργίας των οχημάτων (Z. Gao et al., 2023; Next Future Transportation Inc., 2018). Η προσέγγιση αυτή έχει ήδη εφαρμοστεί σε ευρωπαϊκά δίκτυα. Στη Γαλλία, η Renault σε συνεργασία με τη εταιρία 'WeRide', υλοποιεί από το 2023 πιλοτικό πρόγραμμα σε αυτόνομα ηλεκτρικά μικρά λεωφορεία στην περιοχή Σατορού, με στόχο την ενίσχυση της επιχειρησιακής ευελιξίας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Kim et al., 2023). Αντίστοιχα, στο Μπαντ Μίρνμπαχ της Γερμανίας, εφαρμόζεται πολιτική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων σε συνδυασμό με ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία μικρής χωρητικότητας, τα οποία συνδέουν το κέντρο της πόλης με τον σιδηροδρομικό σταθμό, προσφέροντας βελτιωμένη τοπική εξυπηρέτηση με ελάχιστο λειτουργικό κόστος (Milakis et al., 2017; Next Future Mobility, 2018). Ταυτόχρονα, η προσέγγιση εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, δηλαδή η επιστροφή του λεωφορείου από μια προκαθορισμένη ενδιάμεση στάση, αντί να εκτελεί ολόκληρη τη γραμμή, προσφέρει πιο στοχευμένη εξυπηρέτηση εκεί όπου υπάρχει υψηλότερη ζήτηση και μειώνει τον συνολικό χρόνο ταξιδιού (D. Leffler, 2020; H. Salode & Ramamoorthy, 2024).

Οι παραπάνω στρατηγικές ανταποκρίνονται στις εγγενείς αδυναμίες των παραδοσιακών μοντέλων δρομολόγησης, τα οποία, λόγω της περιορισμένης ευελιξίας τους, παρουσιάζουν συχνά φαινόμενα υπερφόρτωσης κατά τις ώρες αιχμής και υπό-αξιοποίησης του στόλου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Η ανάγκη μετάβασης προς ευέλικτα και προσαρμοστικά μοντέλα δρομολόγησης καθίσταται κρίσιμη, καθώς μόνο μέσω αυτών είναι δυνατή η στοχευμένη διαχείριση της ζήτησης με ορθολογικό τρόπο, εξισορροπώντας την εξυπηρέτηση και το λειτουργικό κόστος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ευθυγραμμίζεται με αυτή την κατεύθυνση, αναδεικνύοντας τη σημασία της δυναμικής ανακατανομής πόρων και της ενσωμάτωσης στρατηγικών όπως η πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, ως απάντηση στην ανάγκη βελτιστοποίησης της εξυπηρέτησης με περιορισμένους πόρους, ενισχύοντας ταυτόχρονα την ευελιξία και την ανταπόκριση των αστικών λεωφορειών σε απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω προκλήσεις και τα αντίστοιχα παραδείγματα εφαρμογής, δίνεται έμφαση στη διερεύνηση και μοντελοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος αστικών συγκοινωνιών που συνδυάζει:

- Τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων
- Τη δρομολόγηση του αυτόνομων και ηλεκτρικών λεωφορείων

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, με στόχο την αποτύπωση των διεθνών πρακτικών που σχετίζονται με την εφαρμογή αυτών των συστημάτων στα αστικά λεωφορεία. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται πιλοτικά προγράμματα, όπως αυτό της εταιρείας NEXT με έδρα την Ιταλία, και αναλύονται τα οφέλη της χρήσης ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων αναφορικά με την ευελιξία των μετακινήσεων και τη βιώσιμη αστική κινητικότητα. Η συμβολή της πολιτικής εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων είναι

καινοτόμα και διαφέρει από τις παραδοσιακές πολιτικές που εφαρμόζονται στα συμβατικά λεωφορεία. Με την εισαγωγή των αυτόνομων ηλεκτρικών λεωφορείων στο χερσαίο αστικό σύστημα μεταφορών, έχουν αναδειχθεί τέτοιες πολιτικές με σκοπό την βελτίωση των υπηρεσιών του αστικού λεωφορείου, αλλά και την ποιότητα εξυπηρέτησης. Παράλληλα, αναφέρονται οι τεχνολογικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά την εφαρμογή αυτών των καινοτόμων λύσεων στα συστήματα μεταφορών όπως τα ξέρουμε σήμερα (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015; H. Gao et al., 2023; J. Wu et al., 2021b; Q. Zhang et al., 2024)

Συνεχίζοντας από την ανάλυση της δρομολόγησης και της δυναμικής διαχείρισης στόλου στα αστικά λεωφορεία, το Κεφάλαιο 3 εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτροκίνηση εισάγει μία νέα διάσταση στον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας. Η μετάβαση προς τα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία δεν περιορίζεται στη μείωση των εκπομπών και της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά επηρεάζει ουσιαστικά και τις στρατηγικές προγραμματισμού, φόρτισης και αξιοποίησης του στόλου. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης σε συστήματα αυτόνομης δρομολόγησης καθιστά εφικτή την ανάπτυξη ευφύων μοντέλων διαχείρισης, όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα συνδυάζεται με λειτουργική ευελιξία και βελτιστοποίηση της επιβατικής εξυπηρέτησης.

Ακολουθεί το Κεφάλαιο 4 στο οποίο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας, με επίκεντρο την ανάπτυξη και υλοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης τύπου Μικτού Ακαίρου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΜΓΠ). Το μοντέλο αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ τεχνολογίας, δομής και λειτουργίας του αυτόνομου λεωφορείου, σε συνδυασμό με την πολιτική εξυπηρέτησης, παρέχοντας τη δυνατότητα προσαρμογής σε μεταβαλλόμενο αριθμό στάσεων. Ειδικότερα, στο μοντέλο ενσωματώνονται μεταβλητές απόφασης που αφορούν την ενεργοποίηση ή μη της συντόμευσης διαδρομών, την ανάθεση των αρθρωτών μονάδων που συγκροτούν το αυτόνομο λεωφορείο ανά δρομολόγιο και στάση, καθώς και περιορισμοί που σχετίζονται με τη χωρητικότητα, την κάλυψη της ζήτησης και τις τεχνικές δυνατότητες σύζευξης και αποσύζευξης των μονάδων. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται σε περιβάλλον Python, ενώ η επίλυση γίνεται μέσω του λογισμικού επίλυσης Gurobi, το οποίο επιτρέπει την επεξεργασία σύνθετων περιορισμών και μεγάλου όγκου δεδομένων (Next Future Transportation Inc., 2018; A. Yanik & Yilmaz, 2023).

Το μοντέλο αξιοποιεί δεδομένα πραγματικής ή προβλεπόμενης ζήτησης, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αυτόνομου οχήματος, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (λειτουργικού, ενεργειακού) και την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του βαθμού επιβατικής εξυπηρέτησης. Επιπλέον, εισάγει περιορισμούς που αντανakλούν τις τεχνικές και επιχειρησιακές απαιτήσεις των συστημάτων των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, όπως η αποφυγή συνεχόμενων μη εξυπηρετήσεων της ίδιας στάσης αλλά και η απαίτηση ελάχιστης κάλυψης ανά γραμμή.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου σε ενδεικτικό σενάριο λεωφορειακής γραμμής της Λεμεσού. Περιλαμβάνεται η ανάλυση των παραγόμενων λύσεων, συγκρίσεις σεναρίων βάσει απόδοσης (σε όρους κόστους, ζήτησης και πληρότητας), καθώς και η αξιολόγηση της επιχειρησιακής ευελιξίας του μοντέλου. Η ανάλυση αυτή τεκμηριώνει

την ικανότητα της προτεινόμενης μεθόδου να ανταποκρίνεται σε δυναμικές κυκλοφοριακές και επιβατικές συνθήκες, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για φορείς σχεδιασμού δημόσιων συγκοινωνιών (Z. Gao et al., 2023; H. Wu et al., 2021).

Το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα βασικά ευρήματα της παρούσας μελέτης, με έμφαση στη συμβολή των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων και της τακτικής της εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων στον σχεδιασμό αποδοτικών, ευέλικτων και βιώσιμων αστικών συγκοινωνιών. Τονίζεται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου τύπου ΜΑΜΓΠ στην αντιμετώπιση προβλημάτων δυναμικής κατανομής πόρων, καθώς και η δυνατότητά του να αξιοποιήσει σε πραγματικό χρόνο δεδομένα ζήτησης και λειτουργικούς περιορισμούς. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η χρήση μονάδων αυτόνομου λεωφορείου και η στρατηγική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων οδηγούν σε σημαντική μείωση λειτουργικού κόστους και καλύτερη εξυπηρέτηση επιβατών, ειδικά σε δίκτυα με ανομοιόμορφη ζήτηση. Επίσης, επισημαίνεται η σημασία της τεχνολογικής υποδομής και της θεσμικής υποστήριξης για την επιτυχία τέτοιων συστημάτων.

Συνολικά, η παρούσα εργασία επιδιώκει να αναδείξει τη συμβολή των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, σε συνδυασμό με την πολιτική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, ως μία βιώσιμη και αποδοτική προσέγγιση για τα σύγχρονα συστήματα αστικών μεταφορών. Η ενσωμάτωση των μεθοδολογιών αυτών σε ένα ενιαίο μαθηματικό πλαίσιο ενισχύει τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των αστικών λεωφορειακών δικτύων, οδηγώντας σε βελτιωμένη ποιότητα επιβατικής εξυπηρέτησης, μειωμένο λειτουργικό κόστος και περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Μέσω της εν λόγω προσέγγισης επιδιώκεται η παροχή μιας τεκμηριωμένης και ολοκληρωμένης οπτικής ως προς τις προοπτικές, τις προκλήσεις και τις τεχνολογικές δυνατότητες που αναδύονται στη διαμόρφωση των μελλοντικών συστημάτων αστικών μεταφορών.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στον σχεδιασμό των μεταφορών, ο όρος «δρομολόγηση» αναφέρεται στον σχεδιασμό των διαδρομών που ακολουθούν τα αστικά λεωφορεία, με στόχο τη βέλτιστη κατανομή του στόλου και την αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση της ζήτησης. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί επικεντρώνεται σε τεχνολογικές και στρατηγικές καινοτομίες που μετασχηματίζουν αυτό το πεδίο.

Η συνεχώς αυξανόμενη αστικοποίηση και η εντατική χρήση των αστικών υποδομών αναδεικνύουν τη σημασία της καινοτομίας στα αστικά λεωφορεία. Η ανάγκη για βιώσιμα, ευέλικτα και αποδοτικά συστήματα γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, καθώς οι πόλεις παγκοσμίως αντιμετωπίζουν προκλήσεις σχετικά με την κυκλοφοριακή συμφόρηση, τις αυξημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ανεπάρκεια των υποδομών (D. Fagnant et al., 2015; UITP, 2021). Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως συστήματα αυτόνομων οχημάτων και η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence), ανοίγει νέους ορίζοντες στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των συστημάτων αστικών λεωφορείων (Gao, 2023; Wu, 2021).

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων αντιπροσωπεύει μία από τις πιο πρωτοποριακές προσεγγίσεις στον τομέα των αστικών συγκοινωνιών. Τα συγκεκριμένα συστήματα προσφέρουν δυναμική προσαρμογή χωρητικότητας σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων, στη μείωση των λειτουργικών εξόδων και στη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (H. Gao et al., 2023; Next Future Mobility, 2018; J. Wu et al., 2021b). Παράλληλα, η χρήση της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων μπορεί να ενισχύσει τη συχνότητα εξυπηρέτησης σε περιοχές υψηλής ζήτησης, βελτιστοποιώντας περαιτέρω τη λειτουργία του συνολικού δικτύου (H. Leffler, 2020; C. K. Salode & Ramamoorthy, 2024).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί αναλύει τη δυναμική αυτών των συστημάτων και των στρατηγικών τους. Στόχος είναι να διερευνηθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για την εφαρμογή τους στις σύγχρονες αστικές συγκοινωνίες (Clausius Scientific Press 2023; Shen 2023). Παράλληλα, εξετάζεται ο ρόλος της αυτόνομης οδήγησης, καθώς και η ενσωμάτωση αλγόριθμων που μπορούν να υλοποιήσουν δυναμικά το εν λόγω μοντέλο.

2.1 Η Δρομολόγηση στον Τακτικό Σχεδιασμό των Αστικών Λεωφορείων (scheduling)

Η δρομολόγηση αποτελεί έναν θεμελιώδη πυλώνα του σχεδιασμού δημοσίων συγκοινωνιών, καθώς καθορίζει τις διαδρομές που ακολουθούν τα μέσα μεταφοράς προκειμένου να εξυπηρετήσουν με τον πιο αποδοτικό τρόπο τη ζήτηση των επιβατών. Με τον όρο «δρομολόγηση», εννοείται η διαδικασία επιλογής και καθορισμού των γεωμετρικών διαδρομών ή γραμμών που θα ακολουθούν τα οχήματα εντός του μεταφορικού δικτύου. Η διαδικασία αυτή καθορίζει το «πού» θα μετακινηθεί ένα μέσο, επιπλέον από το «πότε» (χρονοπρογραμματισμός) ή τους «πόρους» (στόλος, οδηγοί κτλ.) με τους οποίους θα υλοποιηθεί αυτό. Στο πλαίσιο του συνολικού σχεδιασμού μεταφορών, η δρομολόγηση κατατάσσεται στη μεσαία βαθμίδα

σχεδιασμού και μπορεί να εξεταστεί τόσο στο τακτικό επίπεδο (tactical level) όσο και στο επίπεδο λειτουργίας των υπηρεσιών (operational level). Το επίπεδο αυτό γεφυρώνει τον στρατηγικό σχεδιασμό, όπου καθορίζονται μακροπρόθεσμοι στόχοι και βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου, με τον επιχειρησιακό σχεδιασμό, που αφορά την καθημερινή λειτουργία (π.χ. κατανομή στόλου, ωράρια οδηγών). Η δρομολόγηση, επομένως, καθορίζει τη χωρική διάσταση του συστήματος και επιτρέπει την περαιτέρω εξειδίκευση με όρους συχνοτήτων, προγραμματισμού και δυναμικής προσαρμογής.

Στο μάθημα “Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων” η δρομολόγηση αναλύθηκε όχι μόνο ως πρόβλημα επιλογής διαδρομών, αλλά και ως δυναμικό εργαλείο βελτιστοποίησης, ιδίως όταν συνδυάζεται με τεχνολογίες πρόβλεψης ζήτησης και στρατηγικές όπως η αρθρωτή δομή και η πολιτική που έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει μεταβαλλόμενο αριθμό στάσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ζήτησης με τις λιγότερες δυνατές διαδρομές, χωρίς να παραμελείτε η συνδεσιμότητα και η προσβασιμότητα του δικτύου. Επιπλέον, η δρομολόγηση αποτελεί μία από τις κύριες ενότητες του τακτικού σχεδιασμού, διαμορφώνοντας τη δομή του δικτύου και προετοιμάζοντας το έδαφος για τις επόμενες φάσεις, όπως ο καθορισμός συχνοτήτων, ο χρονοπρογραμματισμός και η ανάθεση στόλου (Gkiotsalitis, 2022).

Η εξέλιξη των τεχνολογιών και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των μεταφορικών απαιτήσεων έχουν μεταμορφώσει τη δρομολόγηση από μια απλή στατική διαδικασία σε ένα δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Η παρούσα εργασία αξιοποιεί τη δρομολόγηση, ως θεμέλιο για τον συνδυασμό τεχνολογιών ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, και της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, παρέχοντας τις βάσεις για ένα πιο ευέλικτο και αποδοτικό σύστημα αστικών συγκοινωνιών.

2.2 Πλαίσιο και Σημασία των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στην Δρομολόγηση αστικών λεωφορείων

Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο τεχνολογικού και οργανωτικού μετασχηματισμού της δρομολόγησης στα συστήματα αστικών λεωφορείων, εισάγοντας νέες παραμέτρους στον σχεδιασμό χωρητικότητας και προσαρμογής των διαδρομών. Πρόκειται για μια καινοτόμα σχεδιαστική προσέγγιση, όπου κάθε όχημα αποτελείται από διασυνδεδεμένες μονάδες που μπορούν να προστίθενται ή να αφαιρούνται ανάλογα με τις ανάγκες της διαδρομής. Η αρχιτεκτονική αυτή δεν αφορά μόνο τη μηχανολογική κατασκευή, αλλά υποδηλώνει μια ευρύτερη αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την έννοια της «χωρητικότητας» και της «ευελιξίας» στις μεταφορές (Z. Gao et al., 2023; Liu & Ceder, 2020).

