

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ**

**Αξιολόγηση πραγματικών δεδομένων οδήγησης επιβατικού  
αυτοκινήτου στη Θάσο.**

**Λαδίκας Ηρακλής**

**ΑΜ: 20098**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Τζιράκης Ευάγγελος**

**Ηράκλειο 2026**

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση τοπικού κύκλου οδήγησης βάσει πραγματικών δεδομένων μετακίνησης επιβατικού αυτοκινήτου στο νησί της Θάσου. Στόχος της εργασίας είναι η αποτύπωση της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς σε ένα νησιωτικό οδικό περιβάλλον με έντονη εποχικότητα και αυξημένη κυκλοφοριακή φόρτιση κατά τη θερινή περίοδο.

Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδικών μεταφορών, το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο εκπομπών (Euro, WLTP, RDE, Euro 7), καθώς και η ιστορική εξέλιξη και τα βασικά χαρακτηριστικά διεθνών κύκλων οδήγησης. Παράλληλα, αναλύονται οι κύριες μεθοδολογίες δημιουργίας κύκλων οδήγησης, με έμφαση στη μέθοδο των microtrips.

Στο πειραματικό μέρος συλλέχθηκαν δεδομένα πραγματικής οδήγησης μέσω συσκευής OBD-II σε επιλεγμένη διαδρομή του νησιού, κατά την περίοδο τουριστικής αιχμής. Τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία και στατιστική ανάλυση, με διαχωρισμό των μετρήσεων σε μεσημεριανές και βραδινές χρονικές ζώνες, προκειμένου να διερευνηθούν οι διαφοροποιήσεις στη δομή και τη δυναμική της οδήγησης.

Με βάση τα επεξεργασμένα δεδομένα αναπτύχθηκε ένας ενιαίος τοπικός κύκλος οδήγησης, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία microtrips. Ο κύκλος αξιολογήθηκε ως προς την αντιπροσωπευτικότητά του μέσω σύγκρισης βασικών κινηματικών χαρακτηριστικών και κατανομών ταχυτήτων με τα πραγματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο παραγόμενος κύκλος αποτυπώνει ρεαλιστικά τη συνολική οδηγική συμπεριφορά στη μελετώμενη διαδρομή, υπό συνθήκες αυξημένης κυκλοφορίας.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ποιοτική σύγκριση του τοπικού κύκλου με θεσμοθετημένους κύκλους οδήγησης, όπως ο WLTP, αναδεικνύοντας τον συμπληρωματικό ρόλο των τοπικών κύκλων στη ρεαλιστική αξιολόγηση της οδήγησης σε ειδικά γεωγραφικά περιβάλλοντα.

**Λέξεις-κλειδιά:** κύκλος οδήγησης, πραγματικά δεδομένα οδήγησης, OBD, microtrips, WLTP, τουριστική αιχμή, νησιωτικό οδικό δίκτυο

## Abstract

This diploma thesis focuses on the development and evaluation of a local driving cycle based on real-world driving data collected from a passenger car on the island of Thasos, Greece. The main objective is to capture real driving behavior in an insular road environment characterized by strong seasonality and increased traffic demand during the summer period.

The theoretical part presents the environmental impacts of road transport, the current emission legislation framework (Euro standards, WLTP, RDE, Euro 7), as well as the historical development and main characteristics of international driving cycles. In addition, the main methodologies for driving cycle construction are reviewed, with emphasis on the microtrip-based approach.

In the experimental part, real-world driving data were collected using an OBD-II device along a selected route on the island during the tourist peak period. The data were pre-processed and statistically analyzed, including a distinction between midday and evening driving periods, in order to investigate differences in driving characteristics and dynamics.

Based on the processed data, a single local driving cycle was developed using the microtrip methodology. The representativeness of the cycle was evaluated through comparisons of key kinematic characteristics and speed distributions with the original driving data. The results indicate that the developed cycle realistically represents the overall driving behavior under conditions of increased traffic demand.

Finally, a qualitative comparison with standardized driving cycles, such as the WLTP, was conducted, highlighting the complementary role of local driving cycles in achieving a more realistic assessment of driving behavior in specific geographical environments.

**Keywords:** Driving cycles, real-world driving data, microtrips, WLTP, local driving cycle, tourist peak period, insular road network

## Πίνακας περιεχομένων

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη .....                                                                                                      | 2  |
| Abstract .....                                                                                                      | 2  |
| 1. Εισαγωγή.....                                                                                                    | 9  |
| 1.1. Γενικό πλαίσιο .....                                                                                           | 9  |
| 1.2. Κίνητρα και σκοπός της έρευνας.....                                                                            | 10 |
| 1.3. Μεθοδολογική προσέγγιση και διάρθρωση εργασίας .....                                                           | 10 |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....                                                                                         | 11 |
| 2.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση και επιπτώσεις.....                                                                       | 11 |
| 2.2. Νομοθεσία και κανονισμοί εκπομπών (Euro, WLTP, RDE, Euro 7) .....                                              | 12 |
| 2.2.1. Οι προδιαγραφές Euro: έννοια, σκοπός και γενική εξέλιξη .....                                                | 12 |
| 2.2.2. Ιστορική εξέλιξη των προτύπων Euro (Euro 1 έως Euro 6d).....                                                 | 13 |
| 2.2.3. Euro 6e-bis: Ισχύον κανονιστικό πλαίσιο και έλεγχος εκπομπών<br>σε πραγματικές συνθήκες .....                | 14 |
| 2.2.4. Ο κύκλος NEDC – Ιστορική εξέλιξη, χαρακτηριστικά και<br>περιορισμοί .....                                    | 15 |
| 2.2.5. Ο κύκλος WLTP – Ανάπτυξη, στόχοι και διαφορές από τον<br>NEDC.....                                           | 17 |
| 2.2.6. RDE – Real Driving Emissions: Ανάγκη, μεθοδολογία και<br>εφαρμογή.....                                       | 18 |
| 2.2.7. Euro 7 – Νέο ολοκληρωμένο κανονιστικό πλαίσιο και διεύρυνση<br>του ελέγχου εκπομπών.....                     | 19 |
| 2.3. Κύκλοι οδήγησης: Ιστορική εξέλιξη και διεθνή πρότυπα .....                                                     | 20 |
| 2.3.1. Ιστορικές απαρχές και εξέλιξη των πρώτων κύκλων οδήγησης ..                                                  | 20 |
| 2.3.2. Ο κύκλος FTP-75 – Δομή. Φιλοσοφία σχεδιασμού και σημασία<br>στη μέτρηση εκπομπών .....                       | 21 |
| 2.3.3. Οι κύκλοι Artemis (CADC) – Ανάπτυξη, μεθοδολογία και συμβολή<br>στην ευρωπαϊκή έρευνα .....                  | 23 |
| 2.3.4. Ο κύκλος WLTP στο διεθνές πλαίσιο – Ανάπτυξη, τεχνική<br>φιλοσοφία και ρόλος στην παγκόσμια εναρμόνιση ..... | 25 |
| 2.3.5. Συγκριτική ανάλυση διεθνών κύκλων οδήγησης (FTP-75, Artemis,<br>WLTP).....                                   | 28 |
| 2.4. Μέθοδοι δημιουργίας κύκλων οδήγησης .....                                                                      | 31 |
| 2.4.1. Θεωρητικό υπόβαθρο και αναγκαιότητα μεθοδολογικής<br>προσέγγισης .....                                       | 31 |
| 2.4.2. Μέθοδοι Microtrips – Θεωρητικό υπόβαθρο, διαδικασία και<br>εφαρμογές .....                                   | 32 |
| 2.4.3. Αλυσίδες Markov στη παραγωγή κύκλων οδήγησης: Θεωρία και<br>εφαρμογές .....                                  | 35 |

|        |                                                                                                    |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.4. | Μέθοδοι clustering στη δημιουργία driving cycles: στατιστική θεμελίωση και πρακτική εφαρμογή ..... | 37 |
| 2.4.5. | Μέθοδοι Μηχανικής Μάθησης στη δημιουργία κύκλων οδήγησης – Θεωρία, εφαρμογές και προοπτικές .....  | 40 |
| 3.     | Πειραματική διαδικασία και συλλογή δεδομένων .....                                                 | 42 |
| 3.1.   | Περιγραφή οχήματος και τεχνικά χαρακτηριστικά.....                                                 | 42 |
| 3.2.   | Εξοπλισμός μέτρησης και διαδικασία συλλογής δεδομένων .....                                        | 43 |
| 3.3.   | Περιγραφή διαδρομής και συνθήκες οδήγησης .....                                                    | 45 |
| 3.4.   | Προεπεξεργασία και καθαρισμός ακατέργαστων δεδομένων .....                                         | 47 |
| 3.5.   | Πηγές σφάλματος και περιορισμοί της πειραματικής διαδικασίας .....                                 | 49 |
| 4.     | Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα .....                                                           | 50 |
| 4.1.   | Δομή ανάλυσης και μετρικές αξιολόγησης .....                                                       | 50 |
| 4.2.   | Περιγραφική στατιστική χαρακτηριστικών οδήγησης .....                                              | 50 |
| 4.2.1. | Βασικά χαρακτηριστικά ταχύτητας .....                                                              | 51 |
| 4.2.2. | Χρονική κατανομή κίνησης και στάσεων .....                                                         | 52 |
| 4.2.3. | Κατανομή ταχυτήτων .....                                                                           | 53 |
| 4.3.   | Ανάλυση δυναμικών χαρακτηριστικών οδήγησης .....                                                   | 54 |
| 4.3.1. | Χαρακτηριστικά επιτάχυνσης και επιβράδυνσης .....                                                  | 54 |
| 4.3.2. | Μεταβατικότητα της οδήγησης.....                                                                   | 55 |
| 4.3.3. | Σύγκριση δυναμικών χαρακτηριστικών ανά χρονική ζώνη .....                                          | 56 |
| 4.4.   | Χρονικό πλαίσιο συλλογής δεδομένων και επίδραση τουριστικής αιχμής .....                           | 57 |
| 4.5.   | Σύνοψη και ερμηνεία αποτελεσμάτων .....                                                            | 58 |
| 4.6.   | Συσχέτιση φορτίου κινητήρα, στρωφών και κατανάλωσης καυσίμου .....                                 | 59 |
| 5.     | Ανάπτυξη και αξιολόγηση κύκλων οδήγησης.....                                                       | 61 |
| 5.1.   | Στόχοι και φιλοσοφία ανάπτυξης τοπικών κύκλων οδήγησης .....                                       | 61 |
| 5.2.   | Επιλογή μεθοδολογίας σύνθεσης κύκλων οδήγησης.....                                                 | 61 |
| 5.2.1. | Επισκόπηση διαθέσιμων μεθόδων και κριτήρια επιλογής .....                                          | 62 |
| 5.2.2. | Τεκμηρίωση επιλογής μεθόδου microtrips .....                                                       | 62 |
| 5.2.3. | Μετρικές ελέγχου και στόχοι προσαρμογής.....                                                       | 63 |
| 5.3.   | Ανάπτυξη τοπικού κύκλου οδήγησης Θάσου .....                                                       | 63 |
| 5.3.1. | Διάσπαση δεδομένων σε μικροδιαδρομές (microtrips) .....                                            | 63 |
| 5.3.2. | Χαρακτηρισμός και ανάλυση μικροδιαδρομών .....                                                     | 65 |
| 5.3.3. | Διαδικασία σύνθεσης τελικού κύκλου οδήγησης.....                                                   | 65 |
| 5.3.4. | Τελική σύνθεση και αξιολόγηση του τελικού κύκλου οδήγησης .....                                    | 68 |
| 5.3.5. | Έλεγχος αντιπροσωπευτικότητας τελικού κύκλου οδήγησης .....                                        | 70 |
| 5.4.   | Αξιολόγηση και ερμηνεία τελικού κύκλου οδήγησης .....                                              | 72 |

|        |                                                                                     |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4.1. | Συνολική αξιολόγηση χαρακτηριστικών του τελικού κύκλου.....                         | 72 |
| 5.4.2. | Σχέση του τελικού κύκλου με τις χρονικές ζώνες οδήγησης.....                        | 73 |
| 5.4.3. | Περιορισμοί και παραδοχές της προσέγγισης.....                                      | 74 |
| 5.5.   | Σύγκριση του τοπικού κύκλου οδήγησης με ευρωπαϊκούς<br>θεσμοθετημένους κύκλους..... | 74 |
| 5.5.1. | Σύγκριση με τον κύκλο WLTP.....                                                     | 75 |
| 5.5.2. | Σχόλια σε σχέση με τον κύκλο NEDC .....                                             | 75 |
| 5.5.3. | Συνολική αποτίμηση της σύγκρισης.....                                               | 76 |
| 5.6.   | Σύγκριση με εναλλακτική προσέγγιση αντιπροσωπευτικής<br>διαδρομής.....              | 76 |
| 6.     | Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....                               | 77 |
| 6.1.   | Συμπεράσματα .....                                                                  | 77 |
| 6.2.   | Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....                                               | 78 |
|        | Βιβλιογραφία .....                                                                  | 79 |