Η εισαγωγή ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων σηματοδοτεί τη μετάβαση σε ευφυή και ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, όπου η λειτουργία δεν περιορίζεται από σταθερά δρομολόγια ή τυποποιημένες διαστάσεις στόλου, αλλά προσαρμόζεται δυναμικά στις εκάστοτε συνθήκες ζήτησης. Η λογική δυναμικής χωρικής και χρονικής προσαρμογής, δηλαδή ανάλογα με τη χρονική

στιγμή, τη γεωγραφική θέση ή τη ζήτηση, τοποθετεί τα Ψ στο κέντρο μιας στρατηγικής στροφής προς δυναμικά και «ζωντανά» μεταφορικά συστήματα (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015; Union Internationale des Transports Publics (UITP), 2021). Η ευελιξία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε ένα περιβάλλον όπου οι ανάγκες μετακίνησης χαρακτηρίζονται από ασυνεχή πρότυπα, και τα συστήματα οφείλουν να ανταποκρίνονται με ακρίβεια και ταχύτητα.

Παράλληλα, η υιοθέτηση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων συνδέεται στενά με τις εξελίξεις στον τομέα των ευφύων μεταφορών, της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και της ψηφιακής διαχείρισης στόλου. Η δυναμική σύζευξη και αποσύζευξη των μονάδων μπορεί να εναρμονιστεί με αλγορίθμους πρόβλεψης ζήτησης, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή τους σε σύγχρονα και αυτοματοποιημένα περιβάλλοντα λήψης αποφάσεων (Jiyu et al., 2024; Khan, 2022). Αυτός ο συνδυασμός υλικού και λογισμικού αναβαθμίζει τη λειτουργική ικανότητα των αστικών λεωφορείων, καθιστώντας τες ικανές να αντιμετωπίσουν σύνθετες προκλήσεις. Ιδιαίτερο παράδειγμα αποτελεί η προσομοίωση των J. Wu et al. (2021b), οι οποίοι αξιολόγησαν το σύστημα MAATS με χρήση πρακτόρων και δυναμικών αναθέσεων εν κινήσει, σε πιλοτικό δίκτυο αστικής πλέξης (J. Wu et al., 2021b).

Σε διεθνές επίπεδο, τα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία αρχίζουν να προσελκύουν εντεινόμενο ενδιαφέρον από τις εκάστοτε αρμόδιες αρχές μεταφορών, αλλά και από τους φορείς χάραξης πολιτικής καθώς εντάσσονται ολοένα και περισσότερο σε πιλοτικά προγράμματα ή μακροπρόθεσμους στρατηγικούς σχεδιασμούς (Kawaguchi & Hiraoka, 2020; Kim et al., 2023; Next Future Mobility, 2018). Η σημασία τους έγκειται όχι μόνο στις τεχνικές δυνατότητες που προσφέρουν, αλλά και στην ιδεολογική μετατόπιση που εκπροσωπούν, από το σταθερό και γραμμικό, στο ευέλικτο και προσαρμοστικό. Αυτή η μετατόπιση συνδέεται στενά με τη μετάβαση των πόλεων προς πιο βιώσιμες, έξυπνες και ανθεκτικές μορφές κινητικότητας.

Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στη σύγχρονη συγκοινωνιακή στρατηγική δεν αποτελεί απλώς επιλογή τεχνολογικής αναβάθμισης, αλλά αναδεικνύεται σε εργαλείο αναδιοργάνωσης και μεταρρύθμισης του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται, υλοποιούνται και διαχειρίζονται τα συστήματα αστικών λεωφορείων.

2.3 Οφέλη της Εφαρμογής των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στη Δρομολόγηση

Η εφαρμογή των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη δρομολόγηση των αστικών συγκοινωνιών, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή των διαδρομών, της συχνότητας και της χωρητικότητας σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες ζήτησης. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων αφορά στη δυνατότητα ευέλικτης διαχείρισης της χωρητικότητας σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και χρονικές περιόδους (H. Gao et al., 2023; H. Wu et al., 2021). Μέσω της προσθαφαίρεσης αρθρωτών μονάδων, η χρήση πόρων βελτιστοποιείται, χωρίς την ανάγκη μόνιμης αύξησης ή μείωσης του μεγέθους του στόλου. Αντίστοιχη προσέγγιση προτείνουν και οι Yucheng Tian et al., 2022, αξιοποιώντας Μεικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (ΜΑΓΠ) για τη βέλτιστη διαμόρφωση συνθέσεων λεωφορείων και την επιλογή κατάλληλων σταθμών επανατοποθέτησης βάσει της εκάστοτε ζήτησης.

Σε περιόδους υψηλής κίνησης, η προσθήκη επιπλέον μονάδων επιτρέπει την κάλυψη μεγαλύτερου αριθμού επιβατών, ενώ σε περιόδους χαμηλής ζήτησης η αφαίρεσή τους συμβάλλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του λειτουργικού κόστους (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015; Milakis et al., 2017). Η προσαρμοστικότητα αυτή ενισχύεται περαιτέρω όταν συνδυάζεται με ηλεκτροκίνηση, οδηγώντας σε σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων, όπως καταγράφηκε σε πιλοτικά προγράμματα σε γαλλικές πόλεις, όπου σημειώθηκε μείωση περίπου 15% στις εκπομπές CO₂ (Milakis et al., 2017).

Παράλληλα, η αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου (μέσω αισθητήρων, συστημάτων εποπτείας και ανάλυσης ζήτησης) βελτιώνει ουσιαστικά την επιβατική εμπειρία. Σε βόρειο-ευρωπαϊκά δίκτυα, η εισαγωγή αυτόνομων λεωφορείων σε γραμμές υψηλής ζήτησης οδήγησε σε αύξηση της συχνότητας και σημαντική βελτίωση της ικανοποίησης των επιβατών (Next Future Mobility, 2018). Αντίστοιχα, σε προαστιακές ζώνες της Κεντρικής Ευρώπης, η δυναμική προσαρμογή της λειτουργίας μείωσε καθυστερήσεις και βελτίωσε την αξιοπιστία των δρομολογίων (Q. Zhang et al., 2024).

Η επιλογή επικέντρωσης της παρούσας ερευνητικής εργασίας στα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία αντανakλά την ευρύτερη διεθνή τάση για ανάπτυξη ευέλικτων και βιώσιμων συστημάτων μεταφοράς, ικανών να ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις της επιβατικής ζήτησης και στις περιβαλλοντικές επιταγές. Τα οχήματα αυτά συνδυάζουν τεχνολογική καινοτομία, λειτουργική ευελιξία και δυνατότητα εφαρμογής σε πραγματικά πολύ-παραμετρικά περιβάλλοντα (Gkiotsalitis & Cats, 2021; Liu & Ceder, 2020), καθιστώντας τα ιδιαιτέρως κατάλληλα για περιοχές με σημαντική διακύμανση ζήτησης, όπως τουριστικοί προορισμοί και αστικά κέντρα με μεταβαλλόμενες πληθυσμιακές συνθέσεις.

Η διεθνής εμπειρία επιβεβαιώνει την αυξανόμενη στρατηγική σημασία των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, καθώς πόλεις όπως η Στοκχόλμη, η Ζυρίχη, το Τόκιο και η Σεούλ έχουν ενσωματώσει τέτοια συστήματα είτε σε πιλοτικό επίπεδο είτε σε πλήρη εφαρμογή (Kawaguchi & Hiraoka, 2020). Επιπλέον, μοντέλα αξιολόγησης όπως αυτό των Ivan Dakic et al., (2021) δείχνουν ότι η λειτουργική αποδοτικότητα μπορεί να ενισχυθεί μέσω βελτιστοποίησης της χρονικής απόστασης μεταξύ δρομολογίων και μείωσης του συνολικού χρόνου μετακίνησης.

Συνολικά, η μελέτη των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων συμβάλλει ουσιαστικά στην κατανόηση και τον ανασχεδιασμό των αστικών συγκοινωνιών, προωθώντας λύσεις που συνδυάζουν περιβαλλοντικά, οικονομικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα, και διαμορφώνοντας έτσι το πλαίσιο για τα αστικά λεωφορεία του μέλλοντος.

2.4 Οικονομική και Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων

Η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί βασικό παράγοντα στον σχεδιασμό δρομολόγησης με ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία, καθώς τα οχήματα αυτά επηρεάζουν τη διαμόρφωση των διαδρομών, την κατανομή του στόλου και το λειτουργικό κόστος. Η εισαγωγή τους συνεπάγεται αυξημένες αρχικές επενδύσεις για την προμήθεια αρθρωτών οχημάτων και την ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών (H. Gao et al., 2023; H. Wu et al., 2021). Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη

μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και οι μικρότερες ανάγκες συντήρησης συμβάλλουν στη σημαντική μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας (Liu & Ceder, 2020; Milakis et al., 2017). Επιπλέον, η ευελιξία στη διαχείριση του στόλου επιτρέπει την προσαρμογή της χωρητικότητας στη ζήτηση, περιορίζοντας τη σπατάλη πόρων. Η χρήση μοντέλων βελτιστοποίησης έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην κατανομή οχημάτων και στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (Xumei Chen et al., 2019). Παράλληλα, η υιοθέτηση κατάλληλων χρηματοδοτικών σχημάτων, όπως συνεργασίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, έχει διευκολύνει την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων σε αρκετές πόλεις (Forum, 2023; Oikonomou et al., 2019). Συνολικά, τα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία συνδυάζουν οικονομική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των αστικών συγκοινωνιών και υποστηρίζοντας την μετάβαση σε συστήματα μεταφορών με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Khan, 2022; Q. Zhang et al., 2024).

2.5 Προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στα χερσαία συστήματα αστικών λεωφορείων

Παρά την ύπαρξη σημαντικών οφελών, η ενσωμάτωση ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων στη δρομολόγηση αστικών συγκοινωνιών συνοδεύεται από προκλήσεις τεχνικού, οικονομικού, κοινωνικού και θεσμικού χαρακτήρα, γεγονός που αναδεικνύει τη σύνθετη φύση του σχεδιασμού και της υλοποίησής τους (Clausius Scientific Press, 2023a). Σε τεχνικό επίπεδο, κεντρική πρόκληση αποτελεί η ανάπτυξη υποδομών σύζευξης και αποσύζευξης των αρθρωτών μονάδων, οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο μηχανισμό ευθυγράμμισης και αυτοματοποιημένης σύνδεσης, καθώς και ενσωμάτωση συστημάτων αισθητήρων και τεχνολογιών IoT για τον έλεγχο και τον συντονισμό των λειτουργιών (J. Wu et al., 2021b). Παράλληλα, η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε ήδη υφιστάμενες αστικές δομές μπορεί να αυξήσει το κόστος υλοποίησης και να καθυστερήσει την εφαρμογή (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015). Επιπλέον, η λειτουργική βελτιστοποίηση απαιτεί εξελιγμένους αλγόριθμους πρόβλεψης ζήτησης και δρομολόγησης, ικανούς να διαχειρίζονται δεδομένα πραγματικού χρόνου (Huang et al., 2020).

Σε οικονομικό επίπεδο, το υψηλό αρχικό κόστος παραμένει βασικό εμπόδιο, καθώς περιλαμβάνει επενδύσεις σε αυτόνομα οχήματα, σταθμούς εξυπηρέτησης και τεχνολογικές αναβαθμίσεις. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των αναγκών συντήρησης, σε συνδυασμό με κατάλληλα χρηματοδοτικά μοντέλα (π.χ. συνεργασίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα), μπορεί να αντισταθμίσει το αρχικό κόστος και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα του συστήματος (Forum, 2023; Oikonomou et al., 2019).

Οι κοινωνικές προκλήσεις σχετίζονται με την αποδοχή των αυτόνομων συστημάτων από το κοινό και την ανάγκη ενίσχυσης της εμπιστοσύνης σε ζητήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας (Milakis et al., 2017; Q. Zhang et al., 2024). Η εκπαίδευση του προσωπικού και η ενημέρωση των χρηστών αποτελούν προϋποθέσεις για την επιτυχή υιοθέτηση, όπως παραδείγματα εφαρμογών σε ευρωπαϊκές πόλεις (βλ. Κεφάλαιο 2.3) (Jiyu et al., 2024).

Τέλος, η πολιτική και κανονιστική διάσταση έχει καθοριστική σημασία. Η απουσία ολοκληρωμένων ρυθμιστικών πλαισίων για ζητήματα όπως η ευθύνη σε περίπτωση ατυχημάτων και η προστασία δεδομένων μπορεί να επιβραδύνει την εφαρμογή. Η ανάπτυξη σαφών θεσμικών μηχανισμών, όπως στην περίπτωση της Γερμανίας, μπορεί να επιταχύνει την ενσωμάτωση σε αστικά δίκτυα (Favarò et al., 2018).

Συνολικά, η επιτυχής εφαρμογή ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων απαιτεί συντονισμένη αντιμετώπιση τεχνολογικών, οικονομικών, κοινωνικών και θεσμικών παραμέτρων. Με την κατάλληλη υποστήριξη, τα συστήματα αυτά μπορούν να εξελιχθούν σε πυρήνα βιώσιμων, ευέλικτων και επιχειρησιακά αποδοτικών αστικών μεταφορών (Οικονομου et al., 2022; Tirachini et al., 2011).



Εικόνα 1:Σύζευξη μονάδων αυτόνομου λεωφορείου

Πηγή: J. Wu et al., 2021b

Σε τεχνικό επίπεδο, κεντρική πρόκληση αποτελεί η ανάπτυξη υποδομών σύζευξης και αποσύζευξης των αυτόνομων μονάδων, οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο μηχανισμό ευθυγράμμισης και αυτοματοποιημένης σύνδεσης, καθώς και ενσωμάτωση συστημάτων αισθητήρων και τεχνολογιών IoT για τον έλεγχο και τον συντονισμό των λειτουργιών (J. Wu et al., 2021b). Παράλληλα, η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε ήδη υφιστάμενες αστικές δομές μπορεί να αυξήσει το κόστος υλοποίησης και να καθυστερήσει την εφαρμογή (D. J. Fagnant & Kockelman). Επιπλέον, η λειτουργική βελτιστοποίηση απαιτεί εξελιγμένους αλγορίθμους πρόβλεψης ζήτησης και δρομολόγησης, ικανούς να διαχειρίζονται δεδομένα πραγματικού χρόνου (Huang et al., 2020).

2.6 Ενδεικτικά Διεθνή Παραδείγματα Εφαρμογών στην Δρομολόγηση (scheduling)

Σε διεθνές επίπεδο, η έρευνα και η πιλοτική εφαρμογή αυτόνομων λεωφορείων, αρθρωτών λύσεων και στρατηγικών εμπεριέχει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. Η παρούσα ενότητα διαχωρίζει ρητά τα παραδείγματα σε τέσσερις κατηγορίες: (1) Αυτόνομα λεωφορεία, (2) Αυτόνομα λεωφορεία με πολιτική δυνατότητας εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, (3) Αυτόνομα και ηλεκτρικά λεωφορεία, (4) Αυτόνομα και ηλεκτρικά λεωφορεία με πολιτική δυνατότητας εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, αναδεικνύοντας ποικίλα προγράμματα από διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα διεθνώς.

2.6.1 Αυτόνομα λεωφορεία

Στη Λυών (Γαλλία), δύο ηλεκτροκίνητα αυτόνομα λεωφορεία χωρίς οδηγό ξεκίνησαν πειραματικά δρομολόγια στο κέντρο της πόλης, σε συγκεκριμένη διαδρομή με προκαθορισμένες στάσεις. Το εν λόγω πιλοτικό πρόγραμμα διήρκεσε περίπου ένα έτος, αποτελώντας παγκόσμια πρώτη δοκιμή μεγάλης κλίμακας. Η τεχνολογία βασίζεται σε αισθητήρες (LiDAR, κάμερες, GPS) που επιτρέπουν την ασφαλή πλοήγηση σε αστικό περιβάλλον, ενώ στόχοι του προγράμματος ήταν η αξιολόγηση αποδοτικότητας και η αποδοχή από το κοινό. Οι πρώτες εντυπώσεις ήταν θετικές, υπογραμμίζοντας τη μείωση θορύβου και τη φιλικότητα στο περιβάλλον.

Στο Αμβούργο Γερμανίας, από το 2019 λειτουργεί πιλοτικά η γραμμή 109, την οποία εξυπηρετεί αυτόνομο λεωφορείο, εξοπλισμένο με προηγμένα συστήματα αισθητήρων (LiDAR, ραντάρ, κάμερες) και τεχνητής νοημοσύνης, το οποίο ανιχνεύει εμπόδια, οχήματα και πεζούς. Στόχος ήταν η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, η επίδειξη αξιοπιστίας σε πραγματικές συνθήκες και η βιώσιμη κινητικότητα. Οι πρώτες μετρήσεις δείχνουν βελτίωση στον χρόνο μετακίνησης και θετική υποδοχή από φοιτητές και προσωπικό του πανεπιστημίου (Milakis et al., 2017).

Στο Nanyang Technological University (NTU) της Σιγκαπούρης, σε συνεργασία με τη Volvo, αναπτύχθηκαν αυτόνομα ηλεκτρικά λεωφορεία για την εξυπηρέτηση μετακινήσεων εντός της πανεπιστημιούπολης. Το σύστημα αξιοποιεί αισθητήρες LiDAR για χαρτογράφηση του ο περιβάλλοντος, GPS υψηλής ακρίβειας για πλοήγηση και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για προσαρμοστική οδήγηση, με στόχο την έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών ασφάλειας και τη μείωση των εκπομπών στο τοπικό μεταφορικό σύστημα (H. Gao et al., 2023). Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η εταιρεία EasyMile, σε συνεργασία με δημοτικούς φορείς, πραγματοποίησε πιλοτικές δοκιμές αυτόνομων λεωφορείων σε προκαθορισμένες αστικές διαδρομές χαμηλής ταχύτητας (12–20 km/h). Η πιλοτική εφαρμογή επικεντρώθηκε στη συλλογή δεδομένων για την ενεργειακή κατανάλωση, τις ανάγκες συντήρησης και την αλληλεπίδραση με πεζούς και οχήματα. Παρά τα θετικά αρχικά αποτελέσματα, αναδείχθηκαν προκλήσεις που αφορούν το ρυθμιστικό πλαίσιο και την κοινωνική αποδοχή της αυτόνομης μετακίνησης (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015).

2.6.2 Αυτόνομα λεωφορεία με Δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων διαδρομής

Στη Γαλλία, από το 2020, αυτόνομα λεωφορεία εκτελούν μια διαδρομή περίπου 5 χιλιομέτρων με επτά στάσεις στην πόλη Κρεστ, παρέχοντας σύντομη και κυκλική σύνδεση μεταξύ βασικών σημείων. Στο εσωτερικό υπάρχει χειριστής για λόγους ασφαλείας, ωστόσο η λειτουργία καλύπτεται από προηγμένη τεχνολογία χαρτογράφησης σε πραγματικό χρόνο. Στόχος ήταν η βελτίωση της αστικής κινητικότητας για μικρές αποστάσεις και η αποσυμφόρηση του κέντρου.

Στο Μπαντ Μπίρνμπαχ (Γερμανία), από το 2017, ένα αυτόνομο λεωφορείο συνδέει το κέντρο της πόλης με τον τοπικό σιδηροδρομικό σταθμό, σε απόσταση περίπου 700 μέτρων. Πρόκειται για ένα ιδανικό παράδειγμα διάνυσης μικρής απόστασης, καθώς η ταχύτητα λειτουργίας δεν ξεπερνά τα 15 χιλιόμετρα/ώρα. Το πρόγραμμα δίνει έμφαση στη βελτίωση της προσβασιμότητας για ηλικιωμένους και τουρίστες, ενώ μελλοντικά μπορεί να επεκταθεί σε μεγαλύτερα δρομολόγια (Next Future Mobility, 2018).

2.6.3 Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία

Στη Γαλλία, η Renault, σε συνεργασία με την WeRide, ανακοίνωσε το 2023 την ανάπτυξη στόλου αυτοματοποιημένων ηλεκτρικών μικρών λεωφορείων, με προγραμματισμένη ένταξη στο δίκτυο δημόσιων συγκοινωνιών του Châteauroux Métropole από το 2026. Το σύστημα βασίζεται σε αρθρωτή λογική, όπου οι επιμέρους μονάδες (mini-buses) μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή να συνδέονται μεταξύ τους σε ώρες αιχμής, σχηματίζοντας μεγαλύτερες συνθέσεις για την αύξηση της χωρητικότητας. Οι στόχοι της εφαρμογής περιλαμβάνουν τη μείωση των εκπομπών ρύπων, την ενίσχυση της λειτουργικής ευελιξίας και την αξιοποίηση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της ασφάλειας του συστήματος (STARTCOM ΕΠΕ, 2025).

Σε διεθνές επίπεδο, η Next Future Transportation (NFT) έχει αναπτύξει αυτόνομα λεωφορεία (modular bus), τα οποία λειτουργούν ως ανεξάρτητες μονάδες με δυνατότητα αυτόματης σύζευξης και αποσύζευξης μεταξύ τους. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τον δυναμικό σχηματισμό μεγαλύτερων ή μικρότερων συνθέσεων, ανάλογα με τον φόρτο των επιβατών, διευκολύνοντας την ευελιξία στη χωρητικότητα και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του στόλου. Αντίστοιχα, το Olli της Local Motors (ΗΠΑ) αποτελεί ένα αυτόνομο λεωφορείο μικρής κλίμακας, κατασκευασμένο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο έχει σχεδιαστεί με στόχο την ευκολία αναβάθμισης και προσαρμογής. Η δυνατότητα σύζευξης και αποσύζευξης καθιστά το όχημα κατάλληλο για την εξυπηρέτηση διάφορης ζήτησης (Next Future Mobility, 2018).

2.6.4 Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία με Δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων διαδρομής

Ο συνδυασμός της δομής των αυτόνομων λεωφορείων με μια στρατηγική δυναμικής εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων αποσκοπεί στη μέγιστη αξιοποίηση της συχνότητας των δρομολογίων και στη βέλτιστη διαχείριση της διαθέσιμης χωρητικότητας, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην αποφυγή άσκοπων διαδρομών σε περιόδους ή ζώνες χαμηλής ζήτησης. Αν και δεν υπάρχουν ακόμη ευρέως διαδεδομένα παραδείγματα που να υλοποιούν πλήρως αυτόν τον συνδυαστικό σχεδιασμό, δηλαδή τη χρήση λεωφορείων με δυνατότητα σύζευξης και αποσύζευξης βαγονιών σε συνδυασμό με στρατηγικές δυναμικής εξυπηρέτησης επιλεγμένων στάσεων ανάλογα με τη ζήτηση, πιλοτικές δοκιμές και ερευνητικά εγχειρήματα βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη. Οι δοκιμές αυτές υλοποιούνται κυρίως σε περιβάλλοντα ελεγχόμενης κυκλοφορίας, όπως πανεπιστημιούπολεις, αεροδρόμια ή μεγάλα τουριστικά συγκροτήματα. Σενάρια στα οποία ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία προσαρμόζονται ως προς τον αριθμό των βαγονιών για την κάλυψη αυξημένης ζήτησης και εκτελούν κυκλικές διαδρομές με επιλεκτική εξυπηρέτηση στάσεων σε ζώνες υψηλής κυκλοφορίας έχουν ήδη προταθεί από ερευνητικές ομάδες στην Ευρώπη (Milakis et al., 2017; H. Wu et al., 2021b). Αν και οι περισσότερες από αυτές τις πρωτοβουλίες βρίσκονται ακόμη σε θεωρητικό ή πιλοτικό στάδιο περιορισμένης κλίμακας, αναδεικνύουν με σαφήνεια τη δυναμική κατεύθυνση εξέλιξης των σύγχρονων αστικών συγκοινωνιών.

2.7 Μοντέλα στα Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία

Η δρομολόγηση ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων βασίζεται στη κατασκευή και χρήση των μοντέλων, τα οποία υποστηρίζουν τον σχεδιασμό, τη διαχείριση και την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων. Η αποτελεσματικότητα αυτών των εργαλείων σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που αξιοποιούνται για την προσαρμογή των υπηρεσιών στις πραγματικές ανάγκες (D. J. Fagnant & Kockelman, 2015; J. Wu et al., 2021b) .

Ένα από τα πλέον αξιοποιήσιμα εργαλεία στο πλαίσιο της δρομολόγησης ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων είναι το μοντέλο πρόβλεψης επιβατικής ζήτησης (Traffic Demand Prediction Model – TDPM), το οποίο λειτουργεί υποστηρικτικά στον σχεδιασμό δυναμικά βελτιστοποιημένων διαδρομών. Αντί να εστιάζει στην πρόβλεψη κυκλοφοριακών ροών, το TDPM συγκεντρώνει και επεξεργάζεται δεδομένα επιβατικής ζήτησης από αισθητήρες, πλατφόρμες γεω-εντοπισμού και συστήματα αυτόματης καταγραφής επιβιβάσεων, προκειμένου να τροφοδοτήσει μαθηματικά μοντέλα δρομολόγησης με ακριβείς παραμέτρους εισόδου. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης που αξιοποιούνται (όπως τα νευρωνικά δίκτυα ή οι αλγόριθμοι παλινδρόμησης) επιτρέπουν την ανίχνευση χώρο-χρονικών προτύπων επιβατικής ζήτησης βάσει της ώρας, της γεωγραφικής θέσης, της εποχικότητας και των κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών των επιβατών (H. Gao et al., 2023; Ye & Yamamoto, 2019). Για την επίλυση των προτεινόμενων μοντέλων χρησιμοποιούνται συνήθως εξειδικευμένα λογισμικά επίλυσης (όπως οι CPLEX και Gurobi), καθώς και ευρετικοί ή μεταευρετικοί αλγόριθμοι, ανάλογα με τη φύση και το βαθμό πολυπλοκότητας του προβλήματος, είτε αυτό είναι γραμμικό είτε μη γραμμικό.

- Οι (Ye & Yamamoto, 2019) δημιούργησαν έναν αλγόριθμο με σκοπό την βελτιστοποίηση των διαδρομών, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη γεωγραφική απόσταση, τις κυκλοφοριακές συνθήκες και τη χωρητικότητα στόλου. Παράλληλα, η μέθοδος επίλυσης του γενετικού αλγόριθμου (GA) (μεταευρετικός αλγόριθμος) επιτρέπει την βελτιστοποίηση με πολλά κριτήρια, όπως την ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού και την ενεργειακή αποδοτικότητα, ακόμα και αν προϋποθέτει υψηλή υπολογιστική ισχύ και μειωμένο υπολογιστικό χρόνο.
- Οι αλγόριθμοι ροής δικτύου (network flow algorithms) μπορούν να υποστηρίξουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης δρομολογίων, επιτρέποντας τη δυναμική ανάθεση του στόλου σε διαδρομές με βάση τη ζήτηση και τις επιχειρησιακές συνθήκες. Αποτελούν κρίσιμο στοιχείο των μαθηματικών μοντέλων δρομολόγησης, καθώς επιτρέπουν την ανακατανομή των μονάδων στο δίκτυο με τρόπο που ελαχιστοποιεί τη σπατάλη πόρων και μεγιστοποιεί την πληρότητα. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλή μεταβλητότητα ζήτησης, όπου η προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη (Next Future Mobility, 2018). Προσομοιώσεις δείχνουν ότι η ενσωμάτωσή τους βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνει τα περιστατικά μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, καθιστώντας το μοντέλο δρομολόγησης πιο αποδοτικό και επιχειρησιακά εφαρμόσιμο.

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών είναι καθοριστική για την προσαρμογή των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων σε ένα αστικό περιβάλλον με δυναμικά μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Η ανάπτυξη προηγμένων εργαλείων προσομοίωσης, καθώς και η ενσωμάτωση πιο αποτελεσματικών μεθόδων πρόβλεψης και βελτιστοποίησης, αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα και την επιχειρησιακή αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών (Milakis et al., 2017).

2.8 Μοντέλα με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων στα Ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία

Η στρατηγική της εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων της διαδρομής αποτελεί μια προχωρημένη τακτική ανασχεδιασμού διαδρομών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανομής στόλου και της εξυπηρέτησης σε δίκτυα αστικών λεωφορείων. Στόχος της στρατηγικής είναι η αποδοτικότερη χρήση του στόλου, αναστρέφοντας την κατεύθυνση των οχημάτων πριν την ολοκλήρωση της πλήρους διαδρομής, σε επιλεγμένες στάσεις υψηλής ζήτησης. Η εφαρμογή της στα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία καθίσταται ιδιαίτερα αποδοτική, καθώς η δομή των αυτόνομων οχημάτων επιτρέπει την δυναμική προσαρμογή της χωρητικότητας και τον ανασχεδιασμό της εξυπηρέτησης σε πραγματικό χρόνο.

Η πρώτη κατηγορία μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για τη πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων αφορά μοντέλα γραμμικού και Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ), οι οποίες επιδιώκουν τον προσδιορισμό των βέλτιστων σημείων μη εξυπηρέτησης στάσεων καθώς και την κατανομή του στόλου μεταξύ πλήρων και μερικών διαδρομών. Στο έργο των Tirachini et al. (2011), αναπτύσσεται ένα μοντέλο το οποίο επιλύεται με ΜΑΓΠ λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό λειτουργικό κόστος, τις χρονικές απαιτήσεις επιβατών και τη συχνότητα εξυπηρέτησης. Το μοντέλο προσδιορίζει τον βέλτιστο αριθμό δρομολογίων με και χωρίς δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, μεγιστοποιώντας την εξυπηρέτηση επιβατών σε κρίσιμα σημεία του δικτύου, ενώ διατηρεί επιχειρησιακή ισορροπία στο σύστημα (Tirachini et al., 2011).

Επιπλέον, στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης συμβάλλουν στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας της δυνατότητας εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων όταν η ζήτηση των επιβατών παρουσιάζει αβεβαιότητα ή έντονες διακυμάνσεις. Ο (H. Leffler, 2020) ανέπτυξε ένα μοντέλο προσομοίωσης με χρήση της μεθόδου επίλυσης Monte Carlo, το οποίο δοκιμάζει τη συμπεριφορά του δικτύου σε διάφορα επίπεδα μεταβλητότητας της ζήτησης και αξιολογεί την επίδραση εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων ως προς την πληρότητα, τη συχνότητα και τη μέση καθυστέρηση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκ των προτέρων πρόβλεψη των επιπτώσεων της στρατηγικής σε διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες, προτού αυτή υιοθετηθεί στην πράξη.

Στην ίδια κατεύθυνση, τα μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού ενσωματώνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων της διαδρομής ανάλογα με την προβλεπόμενη ζήτηση ανά στάση. Στη μελέτη των (S. Yanik & Yilmaz, 2023), αναπτύσσεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης με χωροχρονική μεταβλητότητα, στο οποίο εισάγονται η πληρότητα οχήματος, η

επιβατική ζήτηση ανά στάση και οι χρονικοί περιορισμοί εξυπηρέτησης. Το μοντέλο λαμβάνει δυναμικές αποφάσεις μη εξυπηρέτησης στάσεων, εφαρμόζοντας κριτήρια ζήτησης και λειτουργικής πίεσης, επιτρέποντας την προσαρμογή της δρομολόγησης του στόλου σε πραγματικό χρόνο με στόχο τη μείωση του κόστους και την αποτροπή της ανεπαρκούς εξυπηρέτησης.

Η τεχνολογική υποστήριξη διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη δυναμική προσαρμογή των δρομολογίων, επιτρέποντας την άμεση ανταπόκριση στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Οι σύγχρονες εφαρμογές μηχανικής μάθησης (machine learning) και οι πλατφόρμες IoT ενισχύουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, προσφέροντας συνεχή ροή δεδομένων σχετικά με την πληρότητα των οχημάτων, τη ζήτηση ανά στάση και τους χρονικούς περιορισμούς εξυπηρέτησης. Στο πλαίσιο αυτό, το μοντέλο των A. Yanik & Yilmaz, (2023) αξιοποιεί δυναμικό προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο, επιτυγχάνοντας βελτιστοποιημένη δρομολόγηση αστικών λεωφορείων μέσω ενσωμάτωσης δεδομένων IoT, χωρίς να απαιτείται σταθερός αριθμός στάσεων ανά δρομολόγιο.

Η καινοτομία δεν εντοπίζεται μόνο στη χρήση τεχνολογιών, αλλά στην ενσωμάτωσή τους στη μαθηματική μοντελοποίηση της δρομολόγησης στα μοντέλα με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, ενσωματώνοντας μεταβαλλόμενη ζήτηση, χωρητικότητα και χρονικούς περιορισμούς. Το Κεφάλαιο 4 αναλύει αναλυτικά την εν λόγω προσέγγιση, παρουσιάζοντας ένα πλήρες μαθηματικό πλαίσιο βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Python.

3. Ηλεκτροκίνηση και Βελτιστοποίηση Κόστους στα Συστήματα Ηλεκτρικών και Αυτόνομων Λεωφορείων

Η ηλεκτροκίνηση στα συστήματα αστικών συγκοινωνιών εισάγει μια νέα διάσταση στον λειτουργικό σχεδιασμό των γραμμών, καθώς συνοδεύεται από σημαντικές απαιτήσεις ενεργειακής διαχείρισης και επανακαθορίζει τις στρατηγικές δρομολόγησης και στάθμευσης. Η ανάγκη για αποτελεσματική ενσωμάτωση των ηλεκτρικών λεωφορείων στα σύγχρονα ευφυή δίκτυα μεταφοράς έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μοντέλων που συνυπολογίζουν τον τύπο και τη θέση των σταθμών φόρτισης, την αυτονομία των οχημάτων, και τον χρονικό σχεδιασμό των στάσεων ανάμεσα στα δρομολόγια (Gkiotsalitis et al., 2025). Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η επιλογή μεταξύ αργής και ταχείας φόρτισης αντανakλά διαφορετικές λειτουργικές στρατηγικές. Η αργή φόρτιση εφαρμόζεται συνήθως σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, όπως κατά τις νυχτερινές ώρες, ενώ η ταχεία φόρτιση απαιτεί υποδομές υψηλής ισχύος (π.χ. παντογράφοι), παρέχοντας όμως τη δυνατότητα αναπλήρωσης της ενεργειακής αυτονομίας κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου λειτουργίας (Gkiotsalitis et al., 2025). Οι παράμετροι αυτές ενσωματώνονται σε προβλήματα Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ), με στόχο τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης και του αριθμού των σταθμών φόρτισης.