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

|            |                                                                                    |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1:  | Γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής μελέτης.....                                    | 9  |
| Εικόνα 2:  | Σχηματική απεικόνιση μετρήσεων RDE σε πραγματικές συνθήκες<br>οδήγησης.....        | 18 |
| Εικόνα 3:  | Μοντελοποίηση κύκλου οδήγησης με αλυσίδες Markov.....                              | 35 |
| Εικόνα 4:  | Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων.....                     | 42 |
| Εικόνα 5:  | Συσκευή OBD-II που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δεδομένων.....                  | 44 |
| Εικόνα 6:  | Διαδρομή συλλογής δεδομένων.....                                                   | 45 |
| Εικόνα 7:  | Δείγμα ακατέργαστου αρχείου CSV μετά την εισαγωγή του στο Excel. ....              | 46 |
| Εικόνα 8:  | Δείγμα αρχείου μετά την επεξεργασία και την εφαρμογή της λογικής<br>roll/keep..... | 47 |
| Εικόνα 9:  | Δείγμα διάσπασης αρχείου διαδρομής σε microtrips.....                              | 63 |
| Εικόνα 10: | Δεδομένα ταχύτητας και κατηγοριοποίηση .....                                       | 65 |
| Εικόνα 11: | Διάσπαση microtrips σε τμήματα.....                                                | 66 |
| Εικόνα 12: | Ανάθεση τυχαίας τιμής στα microtrips.....                                          | 67 |

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|            |                                                                   |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1: | Εξέλιξη των ευρωπαϊκών προτύπων εκπομπών Euro.....                | 13 |
| Πίνακας 2: | Μέση και μέγιστη ταχύτητα διαδρομής ανά περίοδο και συνολικά..... | 51 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 3: Συνολικός χρόνος διαδρομής και χρόνος στάσης σε κάθε περίοδο..... | 52 |
| Πίνακας 4: Κατανομή ταχυτήτων.....                                           | 53 |
| Πίνακας 5: Μέσες τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και αποκλίσεις.....      | 54 |
| Πίνακας 6: Δείκτης Transient μεταβατικότητας οδήγησης.....                   | 55 |
| Πίνακας 7: Πίνακας κατανομής ταχυτήτων.....                                  | 65 |
| Πίνακας 8: Ποσοστό χρόνου σε κάθε εύρος ταχύτητα.....                        | 64 |
| Πίνακας 9: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων και τελικού κύκλου.....            | 69 |

## ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Γράφημα 1: Συμβολή των οδικών μεταφορών στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων.....        | 11 |
| Γράφημα 2: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου του κύκλου NEDC.....                                         | 15 |
| Γράφημα 3: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου του κύκλου FTP-95.....                                       | 22 |
| Γράφημα 4: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου κύκλου Artemis.....                                          | 24 |
| Γράφημα 5: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου του κύκλου WLTP.....                                         | 26 |
| Γράφημα 6: Γενική μεθοδολογία δημιουργίας κύκλου οδήγησης.....                                  | 30 |
| Γράφημα 7: Ομαδοποίηση χαρακτηριστικών οδήγησης με μεθόδους clustering.....                     | 38 |
| Γράφημα 8: Εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης στη δημιουργία κύκλων οδήγησης.....              | 40 |
| Γράφημα 9: Συσχέτιση στροφών κινητήρα και ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου.....                      | 58 |
| Γράφημα 10: Συσχέτιση φορτίου κινητήρα και ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου .....                    | 59 |
| Γράφημα 11: Προφίλ μέσης ταχύτητας κύκλου.....                                                  | 67 |
| Γράφημα 12: Τελικό προφίλ ταχύτητας-χρόνου κύκλου οδήγησης.....                                 | 68 |
| Γράφημα 13: Σύγκριση κατανομής ταχυτήτων πραγματικών δεδομένων και τελικού κύκλου οδήγησης..... | 69 |
| Γράφημα 14: Αντιπροσωπευτική διαδρομή βάσει εναλλακτικής μεθόδου επιλογής....                   | 75 |



# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Γενικό πλαίσιο

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν έναν από τους κυριότερους τομείς εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε παγκόσμιο επίπεδο, με σημαντική συμβολή στην κλιματική αλλαγή και στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αλλά και άλλων ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC), εξαρτώνται άμεσα από τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης και την πυκνότητα της κυκλοφορίας.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η πολιτική για το κλίμα και την ενέργεια στοχεύει στη σταδιακή μείωση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών. Ο κανονισμός (ΕΕ) 2019/631 καθορίζει δεσμευτικά πρότυπα εκπομπών CO<sub>2</sub> για τα νέα επιβατικά οχήματα, με στόχο την μείωση των εκπομπών κατά 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 2021. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε πρόσφατα στοιχεία που δείχνουν ότι οι πραγματικές εκπομπές CO<sub>2</sub>, όπως προκύπτουν από δεδομένα ενσωματωμένων μετρητών κατανάλωσης (On-Board Fuel Consumption Meters), είναι κατά μέσο όρο περίπου 20% υψηλότερες από τις τιμές που δηλώνονται στις τυποποιημένες δοκιμές. Η διαφορά αυτή καταδεικνύει την ανάγκη για πιο ρεαλιστικές μεθοδολογίες εκτίμησης, οι οποίες θα βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα οδήγησης.

Οι κύκλοι οδήγησης (driving cycles) αποτελούν καθοριστικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς και των εκπομπών των οχημάτων. Οι παραδοσιακοί κύκλοι, όπως ο NEDC και ο νεότερος WLTP, σχεδιάστηκαν ώστε να παρέχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ οχημάτων, όμως η γενικευμένη φύση τους δεν αντανakλά πάντα τις πραγματικές συνθήκες κίνησης, ειδικά σε περιοχές με έντονη τοπογραφική ή κυκλοφοριακή διαφοροποίηση. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη τοπικών κύκλων οδήγησης, βασισμένων σε δεδομένα πεδίου, μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και να συμβάλλει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο περιφέρειας.

Η Θάσος, ως νησί με έντονη εποχική δραστηριότητα και διαφοροποιημένη μορφολογία, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ενός τέτοιου κύκλου. Οι σημαντικές διακυμάνσεις στη ροή της κυκλοφορίας κατά τη θερινή περίοδο, σε συνδυασμό με την ποικιλία υψομέτρων και τοπικών οδικών χαρακτηριστικών, καθιστούν τη συλλογή πραγματικών δεδομένων απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου οδήγησης.



Εικόνα 1: Γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής μελέτης

## 1.2. Κίνητρα και σκοπός της έρευνας

Η παρούσα εργασία βασίζεται στην ανάγκη βελτίωσης της ακρίβειας με την οποία εκτιμώνται οι εκπομπές και η ενεργειακή συμπεριφορά των οχημάτων υπό πραγματικές συνθήκες. Οι τυποποιημένοι κύκλοι οδήγησης, όπως ο WLTP, παρέχουν ένα χρήσιμο πλαίσιο αναφοράς, όμως δεν λαμβάνουν πάντα υπόψιν τις τοπικές ιδιαιτερότητες, όπως η μορφολογία του οδικού δικτύου, οι συχνές στάσεις ή οι αυξομειώσεις ταχύτητας που χαρακτηρίζουν νησιώτικα περιβάλλοντα.

Η Θάσος αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής με διαφοροποιημένα πρότυπα κυκλοφορίας. Κατά τη θερινή περίοδο, και ειδικότερα τις μέρες κοντά στον Δεκαπενταύγουστο, η αυξημένη τουριστική δραστηριότητα επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις κυκλοφοριακές συνθήκες, γεγονός που μεταβάλλει τα προφίλ ταχύτητας, τις επιταχύνσεις και τη συνολική διάρκεια των διαδρομών. Η αποτύπωση αυτών των μεταβολών μέσω πραγματικών δεδομένων οδήγησης επιτρέπει την ανάπτυξη ενός κύκλου που αντικατοπτρίζει τη ρεαλιστική συμπεριφορά ενός επιβατικού οχήματος στο νησί.

Η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τη σημασία των τοπικών κύκλων οδήγησης για την εκτίμηση εκπομπών και κατανάλωσης, με βάση δεδομένα που θα συλλεχθούν μέσω συσκευής OBD σε επιλεγμένες διαδρομές. Μέσω της επεξεργασίας αυτών των δεδομένων θα επιχειρηθεί η ανάπτυξη ενός αντιπροσωπευτικού κύκλου οδήγησης για τη Θάσο και η αξιολόγηση της επίδρασης των εποχικών μεταβολών. Παράλληλα η μελέτη θα προσφέρει τη βάση για μελλοντικές εφαρμογές σε τοπικά ή περιφερειακά σχέδια βιώσιμης κινητικότητας.

## 1.3. Μεθοδολογική προσέγγιση και διάρθρωση εργασίας

Η εργασία ακολουθεί μια μεθοδολογική προσέγγιση που συνδυάζει τη θεωρητική ανάλυση με την πειραματική διερεύνηση. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τους ρύπους των οδικών μεταφορών, τις περιβαλλοντικές και

υγειονομικές επιπτώσεις τους, καθώς και το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τις εκπομπές σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων μέσω συσκευής OBD, τα χαρακτηριστικά της διαδρομής που επιλέχθηκε στη Θάσο και η επεξεργασία των καταγραφών.

Ακολουθεί η φάση της ανάλυσης και ανάπτυξης του κύκλου οδήγησης, όπου τα δεδομένα ταξινομούνται σε επιμέρους φάσεις ώστε να αναπαρασταθεί η συνολική συμπεριφορά του οχήματος. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, σύγκριση μεταξύ περιόδων αιχμής, καθώς και εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση και επιπτώσεις

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τις οδικές μεταφορές αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες περιβαλλοντικής υποβάθμισης και κινδύνου για τη δημόσια υγεία. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με τις οδικές μεταφορές να αποτελούν το κυρίαρχο υποσύνολο αυτού του τομέα.

Τα οχήματα εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το οποίο συνδέεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, καθώς και πληθώρα ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις ( $\text{VOC}/\text{NMVOC}$ ) και αιωρούμενα σωματίδια διαφόρων μεγεθών ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ). Οι ρύποι αυτοί συμβάλλουν στον σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος και δευτερογενών σωματιδίων, επηρεάζοντας άμεσα την ποιότητα του αέρα ιδίως σε αστικές και περιαστικές περιοχές<sup>1</sup>.

Παράλληλα με τις εκπομπές από την εξάτμιση, σημαντικό μέρος της ρύπανσης οφείλεται πλέον στις λεγόμενες μη-καυσαερίων εκπομπές, οι οποίες προέρχονται από τη φθορά των ελαστικών και των φρένων, τη φθορά του οδοστρώματος και την επαναιώρηση σκόνης. Μελέτες διεθνών οργανισμών δείχνουν ότι, σε νεότερους στόλους με αποδοτικά συστήματα ελέγχου καυσαερίων, οι non-exhaust εκπομπές συνεισφέρουν σε ολόένα και μεγαλύτερο ποσοστό στη συνολική σωματιδιακή ρύπανση από την οδική κυκλοφορία.

Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία είναι εκτεταμένες. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτιμά ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια και όζον συνδέεται με εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως λόγω καρδιαγγειακών και αναπνευστικών νοσημάτων. Στην Ευρώπη, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος αναφέρει ότι τα  $\text{PM}_{2.5}$  συμβάλλουν σε σημαντική μείωση του προσδόκιμου ζωής σε πολλές αστικές περιοχές. Επιπλέον, η χρόνια έκθεση σε ρύπους από την κυκλοφορία έχει συσχετιστεί με επιδείνωση άσθματος, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, αυξημένο κίνδυνο εμφραγμάτων, καθώς και επιδράσεις στην ανάπτυξη των παιδιών.<sup>2</sup>

Ένα ακόμη στοιχείο που συνδέεται με τις μεταφορές είναι η ηχορύπανση. Η συνεχής έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου από την οδική κυκλοφορία αυξάνει τον κίνδυνο

<sup>1</sup> World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines*.

<sup>2</sup> European Environment Agency, *Air Pollution Impacts in Europe*.

καρδιαγγειακών παθήσεων, διαταραχών ύπνου και ψυχολογικού στρες, ενώ επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ζωής.

Συνολικά, η ρύπανση από τις μεταφορές δρα σε πολλαπλά επίπεδα: επιβαρύνει το κλίμα μέσω των εκπομπών CO<sub>2</sub>, επηρεάζει την ποιότητα του αέρα μέσω αερίων σωματιδιακών ρύπων, και δημιουργεί πρόσθετους κινδύνους μέσω θορύβου. Σε περιοχές με έντονη εποχικότητα, όπως νησιώτικοι τουριστικοί προορισμοί, η κυκλοφοριακή κίνηση και άρα και οι εκπομπές μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις μέσα στο έτος, καθιστώντας αναγκαία τη λεπτομερή αποτύπωση των πραγματικών συνθηκών οδήγησης.



Γράφημα 1: Συμβολή των οδικών μεταφορών στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων.