Ωστόσο, πέρα από το τεχνικό σκέλος της φόρτισης, η ενεργειακή στρατηγική καθίσταται ουσιαστική όταν εξετάζεται υπό το πρίσμα των λειτουργικών δυνατοτήτων των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων. Τα αυτόνομα λεωφορεία, λόγω της δομής τους σε μονάδες σύζευξης και αποσύζευξης, προσφέρουν υψηλή ευελιξία στην ενεργειακή διαχείριση, καθώς κάθε μονάδα μπορεί να φορτίζεται ανεξάρτητα και να επανεντάσσεται στο σύστημα σύζευξης ανάλογα με τη ζήτηση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη στοχευμένη φόρτιση επιμέρους μονάδων χωρίς την

ανάγκη απόσυρσης ολόκληρου του οχήματος από το δίκτυο.

Ειδικότερα, ο ευέλικτος σχεδιασμός του αυτόνομου λεωφορείου επιτρέπει την άμεση ανταπόκριση στις τοπικές συνθήκες ζήτησης, και την άμεση προσαρμογή του συστήματος αυτόνομου λεωφορείου σε πραγματικό χρόνο.

Πίνακας 1:Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Επιστημονική Εργασία (έτος)	Μεταβλητές Απόφασης	Στόχος	Τύπος Μοντέλου / Μέθοδος Επίλυσης	Δίκτυο / Τόπο (πόλη, χώρα) Εφαρμογής
(Zijia Fu et al., 2023)	- Αναθέσεις οχημάτων, δρομολόγια - Μεταφορές επιβατών - Σύζευξη/αποσύζευξη	Ελαχιστοποίηση κόστους και χρόνου επιβατών	ΜΑΓΠ + Steiner-tree inspired Heuristic Ευρετική Μέθοδος εμπνευσμένη από το πρόβλημα του Δέντρου Steiner	Μεταφορικό δίκτυο 378 κόμβων / Anaheim, ΗΠΑ
(Jiyu et al., 2024)	- Αριθμός MAVs (Modular Autonomous Vehicles) ανά διαδρομή - Χρόνος Μεταξύ Διαδοχικών ταξιδιών - Σύζευξη/αποσύζευξη	Ελαχιστοποίηση κόστους MAV και χρόνου επιβατών	Μεικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΑΜΓΠ) με μη γραμμικούς περιορισμούς και βηματικές συναρτήσεις, μέσω του λογισμικού DICOPT - GAMS.	Πραγματική λεωφορειακή γραμμή / Dandong, Κίνα
(Gkiotsalitis, 2019)	Ποιες στάσεις παραλείπονται σε κάθε διαδρομή	Ελαχιστοποίηση κόστους σε περιπτώσεις χειρότερου χρόνου ταξιδιού	Minimax Robust Optimization + Genetic Algorithm Ελάχιστο-μέγιστη Ανθεκτική Βελτιστοποίηση και Γενετικός Αλγόριθμος	Stop-skipping δίκτυο / Σιγκαπούρη
(Zheng et al., 2021)	- Χρόνος αναχωρήσεων - Διαδρομές - Δυναμική επανά-δρομολόγηση	Ανταπόκριση σε δυναμικά γεγονότα, βελτίωση αξιοπιστίας	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (ΜΑΠ) + Χρονοπρογραμματισμός σε Πραγματικό Χρόνο	Βασισμένο σε δυναμικό περιβάλλον λειτουργίας – Δίκτυο flex-route / Nanjing, Κίνα
(Jihui et al., 2017)	- Διαχωρισμός περιοχών προέλευσης προορισμού - Επιλογή διαδρομών - Συχνότητες	Βελτιστοποίηση customized bus μείωσης κόστους & εξυπηρέτησης	Μη Γραμμικός Ακέραιος + B&B Μέθοδος Διακλάδωσης και Οριοθέτησης	Customized bus network / Πεκίνο, Κίνα
(Yucheng Tian et al., 2022)	- Επιλογή σταθμών - Χρόνος Μεταξύ Διαδοχικών ταξιδιών - Σύζευξη/αποσύζευξη	Μείωση κόστους λειτουργίας και επανατοποθέτησης	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΑΓΠ)	Modular vehicle transit system / Hangzhou, Κίνα

Επιστημονική Εργασία (έτος)	Μεταβλητές Απόφασης	Στόχος	Τύπος Μοντέλου / Μέθοδος Επίλυσης	Δίκτυο / Τόπο (πόλη, χώρα) Εφαρμογής
(Jie Dai et al., 2020)	Αριθμός και τύποι λεωφορείων (MAV ή συμβατικά)	Μείωση κόστους λειτουργίας και χρόνων αναμονής	Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός + Δυναμικός προγραμματισμός	Μικτός στόλος (MAV + συμβατικά) / Dalian, Κίνα
(Ivan Dakic et al., 2021)	- Χρόνος Μεταξύ Διαδοχικών ταξιδιών - τύπος λεωφορείου ανά γραμμή	Μείωση κόστους και χρόνου επιβατών	Macroscopic Fundamental Diagram Optimization Μακροσκοπικό Θεμελιώδες Διάγραμμα (3D-MFD)	Μακροσκοπικό λεωφορειακό δίκτυο / Άμστερνταμ, Ολλανδία
(Xumei Chen et al., 2019)	Αριθμός MAVs and headway ανά διαδρομή	Μείωση αναμονής επιβατών και κατανάλωσης ενέργειας	ΜΑΓΠ (Discrete Shuttle Optimization Model)	Shuttle bus system υπό συμφόρηση / Σανγκάη, Κίνα
(W. Wu et al., 2019)	Παράκαμψη στάσης με στοχαστικούς χρόνους και προσπέραση	Βελτιστοποίηση αξιοπιστίας & καθυστερήσεων	Stochastic Optimization + Response Surface Methodology (RSM) Στοχαστική Βελτιστοποίηση + Μεθοδολογία Επιφανείας Απόκρισης (RSM)	Δίκτυο προσομοίωσης skip-stop / Γκουανγκζού, Κίνα
(Z. Zhang et al., 2020)	- Διαμόρφωση αρθρωτών οχημάτων - συχνότητες ανάλογα με τη ζήτηση	Βελτίωση αποδοτικότητας σε αρθρωτό αυτόνομο σύστημα	ΜΑΓΠ + Συγκριτική ανάλυση σεναρίων	Σενάρια βασισμένα σε πραγματικό πλαίσιο / ΗΠΑ
(Guo et al., 2023)	- Χρονοδρομολόγηση - Κατανομή αρθρωτό ηλεκτρικών λεωφορείων	Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας και φόρτισης	ΜΑΓΠ + ενεργειακή ανάλυση	Προσαρμοσμένο on demand δίκτυο / Κίνα
(Tian et al., 2023)	- Συγχρονισμός χρόνου μεταξύ διαδοχικών ταξιδιών - σχηματισμός οχημάτων ανά ώρα	Βελτιστοποίηση εξυπηρέτησης με χρονικά εξαρτώμενη ζήτηση	Integer Programming + Time-dependent constraints Ακέραιος Προγραμματισμός - Εξαρτημένοι Περιορισμοί	Μεταβαλλόμενο δίκτυο ζήτησης / Κίνα
(Huang et al., 2020)	- Στρατηγική παράκαμψης στάσεων - Κράτηση λωρίδων λεωφορείου	Ελαχιστοποίηση κόστους υπό αβεβαιότητα	Multi-stage Stochastic Optimization Πολυεπίπεδη Στοχαστική Βελτιστοποίηση	Αστικό δίκτυο με ασταθή ζήτηση / Κίνα

Επιστημονική Εργασία (έτος)	Μεταβλητές Απόφασης	Στόχος	Τύπος Μοντέλου / Μέθοδος Επίλυσης	Δίκτυο / Τόπο (πόλη, χώρα) Εφαρμογής
(J. Wu et al., 2021a)	Αναθέσεις σε ηλεκτρικά και αυτόνομα οχήματα με in-motion μεταφορές	Αξιολόγηση αποδοτικότητας MAATS	Agent-based simulation Προσομοίωση Βάσει Agent + ευέλικτη Δρομολόγηση	Δίκτυο urban grid / Πιλοτικό στη Σιγκαπούρη
(Liu & Ceder, 2020)	Ελαχιστοποίηση μεγέθους στόλου μέσω deficit function Συνάρτηση Ελλείμματος	Προσδιορισμός ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού MAVs	Deficit-based optimization	Υποθετικό δίκτυο αυτόνομων MAVs / Νέα Ζηλανδία
(Zhou et al., 2023)	- Ζήτηση ανά στάση - διαθεσιμότητα οχημάτων - κόστος ανά διαδρομή	Αξιολόγηση αποδοτικότητας ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων σε σενάρια ζήτησης	DRT Σύστημα Μεταφορών με ανταπόκριση στη ζήτηση με παραμετρική αξιολόγηση	Υποθετικά σενάρια DRT σε ηλεκτρικά λεωφορεία / Κίνα
(Delle & Filippi, 2020)	- Πληρότητα - αριθμός μονάδων, απόσταση - κόστος	Αξιολόγηση αποδοτικότητας ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων σε σενάρια ζήτησης	DRT Σύστημα Μεταφορών με ανταπόκριση στη ζήτηση με παραμετρική αξιολόγηση	Υποθετικά σενάρια DRT σε ηλεκτρικά λεωφορεία / Ιταλία
(H. Leffler, 2020)	- Ροές επιβατών - τοποθεσίες στάσεων - Διασπορά ζήτησης	Αξιολόγηση της στρατηγικής πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας	Προσομοίωση Monte Carlo	Πειραματικό αστικό δίκτυο / Γερμανία
(Tirachini et al., 2011)	- Συχνότητα - Μη εξυπηρετούμενοι κόμβοι - επιβατική ροή	Εύρεση βέλτιστων σημείων μη εξυπηρέτησης κόμβου στην διαδρομή	ΜΑΓΠ (με περιορισμούς λειτουργικού κόστους και εξυπηρέτησης)	Γραμμικό αστικό δίκτυο / Χιλή (Santiago)
(Clausius Scientific Press, 2023b)	- Πληρότητα - Κυκλοφοριακά δεδομένα Χρήση στάσεων σε πραγματικό χρόνο	Βελτιστοποίηση διαδρομών με βάση live πληροφόρηση	Πλατφόρμα πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο	Αστικό δίκτυο / Σιγκαπούρης
Η έρευνά μας	Δρομολόγηση βάσει - Ζήτησης - Πολιτική με δυνατότητα	Μείωση λειτουργικού κόστους, Σχεδιασμός	Μεικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός	Γραμμή λεωφορείου στη Λεμεσό,

Επιστημονική Εργασία (έτος)	Μεταβλητές Απόφασης	Στόχος	Τύπος Μοντέλου / Μέθοδος Επίλυσης	Δίκτυο / Τόπο (πόλη, χώρα) Εφαρμογής
	εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων	ευέλικτου συστήματος ηλεκτρικού και αυτόνομου λεωφορείου	(ΜΑΜΓΠ) / Gurobi σε Python	Κύπρος

4. Μεθοδολογία Μοντέλου

4.1 Μοντέλο και Παραδείγματα Χρήσης

Ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος αστικών μεταφορών είναι κρίσιμος σε αστικά κέντρα με υψηλές και μεταβαλλόμενες ανάγκες κινητικότητας και σημαντική κυκλοφοριακή συμφόρηση, και η παρούσα πρόταση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που συνδυάζει ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία με ευέλικτη πολιτική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, επιτρέποντας δυναμική προσαρμογή των δρομολογίων χωρίς την ανάγκη οδηγού. Η προτεινόμενη λύση στοχεύει στη βελτιστοποίηση του συστήματος αυτόνομου λεωφορείου, στη μείωση χρόνων αναμονής και στην αύξηση της αποδοτικότητας του στόλου μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης ζήτησης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων, ενώ παράλληλα προάγει τη βιώσιμη αστική κινητικότητα και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Επιπλέον, απαιτείται διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας των δεδομένων, καθώς και αντιμετώπιση ζητημάτων κοινωνικής αποδοχής και νομοθετικής προσαρμογής για την πλήρως αυτόνομη λειτουργία. Ως στόχος παραμένει η εξοικονόμηση πόρων και η δημιουργία ενός ευέλικτου συστήματος που μπορεί να ανταποκρίνεται δυναμικά στις εκάστοτε κυκλοφοριακές και λειτουργικές συνθήκες. Για τις ανάγκες ανάπτυξης και επαλήθευσης του προτεινόμενου μοντέλου, υλοποιήθηκε η μόχλευση δεδομένων λειτουργίας της γραμμής λεωφορείου 31 (Άγιος Αθανάσιος – Κέντρο Λεμεσού – ΤΕΠΑΚ – Καζίνο). Τα στοιχεία αυτά, που παρέχονται από τον αρμόδιο φορέα των συγκοινωνιών της Κύπρου, περιλαμβάνουν πλήρη χρονοδιάγραμμα, στοιχεία επιβίβασης ανά στάση, ζήτηση ανά χρονική περίοδο και έναν πλήρη πίνακα προέλευσης-προορισμού (O-D) για 15 διαφορετικά δρομολόγια την ημέρα. Η συγκεκριμένη γραμμή, με μήκος διαδρομής 12,8 χιλιόμετρα και 9 στάσεις, παρουσιάζει έντονη διακύμανση στη ζήτηση τόσο ανά ημέρα όσο και ανά ωράριο, καθιστώντας την ένα ιδανικό πεδίο δοκιμής για την εφαρμογή των αρχών της αρθρωτής συγκοινωνίας, της δυναμικής διαχείρισης δρομολογίων και την εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων.

Στην ανάλυση του μοντέλου συμπεριλαμβάνεται ο καθορισμός των μονάδων αυτόνομου λεωφορείου, η διαχείριση των δρομολογίων σε περιόδους αιχμής ή χαμηλής ζήτησης, καθώς και η εφαρμογή, όπου η ζήτηση είναι ιδιαίτερα χαμηλή ή η απόσταση κρίνεται μη αποδοτική για την πλήρη διαδρομή.

4.2 Γενική Λογική και Υποθέσεις του Μαθηματικού Μοντέλου

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο επικεντρώνεται στη διαχείριση και βελτιστοποίηση ενός στόλου αυτόνομων λεωφορείων, μέσα από δύο βασικές στρατηγικές: τα ηλεκτρικά και αυτόνομα λεωφορεία και τη πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Σε επίπεδο μεταβλητών, το σύνολο S περιλαμβάνει τις επιλογές 1 (πλήρης διαδρομή) και 2. Το σύνολο U αναπαριστά τα ηλεκτρικά και αυτόνομα τμήματα (units) ενός οχήματος, όπου κάθε μονάδα μπορεί να συνδεθεί ή αποσυνδεθεί. Το σύνολο T αφορά τα δρομολόγια (trips), π.χ. διαδρομές από 1 έως N , ενώ το σύνολο K αναφέρεται στους σταθμούς (stops) του δικτύου, π.χ. από 1 έως M . Στη μεταβλητή $X[s,u,t]$ αποτυπώνεται αν χρησιμοποιείται το πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων ($s=2$) ή η πλήρης διαδρομή ($s=1$) από μια συγκεκριμένη μονάδα αυτόνομου λεωφορείου u στο δρομολόγιο t και τον σταθμό k . Η τιμή της μεταβλητής μπορεί να είναι δυαδική, υποδεικνύοντας την ενεργοποίηση ή μη της σχετικής. Το μοντέλο εστιάζει στην πρόβλεψη ζήτησης σε κάθε σταθμό, τη δυναμική διαχείριση πόρων και την εφαρμογή σε περιοχές όπου κρίνεται αποδοτικότερη η μερική εξυπηρέτηση της διαδρομής.

Οι βασικές συνιστώσες του μοντέλου περιλαμβάνουν την αντικειμενική συνάρτηση (ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους), λαμβάνοντας υπόψη κόστη καυσίμων ή ενέργειας, πρόσθετο κόστος ή όφελος από πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων και πιθανώς κόστος περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ακολουθούν οι περιορισμοί χωρητικότητας, όπου κάθε σταθμός και δρομολόγιο δεν υπερβαίνει τον μέγιστο αριθμό μονάδων που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, καθώς και οι περιορισμοί, που ορίζουν σε ποιες συνθήκες επιτρέπεται συντομευμένη διαδρομή (π.χ. ώρες χαμηλής ζήτησης, σταθμοί χαμηλής ζήτησης). Επίσης, η κάλυψη ελάχιστης ζήτησης διασφαλίζει ότι κάθε δρομολόγιο εξυπηρετεί ένα βασικό επίπεδο επιβατών ή σταθμών, ενώ η διαχείριση των μονάδων επιτρέπει σε κάθε αρθρωτή μονάδα να μεταβεί σε διαφορετική γραμμή ή δρομολόγιο βάσει των δεδομένων ζήτησης. Στις υποθέσεις που συχνά εισάγονται, περιλαμβάνεται η θεώρηση σταθερών ή ομαλών μεταβολών κυκλοφοριακών συνθηκών στον χρονικό ορίζοντα, η επαρκής ακρίβεια αλγορίθμων πρόβλεψης ζήτησης, ο πολύ μικρός χρόνος σύζευξη και αποσύζευξη μονάδων (αμελητέος), το εύρωστο νομικό πλαίσιο που επιτρέπει αυτόνομη κυκλοφορία σε αστικές περιοχές και η διαθεσιμότητα υποδομής IoT για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

4.3 Ενδεικτικός Κώδικας Python/Gurobi και Αρχική Λογική

Η υλοποίηση του μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Python και του Gurobi, που είναι κατάλληλος για προβλήματα γραμμικού και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (ΜΑΓΠ). Το μοντέλο αρχικοποιείται με τον ορισμό των βασικών συνόλων S , U , T , K και των δυαδικών μεταβλητών απόφασης $X[s,u,t]$.

Στη συνέχεια, ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση κόστους, η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο το λειτουργικό κόστος των μονάδων σε πλήρη διαδρομή ($s=2$), όσο και το κόστος από την εφαρμογή πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων ($s=1$). Οι περιορισμοί του μοντέλου αφορούν τη ζήτηση, τις στρατηγικές πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης

μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, τη χωρητικότητα οχημάτων ανά διαδρομή και σταθμό, καθώς και τις συνθήκες ενεργοποίησης των δρομολογίων.

Η δομή υλοποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Αρχικοποίηση του μοντέλου (`model = Model ("ModularBus")`)
- Ορισμός συνόλων και παραμέτρων εισόδου
- Δήλωση μεταβλητών απόφασης (`model.addVars (...)`)
- Κατασκευή αντικειμενικής συνάρτησης (`model.setObjective (...)`)
- Προσθήκη περιορισμών (`model.addConstr (...)`)
- Επίλυση προβλήματος (`model.optimize ()`)
- Εξαγωγή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Μετά την επίλυση, τα αποτελέσματα αξιολογούνται για τη χρησιμοποίηση των βαγονιών του λεωφορείου, τη συχνότητα εφαρμογής πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, το ποσοστό μη εξυπηρετούμενης ζήτησης και τη συμμόρφωση στους περιορισμούς χωρητικότητας. Η ανάλυση επιτρέπει περαιτέρω ρύθμιση παραμέτρων και βελτίωση του μοντέλου, ώστε να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός αστικού δικτύου.

4.4 Σημαντικές Υποθέσεις στο Πλαίσιο του Μοντέλου

Στο πλαίσιο του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε, διατυπώνονται τέσσερις βασικές υποθέσεις που καθοδηγούν τη στρατηγική εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων στις διαδρομές, εξισορροπώντας την αποδοτικότητα με την επαρκή κάλυψη του δικτύου, όπως χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω:

- Η πρώτη υπόθεση ορίζει ότι στις διαδρομές με ζυγό αριθμό ($t = 2, 4, 6, 8$), δεν επιτρέπεται η εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι συγκεκριμένες διαδρομές λειτουργούν πάντα με πλήρη κάλυψη σταθμών, ανεξαρτήτως της εκάστοτε ζήτησης, ώστε να διασφαλίζεται η συνοχή του δικτύου και η καθολική εξυπηρέτηση επιβατών σε κρίσιμα σημεία. Λειτουργούν, έτσι, ως σταθερός κορμός του συστήματος, γύρω από τον οποίο εφαρμόζονται πιο ευέλικτες τακτικές στις υπόλοιπες διαδρομές.
- Η δεύτερη υπόθεση περιορίζει τη χρήση πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων στην ίδια στάση για δύο συνεχόμενες διαδρομές. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επαναλαμβανόμενη αδυναμία εξυπηρέτησης συγκεκριμένων στάσεων, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε κοινωνικά άδικη κατανομή του στόλου ή ακόμα και σε λειτουργικές ανεπάρκειες λόγω συσσωρευμένης μη εξυπηρετούμενης ζήτησης.
- Η τρίτη υπόθεση προβλέπει ότι για κάθε διαδρομή πρέπει να εξυπηρετείται ένας ελάχιστος αριθμός μονάδων με πλήρη διαδρομή, προτού επιτραπεί η ενεργοποίηση του

πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Έτσι, το σύστημα δεν επιλέγει τη συντόμευση διαδρομής αυθαίρετα, αλλά μόνο όταν πληρούνται ελάχιστες απαιτήσεις κάλυψης. Αυτό συμβάλλει στην εξασφάλιση ότι η τακτική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων εφαρμόζεται επιλεκτικά, με γνώμονα τη ζήτηση και όχι ως γενικευμένη στρατηγική εξοικονόμησης πόρων.

- Η τέταρτη υπόθεση αφορά τους χρόνους μετακίνησης. Γενικά, οι χρόνοι μετακίνησης θα θεωρηθούν σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, προκειμένου να διασφαλιστεί η απλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου και να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση των επιχειρησιακών ρυθμίσεων χωρίς την επίδραση στοχαστικών παραγόντων που συνδέονται με τη μεταβλητότητα της κυκλοφορίας.

Συνοψίζοντας, οι τέσσερις παραπάνω υποθέσεις ενισχύουν τον ρεαλισμό και τη σταθερότητα του προτεινόμενου μοντέλου. Ενσωματώνονται με τρόπο που επιτρέπει την ευελιξία των ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων και την προσαρμογή μέσω της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, χωρίς όμως να θυσιάζεται η ποιότητα εξυπηρέτησης ή η αξιοπιστία του αστικού συστήματος μεταφορών.

4.5 Γραμμικοποίηση σε Μεικτά Ακέραια Μη Γραμμικά Μοντέλα Δημοσίων Συγκοινωνιών

Σε μοντέλα αυτόνομων λεωφορείων που ενσωματώνουν στρατηγικές όπως η δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, η διατύπωση συχνά ακολουθεί μη γραμμική μορφή, προκειμένου να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πολυπλοκότητα του συστήματος. Το μοντέλο της παρούσας εργασίας διαμορφώνεται ως Μη Γραμμικό Πρόβλημα Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (ΜΓΜΑΠ) και υλοποιείται σε περιβάλλον Python με χρήση του λογισμικού επίλυσης Gurobi. Σε επιλεγμένα σημεία πραγματοποιείται γραμμικοποίηση ορισμένων περιορισμών, με στόχο τη βελτίωση της υπολογιστικής αποδοτικότητας και τη δυνατότητα επίλυσης σε ρεαλιστικούς χρόνους, χωρίς να αλλοιώνεται η μαθηματική ακρίβεια του μοντέλου. Με βάση τη θεωρία, μαθηματικά προβλήματα μπορούν να περιλαμβάνουν όρους ελάχιστου ή μεγίστου στους στόχους ή τους περιορισμούς τους. Μια συνάρτηση όπως η $\min\{x, y\}$ μπορεί να γραμμικοποιηθεί με την εισαγωγή μιας συνεχούς μεταβλητής r , μιας πολύ μεγάλης θετικής σταθεράς M (big-M) και μιας δυαδικής μεταβλητής $\delta \in \{0, 1\}$. Η r αντικαθιστά τη $\min\{x, y\}$ και υπόκειται στους ακόλουθους τέσσερις γραμμικούς περιορισμούς:

1. $r \leq x$
2. $r \leq y$
3. $r \geq x - \delta M$
4. $r \geq y - (1 - \delta)M$

Η λογική είναι η εξής:

Οι περιορισμοί (1) και (2) εξασφαλίζουν ότι το r δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από κανένα από τα x ή y , άρα $r \leq \min\{x, y\}$. Οι περιορισμοί (3) και (4), με τη βοήθεια της δυαδικής μεταβλητής δ , εξασφαλίζουν ότι το r θα είναι τουλάχιστον ίσο με το μικρότερο από τα x ή y . Ανάλογα με την τιμή του δ , ένας από αυτούς τους δύο τελευταίους περιορισμούς "αναγκάζει" το r να πάρει την τιμή του μικρότερου από τα δύο ορίσματα. Το σύνολο αυτών των τεσσάρων ανισοτήτων εξαναγκάζει

το r να ταυτιστεί με τη $\min\{x, y\}$.

Εφαρμογή της Θεωρίας κατά τη δρομολόγηση

Στο πλαίσιο του παρόντος μοντέλου, ο αρχικός μη γραμμικός ορισμός του επιβατικού φορτίου $l(1,1)$ για το πρώτο ταξίδι είναι :

$$l_{1,1} = \min\{y \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{s,u,1} u ; \widetilde{b}_{1,1}\}$$

Εφαρμόζοντας ακριβώς την παραπάνω θεωρία γραμμικοποίησης, η μεταβλητή $l(1,1)$ παίρνει τον ρόλο της r . Η έκφραση $y \cdot \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{s,u,1}$ αντιστοιχεί στο x και το $\widetilde{b}_{1,1}$ αντιστοιχεί στο y . Η δυαδική μεταβλητή $d(1,1)$ χρησιμοποιείται ως δ . Έτσι, οι τέσσερις γραμμικοί περιορισμοί που αντικαθιστούν τον μη γραμμικό ορισμό και προκύπτουν από την εφαρμογή της θεωρίας είναι:

$$1. l_{1,1} \leq y \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{s,u,1} u$$

$$2. l_{1,1} \leq \widetilde{b}_{1,1}$$

$$3. l_{1,1} \geq y \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{s,u,1} u - d_{1,1} M$$

$$4. l_{1,1} \geq \widetilde{b}_{1,1} + (d_{1,1} - 1)M$$

Τα ίδια ισχύουν και για το τρίτο ταξίδι στο οποίο χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο για γραμμικοποίηση. Η γραμμικοποίηση ορισμένων εξισώσεων του Μεικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προβλήματος (MINLP) πραγματοποιείται με στόχο την απλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου και τη μετατροπή του σε αντίστοιχο Μεικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόβλημα (ΜΑΓ), ώστε η διαδικασία επίλυσης να καταστεί πιο σταθερή, αποδοτική και συμβατή με τις υπολογιστικές δυνατότητες του λογισμικού βελτιστοποίησης Gurobi. Έτσι, η σωστή εφαρμογή των τεχνικών Big-M και η διαχείριση των δυαδικών μεταβλητών επιτρέπουν την επίλυση του μοντέλου με αξιοπιστία και σε αποδεκτό χρόνο (Gkiotsalitis, 2022).

4.6 Συμβολισμοί μοντέλου

Σύνολα

- U : Σύνολο διαθέσιμων μονάδων λεωφορείου (modular bus units)
 - S : Σύνολο πολιτικών πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων
 - T : Σύνολο Ταξιδιών
 - K : Σύνολο σταθμών
-

Παράμετροι

- $w_{t,k,y}$: Ζήτηση επιβατών από σταθμό k προς σταθμό y στο δρομολόγιο t
 - $\beta_{s,k,y}$: Δυαδική παράμετρος που δηλώνει αν επιτρέπεται η διαδρομή από k προς y υπό πολιτική s (1 = επιτρέπεται, 0 = όχι)
 - C : Χωρητικότητα κάθε μονάδας λεωφορείου
 - $cc_{s,u,t}$: Κόστος λειτουργίας μονάδας u υπό πολιτική s στο δρομολόγιο t ($cc_{s,u,t} = u$)
 - M : Μεγάλος θετικός αριθμός (Big-M) για τη διατύπωση λογικών περιορισμών
 - SOC_{min} : Ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό μπαταρίας ($SOC_{min} = 0.2$)
 - SOC_{max} : Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό μπαταρίας ($SOC_{max} = 1$)
 - $d_{k,y}$: Απόσταση μεταξύ σταθμών k και y ($d_{k,y} = 1.5$ km)
 - e : Κατανάλωση μπαταρίας ανά km ($e = 0.05$)
-

Μεταβλητές Απόφασης

Δυαδικές Μεταβλητές

- $X_{s,u,t}$: Μεταβλητή απόφασης, 1 αν η μονάδα u εκτελεί το δρομολόγιο t υπό πολιτική s

Συνεχείς Μεταβλητές

- $\alpha_{t,k}$: Αριθμός επιβατών που παραμένουν εκτός οχήματος στον σταθμό k μετά το δρομολόγιο t
- $bb_{t,k}$: Αριθμός επιβατών που περιμένουν στον σταθμό k για το ταξίδι t
- $ww_{t,k,y}$: Αριθμός επιβατών που δεν εξυπηρετούνται μεταξύ των σταθμών k και y στο δρομολόγιο t (unserved demand)
- $l_{t,k}$: Φορτίο επιβατών μέσα στο όχημα αμέσως μετά τον σταθμό k στο δρομολόγιο t (load)
- $z_{t,k}$: Ποσοστό επιβατών που επιβιβάζονται στον σταθμό k στο ταξίδι t
- $d_{t,k}$: Δυαδική μεταβλητή

4.7 Κατασκευή Μαθηματικού Μοντέλου

Συνάρτηση Στόχου

$$\min F(X) = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} X_{s,u,t} * cc_{s,u,t} \quad (1)$$

Με τους περιορισμούς:

Παράμετροι

$$Wt, k, y \geq 0 \quad (2)$$

$$C = 28 \quad (3)$$

Μεταβλητές

$$X_{s,u,t} \in \{0,1\}, \forall s \in S, u \in U, t \in T \quad (4)$$

$$ww_{s,u,t} \geq 0, \forall s \in S, u \in U, t \in T \quad (5)$$

$$bb_{t,k} = \sum_{s \in S} (\sum_{u \in U} X_{s,u,t} \cdot \beta_{s,k,y}), \forall t \in T, k \in K \quad (6)$$

$$l_{t,k}, \forall t \in T, k \in K \quad (7)$$

$$d_{t,k} \in \{0,1\}, \forall t \in T, k \in K \quad (8)$$

$$\begin{aligned} l_{t,k} &\leq C \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} \cdot u X_{s,u,t}, \\ l_{t,k} &\leq bb_{t,k}, \\ l_{t,k} &\geq C \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} \cdot u X_{s,u,t} - M d_{t,k}, \\ l_{t,k} &\geq bb_{t,k} + (d_{t,k} - 1)M \end{aligned} \quad (9)$$

$$z_{t,k}, \forall t \in T, k \in K \quad (10)$$

$$SOC_k \geq 0, \forall k \in K \quad (11)$$

Η εξίσωση (1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του μοντέλου και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος, με βάση την απόφαση εάν θα ακολουθηθεί την πολιτική δυνατότητας εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Ο δείκτης $t \in T$ αναφέρεται στο σύνολο των διαθέσιμων ταξιδιών, ο δείκτης $s \in S$ στις διαθέσιμες πολιτικές (με τιμές 1 για να ακολουθηθεί αυτή την πολιτική και 2 να μην ακολουθηθεί την πολιτική), ενώ ο δείκτης $u \in U$ αφορά τις μονάδες αυτόνομων ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων (modular bus units). Η μεταβλητή απόφασης $x_{s,u,t}$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν η

μονάδα u εκτελεί το δρομολόγιο t υπό την πολιτική s , και 0 διαφορετικά. Ο παράγοντας $cc_{s,u,t}$ εκφράζει το κόστος λειτουργίας της μονάδας u στο δρομολόγιο t με πολιτική s . Το κόστος λειτουργίας ορίζεται με τον αριθμό των μονάδων u επί τα χιλιόμετρα που διανύθηκαν με βάση την πολιτική που ακολούθησε το αυτόνομο λεωφορείο s .

Η εξίσωση (2) της μεταβλητής $w_{t,k,y}$ εκφράζει τη ζήτηση επιβατών στο ταξίδι t που επιθυμούν να ταξιδέψουν από τη στάση k προς τη στάση y . Οι δείκτες $k, y \in K$ αφορούν το σύνολο των στάσεων της γραμμής και πρέπει πάντα να είναι θετική ή μηδενική. Η εξίσωση (3) ορίζει τη χωρητικότητα c κάθε μονάδας αυτόνομου λεωφορείου.