## 2.2. Νομοθεσία και κανονισμοί εκπομπών (Euro, WLTP, RDE, Euro 7)

### 2.2.1. Οι προδιαγραφές Euro: έννοια, σκοπός και γενική εξέλιξη

Οι προδιαγραφές Euro αποτελούν το βασικό κανονιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής ένωσης για τον περιορισμό των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα. Εισήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με σκοπό να μειώσουν τις εκπομπές CO, HC, NO<sub>x</sub> και σωματιδίων (PM), τόσο από βενζινοκίνητα όσο και από πετρελαιοκίνητα οχήματα, βελτιώνοντας σταδιακά την ποιότητα του αέρα στα κράτη μέλη.<sup>3</sup>

Η φιλοσοφία των προτύπων Euro στηρίζεται σε τρεις αρχές:

1. Σταδιακή αυστηροποίηση των ορίων εκπομπών, με κάθε νέα βαθμίδα να μειώνει σημαντικά τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές τους.
2. Εξέλιξη τεχνολογιών ελέγχου ρύπων, όπως καταλύτες συστήματα EGR, φίλτρα σωματιδίων (DPF) και καταλύτες SCR.

<sup>3</sup> Delphi Technologies, *Worldwide Emission Standards: Passenger Cars and Light Duty Vehicles*.

### 3. Εναρμόνιση με ευρωπαϊκές κλιματικές πολιτικές σε συνδυασμό με παράλληλους κανονισμούς για το CO<sub>2</sub> (EU Regulation 2019/631).

Η μετάβαση από το Euro 1 έως το Euro 6 οδήγησε σε δραστική μείωση των θερμοθετημένων ορίων. Για παράδειγμα, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> από τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα μειώθηκαν κατά περισσότερο από 80% μεταξύ Euro 1 και Euro 6, ενώ η εισαγωγή υποχρεωτικών φίλτρων σωματιδίων (DPF) με το Euro 5 οδήγησε σε εντυπωσιακή μείωση των PM.

Παρά την μείωση των εργαστηριακών εκπομπών, η εμφάνιση του φαινομένου “real-world emissions gap” ανέδειξε την ανάγκη για μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες, γεγονός που οδήγησε στην εισαγωγή διαδικασιών WLTP και RDE καθώς και στην πρόσφατη διαμόρφωση του Euro 7.<sup>4</sup>

#### 2.2.2. Ιστορική εξέλιξη των προτύπων Euro (Euro 1 έως Euro 6d)

Η εξέλιξη των προδιαγραφών Euro συνδέεται με τις τεχνικές δυνατότητες της εκάστοτε εποχής, την αυξανόμενη επιστημονική γνώση για την τοξικότητα των ρύπων και τις ανάγκες συγκράτησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα κράτη μέλη της ΕΕ. Κάθε επίπεδο του προτύπου αντανάκλα μια σημαντική καμπή τόσο στον σχεδιασμό κινητήρων όσο και στην τεχνολογία ελέγχου εκπομπών.<sup>5</sup>

##### **Euro 1 (1992)**

Το Euro 1 αποτέλεσε την πρώτη οργανωμένη προσπάθεια περιορισμού εκπομπών από επιβατικά οχήματα στην ΕΕ. Εισήγαγε υποχρεωτική χρήση τριοδικών καταλυτών στα βενζινοκίνητα οχήματα και περιόρισε σημαντικά τις εκπομπές CO και HC. Στα πετρελαιοκίνητα οχήματα, για πρώτη φορά τέθηκαν όρια για PM. Η θέσπιση του Euro 1 έθεσε τις βάσεις για μια μακροχρόνια στρατηγική σταδιακής αυστηροποίησης.

##### **Euro 2 (1996)**

Το Euro 2 ενίσχυσε περαιτέρω τα όρια του Euro 1, μειώνοντας τόσο τα HC όσο και τα NO<sub>x</sub> σε βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα. Οι απαιτήσεις αυτές επέβαλαν βελτιώσεις στους καταλύτες και την ανάφλεξη, καθώς και καλύτερο έλεγχο μείγματος καυσίμου-αέρα.

##### **Euro 3 (2000)**

Η μετάβαση στο Euro 3 χαρακτηρίστηκε από σημαντική αυστηροποίηση των ορίων για NO<sub>x</sub> και HC, ιδιαίτερα για τα πετρελαιοκίνητα οχήματα, στα οποία για πρώτη φορά απαιτήθηκαν πιο προηγμένες στρατηγικές ελέγχου καύσης και συστήματα EGR. Επίσης, διαχωρίστηκαν τα όρια HC και NO<sub>x</sub> στα βενζινοκίνητα οχήματα, κάτι που επέτρεψε πιο στοχευμένες τεχνολογικές εξελίξεις.

##### **Euro 4 (2005)**

Το Euro 4 συνέχισε τη σταδιακή μείωση των NO<sub>x</sub> και PM, απαιτώντας πληρέστερο έλεγχο της καύσης στα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Το πρότυπο αυτό σηματοδότησε το σημείο στο οποίο τα πετρελαιοκίνητα οχήματα άρχισαν να απαιτούν πιο συστηματική χρήση EGR υψηλής απόδοσης και βελτιωμένους καταλύτες οξειδωσης.

##### **Euro 5 (2009)**

---

<sup>4</sup> European Commission, *Euro 7 Proposal*.

<sup>5</sup> Delphi Technologies, *Worldwide Emission Standards: Passenger Cars and Light Duty Vehicles*.

Με το Euro 5 έγινε υποχρεωτική η χρήση φίλτρων σωματιδίων (DPF) στα πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πολύ μεγάλη μείωση των εκπομπών PM και PN (Particulate Number). Ταυτόχρονα, μειώθηκαν περαιτέρω τα όρια για τα NO<sub>x</sub>, γεγονός που επέτρεψε την επέκταση τεχνολογιών όπως η υγρή EGR και τα συστήματα SCR σε επιβατικά οχήματα.<sup>6</sup>

### **Euro 6 (2014) και υποεκδόσεις (6b, 6c, 6d-TEMP, 6d)**

Το Euro 6 καθιέρωσε τα πιο αυστηρά όρια για τα NO<sub>x</sub> σε πετρελαιοκίνητα οχήματα έως τότε, απαιτώντας την ευρεία υιοθέτηση συστημάτων SCR με AdBlue.

Οι υποεκδόσεις του Euro 6 σηματοδοτούν τη μετάβαση προς μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες:

- **Euro 6b (2014):** πρώτη εφαρμογή των ορίων.
- **Euro 6c (2017):** προσαρμογή στον WLTP.
- **Euro 6d-TEMP (2019):** προσωρινή εισαγωγή RDE με πιο χαλαρούς conformity factors.
- **Euro 6d (2021):** πλήρης εφαρμογή των RDE με αυστηρούς παράγοντες συμμόρφωσης.

Η σταδιακή ενσωμάτωση των RDE σε αυτές τις υποεκδόσεις αποτέλεσε καθοριστικό βήμα για τη μείωση της απόκλισης ανάμεσα στις εργαστηριακές και στις πραγματικές εκπομπές.

| Euro Standard | Introduction date |                       | Emission limits        |                             |            |
|---------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|------------|
|               | New approvals     | All new registrations | Petrol NO <sub>x</sub> | Diesel NO <sub>x</sub>      | Diesel PM  |
| Euro-1        | 1 July 1992       | 31 December 1992      | 0.97g/km*              | 0.97g/km*                   | 0.14g/km   |
| Euro-2        | 1 January 1996    | 1 January 1997        | 0.5g/km*               | 0.9g/km* (direct injection) | 0.1g/km    |
| Euro-3        | 1 January 2000    | 1 January 2001        | 0.15g/km               | 0.5g/km                     | 0.5g/km    |
| Euro-4        | 1 January 2005    | 1 January 2006        | 0.08g/km               | 0.25g/km                    | 0.025g/km  |
| Euro-5        | 1 September 2009  | 1 January 2011        | 0.06g/km               | 0.08g/km                    | 0.005g/km  |
| Euro-6        | 1 September 2014  | 1 September 2015      | 0.06g/km               | 0.08g/km                    | 0.0045g/km |

\*includes NO<sub>x</sub> and HC

*Πίνακας 1: Εξέλιξη των ευρωπαϊκών προτύπων εκπομπών Euro.*

### **2.2.3. Euro 6e-bis: Ισχύον κανονιστικό πλαίσιο και έλεγχος εκπομπών σε πραγματικές συνθήκες**

Το πρότυπο Euro 6e-bis αποτελεί την πλέον πρόσφατη και ισχύουσα φάση της οικογένειας Euro 6 και ενσωματώνει τη συσσωρευμένη εμπειρία από την εφαρμογή των δοκιμών εκπομπών σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Η εισαγωγή του αντανάκλα τη συνεχή προσπάθεια της ευρωπαϊκής νομοθεσίας να περιορίσει την

<sup>6</sup> European Environment Agency, *Air Pollution Impacts in Europe*.

απόκλιση μεταξύ των εργαστηριακών μετρήσεων και των πραγματικών εκπομπών κατά τη χρήση των οχημάτων στο οδικό δίκτυο.

Κεντρικό χαρακτηριστικό του Euro 6e-bis είναι η ενίσχυση του ρόλου των δοκιμών RDE (Real Driving Emissions) ως βασικού εργαλείου συμμόρφωσης. Σε αντίθεση με παλαιότερες φάσεις, όπου οι μετρήσεις πραγματικής οδήγησης λειτουργούσαν συμπληρωματικά προς τις εργαστηριακές δοκιμές, σε αυτό το πλαίσιο οι μετρήσεις RDE αποκτούν ουσιαστικά ισοδύναμη βαρύτητα στο έλεγχο εκπομπών. Η συμμόρφωση των οχημάτων δεν αξιολογείται πλέον μόνο σε τυποποιημένες συνθήκες, αλλά σε ευρύ φάσμα πραγματικών σεναρίων οδήγησης.<sup>7</sup>

Στο πλαίσιο αυτό, το Euro 6e-bis προβλέπει περαιτέρω μείωση των συντελεστών συμμόρφωσης (Conformity Factors) που εφαρμόζονται στις μετρήσεις RDE. Οι συντελεστές αυτοί, οι οποίοι είχαν αρχικά εισαχθεί για να καλύψουν την αβεβαιότητα των φορτηγών συστημάτων μέτρησης (PEMS), περιορίζονται προοδευτικά, με στόχο οι πραγματικές εκπομπές να προσεγγίζουν ολοένα και περισσότερο τα νομοθετημένα όρια. Η εξέλιξη αυτή αυξάνει τις απαιτήσεις για τον σχεδιασμό και τη ρύθμιση των συστημάτων ελέγχου εκπομπών των οχημάτων.

Ένα ακόμη κρίσιμο στοιχείο του Euro 6e-bis είναι η διεύρυνση των συνθηκών υπό τις οποίες ελέγχεται η συμμόρφωση. Οι μετρήσεις εκπομπών καλύπτουν πλέον μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος, διαφορετικά προφίλ διαδρομής, μεταβολές φορτίου και ποικιλία οδηγικών συμπεριφορών. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η αποτύπωση της πραγματικής χρήσης του οχήματος, αποφεύγοντας τη βελτιστοποίηση αποκλειστικά για συγκεκριμένες, ευνοϊκές συνθήκες δοκιμών.<sup>8</sup>

Παράλληλα, το Euro 6e-bis ενισχύει τον έλεγχο της διαχρονικής συμμόρφωσης των οχημάτων, απαιτώντας τη διατήρηση των επιδόσεων εκπομπών σε βάθος χρόνου και χιλιομετρικής χρήσης. Η απαίτηση αυτή καθιστά σαφές ότι ο έλεγχος εκπομπών δεν αφορά μόνο την έγκριση τύπου, αλλά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του οχήματος, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιολόγηση της πραγματικής περιβαλλοντικής επίδρασης.<sup>9</sup>

Σε αντίθεση με το επερχόμενο Euro 7, το οποίο εισάγει νέο και ενιαίο κανονιστικό πλαίσιο, αυτή τη έκδοση λειτουργεί ως μεταβατικό αλλά ουσιαστικό στάδιο. Χωρίς να αλλάζει ριζικά τα αριθμητικά όρια εκπομπών, μετατοπίζει το επίκεντρο της αξιολόγησης από τις εργαστηριακές δοκιμές στη ρεαλιστική αναπαράσταση της οδήγησης. Η προσέγγιση αυτή καθιστά τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης και τους κύκλους οδήγησης βασικό εργαλείο κατανόησης και ελέγχου των εκπομπών.

Συνολικά, το Euro 6e-bis σηματοδοτεί μια σαφή μετάβαση προς ένα κανονιστικό πλαίσιο όπου η πραγματική οδηγική συμπεριφορά, η ποικιλία συνθηκών χρήσης και η αξιοπιστία των μετρήσεων αποτελούν κεντρικούς άξονες.

#### **2.2.4. Ο κύκλος NEDC – Ιστορική εξέλιξη, χαρακτηριστικά και περιορισμοί**

Ο New European Driving Cycle (NEDC) αποτέλεσε για πολλές δεκαετίες το επίσημο ευρωπαϊκό πρότυπο μέτρησης εκπομπών και κατανάλωσης καυσίμου για τα επιβατικά οχήματα. Αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1970 και υιοθετήθηκε επίσημα στο ευρωπαϊκό πλαίσιο έγκρισης τύπου τη δεκαετία του 1990. Παρά την ονομασία “New”. Ο κύκλος

<sup>7</sup> Regulation (EU) 2016/427.

<sup>8</sup> ‘Comparison of WLTP and real-world emissions’.

<sup>9</sup> ‘Analysis of driving patterns and car usage for real-world emission estimation’.

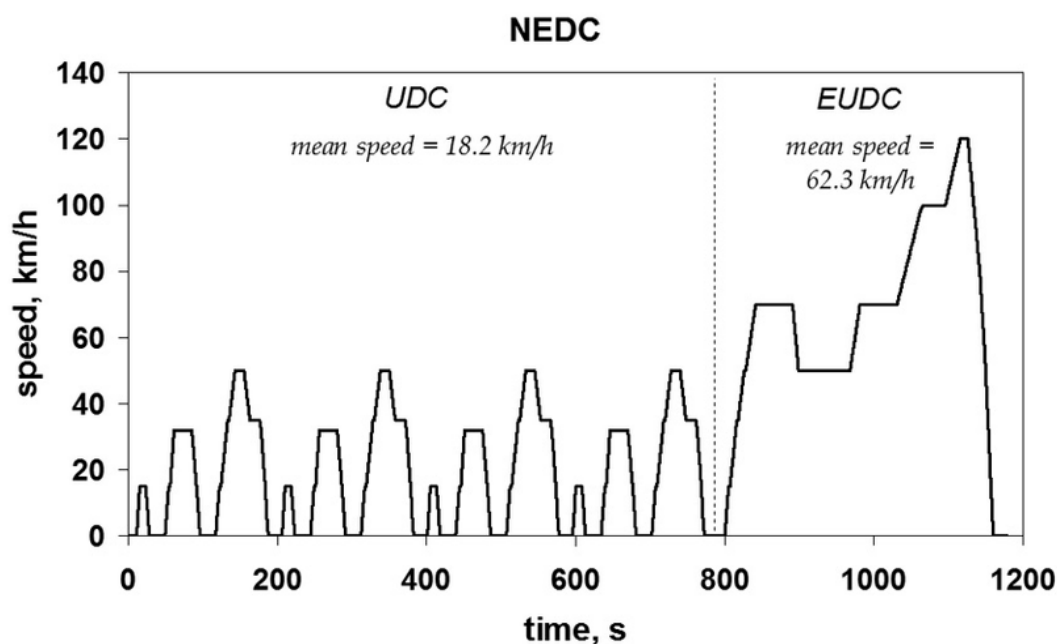
βασίστηκε σε παλαιότερα πρότυπα και σχεδιάστηκε για να προσομοιώσει τις συνθήκες οδήγησης των ευρωπαϊκών πόλεων της εποχής, με σχετικά χαμηλές ταχύτητες, ομαλή επιτάχυνση και περιορισμένη μεταβλητότητα.<sup>10</sup>

Ο NEDC αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: το ECE-15 (αστικό σκέλος) και το EUDC (υπεραστικό σκέλος). Το αστικό σκέλος περιλαμβάνει συχνές στάσεις και ήπιες επιταχύνσεις, με μέγιστη ταχύτητα 50 km/h, αποτυπώνοντας υποτιθέμενα την οδήγηση μέσα σε πόλη. Το υπεραστικό σκέλος περιλαμβάνει πιο ομαλή οδήγηση, με μέγιστη ταχύτητα 120 km/h. Η συνολική διάρκεια του κύκλου είναι περίπου 20 λεπτά, κάτι που τον καθιστά σχετικά σύντομο σε σύγκριση με σύγχρονα πρότυπα.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού του NEDC αντανakλούσε τις συνθήκες οδήγησης της εποχής ανάπτυξής του: χαμηλές μέσες ταχύτητες, περιορισμένες μεταβολές φορτίου και γραμμικές επιταχύνσεις. Επιπλέον, ο κύκλος απαιτούσε δοκιμή με πολύ “ήπια” θερμοκρασιακά και περιβαλλοντικά όρια, χωρίς κλιματισμό, χωρίς σημαντικό φορτίο, και με προκαθορισμένη στρατηγική αλλαγών ταχυτήτων για τα χειροκίνητα οχήματα.

Με την πάροδο του χρόνου, ο NEDC άρχισε να παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς. Η οδήγηση στην Ευρώπη εξελίχθηκε και έγινε πιο δυναμική: υψηλότερες μέσες ταχύτητες, μεγαλύτερες επιταχύνσεις, αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση και διαφορετική συμπεριφορά οδηγού σε σχέση με δεκαετίες παλαιότερα. Παράλληλα, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων βρήκαν τρόπους να βελτιστοποιούν τη λειτουργία των οχημάτων ειδικά για τον NEDC, γεγονός που δημιούργησε ένα μεγάλο χάσμα ανάμεσα στις εργαστηριακές και τις πραγματικές μετρήσεις κατανάλωσης και εκπομπών.

Αυτό οδήγησε στο λεγόμενο “NEDC credibility gap”, δηλαδή την απόκλιση μεταξύ “τυποποιημένης” και πραγματικής λειτουργίας, που σύμφωνα με ευρωπαϊκές τεχνικές αναλύσεις ξεπερνούσε το 30% σε CO<sub>2</sub> για πολλά μοντέλα. Η αδυναμία του κύκλου να αναπαραστήσει σύγχρονες συνθήκες οδήγησης αποτέλεσε έναν από τους βασικούς λόγους δημιουργίας του νέου προτύπου WLTP.<sup>11</sup>



<sup>10</sup> International Council on Clean Transportation, *From NEDC to WLTP: effect on emissions*.

<sup>11</sup> ‘Comparison of WLTP and real-world emissions’.

### 2.2.5. Ο κύκλος WLTP – Ανάπτυξη, στόχοι και διαφορές από τον NEDC

Ο Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) αναπτύχθηκε με σκοπό να αντιμετωπίσει τις αδυναμίες του NEDC και να αντικαταστήσει οριστικά τον κύκλο αυτό στις διαδικασίες έγκρισης τύπου στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το πρότυπο εντάσσεται στο πλαίσιο του UN Global Technical Regulation No. 15 (GTR 15) και βασίζεται σε εκτεταμένη ανάλυση δεδομένων από πραγματικές συνθήκες οδήγησης σε διαφορετικές χώρες, πολλαπλές κατηγορίες οδικού δικτύου και διαφορετικές κλιματικές περιοχές.<sup>12</sup>

Σε αντίθεση με τον NEDC, ο WLTP χαρακτηρίζεται από υψηλή δυναμικότητα, μεγαλύτερη διάρκεια και πολύ ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Ο σχεδιασμός του χωρίζεται σε τέσσερις υποφάσεις (Low, Medium, High, Extra-High), οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα κυκλοφοριακής ροής και τύπους διαδρομών. Επιπλέον ο WLTP λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους που αγνοούταν στο NEDC, όπως μάζα οχήματος, αεροδυναμική αντίσταση, αντίσταση κύλισης, πρόσθετος εξοπλισμός, καθώς και διαφορετικούς τύπους κιβωτίων ταχυτήτων.<sup>13</sup>

Σημαντική καινοτομία του WLTP αποτελεί η ταξινόμηση των οχημάτων σε τρεις κατηγορίες (“vehicle classes”) ανάλογα με τη σχέση ισχύος/μάζας (PWr):

- **Class 1:** χαμηλή ισχύς – μικρά οχήματα
- **Class 2:** μεσαία κατηγορία
- **Class 3:** οχήματα με υψηλότερη ισχύ/μάζα

Με τον τρόπο αυτό, κάθε όχημα δοκιμάζεται σε κύκλο που ταιριάζει καλύτερα στα χαρακτηριστικά του, μειώνοντας τις στρεβλώσεις των μετρήσεων.

Οι κύριες διαφορές WLTP συνοψίζονται σε τρεις άξονες:

- **Μεγαλύτερη διάρκεια και απόσταση:** ο WLTP είναι περίπου 30 λεπτά και περιλαμβάνει μεγαλύτερη ποικιλία επιταχύνσεων και ταχυτήτων.
- **Ρεαλιστικότερες συνθήκες:** υψηλότερες μέσες/μέγιστες ταχύτητες, περισσότερες μεταβατικές φάσεις, καλύτερη απεικόνιση του σύγχρονου οδηγικού προφίλ.
- **Λιγότερη δυνατότητα “Βελτιστοποίησης”:** τα οχήματα πλέον μετρώνται με πραγματικές ρυθμίσεις αλλαγής ταχυτήτων, με εξατομικευμένη προσομοίωση μάζας και αντίστασης.

Η εφαρμογή του WLTP μείωσε το γνωστό “lab-to-road CO<sub>2</sub> gap”, αυξάνοντας τις εργαστηριακές τιμές κατανάλωσης/εκπομπών ώστε να αποτυπώνονται ρεαλιστικότερα. Παρ’όλα αυτά, το πρότυπο δεν αίρει πλήρως τις αποκλίσεις από τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης, πράγμα που οδήγησε στη συμπληρωματική υιοθέτηση των δοκιμών RDE, οι οποίες αποτελούν πλέον αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας έγκρισης τύπου.<sup>14</sup>

<sup>12</sup> Regulation (EU) 2017/1151.

<sup>13</sup> UNECE, *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

<sup>14</sup> International Council on Clean Transportation, *From NEDC to WLTP: effect on emissions*.

### 2.2.6. RDE – Real Driving Emissions: Ανάγκη, μεθοδολογία και εφαρμογή

Η εισαγωγή των Real Driving Emissions (RDE) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αλλαγές στο ευρωπαϊκό σύστημα ελέγχου εκπομπών των τελευταίων δεκαετιών. Η ανάγκη για RDE προέκυψε από το γεγονός ότι τα οχήματα -κυρίως τα πετρελαιοκίνητα- εμφάνιζαν σε πραγματικές συνθήκες σημαντικά υψηλότερες εκπομπές NO<sub>x</sub> από αυτές που μετρούνταν στο εργαστήριο υπό τον κύκλο NEDC και αργότερα WLTP. Η απόκλιση αυτή οδήγησε στην δημιουργία μιας συζήτησης περί αξιοπιστίας των τυποποιημένων εργαστηριακών δοκιμών, ειδικά μετά το 2015, όπου διαπιστώθηκε τεράστια απόκλιση στις εκπομπές NO<sub>x</sub>, στον δρόμο.<sup>15</sup>

Οι RDE δοκιμές σχεδιάστηκαν ώστε να αιχμαλωτίζουν τις εκπομπές σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, έξω από το εργαστήριο. Η μέτρηση πραγματοποιείται με φορητά συστήματα PEMS (Portable Emissions Measurement Systems), τα οποία τοποθετούνται στο όχημα και καταγράφουν συνεχώς τις εκπομπές κατά τις οδηγικές συνθήκες της καθημερινότητας, σε πραγματική κυκλοφορία, με μεταβλητό καιρικό περιβάλλον, διαφορετικό φορτίο και ποικίλες κλίσεις οδοστρώματος.

Η διαδικασία RDE έχει σαφώς καθορισμένες απαιτήσεις:

- Το προφίλ της διαδρομής πρέπει να περιλαμβάνει αστική, υπεραστική και αυτοκινητόδρομο.
- Τα όρια διάρκειας, ταχύτητας, επιταχύνσεων και διαδρομής πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις.
- Η εκκίνηση πρέπει να γίνεται με κρύο κινητήρα ή σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών.
- Η μέτρηση υπόκειται σε “conformity factors”, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα των φορητών οργάνων.