Η εξίσωση (4) δηλώνει ότι η μεταβλητή $x_{s,u,t}$ είναι δυαδική, δηλαδή παίρνει μόνο τις τιμές 0 ή 1. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η $x_{s,u,t} = 1$ σημαίνει ότι η μονάδα u εκτελεί το δρομολόγιο t με την πολιτική s . Η συνθήκη αυτή θα ισχύει σε κάθε ταξίδι τουλάχιστον 1 φορά και θα διασφαλίζει ότι θα ακολουθείτε η όχι η πολιτική της μεταβαλλόμενης εξυπηρέτησης. Η εξίσωση (5) επιβάλλει ότι η μεταβλητή $ww_{t,k,y}$, η οποία εκφράζει τη μη εξυπηρετούμενη ζήτηση μεταξύ των στάσεων k και y στο δρομολόγιο t , είναι μη αρνητική. Η τιμή αυτής της μεταβλητής υπολογίζει τους επιβάτες που δεν κατάφεραν να επιβιβαστούν λόγω χωρητικότητας, όπως ορίζεται από την πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Το μοντέλο παρακολουθεί τις τιμές της $ww_{t,k,y}$ ώστε να υπολογίσει τη συνολικό αριθμό μη εξυπηρετούμενης ζήτησης (unserved demand), δηλαδή το πλήθος των επιβατών που δεν εξυπηρετήθηκαν. Η εξίσωση (6) ορίζει τον αριθμό των επιβατών που επιθυμούν να επιβιβαστούν από την στάση k του ταξιδιού t . Η εξίσωση (7) αφορά τη μεταβλητή $l_{t,k}$ η οποία εκφράζει το φορτίο (load) του οχήματος, δηλαδή τον αριθμό των επιβατών που βρίσκονται εντός του λεωφορείου αμέσως μετά τη στάση k στο δρομολόγιο t . Ο δείκτης $t \in T$ αναφέρεται στο σύνολο των δρομολογίων και ο δείκτης $k \in K$ στο σύνολο των στάσεων. Η μεταβλητή αυτή είναι συνεχής και δεν περιορίζεται σε ακέραιες τιμές, καθώς αντιπροσωπεύει ροή επιβατών. Το φορτίο του οχήματος υπολογίζεται δυναμικά σε κάθε στάση, με βάση την κατανομή της ζήτησης: προκύπτει από την αφαίρεση των επιβατών που αποβιβάζονται και την πρόσθεση εκείνων που επιβιβάζονται, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της πολιτικής μεταβαλλόμενης εξυπηρέτησης στάσεων. Η εξέλιξη της μέσα στη διαδρομή χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της χωρητικότητας και της εξυπηρέτησης. Η εξίσωση (8) αφορά τη δυαδική μεταβλητή $d_{t,k}$. Οι παραπάνω ανισότητες της εξίσωσης (9) Big-M για να διασφαλιστεί ότι το φορτίο δεν μπορεί να υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα (η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των επιλεγμένων μονάδων), ούτε να είναι μικρότερο από το πλήθος των επιβατών που επιβιβάζονται. Ο βοηθητικός δυαδικός δείκτης $d_{t,k}$ ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τα όρια αυτά ανάλογα με το σενάριο. Στην (10) μεταβλητή ή $z_{t,k}$ δηλώνει το ποσοστό των επιβατών που επιβιβάζονται στον σταθμό k στο δρομολόγιο t . Είναι συνεχής μεταβλητή με τιμές στο διάστημα $[0,1]$, και εκφράζει τον λόγο μεταξύ των επιβιβαζόμενων επιβατών και της συνολικής ζήτησης στη στάση. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει τη μη εξυπηρετούμενη ζήτηση επιβατών (unserved demand ($ww_{t,k,y}$)), οι οποίοι έχουν ως αφετηρία τη στάση k και προορισμό την y στο ταξίδι t . Η μεταβλητή (11) παρουσιάζει το ποσοστό μπαταρίας όταν το

λεωφορείο βρίσκεται στον σταθμό k .

Περιορισμοί

$$\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} X_{s,u,t} = 1, \forall t \in T \quad (12)$$

Ο περιορισμός (12) διασφαλίζει ότι για κάθε δρομολόγιο $t \in T$ επιλέγεται ακριβώς ένας συνδυασμός μονάδας λεωφορείου $u \in U$ και πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων $s \in S$. Η απαίτηση το άθροισμα να ισούται με 1 διασφαλίζει ότι κάθε δρομολόγιο θα επιλέγεται ακριβώς μία φορά. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η μοναδικότητα της εκτέλεσης κάθε διαδρομής και η συνεπής εφαρμογή της συγκεκριμένης πολιτικής σε κάθε ταξίδι.

$$\sum_{u \in U} X_{1,u,t} = 1, \forall t \in \{1,3,5,7,9,11,13,15\}, u \in U \quad (13)$$

Ο περιορισμός (13) επιβάλλει ότι τα μονά δρομολόγια $(1,3,\dots,15)$ εκτελούνται υποχρεωτικά με πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων ($s=1$). Ο δείκτης 1 στην πολιτική δηλώνει ότι ενεργοποιείται η στρατηγική περιορισμού της διαδρομής. Ο σκοπός αυτής της εξίσωσης είναι να ορίσει μία συγκεκριμένη κατάσταση αναφοράς για τα μονά δρομολόγια. Έτσι, γίνεται εφικτός ο έλεγχος της αποδοτικότητας της εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων σε σχέση με την πλήρη εξυπηρέτηση.

$$bb_{t,k} = \sum_{y \in K, y > k} w_{t,k,y} \cdot \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} \beta_{s,k,y} X_{s,u,t}, \forall s \in S, u \in U, k \in K \quad (14)$$

Ο περιορισμός (14) υπολογίζει τον αριθμό επιβατών που περιμένουν στον σταθμό k με προορισμό y και επιθυμούν να επιβιβαστούν στο δρομολόγιο t . Η $w_{t,k,y}$ είναι η ζήτηση επιβατών που επιθυμούν να μετακινηθούν από τη στάση k προς τη στάση y στο δρομολόγιο t . Ο όρος $\beta_{s,k,y}$ είναι π αράμετρος που παίρνει τιμή 1 αν, υπό την πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων s , επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί η μετακίνηση από τον σταθμό k στον y , και 0 διαφορετικά. Η εσωτερική διπλή άθροιση $\sum \sum (X_{s,u,t} \cdot \beta_{s,k,y})$ φιλτράρει τη ζήτηση ώστε να συμπεριλαμβάνει μόνο τις μετακινήσεις που επιτρέπονται από την πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων s και αντιστοιχούν σε μονάδα u που έχει επιλεγεί για το δρομολόγιο t .

Για να ενσωματωθεί αυτή η συνθήκη "and" στο γραμμικό πλαίσιο του μοντέλου ΜΑΓΠ, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο βιβλίο (Gkiotsalitis, 2022). Συγκεκριμένα, η διατύπωση αξιοποιεί την αρχή της γραμμικοποίησης γινομένων δυαδικών μεταβλητών ή την εφαρμογή βοηθητικών περιορισμών με τη μέθοδο Big-M.

$$ww_{t,k,y} = (1 - z_{t,k}) w_{t,k,y}, \forall t, k, y \quad (15)$$

Η σχέση (15) ορίζει τη μη εξυπηρετημένη ζήτηση (unserved demand) μεταξύ δύο σταθμών k και y στο δρομολόγιο t . Όταν το ποσοστό επιβίβασης $z_{t,k}$ είναι μικρότερο της μονάδας, ένα τμήμα της ζήτησης δεν ικανοποιείται και παραμένει ως μη εξυπηρετούμενη και να εξυπηρετηθεί στα επόμενα δρομολόγια.

$$l_{t,1} \leq C \cdot \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} u \cdot X_{s,u,t} \right), \forall t \in T \quad (16)$$

Ο περιορισμός (16) συνδέει τη χωρητικότητα του λεωφορείου με το φορτίο επιβατών που μεταφέρεται αμέσως μετά την πρώτη στάση κάθε δρομολογίου. Ο δείκτης $l_{t,1}$ αναφέρεται στο φορτίο εντός του οχήματος μετά τη στάση 1 στο δρομολόγιο t . Το γινόμενο $(X_{s,u,t} \cdot u)$ δείχνει αν η μονάδα u συμμετέχει στη διαδρομή t υπό πολιτική s , και το άθροισμα σε όλους τους s και u δίνει το συνολικό μέγεθος οχήματος για την τρέχουσα ανάθεση. Εφόσον $c=28$, η συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα προκύπτει απευθείας από το άθροισμα των μονάδων που έχουν ανατεθεί. Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει υπέρβαση της χωρητικότητας στο σημείο αυτό της διαδρομής.

$$l_{t,1} \leq bb_{t,1}, \forall t \in T \quad (17)$$

Ο περιορισμός (17) διασφαλίζει ότι το φορτίο εντός του οχήματος δεν μπορεί να υπερβαίνει τον αριθμό των επιβατών που περιμένουν στη στάση 1 στο δρομολόγιο t . Το $bb_{t,1}$ αντιπροσωπεύει τη ζήτηση επιβίβασης στη συγκεκριμένη στάση, ενώ το $l_{t,1}$ το πλήθος των επιβατών που επιβιβάστηκαν. Ο περιορισμός αυτός είναι απαραίτητος για την εσωτερική συνέπεια του μοντέλου, καθώς δεν είναι λογικά εφικτό να επιβιβαστούν περισσότεροι επιβάτες από όσους βρίσκονται στην ουρά αναμονής.

$$a_{1,1} = \sum_{y \in K} w_{1,1,y} - l_{1,1} \quad (18)$$

Στην εξίσωση (18), η μεταβλητή $a_{1,1}$ εκφράζει το πλήθος των επιβατών που δεν επιβιβάστηκαν από τη στάση 1 στο πρώτο δρομολόγιο, δηλαδή τη μη εξυπηρετηθείσα ζήτηση (unserved demand). Ο πρώτος όρος, $\sum_{y \in K} w_{1,1,y}$, δίνει τη συνολική ζήτηση από τη στάση 1 προς όλες τις άλλες στάσεις στο δρομολόγιο 1, ενώ το $l_{1,1}$ είναι το φορτίο που επιβιβάστηκε. Η διαφορά αυτών των δύο όρων δίνει το πλήθος των επιβατών που έμειναν πίσω.

$$z_{1,1} = \frac{l_{1,1}}{\sum_{y \in K, y \geq 1} w_{1,1,y}}, \text{ if } \sum_{y \in K, y \geq 1} w_{1,1,y} > 0 \quad (19)$$

$$z_{1,1} = \{ 0, \text{ if otherwise } \}$$

Η μεταβλητή $z_{1,1}$ υπολογίζει το ποσοστό των επιβατών που τελικά επιβιβάστηκαν στον σταθμό 1 του πρώτου δρομολογίου. Ο παρονομαστής της έκφρασης είναι η συνολική ζήτηση από τη στάση 1 προς οποιονδήποτε άλλο προορισμό y , δηλαδή το άθροισμα όλων των $w_{1,1,y}$ για $y \geq 1$. Ο αριθμητής είναι το πραγματικό φορτίο που επιβιβάστηκε. Αν η συνολική ζήτηση είναι μηδέν (δηλαδή κανείς δεν θέλει να επιβιβαστεί), τότε η μεταβλητή $z_{1,1}$ ορίζεται ως μηδέν ώστε να αποφευχθεί διαίρεση με το μηδέν και να διατηρηθεί η μαθηματική συνέπεια.

$$l_{t,k} = l_{t,k-1} + bb_{t,k} - \sum_{y < k} \left[z_{t,y} w_{t,y,k} \sum_{s,u} X_{s,u,t} \beta_{s,y,k} \right], \forall t, k \geq 2 \quad (20)$$

Η εξίσωση (20) αποτυπώνει την εξέλιξη του φορτίου του οχήματος κατά μήκος της γραμμής. Το φορτίο στον σταθμό k ισούται με το φορτίο στον προηγούμενο σταθμό $k-1$, προσαυξημένο από τους νέους επιβάτες που επιβιβάζονται και μειωμένο από τους επιβάτες που αποβιβάζονται στον τρέχοντα σταθμό. Η εξάρτηση από τον δείκτη $\beta_{s,y,k}$ υπογραμμίζει ότι η αποβίβαση είναι εφικτή μόνο εφόσον η μετάβαση από τον σταθμό y στον k είναι επιτρεπτή από την εφαρμοζόμενη πολιτική.

$$ww_{1,1,y} = (1 - z_{1,1}) \cdot w_{1,1,y}, \forall y \in K, y \geq 1 \quad (21)$$

Η εξίσωση (21) ορίζει τη μη εξυπηρετημένη ζήτηση από τη στάση 1 προς τον προορισμό y στο πρώτο δρομολόγιο, του πρώτου ταξιδιού. Εφόσον $z_{1,1}$ εκφράζει το ποσοστό των επιβατών που επιβιβάστηκαν, τότε $1 - z_{1,1}$ δίνει το ποσοστό των επιβατών που έμειναν εκτός λεωφορείου. Πολλαπλασιάζοντας αυτό το ποσοστό με τη ζήτηση $w_{1,1,y}$, προκύπτει ο αριθμός των μη εξυπηρετούμενων επιβατών που επιθυμούσαν να ταξιδέψουν προς τον προορισμό y . Το αποτέλεσμα καταγράφεται στη μεταβλητή $ww_{1,1,y}$, η οποία είναι θεμελιώδης για την παρακολούθηση του μοντέλου ως προς την κάλυψη της ζήτησης.

$$a_{t,1} = a_{t-1,1} + \sum_{y \in K} w_{t,1,y} - l_{t,1}, \forall t > 1 \quad (22)$$

Η εξίσωση (22) υπολογίζει τους επιβάτες που απέμειναν στον σταθμό 1 μετά το δρομολόγιο t για $t > 1$. Λαμβάνει υπόψη τους απούς επιβάτες από το προηγούμενο δρομολόγιο ($a_{t-1,1}$), τη νέα ζήτηση για το τρέχον δρομολόγιο ($\sum_{y \in K} w_{t,1,y}$), και τους επιβάτες που πράγματι επιβιβάστηκαν

($l_{t,1}$). Αυτή η εξίσωση διασφαλίζει τη συνέχεια της εξυπηρέτησης μεταξύ διαδοχικών δρομολογίων.

$$z_{t,1} = \begin{cases} \frac{l_{t,1}}{a_{t-1,1} + \sum_{y \in K, y \geq 1} w_{t,1,y}}, & \text{if } a_{t-1,1} + \sum_{y \in K, y \geq 1} w_{t,1,y} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \forall t > 1 \quad (23)$$

Η εξίσωση (23) υπολογίζει το ποσοστό επιβίβασης για $t > 1$, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους απούς επιβάτες από το προηγούμενο δρομολόγιο όσο και τη νέα ζήτηση. Αυτό επιτρέπει έναν πιο ρεαλιστικό υπολογισμό του ποσοστού επιβίβασης, ο οποίος αντιπροσωπεύει καλύτερα την πραγματική λειτουργία του συστήματος.

$$ww_{t,1,y} = (1 - z_{t,1}) \cdot w_{t,1,y}, \forall t > 1, y \in K, y \geq 1 \quad (24)$$

Η εξίσωση (24) ενημερώνει τη μη εξυπηρετημένη ζήτηση για $t > 1$ βάσει του νέου ποσοστού επιβίβασης. Αυτό διασφαλίζει ότι η μη εξυπηρετημένη ζήτηση ανανεώνεται σωστά μεταξύ διαδοχικών δρομολογίων.

$$SOC_1 = SOC_{\max} \quad (25)$$

Η εξίσωση (25) ορίζει ότι η μπαταρία ξεκινάει πλήρως φορτισμένη (100%) στον πρώτο σταθμό. Αυτό θεωρείται ως η αρχική κατάσταση του οχήματος πριν από την έναρξη των δρομολογίων.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - (d_{k-1,k} \cdot e), \forall k \in K \setminus \{1\} \quad (26)$$

Η εξίσωση (26) περιγράφει τη μεταβολή του SOC μεταξύ διαδοχικών σταθμών. Το SOC στον σταθμό k ισούται με το SOC στον προηγούμενο σταθμό $k - 1$ μείον την κατανάλωση ενέργειας για τη μετάβαση μεταξύ των σταθμών. Η κατανάλωση ενέργειας προκύπτει από το γινόμενο της απόστασης μεταξύ των σταθμών ($d_{k-1,k}$) και του ποσοστού κατανάλωσης ανά km (e).

$$SOC_k \geq SOC_{\min}, \forall k \in K \quad (27)$$

Ο περιορισμός (27) διασφαλίζει ότι το ποσοστό μπαταρίας δεν πέφτει ποτέ κάτω από το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο (20%) σε κανέναν σταθμό. Αυτό είναι κρίσιμο για την αποφυγή βλαβών στη μπαταρία και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του οχήματος.

$$SOC_k \leq SOC_{\max}, \forall k \in K \quad (28)$$

Ο περιορισμός (28) διασφαλίζει ότι το ποσοστό μπαταρίας δεν υπερβαίνει ποτέ το μέγιστο (100%) σε κανέναν σταθμό.

0%). Αυτό προστατεύει τη μπαταρία από υπερφόρτιση και διατηρεί τη μακροπρόθεσμη υγεία της.

$$l_{t,k} = l_{t,k-1} + bb_{t,k} - \sum_{y < k} ww_{t-1,y,k} - \sum_{y < k} w_{t,y,k}, \forall k > 1 \quad (29)$$

Η εξίσωση (29) υπολογίζει το φορτίο επιβατών μετά από κάθε σταθμό $k > 1$.