Η εισαγωγή των RDE άλλαξε ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο ελέγχονται και πιστοποιούνται τα οχήματα. Για πρώτη φορά, οι κατασκευαστές όφειλαν να αποδείξουν ότι τα οχήματά τους συμμορφώνονται με τα όρια εκπομπών εκτός εργαστηρίου, σε πραγματικές συνθήκες, κάτι που απαιτούσε βαθύτερες τεχνολογικές αλλαγές στις στρατηγικές καύσης και στον έλεγχο ρύπων.<sup>16</sup>

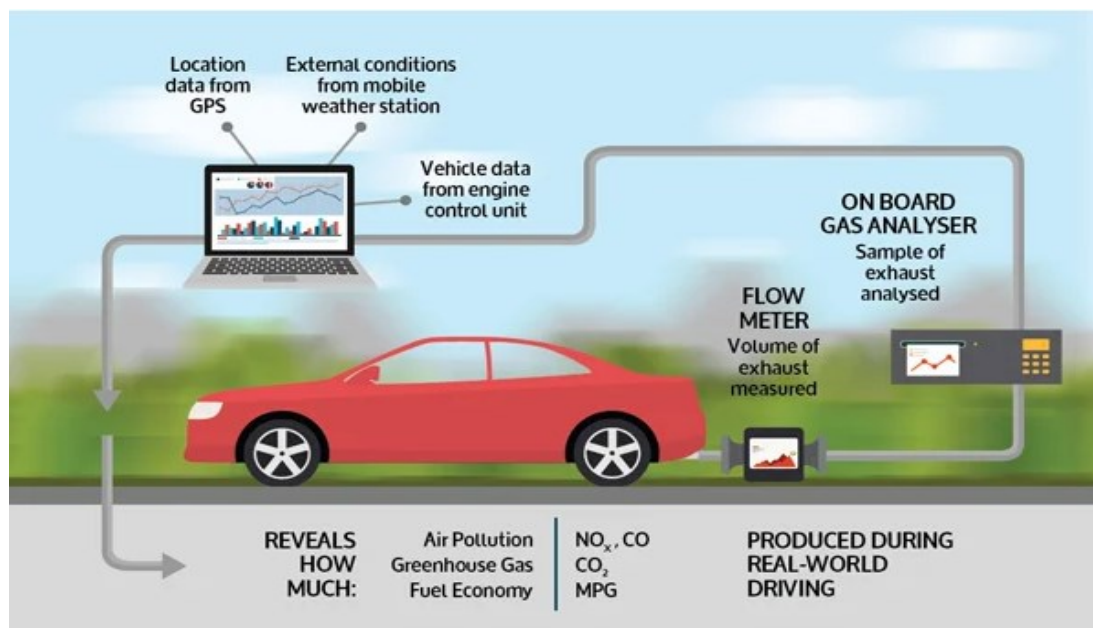
Με την πλήρη εφαρμογή του προτύπου Euro 6d, οι RDE έγιναν υποχρεωτικό και ισότιμο μέρος της διαδικασίας έγκριση τύπου. Η εισαγωγή τους έχει συνδεθεί με εντυπωσιακή μείωση των πραγματικών εκπομπών NO<sub>x</sub> από τα νεότερα πετρελαιοκίνητα οχήματα, καθώς και με την ενίσχυση της διαφάνειας και την αξιοπιστίας των συνολικών διαδικασιών πιστοποίησης.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> Regulation (EU) 2016/427.

<sup>16</sup> ‘Comparison of WLTP and real-world emissions’.

<sup>17</sup> ‘Analysis of driving patterns and car usage for real-world emission estimation’.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση μετρήσεων RDE σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης

### 2.2.7. Euro 7 – Νέο ολοκληρωμένο κανονιστικό πλαίσιο και διεύρυνση του ελέγχου εκπομπών

Το Euro 7, που θεσπίστηκε με τον κανονισμό (ΕΕ) 2024/1257, αποτελεί τη μεγαλύτερη αναδιαμόρφωση του συστήματος εκπομπών της ΕΕ μετά την εισαγωγή των Euro 1-6. Σε αντίθεση με τα παλαιότερα πρότυπα, το Euro 7 υιοθετεί μια ολιστική προσέγγιση: επεκτείνει τη διαδικασία ελέγχου πέρα από τις κλασικές εκπομπές από την εξάτμιση και περιλαμβάνει πλέον εκπομπές από φρένα, ελαστικά και διάρκεια ζωής μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα.

Η φιλοσοφία του Euro 7 εστιάζει σε δύο κεντρικές αρχές: την τεχνολογική ουδετερότητα και τη διεύρυνση του ελέγχου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του οχήματος. Αυτό σημαίνει ότι οι απαιτήσεις δεν περιορίζονται μόνο στα κινητήρια συστήματα εσωτερικής καύσης αλλά ισχύουν και για ηλεκτρικά, υβριδικά και plug-in υβριδικά οχήματα, με στόχο την ανάπτυξη ενός κανονισμού που να ισχύει οριζόντια σε όλες τις τεχνολογίες.

Στο πλαίσιο του Euro 7 εισάγονται:

1. **Όρια για εκπομπές από φθορά φρένων (brake particle emissions).** Για πρώτη φορά, τεχνικά όρια και μετρήσιμες διαδικασίες για τα σωματίδια που παράγονται κατά το φρενάρισμα, κρίσιμη πηγή PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub> σε αστικές περιοχές.
2. **Όρια για εκπομπές από ελαστικά,** οι οποίες αποτελούν σημαντική πηγή μικροπλαστικών και σωματιδίων non-exhaust.
3. **Απαιτήσεις για διάρκεια ζωής μπαταριών σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα,** με έλεγχο της ικανότητας διατήρησης χωρητικότητας μετά από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων χρήσης
4. **Διεύρυνση των RDE,** με έμφαση σε πραγματικές συνθήκες που καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών, φορτίων και προφίλ οδήγησης.
5. **Αυστηρότερη απαίτηση για διάρκεια λειτουργίας συστημάτων ελέγχου ρύπων,** με σκοπό να διατηρούνται οι χαμηλές εκπομπές για μεγαλύτερο μέρος της ζωής του οχήματος.

Το Euro 7 έχει στόχο τόσο την περαιτέρω μείωση των εκπομπών όσο και την αντιμετώπιση των πηγών ρύπανσης που γίνονται πιο κυρίαρχες όσο μειώνονται οι εκπομπές από τις εξατμίσεις των σύγχρονων οχημάτων. Με την αύξηση της ηλεκτροκίνησης, τα φρένα και τα ελαστικά αποτελούν πλέον σημαντικό μέρος της συνολικής επιβάρυνσης, και η ένταξή τους στο νέο πρότυπο αποτελεί ουσιαστικό βήμα για τη περιβαλλοντική προστασία σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Αναμένεται ότι το Euro 7 θα εφαρμοστεί σταδιακά από το 2026, με διαφοροποίηση για ελαφρά και βαρέα οχήματα, ενώ παράλληλα θα τεθούν σε ισχύ ανώτατα όρια για το PEMS και αναθεωρημένα conformity factors για την περαιτέρω ευθυγράμμιση των εργαστηριακών και πραγματικών μετρήσεων.<sup>18</sup>

## **2.3. Κύκλοι οδήγησης: Ιστορική εξέλιξη και διεθνή πρότυπα**

### **2.3.1. Ιστορικές απαρχές και εξέλιξη των πρώτων κύκλων οδήγησης**

Η έννοια του κύκλου οδήγησης εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ως απάντηση στην ανάγκη των κυβερνήσεων να θεσπίσουν τυποποιημένα πρωτόκολλα μέτρησης εκπομπών για επιβατικά οχήματα. Μέχρι τότε, οι μετρήσεις εκπομπών πραγματοποιούνταν με μη συστηματικό τρόπο, συχνά από τους ίδιους τους κατασκευαστές, με αποτέλεσμα δεδομένα να μην είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

#### **2.3.1.1. Η απαρχή στις ΗΠΑ – LA-4 και UDDS**

Η πρώτη συντονισμένη προσπάθεια ανήκει στην Environmental Protection Agency (EPA) των Ηνωμένων Πολιτειών, η οποία το 1972 εισήγαγε τον κύκλο LA-4 για τη μέτρηση εκπομπών ρύπων σε εργαστηριακό δυναμόμετρο. Ο LA-4 σχεδιάστηκε για να αναπαριστά αστική οδήγηση στο Λος Άντζελες της συγκεκριμένης εποχής, με μικρές αποστάσεις, συχνές στάσεις και σχετικά μικρές επιταχύνσεις.

Ο LA-4 αποτέλεσε τη βάση για την εξέλιξη του Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αργότερα ως θεμελιώδης συνιστώσα του σημερινού FTP-75. Ο UDDS εισήγαγε πιο λεπτομερή περιγραφή του προφίλ ταχύτητας, με περισσότερες μεταβατικές φάσεις και σαφέστερα όρια επιτάχυνσης, βελτιώνοντας την αναπαράσταση της αστικής οδήγησης.<sup>19</sup>

Η φιλοσοφία της EPA στηριζόταν σε δύο αρχές:

1. Η εκπομπή των ρύπων δεν εξαρτάται μόνο από το είδος του κινητήρα αλλά και από τον τρόπο οδήγησης.
2. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, η οδήγηση πρέπει να “προσομοιώνεται” με ακρίβεια σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Αυτή η προσέγγιση αποτέλεσε θεμέλιο για όλα τα μεταγενέστερα προγράμματα.

#### **2.3.1.2. Οι πρώτες ευρωπαϊκές προσπάθειες – ECE-15 και EUDC**

Στην Ευρώπη, αντίστοιχες προσπάθειες ξεκίνησαν λίγο αργότερα, οδηγώντας στην ανάπτυξη του κύκλου ECE-15 κατά τη δεκαετία του 1970. Ο ECE-15 σχεδιάστηκε με στόχο την προσομοίωση της οδήγησης σε πυκνοκατοικημένες ευρωπαϊκές πόλεις, αλλά είχε ακόμη λιγότερη δυναμικότητα από τους αμερικανικούς κύκλους. Η μέγιστη ταχύτητά του δεν ξεπερνούσε τα 50 km/h, ενώ η επιταχύνσεις ήταν εξαιρετικά ήπιες.

<sup>18</sup> European Commission, *Euro 7 Proposal*.

<sup>19</sup> United States Environmental Protection Agency, *Dynamometer Drive Schedules (FTP-75)*.

Στη δεκαετία του 1990, ο ECE-15 συνδυάστηκε με έναν επιπλέον υπεραστικό κύκλο, τον EUDC (Extra-Urban Driving Cycle), ώστε να γίνει δυνατή η μέτρηση εκπομπών και σε υψηλότερες ταχύτητες. Το αποτέλεσμα ήταν ο New European Driving Cycle (NEDC), ο οποίος αποτέλεσε το επίσημο ευρωπαϊκό πρότυπο για σχεδόν 30 χρόνια, μέχρι την αντικατάστασή του από τον WLTP το 2017.

### **2.3.1.3. Περιορισμοί των πρώτων προτύπων και ανάγκη εξέλιξης**

Αν και οι κύκλοι αυτοί αποτέλεσαν σημαντικά βήματα για την εποχή τους, παρουσίασαν περιορισμού που έγιναν εμφανείς όσο εξελισσόταν:

- Οι ρυθμοί κυκλοφορίας άλλαξαν
- Οι μέσες ταχύτητες αυξήθηκαν
- Οι επιταχύνσεις έγιναν πιο απαιτητικές
- Η αστική συμφόρηση άλλαξε χαρακτήρα
- Η τεχνολογία οχημάτων εξελίχθηκε και οι κατασκευαστές μπορούσαν να “βελτιστοποιούν” τους κινητήρες για τους κύκλους

Παράλληλα, η επιστημονική κοινότητα άρχισε να αναγνωρίζει ότι η μεταβατική λειτουργία του κινητήρα (επιτάχυνση, επιβράδυνση, cold start) είναι κρίσιμη για τις συνολικές εκπομπές. Οι πρώτοι κύκλοι, όμως δεν απέδιδαν επαρκώς αυτή τη μεταβατικότητα. Η ανάγκη για πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις οδήγησε στη δημιουργία πιο εξελιγμένων προτύπων όπως ο FTP-75 και αργότερα ο WLTP, καθώς και ερευνητικών κύκλων όπως οι Artemis.<sup>20</sup>

Οι απαρχές αυτές έθεσαν τα θεμέλια για τη σύγχρονη αντίληψη των κύκλων οδήγησης: ένα εργαλείο που πρέπει να συνδυάζει στατιστικό ρεαλισμό, τεχνική μετρησιμότητα, συγκρισιμότητα και ρυθμιστική λειτουργικότητα.<sup>21</sup>

### **2.3.2. Ο κύκλος FTP-75 – Δομή. Φιλοσοφία σχεδιασμού και σημασία στη μέτρηση εκπομπών**

Ο FTP-75 (Federal Test Procedure 75) είναι ο βασικός τυποποιημένος κύκλος οδήγησης που χρησιμοποιείται στις Ηνωμένες Πολιτείες για τη μέτρηση εκπομπών ρύπων και κατανάλωσης καυσίμου επιβατικών οχημάτων. Αναπτύχθηκε από την Environmental Protection Agency (EPA) ως συνέχεια των κύκλων LA-4 και UDDS, με στόχο να δημιουργηθεί ένα ενιαίο πρωτόκολλο που θα αναπαριστά με μεγαλύτερη ακρίβεια την αστική οδήγηση σε συνθήκες πυκνής κυκλοφορίας.<sup>22</sup>

Σε αντίθεση με τους πρώτους ευρωπαϊκούς κύκλους (ECE-15, EUDC), ο FTP-75 ενσωματώνει περισσότερες επιταχύνσεις, μεγαλύτερη ταχύτητα μεταβολών και σημαντική μεταβατικότητα, καθώς βασίζεται στην παρατήρηση ότι οι εκπομπές HC, CO και NO<sub>x</sub>, αυξάνονται δραστικά όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε δυναμικές συνθήκες. Παράλληλα, αναγνωρίζει ότι ένα μεγάλο μέρος της οδήγησης σε αστικά περιβάλλοντα στις ΗΠΑ περιλαμβάνει συχνές στάσεις, έντονες αλλαγές ταχύτητας και μεταβαλλόμενα φορτία στον κινητήρα.

#### **2.3.2.1. Δομή και χαρακτηριστικά του FTP-75**

Ο FTP-75 αποτελείται από τρία διακριτά τμήματα:

##### **1. Η αρχική φάση ψυχρής εκκίνησης ( Cold Start UDDS)**

<sup>20</sup> André, ‘The Artemis European driving cycles for measuring car pollutant emissions’.

<sup>21</sup> UNECE, *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

<sup>22</sup> United States Environmental Protection Agency, *Dynamometer Drive Schedules (FTP-75)*.

Η φάση αυτή αναπαριστά ένα τυπικό ξεκίνημα οχήματος έπειτα από παραμονή σε χαμηλή θερμοκρασία ή μακρά στάση. Όπου το σύστημα καταλύτη δεν έχει ακόμη ενεργοποιηθεί θερμικά. Αυτό το στάδιο έχει κρίσιμη σημασία για τις εκπομπές διότι ο καταλύτης δεν λειτουργεί αποτελεσματικά τα πρώτα λεπτά και η καύση δεν είναι πλήρως σταθεροποιημένη αυξάνοντας έτσι σημαντικά τις εκπομπές HC και CO. Οι συνθήκες αυτές αντικατοπτρίζουν την πραγματική συμπεριφορά οχημάτων στις καθημερινές μετακινήσεις.

## **2. Η φάση σταθεροποιημένης λειτουργίας (Hot-Stabilized UDDS)**

Μετά την αρχική εκκίνηση, το όχημα ακολουθεί το κύριο τμήμα του UDDS. Στο σημείο αυτό ο καταλύτης έχει φτάσει σε πλήρη λειτουργική θερμοκρασία και οι εκπομπές μειώνονται, επιτρέποντας τη μέτρηση της “κανονικής” λειτουργίας του κινητήρα. Η φάση αυτή περιλαμβάνει ρεαλιστικές αλλαγές ταχύτητας με χαμηλές έως μεσαίες επιταχύνσεις, καθώς και συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης με διαδοχικές στάσεις και μεταβαλλόμενα φορτία κινητήρα.

## **3. Η φάση θερμής εκκίνησης (Hot Start UDDS)**

Η φάση αυτή αποτελεί επανάληψη μικρού μέρους του κύκλου, αλλά με το όχημα και τον καταλύτη ήδη σε θερμική ισορροπία. Το στάδιο αυτό χρησιμοποιείται για την απομόνωση των επιδράσεων του cold start στις συνολικές εκπομπές και επιτρέπει ακριβή υπολογισμό της συμβολής της ψυχρής εκκίνησης στο σύνολο

### **2.3.2.2. Φιλοσοφία σχεδιασμού του FTP-75**

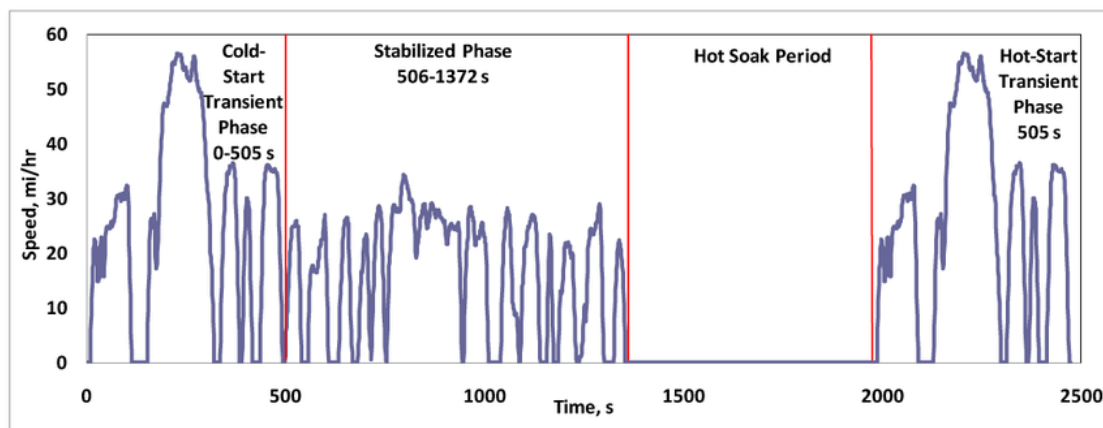
Ο FTP-75 αναπτύχθηκε με σκοπό να ενσωματώσει τις παρατηρήσεις συμπεριφοράς οδηγών σε μεγάλες αμερικανικές πόλεις. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του περιλαμβάνουν:

- **Υψηλό αριθμό στάσεων**
- **Διαρκείς μεταβατικές συνθήκες (επιτάχυνση-επιβράδυνση)**
- **Μέγιστη ταχύτητα 91,2 km/h**
- **Μέση ταχύτητα 31 km/h**
- **Συνολική διάρκεια περίπου 31 λεπτών**

Ο κύκλος παρουσιάζει υψηλότερη δυναμικότητα από τους πρώτους ευρωπαϊκούς κύκλους κάτι που έχει ως συνέπεια αυξημένες μετρήσεις κατανάλωσης και εκπομπών αλλά και ρεαλιστικότερες συνθήκες αστικής οδήγησης στις ΗΠΑ. Η λεπτομερής περιγραφή του προφίλ ταχύτητας επέτρεψε για πρώτη φορά την εκπόνηση εκτεταμένων συγκρίσεων μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών κινητήρα, συστημάτων συγχρονισμού και στρατηγικών ελέγχου καύσης.<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> United States Environmental Protection Agency, *Dynamometer Drive Schedules (FTP-75)*.



Γράφημα 3: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου του κύκλου FTP-95

### 2.3.2.3. Ρόλος του FTP-75 στη διεθνή έρευνα και στη ρυθμιστική πολιτική

Ο FTP-75 αποτέλεσε για δεκαετίες πρότυπο σύγκρισης και σημείο αναφοράς σε διεθνείς μελέτες, επειδή περιλαμβάνει πιο απαιτητική δυναμική από τον NEDC, αναδεικνύει τις εκπομπές cold start και προσεγγίζει πιο πολύ την καθημερινή οδήγηση μεγάλων πόλεων. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιήθηκε ως βάση για αναλύσεις ενεργειακής κατανομής, θερμικής συμπεριφοράς καταλυτών και δυναμικής ρύπων.

Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες που συγκρίνουν υβριδικά οχήματα με οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης ή εξετάζουν μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης (drive cycle energy models) χρησιμοποιούν τον FTP-75 λόγω του υψηλού βαθμού μεταβατικότητας. Επιπλέον, επειδή εστιάζει στη μεταβατική λειτουργία και στη δυναμική ρύπων, ο κύκλος συνέβαλε στη διαμόρφωση σύγχρονων αντιλήψεων για τα transient emissions, που αποτελούν κρίσιμο μέρος της πραγματικής επιβάρυνσης από τα οχήματα.

Παρά τις αρετές του ο συγκεκριμένος κύκλος έχει και περιορισμούς. Οι βασικότεροι είναι ότι δεν περιλαμβάνει αυτοκινητόδρομο με υψηλές ταχύτητες, βασίζεται σε δεδομένα οδήγησης παλαιότερων δεκαετιών, και δεν αποδίδει πλήρως τη σύγχρονη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Παρόλα αυτά, παραμένει ένα από τα πιο σημαντικά πρότυπα στη διεθνή βιβλιογραφία.<sup>24</sup>

### 2.3.3. Οι κύκλοι Artemis (CADC) – Ανάπτυξη, μεθοδολογία και συμβολή στην ευρωπαϊκή έρευνα

Οι κύκλοι Artemis, γνωστοί διεθνώς ως Common Artemis Driving Cycles (CADC), αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000 στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems), υπό τη συντονιστική ευθύνη του Joint Research Centre (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.<sup>25</sup>

Σε αντίθεση με προγενέστερους ρυθμιστικούς κύκλους όπως ο NEDC, οι Artemis σχεδιάστηκαν αποκλειστικά από μεγάλα σύνολα πραγματικών δεδομένων οδήγησης, χρησιμοποιώντας σύγχρονες στατιστικές μεθόδους και αναλυτικές τεχνικές. Ο στόχος ήταν η ανάπτυξη κύκλων που να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τη σύγχρονη ευρωπαϊκή οδήγηση σε διαφορετικά είδη οδικού δικτύου.

<sup>24</sup> United States Environmental Protection Agency, *Dynamometer Drive Schedules (FTP-75)*.

<sup>25</sup> André, 'The Artemis European driving cycles for measuring car pollutant emissions'.

Αποτελούν ερευνητικό όχι ρυθμιστικό, πρότυπο, αλλά αναγνωρίζονται ως τα πιο ρεαλιστικά προφίλ οδήγησης που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

#### **2.3.3.1. Μεθοδολογία ανάπτυξης των Artemis**

Η δημιουργία των CADC βασίστηκε σε ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο σύνολο δεδομένων από ευρωπαϊκές πόλεις και οδικά δίκτυα. Η διαδικασία ανάπτυξης περιλάμβανε τρία βασικά στάδια:

##### **1. Συλλογή πραγματικών δεδομένων οδήγησης**

Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν μέσω on-board συστημάτων που κατέγραφαν ταχύτητα, επιταχύνσεις, καθυστερήσεις, στάσεις, κλίσεις και άλλα στοιχεία του οδηγικού προφίλ. Η συλλογή καλύπτει:

- Διαφορετικές χώρες (Ιταλία, Γαλλία, Γερμανία, Ολλανδία κ.ά.)
- Διαφορετικές εποχές του έτους
- Διάφορες κυκλοφοριακές συνθήκες
- Διαφορετικά είδη οχημάτων

Αποτέλεσμα ήταν ένα ενιαίο dataset που θεωρείται αντιπροσωπευτικό της ευρωπαϊκής οδηγικής συμπεριφοράς.

##### **2. Στατιστική ταξινόμηση μικρο-τμημάτων (microtips)**

Τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε μικρά τμήματα διαδρομής, τα λεγόμενα microtrips, τα οποία αναφέρονται σε ανεξάρτητα τμήματα της οδήγησης μεταξύ δύο στάσεων ή σε διαστήματα στα οποία το προφίλ ταχύτητας εμφανίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Κάθε microtrip ταξινομήθηκε με βάση:

- Μέση ταχύτητα
- Μέγιστη ταχύτητα
- Επιτάχυνση
- Διάρκεια
- Κατανομή στάσεων

Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί τη βάση της σύνθεσης του κάθε κύκλου.

##### **3. Σύνθεση των κύκλων μέσω αντιπροσωπευτικής δειγματοληψίας**

Οι Artemis προέκυψαν από στατιστική επιλογή και συνένωση microtrips που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά για κάθε χρήση οδικού δικτύου. Η σύνθεση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε, να διατηρείται η κατανομή ταχυτήτων του πραγματικού dataset, να αναπαράγεται το εύρος των επιταχύνσεων, να αντικατοπτρίζονται οι πραγματικές μεταβατικές συνθήκες (δράσεις-αντιδράσεις οδηγού και να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη ροή για χρήση σε εργαστηριακό δυναμόμετρο. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται πιο προηγμένη από τον NEDC, που δεν στηρίχθηκε σε τόσο εκτεταμένα δεδομένα ούτε σε στατιστικές διαδικασίες σύνθεσης.

#### **2.3.3.2. Δομή των Artemis Driving Cycles**

Οι Artemis CADC περιλαμβάνουν τρεις κύριους κύκλους που αντιπροσωπεύουν τα βασικά είδη οδικού δικτύου:

##### **1. Αστικός κύκλος (Urban)**

Αποτελείται από πολλές στάσεις, χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες, και υψηλό αριθμό μεταβατικών φάσεων. Αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά τη σύγχρονη αστική οδήγηση στην Ευρώπη, πολύ περισσότερο από τον NEDC.

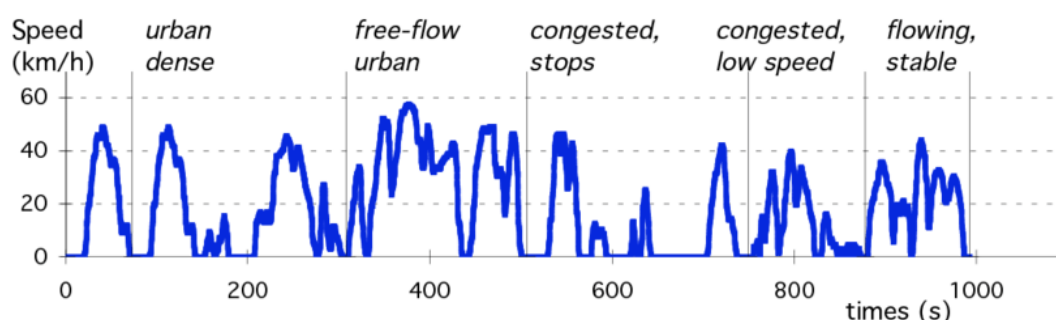
### 2. Επαρχιακός κύκλος (Rural Road)

Περιλαμβάνει υψηλότερες μέσες ταχύτητες και μεγαλύτερη διάρκεια συνεχούς οδήγησης, με πιο έντονες επιταχύνσεις και λιγότερες στάσεις.

### 3. Κύκλος αυτοκινητόδρομου (Motorway)

Αναπαριστά οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο με υψηλές ταχύτητες, κοντά στα ευρωπαϊκά όρια ταχύτητας, καθώς και συνθήκες προσπέρασης με αυξημένη επιταχυντικότητα.