Το φορτίο εξαρτάται από:

- Το φορτίο στον προηγούμενο σταθμό ($l_{t,k-1}$)
- Τους νέους επιβάτες που επιβιβάζονται ($bb_{t,k}$)
- Τους επιβάτες που κατέβηκαν (αναπαριστώνται από τις αφαιρέσεις των $ww_{t-1,y,k}$ και $w_{t,y,k}$ για $y < k$)

Αυτή η εξίσωση διασφαλίζει τη συνέχεια της ροής επιβατών κατά μήκος της διαδρομής.

$$l_{t,k} \leq C \cdot \left(\sum_{s \in S} \sum_{u \in U} u \cdot X_{s,u,t} \right), \forall k > 1 \quad (30)$$

Ο περιορισμός (30) διασφαλίζει ότι το φορτίο σε κάθε σταθμό $k > 1$ δεν υπερβαίνει ποτέ τη συνολική χωρητικότητα των ανατεθειμένων μονάδων. Αυτό είναι απαραίτητο για την τήρηση των προτύπων ασφαλείας και την αποφυγή υπερπλήρωσης.

$$\sum_{y > k} ww_{t,k,y} = (1 - z_{t,k}) \cdot \sum_{y > k} w_{t,k,y}, \forall t \in T, k \in K \quad (31)$$

Η εξίσωση (31) διασφαλίζει τη διατήρηση της ροής επιβατών. Η συνολική μη εξυπηρετημένη ζήτηση από έναν σταθμό k είναι ανάλογη του ποσοστού μη επιβίβασης ($1 - z_{t,k}$) και της συνολικής ζήτησης από αυτόν τον σταθμό.

$$d_{t,k} \leq \sum_{y > k} w_{t,k,y} + \sum_{y < k} w_{t,y,k}, \forall t \in T, k \in K \quad (32)$$

Ο περιορισμός (32) αποτελεί μέρος της λογικής μεταβαλλόμενης εξυπηρέτησης στάσεων. Ελέγχει αν το όχημα πρέπει να σταματήσει στη στάση k κατά τη διάρκεια του δρομολογίου t . Η μεταβλητή $d_{t,k}$ είναι δυαδική και παίρνει την τιμή 1 μόνο όταν υπάρχει επιβάτης που είτε θέλει να επιβιβαστεί είτε να αποβιβαστεί στη στάση αυτή. Αν και οι δύο αθροίσεις είναι μηδέν, τότε δεν υπάρχει λόγος στάσης και το $d_{t,k}$ ορίζεται αναγκαστικά ως 0. Αντίθετα, οποιαδήποτε θετική ζήτηση επιτρέπει το ενδεχόμενο στάσης. Αυτός ο περιορισμός βελτιστοποιεί τη λειτουργία του συστήματος, εξορίζοντας στάσεις χωρίς ζήτηση και μειώνοντας το συνολικό κόστος.

$$M \cdot d_{t,k} \geq \sum_{y>k} w_{t,k,y} + \sum_{y<k} w_{t,y,k}, \forall t \in T, k \in K \quad (33)$$

Η εξίσωση (33) λειτουργεί ως συμπληρωματικός λογικός περιορισμός στην εξίσωση (32) και διασφαλίζει ότι εάν υπάρχει έστω και ένας επιβάτης που επιθυμεί να επιβιβαστεί ή να αποβιβαστεί στη στάση k κατά το δρομολόγιο t , τότε η μεταβλητή $d_{t,k}$ ενεργοποιείται, δηλαδή λαμβάνει την τιμή 1. Ο παράγοντας M είναι ένας μεγάλος θετικός αριθμός (Big-M), επαρκώς μεγαλύτερος από κάθε πιθανή ζήτηση, που καθιστά δυνατή τη διατύπωση της λογικής "αν υπάρχει ζήτηση, τότε $d_{t,k} = 1$ ". Αν η δεξιά πλευρά είναι θετική, το $d_{t,k}$ δεν μπορεί να είναι 0 χωρίς να παραβιαστεί η ανισότητα. Ο συνδυασμός των εξισώσεων (28) και (29) υλοποιεί πλήρως τη πολιτική μεταβαλλόμενων στάσεων, δηλαδή δεν θα εξυπηρετεί στάσεις χωρίς ζήτηση.

5. Μέθοδος Επίλυσης

Για την επίλυση του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed-Integer Nonlinear Programming - MAMΓΠ) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό επίλυσης Gurobi μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη διαδοχική δήλωση των συνόλων, των παραμέτρων, των μεταβλητών απόφασης, της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4. Η διαδικασία επίλυσης αποδείχθηκε αποδοτική, καθώς παρήγαγε βέλτιστες λύσεις εντός λογικού χρονικού πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

6. Μελέτη Εφαρμογής και Αποτελέσματα

Η εφαρμογή του αναπτυγμένου μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε υφιστάμενη λεωφορειακή γραμμή της Λεμεσού, τη γραμμή 31, η οποία αποτελεί έναν από τους κύριους άξονες μετακίνησης της πόλης. Η γραμμή περιλαμβάνει εννέα στάσεις και δεκαπέντε ταξίδια, ξεκινώντας από τη Νέα Εκάλη και καταλήγοντας στο Καζίνο – City of Dreams, ενώ στο ενδιάμεσο εξυπηρετεί περιοχές υψηλής συγκοινωνιακής σημασίας, όπως η Πλατεία Ηρώων, η Σχολή Λανιτείου, η περιοχή Εναερίου και το Πανεπιστήμιο ΤΕΠΑΚ. Η επιλογή αυτής της γραμμής δεν υλοποιήθηκε τυχαία, καθώς συγκεντρώνει τόσο εκπαιδευτικούς και εμπορικούς πόλους έλξης όσο και τουριστικές δραστηριότητες, γεγονός που την καθιστά αντιπροσωπευτική για τη μελέτη των αναγκών μετακίνησης στη Λεμεσό. Παράλληλα, η ύπαρξη σημαντικών διακυμάνσεων στη ζήτηση μεταξύ στάσεων ενισχύει την καταλληλότητά της για την εφαρμογή στρατηγικών βελτιστοποίησης όπως η πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων και η χρήση ηλεκτρικών και αυτόνομων λεωφορείων, επιτρέποντας την εξαγωγή ασφαλών και γενικεύσιμων συμπερασμάτων.



Εικόνα 2α. Δίκτυο μελέτης περίπτωσης –
Κύρια Κατεύθυνση
Πηγή: Ιδία Επεξεργασία



Εικόνα 2β. Δίκτυο μελέτης περίπτωσης –
Αντίθετη Κατεύθυνση
Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Πίνακας 2:Επίβατικός φόρτος αυτόνομου λεωφορείου στα 15 ταξίδια

ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΣΕΩΝ															
STOPS	TRIP 1	TRIP 2	TRIP 3	TRIP 4	TRIP 5	TRIP 6	TRIP 7	TRIP 8	TRIP 9	TRIP 10	TRIP 11	TRIP 12	TRIP 13	TRIP 14	TRIP 15
1	30	42	51	19	58	29	51	23	48	19	39	33	51	19	58
2	35	50	87	29	85	48	85	39	85	45	76	42	87	29	85
3	24	58	124	44	95	57	99	58	112	52	92	52	124	44	95
4	-	60	138	49	112	65	117	72	112	58	113	55	138	49	112
5	-	57	123	53	116	64	126	68	111	64	117	53	123	53	116
6	12	49	103	51	99	56	115	59	98	58	108	46	103	51	99
7	16	47	77	44	80	45	84	43	74	45	85	45	77	44	80
8	3	84	47	26	43	30	43	26	42	22	49	24	47	26	43
9	3	84	47	26	43	30	43	26	42	22	49	24	47	26	43

Πίνακας 3:Επίβατικός φόρτος συμβατικού λεωφορείου στα 15 ταξίδια

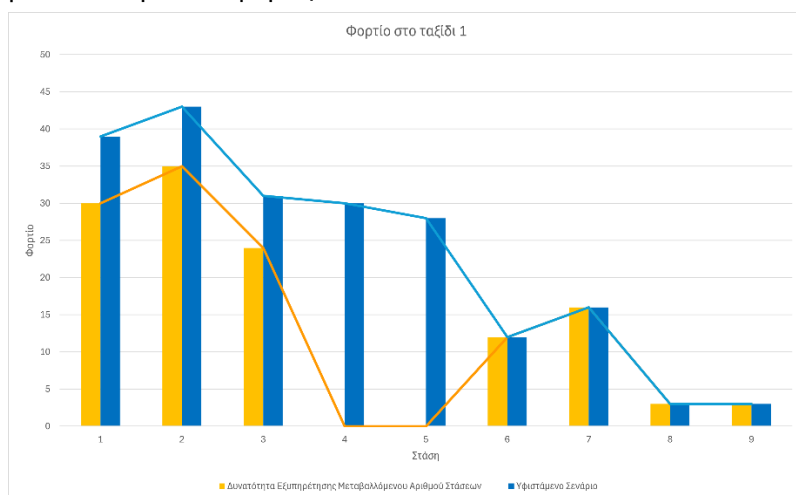
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΣΕΝΑΡΙΟ															
STOPS	TRIP 1	TRIP 2	TRIP 3	TRIP 4	TRIP 5	TRIP 6	TRIP 7	TRIP 8	TRIP 9	TRIP 10	TRIP 11	TRIP 12	TRIP 13	TRIP 14	TRIP 15
1	39	33	51	19	58	29	51	23	48	19	39	33	51	19	58
2	43	42	87	29	85	48	85	39	85	133	76	42	87	29	85
3	31	52	124	140	95	140	99	58	112	140	92	52	124	140	95

4	30	140	138	140	112	140	117	140	112	140	113	140	138	140	112
5	28	140	123	140	116	140	126	140	111	140	117	140	123	140	116
6	12	140	103	140	99	140	115	140	98	140	108	140	103	140	99
7	16	140	77	140	80	140	84	140	74	140	85	140	77	140	80
8	3	140	47	140	43	140	43	140	42	140	49	140	47	140	43
9	3	140	47	140	43	140	43	140	42	140	49	140	47	140	43

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα φορτία των επιβατών ανά στάση για το σενάριο εφαρμογής μεταβαλλόμενης εξυπηρέτησης στάσεων (STP). Παρατηρείται ότι, εφαρμόζοντας την πολιτική στο πρώτο δρομολόγιο, το αυτόνομο λεωφορείο εξυπηρετεί τη στάση 1 και 2, προσπερνάει τη στάση 4 και 5 και εξυπηρετεί τη στάση 6. Τα υπόλοιπα ταξίδια εξυπηρετούν όλες τις στάσεις κανονικά.

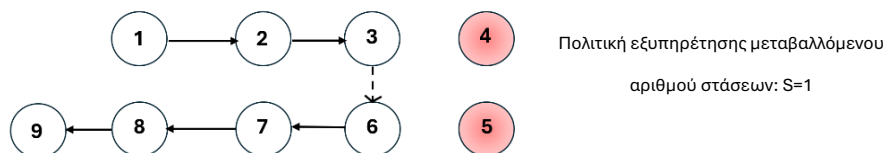
Αντίστοιχα, στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα φορτία για το σενάριο αναφοράς as-is, όπου δεν ακολουθείται η πολιτική εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Σε αυτή την περίπτωση, το λεωφορείο συνεχίζει κανονικά σε όλες τις στάσεις, με αποτέλεσμα να παρατηρείται συσώρευση επιβατών και μικρότερη ευελιξία στην κάλυψη της ζήτησης.

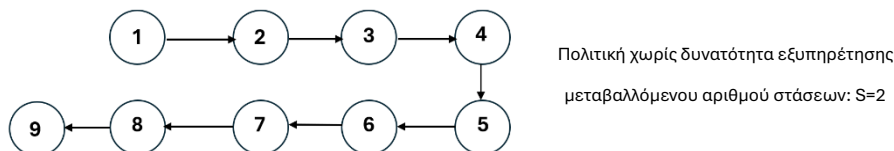
Συνολικά, από τους Πίνακες 2 και 3 τα φορτία του βέλτιστου σεναρίου είναι μικρότερα σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.



Διάγραμμα 1: Φόρτος Επιβατών σε κάθε στάση του ταξιδιού 1 για τα δύο σενάρια

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται συγκριτικά η κατανομή του φορτίου επιβατών στο πρώτο ταξίδι για τα δύο σενάρια. Παρατηρείται ότι στο σενάριο αναφοράς (μπλε χρώμα) τα φορτία παραμένουν υψηλότερα σχεδόν σε όλη τη διαδρομή, ενώ στο σενάριο με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων (κίτρινο χρώμα) παρατηρείται πιο ομαλή κατανομή των επιβατών και μείωση της υπερφόρτωσης στις ενδιάμεσες στάσεις. Η σύγκριση καταδεικνύει ότι η εφαρμογή της πολιτικής μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων οδηγεί σε πιο αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων μονάδων και συμβάλλει στη μείωση μη παραγωγικών διαδρομών.





Εικόνα 2: Διαδρομές ανά πολιτική εξυπηρέτησης

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, στο ανώτερο μέρος ($S = 1$) απεικονίζεται η πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων. Το δρομολόγιο εκτελείται $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ και, λόγω χαμηλής ζήτησης στις ενδιάμεσες στάσεις, πραγματοποιείται εξυπηρέτηση μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων με ευθεία μετάβαση $3 \rightarrow 6$, οπότε οι στάσεις 4 και 5 δεν εξυπηρετούνται στο συγκεκριμένο ταξίδι. Η λογική αυτή αντιστοιχεί στη «μεταβαλλόμενη εξυπηρέτηση στάσεων», δηλαδή επιτρέπεται η παράκαμψη επιλεγμένων στάσεων, με σκοπό την μείωση του κόστους και χρόνου, οδηγώντας σε μικρότερη διαδρομή και σε ένα βελτιστοποιημένο σύστημα αυτόνομου λεωφορείου.

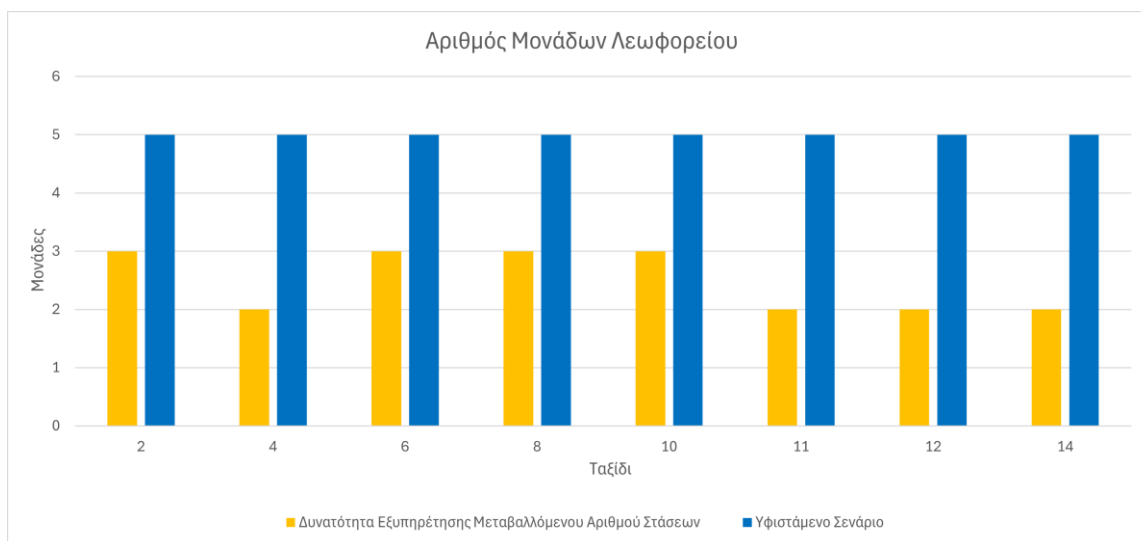
Πίνακας 4: Συνεισφορά πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων

ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΣΕΩΝ					
TRIPS	X	NO. OF SKIP STOPS	NO. OF MODULAR UNITS	KM TRAVELED	OPERATION COST (UNITS X KM TRAVELED)
1	$X[1,5,1] = 1.0$	2	5	12.2	61
2	$X[2,3,2] = 1.0$	0	3	15.5	46.5
3	$X[2,5,3] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
4	$X[2,2,4] = 1.0$	0	2	15.5	31
5	$X[2,5,5] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
6	$X[2,3,6] = 1.0$	0	3	15.5	46.5
7	$X[2,5,7] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
8	$X[2,3,8] = 1.0$	0	3	15.5	46.5
9	$X[2,5,9] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
10	$X[2,3,10] = 1.0$	0	3	15.5	46.5
11	$X[2,5,11] = 1.0$	0	2	15.5	31
12	$X[2,2,12] = 1.0$	0	2	15.5	31
13	$X[2,5,13] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
14	$X[2,2,14] = 1.0$	0	2	15.5	31
15	$X[2,5,15] = 1.0$	0	5	15.5	77.5
				OP. COST 1	836

Πίνακας 5: Συνεισφορά του σεναρίου αναφοράς

ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ				
TRIPS	X	NO. OF MODULAR UNITS	KM TRAVELED	OPERATION COST (UNITS X KM TRAVELED)
1	X [2,5,1] = 1.0	5	15.5	77.5
2	X [2,5,2] = 1.0	5	15.5	77.5
3	X [2,5,3] = 1.0	5	15.5	77.5
4	X [2,5,4] = 1.0	5	15.5	77.5
5	X [2,5,5] = 1.0	5	15.5	77.5
6	X [2,5,6] = 1.0	5	15.5	77.5
7	X [2,5,7] = 1.0	5	15.5	77.5
8	X [2,5,8] = 1.0	5	15.5	77.5
9	X [2,5,9] = 1.0	5	15.5	77.5
10	X [2,5,10] = 1.0	5	15.5	77.5
11	X [2,5,11] = 1.0	5	15.5	77.5
12	X [2,5,12] = 1.0	5	15.5	77.5
13	X [2,5,13] = 1.0	5	15.5	77.5
14	X [2,5,14] = 1.0	5	15.5	77.5
15	X [2,5,15] = 1.0	5	15.5	77.5
				OP. COST 2
				1162.5

Στους παραπάνω πίνακες 4 και 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων, με ιδιαίτερη έμφαση στον αριθμό των στάσεων που παραλείπονται, στον αριθμό των μονάδων, στα χιλιόμετρα που διανύονται και στο αντίστοιχο λειτουργικό κόστος. Για το Σενάριο 1 παρατηρείται ότι σε ορισμένα ταξίδια εφαρμόζεται εξυπηρέτηση μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων, με αποτέλεσμα να παραλείπονται στάσεις και να μειώνεται η συνολική απόσταση που διανύεται. Αυτό επιτρέπει τη χρήση λιγότερων μονάδων σε συγκεκριμένα δρομολόγια, οδηγώντας σε διαφοροποίηση του λειτουργικού κόστους. Το συνολικό κόστος που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους δρομολογίων είναι ίσο με 836, τιμή σημαντικά μικρότερη σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Η διαφοροποίηση αυτή τεκμηριώνει ότι η πολιτική με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων οδηγεί σε καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων, μειώνοντας τις μη παραγωγικές μετακινήσεις. Αντίθετα, στο Σενάριο 1 δεν εφαρμόζεται καμία εξυπηρέτηση μεταβαλλόμενων στάσεων. Σε όλα τα δρομολόγια χρησιμοποιείται σταθερά ο μέγιστος αριθμός μονάδων (5 μονάδες) και καλύπτονται όλες οι στάσεις, με αποτέλεσμα το λειτουργικό κόστος να παραμένει υψηλό και να ανέρχεται συνολικά σε 1162,5. Αυτό καταδεικνύει ότι η απουσία στρατηγικής προσαρμογής οδηγεί σε υπέρ-εκμετάλλευση των διαθέσιμων μονάδων, χωρίς ουσιαστική βελτιστοποίηση.