Σε αντίθεση με τον FTP-75 ή τον NEDC, οι Artemis διαθέτουν πολύ υψηλότερη δυναμικότητα (transient intensity). Αυτό σημαίνει μεγαλύτερο εύρος επιταχύνσεων, υψηλότερα ποσοστά μεταβατικών στιγμών, ρεαλιστικότερη κατανομή ταχυτήτων και πιο “απαιτητικό” ενεργειακό προφίλ για τον κινητήρα.<sup>26</sup>



Γράφημα 4: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου κύκλου Artemis

#### 2.3.3.3. Συμβολή των Artemis στη διεθνή έρευνα

Οι CADC δεν αποτέλεσαν ρυθμιστικό πρότυπο, αλλά είχαν τεράστια επιρροή στην:

- Ανάπτυξη ενεργειακών μοντέλων οχημάτων
- Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου ρύπων
- Βαθμονόμηση μοντέλων εκπομπών (COPERT και HBEFA)
- Σύγκριση αποδόσεων μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών κινητήρων
- Προσομοίωση επιδράσεων διαφόρων στρατηγικών οδήγησης στις εκπομπές

Πολλές σύγχρονες έρευνες εξακολουθούν να χρησιμοποιούν τους Artemis επειδή θεωρούνται «ρεαλιστικοί αλλά ταυτόχρονα εύκολα διαχειρίσιμοι στο εργαστήριο». Η δομή τους προσφέρει μια από τις πιο ολοκληρωμένες απεικονίσεις της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς πριν την εισαγωγή του WLTP.

Αυτό τους καθιστά ιδιαίτερα σημαντικούς ως μεθοδολογικό πρόδρομο της φιλοσοφίας που ακολουθήθηκε στο WLTP, όπου πλέον η συλλογή και η στατιστική ανάλυση πραγματικών δεδομένων αποτελεί θεμέλιο της διαδικασίας ανάπτυξης.

#### 2.3.4. Ο κύκλος WLTP στο διεθνές πλαίσιο – Ανάπτυξη, τεχνική φιλοσοφία και ρόλος στην παγκόσμια εναρμόνιση

Ο Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) αποτελεί το σημαντικότερο βήμα προς την παγκόσμια εναρμόνιση των διαδικασιών μέτρησης εκπομπών και κατανάλωσης στα επιβατικά οχήματα. Η ανάπτυξή του εντάσσεται στο πλαίσιο της UN Global Technical Regulation No.15 (GTR 15), που εγκρίθηκε από το

<sup>26</sup> André, ‘The Artemis European driving cycles for measuring car pollutant emissions’.

World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (UNECE WP.29), και βασίστηκε σε συνεργασία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Ιαπωνίας, ΗΠΑ, Κορέας και άλλων χωρών.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού του WLTP διαφοροποιείται ριζικά από αυτήν των προηγούμενων κύκλων, καθώς στηρίζεται σε στατιστική ανάλυση μεγάλων συνόλων πραγματικών δεδομένων οδήγησης από πολλές χώρες και διαφορετικά περιβάλλοντα. Αυτό εξασφαλίζει ότι το προφίλ του κύκλου αντιπροσωπεύει σύγχρονες συνθήκες, αποφεύγοντας τα προβλήματα όπως εκείνο του NEDC, που είχε βασιστεί σε δεδομένα δεκαετιών παλαιότερων οδηγικών μοτίβων.<sup>2728</sup>

#### **2.3.4.1. Διεθνής συνεργασία και ανάγκη για εναρμόνιση**

Η δημιουργία του WLTP προέκυψε από την ανάγκη για εναρμόνιση μεταξύ των αμερικανικών, των ευρωπαϊκών και των ασιατικών μεθόδων μέτρησης, οι οποίες μέχρι τότε βασίζονταν σε εντελώς διαφορετικά πρότυπα (NEDC, FTP-75, JC08), καθώς και στην βελτίωση της ακρίβειας των εργαστηριακών μετρήσεων, έτσι ώστε οι τιμές των εκπομπών και κατανάλωσης να μην αποκλίνουν σημαντικά από τις τιμές από πραγματική οδήγηση.

Η συνεργασία αυτή είχε σημαντικές τεχνικές συνέπειες, όπως ότι ανέδειξε τη σημασία της προσομοίωσης πολλών διαφορετικών οδικών περιβαλλόντων, τον καθορισμό κοινών κανόνων για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δοκιμών και τελικά κατέστησε δυνατή τη χρήση μιας ενιαίας διαδικασίας από τους κατασκευαστές οχημάτων και κινητήρων σε παγκόσμιο επίπεδο.

#### **2.3.4.2. Τεχνική δομή του WLTP**

Ο WLTP δεν είναι ένας ενιαίος κύκλος αλλά ένα σύνολο τεχνικών διαδικασιών που περιλαμβάνουν τον κύκλο WLTC (Worldwide harmonized Light-duty driving Test cycle), δηλαδή το προφίλ ταχύτητας-χρόνου που εκτελείται στο δυναμόμετρο, τους κανόνες για την προετοιμασία του οχήματος καθώς και του εργαστηρίου, διάφορους τύπους δοκιμών για κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές, τις διαδικασίες μέτρησης ρύπων και CO<sub>2</sub> και τέλος την μεθοδολογία προσομοίωσης αντίστασης κύλισης, αεροδυναμικής και μάζας.

Η δομή του WLTC αποτελείται από τέσσερις υποφάσεις:

- **Low** (χαμηλές ταχύτητες, αστικές συνθήκες0)
- **Medium** (μέσες ταχύτητες - επαρχιακή οδήγηση)
- **High** (υψηλότερες ταχύτητες - μεικτό προφίλ)
- **Extra-High** (πολύ υψηλές ταχύτητες – αυτοκινητόδρομος)

Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει την αναπαράσταση μεγαλύτερου εύρους πραγματικών σεναρίων οδήγησης σε σχέση με τους παλαιότερους κύκλους.

#### **2.3.4.3. Στατιστική βάση ανάπτυξης**

Σε αντίθεση με τον κύκλο NEDC, ο οποίος είχε καθοριστεί σε μεγάλο βαθμό με μη-στατιστικές μεθόδους, ο WLTP συντέθηκε μεγάλα σύνολα πραγματικών δεδομένων (real-world driving datasets) από πάνω από 14 χώρες σε διάφορα περιβάλλοντα, ομαδοποιώντας και ταξινομώντας χιλιάδων microtrips. Επιπλέον έγινε εφαρμογή

<sup>27</sup> UNECE, *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

<sup>28</sup> *Regulation (EU) 2017/1151*.

στατιστικών προτύπων επιλογής επιταχύνσεων και χρήση της μεθόδου PMP (Principal Movement Patterns) για αναγνώριση κυρίαρχων οδηγικών μοτίβων.

Η διαδικασία αυτή κατέστησε τον WLTC τον πιο στατιστικά αντιπροσωπευτικό ρυθμιστικό κύκλο που έχει αναπτυχθεί μέχρι και σήμερα

#### 2.3.4.4. Τεχνική προσαρμογή στα χαρακτηριστικά του οχήματος

Ο WLTP εισάγει μια σημαντική καινοτομία: τα οχήματα δεν δοκιμάζονται πλέον όλα με τον ίδιο κύκλο, αλλά ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες βάσει ισχύος/μάζας (PWr):

- **Class 1:** μικρά, χαμηλής ισχύος οχήματα
- **Class 2:** μεσαία οχήματα
- **Class 3:** οχήματα μεγαλύτερης ισχύος/μάζας (τα περισσότερα ευρωπαϊκά οχήματα)

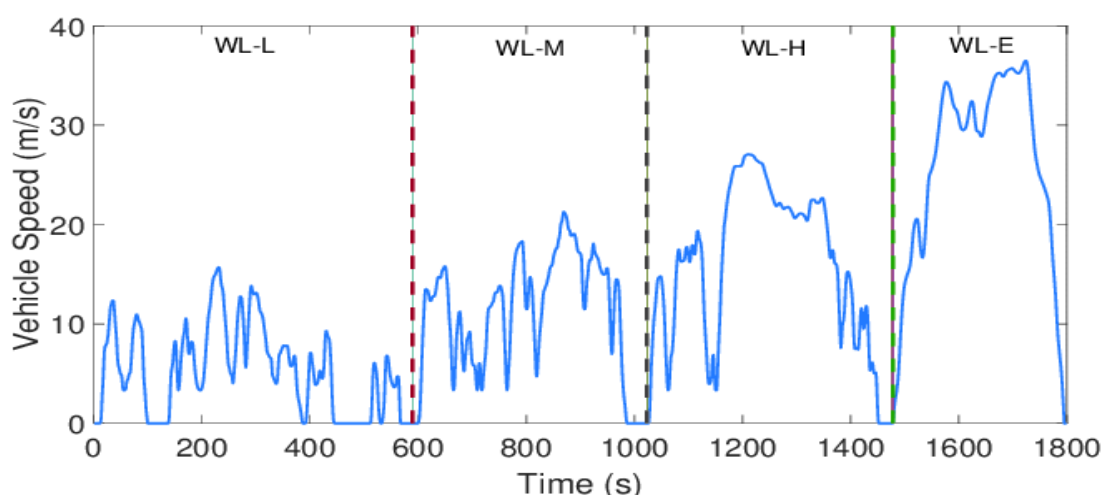
Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων, επειδή οι απαιτήσεις επιτάχυνσης και η δυναμικότητα του κύκλου προσαρμόζονται στις πραγματικές δυνατότητες του οχήματος.

Επιπλέον, ο WLTP περιλαμβάνει προσομοίωση αεροδυναμικής και μηχανικής αντίστασης βάσει δοκιμών coastdown, λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους εξοπλιστικής διαμόρφωσης (μεγαλύτερες ζάντες, επιπλέον βάρος), και πραγματικούς κανόνες αλλαγής ταχυτήτων για μηχανικά κιβώτια (και όχι ιδεατές καμπύλες όπως στον NEDC). Αυτό εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα είναι πιο κοντά στην πραγματική κατανάλωση.<sup>29</sup>

#### 2.3.4.5. Ρόλος του WLTP στη μείωση του “lab-to-road gap”

Ένας από τους βασικούς στόχους του WLTP ήταν η αντιμετώπιση της απόκλισης μεταξύ των εργαστηριακών και των πραγματικών εκπομπών CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>. Σύμφωνα με αναλύσεις του ICCT, το “CO<sub>2</sub> gap” που υπήρχε στον NEDC, το οποίο είχε τιμές συχνά πάνω από 35% μειώθηκε σημαντικά με την εισαγωγή του WLTP 8.

Παρόλα αυτά, ο WLTP δεν αρκεί για να αναπαραστήσει πλήρως τη λειτουργία του οχήματος στον πραγματικό δρόμο, γεγονός που οδήγησε στην εφαρμογή των δοκιμών RDE (Real Driving Emissions), που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.2.5.



Γράφημα 5: Προφίλ ταχύτητας-χρόνου του κύκλου WLTP

<sup>29</sup> UNECE, *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

#### **2.3.4.6. Ο WLTP ως διεθνής εναρμονισμένος κύκλος**

Ο WLTP αποτελεί πλέον κοινό σημείο αναφοράς για την πιστοποίηση οχημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την υιοθέτηση από την Ιαπωνία (ως νέο JC08/WLTC), την εναρμονισμένη εξέλιξη μεγάλου μέρους των διαδικασιών μέτρησης εκπομπών στις ασιατικές αγορές, και την τεχνική σύγκλιση με διαδικασίες EPA στις ΗΠΑ, παρά τις ρυθμιστικές διαφορές.<sup>30</sup>

Χάρη στη διεθνή του φύση, ο WLTP επιτρέπει στους κατασκευαστές:

- Να εφαρμόζουν ενιαία διαδικασία μέτρησης
- Να μειώνουν το κόστος πολλαπλών δοκιμών
- Να διασφαλίζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ χωρών

Η διεθνής αυτή εναρμόνιση αποτελεί σημαντικό βήμα προς ένα καθολικό σύστημα αξιολόγησης εκπομπών.

#### **2.3.5. Συγκριτική ανάλυση διεθνών κύκλων οδήγησης (FTP-75, Artemis, WLTP)**

Η συγκριτική εξέταση των διεθνών κύκλων οδήγησης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εξελίχθηκε η τεχνολογία μέτρησης εκπομπών τις τελευταίες δεκαετίες. Κάθε κύκλος αντικατοπτρίζει διαφορετική φιλοσοφία σχεδιασμού, διαφορετικά δεδομένα βάσης και διαφορετικό βαθμό ρεαλισμού. Η σύγκριση μεταξύ των FTP-75, Artemis (CADC) και WLTP/WLTC αναδεικνύει σαφώς την μετάβαση από απλουστευμένες προσεγγίσεις σε σύνθετες, στατιστικά τεκμηριωμένες και διεθνώς εναρμονισμένες διαδικασίες.<sup>31</sup>

##### **2.3.5.1. Διαφορές στη φιλοσοφία σχεδιασμού**

##### **FTP-75 – Προσομοίωση αστικής οδήγησης υψηλής μεταβατικότητας**

Ο FTP-75 βασίζεται σε παρατήρηση της αστικής οδήγησης στις Ηνωμένες Πολιτείες τη δεκαετία του 1970-1980. Αν και είναι δυναμικός κύκλος με πολλές στάσεις και μεταβατικές φάσεις, η ανάπτυξη του δεν στηρίχθηκε σε μεγάλα πολυεθνικά datasets, αλλά σε δεδομένα συγκεκριμένων πόλεων, κυρίως στο Λος Άντζελες.