Διάγραμμα 2:Αριθμός μονάδων λεωφορείου για τα δύο σενάρια

Στο διάγραμμα 2 συγκρίνονται οι μονάδες που χρησιμοποιούνται ανά δρομολόγιο στα δύο σενάρια. Η απεικόνιση περιλαμβάνει τα ταξίδια όπου εμφανίζεται διαφοροποίηση, με μέγιστο αριθμό τις 5 μονάδες. Είναι εμφανές ότι στο Σενάριο 1 ο αριθμός μονάδων παραμένει συνεχώς στο ανώτατο επίπεδο, ενώ στο Σενάριο 2 υπάρχει ευελιξία και μείωση του αριθμού τους σε επιλεγμένα δρομολόγια. Η διαφορά αυτή αποδεικνύει ότι η εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων και της μεταβαλλόμενης εξυπηρέτησης στάσεων συνεισφέρει ουσιαστικά στη μείωση του κόστους λειτουργίας και στην πιο ισορροπημένη χρήση του στόλου, και ανταποκρίνεται ευέλικτα στην ζήτηση με μειωμένο κόστος λειτουργικών εξόδων.

Το τελικό και πιο σημαντικό μέγεθος της σύγκρισης είναι το λειτουργικό κόστος, το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

Λειτουργικό Κόστος = Μονάδες (Units) × Χιλιόμετρα Διαδρομής (Km Traveled).

Πίνακας 6:Συνολικός πίνακας Ελαχιστοποίησης λειτουργικού κόστους

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ = Χιλιόμετρα Διαδρομής * Μονάδες		ΔΙΑΦΟΡΑ
ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΑΣΕΩΝ	836	326.5
ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	1162.5	

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι στο Σενάριο 1 το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 836, ενώ στο Σενάριο Αναφοράς (As-is) το αντίστοιχο κόστος είναι 1162,5. Η διαφορά αυτή είναι ίση με 326,5 και αποτυπώνει τη σαφή εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής της πολιτικής εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων.

Η βελτίωση που προκύπτει εκφράζεται ως ποσοστό με βάση τον τύπο:

$$\text{ΒΕΛΤΙΩΣΗ} = \frac{OP_COST_{AS-IS} - OP_COST_{STP}}{OP_COST_{AS-IS}}$$

Πίνακας 7:Βελτιστοποίηση του συστήματος αυτόνομου λεωφορείου

ΒΕΛΤΙΩΣΗ			
(Λ.Κ 2 - Λ.Κ 1) / Λ.Κ 2	0.28	=	28%

Η τιμή που υπολογίστηκε ανέρχεται σε **28%**, γεγονός που αναδεικνύει ότι η εξυπηρέτηση μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του λειτουργικού κόστους. Το εύρημα αυτό αποτελεί την πιο σημαντική απόδειξη της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας, καθώς δείχνει ότι με την εφαρμογή της μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση πόρων και βελτιστοποίηση της χρήσης των μονάδων σε σχέση με το παραδοσιακό σενάριο λειτουργίας.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε, μέσω της εφαρμογής σε πραγματικό συγκοινωνιακό δίκτυο της Λεμεσού, τη σημαντική συμβολή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αστικών λεωφορείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν με σαφήνεια ότι η εφαρμογή της συγκεκριμένης στρατηγικής μειώνει αισθητά το λειτουργικό κόστος, εξισορροπεί καλύτερα τη χρήση των διαθέσιμων μονάδων και αποτρέπει τη σπατάλη πόρων σε δρομολόγια με χαμηλή ζήτηση. Η μείωση του κόστους κατά 28% στο εξεταζόμενο δίκτυο αποτελεί αδιάψευστη ένδειξη της αποτελεσματικότητας της μεθοδολογίας και επιβεβαιώνει την αξία της σε δίκτυα μεγαλύτερης κλίμακας.

Η εφαρμογή της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία σε μεγάλα και πολυσύνθετα δίκτυα αστικών λεωφορείων, όπου η ζήτηση εμφανίζει έντονες χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις. Σε τέτοια περιβάλλοντα, η υιοθέτηση της πολιτικής με δυνατότητα εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη μείωση της συμφόρησης, στην καλύτερη αξιοποίηση του στόλου και στην αποτελεσματική κατανομή της προσφοράς μετακινήσεων εκεί όπου αυτή είναι περισσότερο αναγκαία. Η εξυπηρέτηση μεταβαλλόμενου αριθμού στάσεων δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική εξοικονόμησης, αλλά μια στρατηγική προσαρμογής που ανταποκρίνεται δυναμικά στις πραγματικές συνθήκες ζήτησης.

Όσον αφορά μελλοντική έρευνα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προοπτική ενσωμάτωσης υπηρεσιών εξυπηρέτησης με βάση τη ζήτηση, όπου τα δρομολόγια ενεργοποιούνται μόνο όταν προκύπτει επιβατική ανάγκη. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να λειτουργούν επικουρικά σε περιοχές ή χρονικές περιόδους όπου η ζήτηση είναι περιορισμένη ή κατακερματισμένη, προσφέροντας ευελιξία και βελτιώνοντας την κάλυψη του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό

επιτυγχάνεται ένας υβριδικός σχεδιασμός, όπου τα κύρια δρομολόγια υποστηρίζονται από δυναμικά συστήματα μικρότερης κλίμακας, τα οποία εξασφαλίζουν την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Η συμπληρωματική αυτή σχέση μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πιο ολοκληρωμένες συγκοινωνιακές λύσεις στις σύγχρονες πόλεις.

Συμπερασματικά, προτείνονται η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μεγάλα μητροπολιτικά δίκτυα, η αξιολόγηση της επίδρασης της εξυπηρέτησης μεταβαλλόμενων στάσεων σε συνδυασμό με διαφορετικά σενάρια τιμολογιακής πολιτικής, καθώς και η διερεύνηση υβριδικών μοντέλων που ενσωματώνουν ταυτόχρονα την προγραμματισμένη δρομολόγηση και υπηρεσίες εξυπηρέτησης με βάση τη ζήτηση. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα χρήσης προηγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι θα μπορούν να λαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο αποφάσεις για την προσαρμογή των δρομολογίων και την καλύτερη αξιοποίηση του στόλου.

Συνολικά, η εργασία ανέδειξε ότι η πολιτική αυτή αποτελεί μια αποδοτική και ρεαλιστική στρατηγική για τη βελτίωση της λειτουργίας των αστικών λεωφορείων, ενώ η ενσωμάτωσή της με συστήματα που εξυπηρετούνται ανάλογος της ζήτησης δημιουργεί νέες προοπτικές για την ανάπτυξη πιο ευέλικτων, βιώσιμων και αποδοτικών συγκοινωνιακών δικτύων. Η κατεύθυνση αυτή μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις αστικές περιοχές, στη μείωση των λειτουργικών δαπανών και στην προώθηση ενός σύγχρονου και προσαρμοστικού συστήματος μεταφορών.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Clausius Scientific Press. (2023a). Analysis of Modular Autonomous Urban Micro-Bus Applications. *Journal of Electrotechnology, Electrical Engineering and Management*.
- Clausius Scientific Press. (2023b). Analysis of Modular Autonomous Urban Micro-Bus Applications. *Journal of Electrotechnology, Electrical Engineering and Management*, 100–101.
- Delle, S., & Filippi, F. (2020). A method for designing and evaluating Demand Responsive Transport services. *Case Studies on Transport Policy*, 8.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
- Fagnant, D., Kockelman, & Kara. (2015). Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 167–181.
- Favarò, F., Eurich, S., & Nader, N. (2018). Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis & Prevention*.
- Forum, W. E. (2023). *5 Cities Trying Innovations with Their Public Transport*.
- Gao, H., Liu, K., Wang, J., & Guo, F. (2023). *Modular Bus Unit Scheduling for an Autonomous Transit System under Range and Charging Constraints*.
- Gao, Z., Guo, Y., & Liu, P. (2023). A Modular Bus Scheduling Method Based on Demand Prediction and Dynamic Vehicle Adjustment. *Journal of Advanced Transportation*, 1–12.
- Gkiotsalitis, K. (2019). Robust Stop-Skipping at the Tactical Planning Stage with Evolutionary Optimization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 611–623. <https://doi.org/10.1177/0361198119834549>
- Gkiotsalitis, K. (2022). *Public Transport Optimazation*.
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). *At-stop control measures in public transport: Literature review and research agenda*.
- Gkiotsalitis, K., Rizopoulos, D., Merakou, M., & Iliopoulou, C. (2025). Electric bus charging station location selection problem with slow and fast charging. *Applied Energy*.
- Guo, R., Guan, W., Vallati, M., & Zhang, W. (2023). Modular Autonomous Electric Vehicle Scheduling for Customized On-Demand Bus Services. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24.
- Huang, D., Xing, J., Liu, Z., & An, Q. (2020). A multi-stage stochastic optimization approach to stop-skipping and bus lane reservation. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17.
- Ivan Dakic, Oded Cats, & Niels van Oort. (2021). Design and evaluation of modular public transport services using a macroscopic fundamental diagram approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
- Jie Dai, Chunyan Tang, & Jiyu Zhang. (2020). An optimization model for mixed fleet operation of modular and conventional buses. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 569–581.
- Jihui, M., Yang, Y., Wei, G., Fei, W., Tao, L., Wenyan, T., & Cuiying, S. (2017). Large-Scale Demand Driven Design of a Customized Bus Network: A Methodological Framework and Beijing Case Study. *Journal of Advanced Transportation*.
- Jiyu, Z., Ying-En Ge, & Meisu Zhong. (2024). Optimising modular-autonomous-vehicle transit service employing coupling–decoupling operations plus skip-stop strategy. *Transportation Research*

Part E: Logistics and Transportation Review, 184.

- Kawaguchi, A., & Hiraoka, T. (2020). Development and demonstration of modular buses for flexible transport services in Japan. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- Khan, Z. S. ; H. W. M. M. (2022). *Application of Modular Vehicle Technology to Mitigate Bus Bunching*.
- Kim, H., Lee, J., & Park, C. (2023). Real-world implementation of modular bus operations in Korea: Efficiency and service quality impacts. *Journal of Advanced Transportation*.
- Leffler, D. (2020). Optimizing Urban Transit Routes Through Short Turning: A Simulation Approach. *Transportation Research Procedia*, 495–502.
- Leffler, H. (2020). Optimizing Bus Networks with Short-Turning: A Methodological Approach and Case Study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 205–220.
- Liu, T., & Ceder, A. A. (2020). Using Deficit Function to Determine the Minimum Fleet Size of an Autonomous Modular Public Transit System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 532–541.
- Milakis, D., Snelder, M., Arem, B. van, Wee, B. van, & Almeida Correia, G. H. de. (2017). *Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050*.
- Next Future Mobility. (2018). *Modular Autonomous Bus Trials in Dubai*.
- Next Future Transportation Inc. (2018). *Modular Self-Driving Vehicle Concept*.
- Oikonomou, M., Kopelias, P., Vlahogianni, E., & Mourtakos, V. (2019). Impacts of autonomous on-demand mobility service: A simulation experiment in the City of Athens. *Transportation Letters The International Journal of Transportation Research* 14.
- Oikonomou, M., Sekadakis, M., Katrakazas, C., & George, Y. (2022). Safety impacts of autonomous shuttle bus with different operational speeds towards. *Transportation Research Board (TRB) 102nd Annual Meeting*.
- Salode, C. K., & Ramamoorthy, P. (2024). *Train timetabling with rolling stock assignment, short-turning and skip-stop strategy for a bidirectional metro line*.
- Salode, H., & Ramamoorthy, R. (2024). Dynamic Route Optimization Using Short Turning in Bus Networks. *Procedia Computer Science*, 1162–1170.
- Shen, J., Liu, Q., Ye, J., & Ma, C. (2023). Autonomous bus services: current research status and future recommendations. *Digital Transportation and Safety*, 229–240.
- Tian, Q., Lin, Y., & Wang, D. (. (2023). Joint scheduling and formation design for modular-vehicle transit service with time-dependent demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 147.
- Tirachini, A., Cortés, C., & Díaz, S. J. (2011). Optimal design and benefits of a short turning strategy for a bus corridor. *Transportation*, 38 (1), 169–189.
- UITP, I. A. of P. T. (2021). *Public Transport Trends 2021*.
- Union Internationale des Transports Publics (UITP). (2021). Transforming Cities with Bus Rapid Transit (BRT) Systems. *UITP Publications*.
- Wu, H., Liu, Y., & Ma, K. (2021). Integrated Planning of Electric Modular Bus Operations Using Big Data. *Sustainable Cities and Society*.
- Wu, J., Kulcsár, B., & Qu, X. (2021a). A modular, adaptive, and autonomous transit system (MAATS): An in-motion transfer strategy and performance evaluation in urban grid transit networks.

- Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 151.
- Wu, J., Kulcsár, B., & Qu, X. (2021b). A modular, adaptive, and autonomous transit system (MAATS): An in-motion transfer strategy and performance evaluation in urban grid transit networks.
- Wu, W., Liu, R., Jin, W., & Ma, C. (2019). Simulation-based robust optimization of limited-stop bus service with vehicle overtaking and dynamics: A response surface methodology. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 130,.
- Xumei Chen, Zhaohui Liu, & Jingqin Lin. (2019). Design and optimization of an autonomous modular bus system for shuttle services under congestion. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 474–491.
- Yanik, A., & Yilmaz, G. (2023). Design and Operational Strategies for Modular Bus Systems in Smart Cities. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 45–58.
- Yanik, S., & Yilmaz, S. (2023). Optimal design of a bus route with short-turn services. *Public Transport*, 15, 167–197.
- Ye, L., & Yamamoto, T. (2019). Evaluating the impact of connected and autonomous vehicles on traffic safety. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*.
- Yucheng Tian, Yihui Chen, Chunyan Tang, & Jiyu Zhang. (2022). Planning modular vehicle transit services with optimization of coupling and decoupling station locations and capacities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Yue, Z., Liangpeng, G., & Wenquan, L. (2021). Vehicle Routing and Scheduling of Flex-Route Transit under a Dynamic Operating Environment. *Discrete Dynamics in Nature and Society*.
- Zhang, Q., Wallbridge, C., Jones, D., & Morgan, P. (2024). Public perception of autonomous vehicle capability determines judgment of blame and trust in road traffic accidents. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
- Zhang, Z., Tafreshian, A., & Masoud, N. (2020). Modular transit: Using autonomy and modularity to improve performance in public transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141.
- Zhou, Y., Zhang, X., & Guo, L. (2023). An optimization framework for modular bus scheduling with on-demand passenger requests. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Zijia Fu, & Joseph Y. J. Chow. (2023). Dial-a-ride problem with modular platooning and en-route transfers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 152.