Η έμφαση δίνεται:

- Στη μεταβατική λειτουργία (transients)
- Στο φαινόμενο cold-start
- Στην αποτύπωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης

Η φιλοσοφία του είναι ρεαλισμός μέσω παρατήρησης, όχι μέσω στατιστικής ενοποίησης πραγματικών διαδρομών.

##### **Artemis – Στατιστική αναπαράσταση ευρωπαϊκής οδήγησης**

Οι Artemis αναπτύχθηκαν με βάση μεγάλης κλίμακας συλλογές πραγματικών δεδομένων από πολλές ευρωπαϊκές χώρες, στατιστικά επεξεργασμένες και ταξινομημένες σε microtrips.

Η ανάπτυξή τους στηρίζεται σε:

- Πολυδιάστατη στατιστική ανάλυση

---

<sup>30</sup> Regulation (EU) 2017/1151.

<sup>31</sup> International Council on Clean Transportation, *From NEDC to WLTP: effect on emissions*.

- Τυχαία δειγματοληψία από microtrip clusters
- Εξισορρόπηση στη μεταβατικότητα
- Αναπαράσταση πολλαπλών ειδών οδικού δικτύου

Η φιλοσοφία τους είναι ρεαλισμός μέσω στατιστικής σύνθεσης, όχι μέσω απλής καταγραφής.

#### **WLTP/WLTC – Διεθνής εναρμόνιση μέσω εκτεταμένων παγκόσμιων datasets**

Ο WLTP έχει σχεδιαστεί με βάση δεδομένα από περισσότερες από 14 χώρες, εφαρμόζοντας σύγχρονα πρότυπα ανάλυσης microtrips, machine learning clustering και αξιολόγηση driving patterns.

Η φιλοσοφία τους είναι:

- Ρεαλισμός
- Διεθνής εναρμόνιση
- Δυνατότητα αναπαραγωγής σε εργαστήριο
- Προσαρμογή στα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος (PWr classes)

Μέχρι σήμερα αποτελεί τον μοναδικό κύκλο που εξισορροπεί όλα τα παραπάνω.<sup>32</sup>

#### **2.3.5.2. Διαφορές σε τεχνική δομή και δυναμικότητα**

##### **FTP-75**

- 31 λεπτά
- 23 στάσεις
- Μέση ταχύτητα ~31 km/h
- Μεταβατική λειτουργία υψηλής σημασίας
- Χρήση ψυχρής και θερμής εκκίνησης
- Αποκλειστικά αστικός χαρακτήρας

##### **Artemis**

- Τρεις ξεχωριστοί κύκλοι: Urban – Rural - Motorway
- Υψηλή δυναμικότητα (intensity)
- Μεγαλύτερες επιταχύνσεις από τον FTP-75
- Ρεαλιστική αναπαράσταση ευρωπαϊκών δικτύων
- Μεγαλύτερη διάρκεια και ταχύτητες στον κύκλο αυτοκινητόδρομου

##### **WLTP/WLTC**

- Τέσσερις υποφάσεις: Low – Medium - High - Extra High
- Συνολική διάρκεια ~30 λεπτά
- Υψηλότερες μέσες και μέγιστες ταχύτητες από τους NEDC & FTP-75
- Σύνθεση βάσει στατιστικών driving patterns
- Παγκόσμιο σημείο αναφοράς για έγκριση τύπου

Σε επίπεδο δυναμικότητας, οι Artemis και WLTP είναι πιο σύγχρονοι και αναπαριστούν πολύ μεγαλύτερο εύρος έντασης οδήγησης. Ο FTP-75 παραμένει εξαιρετικός κύκλος για αστική οδήγηση, αλλά δεν περιλαμβάνει υψηλές ταχύτητες ή αυτοκινητόδρομους.

<sup>32</sup> International Council on Clean Transportation, *From NEDC to WLTP: effect on emissions*.

### **2.3.5.3. Επίδραση στις εκπομπές και την κατανάλωση καυσίμου FTP-75**

Ο κύκλος αυτός οδηγεί σε υψηλότερες εκπομπές HC και CO, ειδικά κατά την φάση cold start, και είναι χρήσιμος για την αξιολόγηση μεταβατικών φάσεων.

#### **Artemis**

Οι CADC έχουν αυξημένες απαιτήσεις ενέργειας λόγω των επιταχύνσεων, μετρούν υψηλότερη κατανάλωση και εκπομπές NO<sub>x</sub> σε σχέση με τον NEDC ή τον FTP-75, επειδή προκύπτουν από πραγματικές οδηγικές κατανομές.

#### **WLTP**

Ο WLTP βελτιώνει την εκτίμηση κατανάλωσης CO<sub>2</sub> επειδή:

- Έχει μεγαλύτερη διάρκεια
- Έχει υψηλότερες μεταβατικές επιταχύνσεις
- Περιλαμβάνει ευρύτερο φάσμα ταχυτήτων
- Προσαρμόζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος

Τα αποτελέσματα πλησιάζουν πολύ περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα οδήγησης από τους NEDC και FTP-75.

Έτσι προκύπτει ότι ο FTP-75 είναι κατάλληλος για μοντελοποίηση αστικών εκπομπών και μελέτες cold-start, αλλά λιγότερο αντιπροσωπευτικός σύγχρονης κυκλοφορίας. Οι κύκλοι Artemis είναι εξαιρετικοί για επιστημονική έρευνα, λόγω της στατιστικής τους βάσης και της υψηλής ποικιλίας μεταβατικών συνθηκών. Ο WLTP είναι ο πλέον κατάλληλος για ρυθμιστικούς σκοπούς και για συγκρίσεις μεταξύ οχημάτων, επειδή συνδέεται άμεσα με τη νομοθεσία και την έγκριση τύπου, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί ικανοποιητικό επίπεδο ρεαλισμού.<sup>33</sup>

### **2.3.5.4. Τελικό συμπέρασμα**

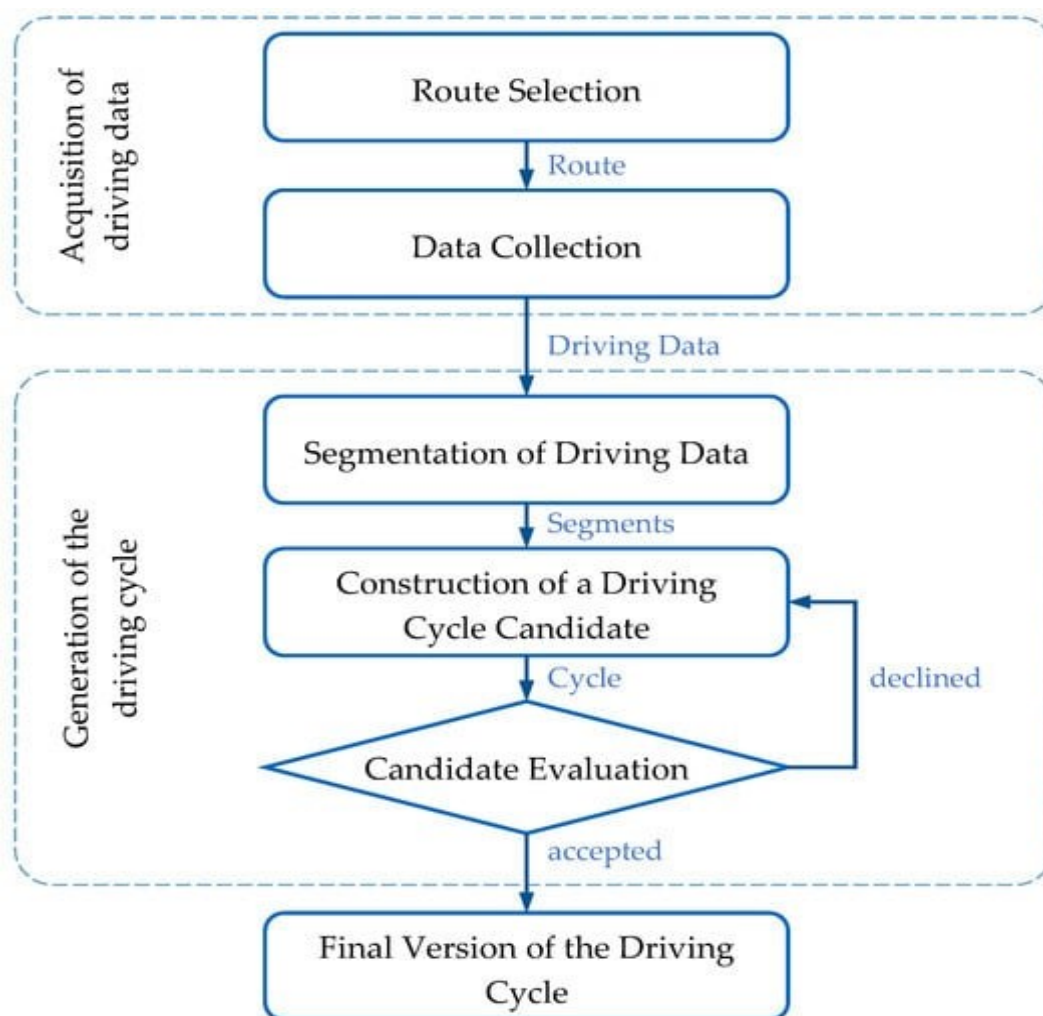
Η εξέλιξη των κύκλων οδήγησης δείχνει μια σταθερή μετάβαση από εργαλείο μέτρησης εκπομπών βασισμένο σε απλές παρατηρήσεις (LA-4, FTP-75), προς ερευνητικούς κύκλους βασισμένους σε στατιστική ανάλυση πραγματικής οδήγησης (Artemis), και τελικά σε διεθνώς εναρμονισμένο πολύ-επίπεδο σύστημα με επιστημονική τεκμηρίωση και ρυθμιστική ισχύ.

Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της χρήσης πραγματικών δεδομένων για την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης, κάτι που αποτελεί και τον πυρήνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

---

<sup>33</sup> *Real-world vehicle emissions and driving cycles.*

## 2.4. Μέθοδοι δημιουργίας κύκλων οδήγησης



Γράφημα 6: Γενική μεθοδολογία δημιουργίας κύκλου οδήγησης

### 2.4.1. Θεωρητικό υπόβαθρο και αναγκαιότητα μεθοδολογικής προσέγγισης

Η δημιουργία κύκλων οδήγησης βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα αποτελεί κρίσιμο εργαλείο στην ανάλυση εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας από επιβατικά οχήματα. Σε αντίθεση με τους θεσμοθετημένους κύκλους που σχεδιάζονται σε ρυθμιστικό επίπεδο, οι ερευνητικοί και τοπικοί κύκλοι προκύπτουν μέσα από επεξεργασία δεδομένων που συλλέγονται απευθείας από την πραγματική οδήγηση, όπως μέσω συστημάτων OBD, GPS καταγραφής, τηλεμετρίας ή κινητών μετρητικών διατάξεων.

Η ανάγκη ανάπτυξης τοπικών κύκλων προκύπτει από το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά της οδήγησης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, την εποχικότητα, το είδος του οδικού δικτύου και σε μεγάλο βαθμό, τις συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης. Περιοχές με ιδιαίτερη μορφολογία, όπως νησιώτικές ή ορεινές περιοχές -με χαρακτηριστικό παράδειγμα το νησί της Θάσου- εμφανίζουν διαφορετικά πρότυπα επιτάχυνσης κατανάλωσης και λειτουργίας κινητήρα σε σχέση με μεγάλες αστικές περιοχές ή διαδρομές αυτοκινητοδρόμων.

Οι διαφορές αυτές επηρεάζουν σημαντικά το ενεργειακό φορτίο του κινητήρα, τη θερμική κατάσταση του συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων, τη συχνότητα μεταβατικών φάσεων και τελικά τις εκπομπές και την κατανάλωση καυσίμου.

Η δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού κύκλου οδήγησης δεν μπορεί να βασιστεί σε αυθαίρετη επιλογή δεδομένων, αλλά απαιτεί συστηματική προσέγγιση. Κάθε κύκλος πρέπει να αναπαράγει, στο μέτρο του δυνατού, τη στατιστική δομή της πραγματικής οδήγησης: την κατανομή ταχυτήτων, τις επιταχύνσεις, τις επιβραδύνσεις, τη συχνότητα στάσεων και τη δυναμικότητα των μεταβατικών φάσεων. Για τον λόγο αυτό, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, οι οποίες εξελίχθηκαν σταδιακά από απλούστερες σε περισσότερο σύνθετες τεχνικές.

Οι πιο θεμελιώδεις προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τις μεθόδους *microtrips*, τις στοχαστικές διαδικασίες αλυσίδων Markov, τις μεθόδους πολυδιάστατης ομαδοποίησης (*clustering*) και πιο πρόσφατα, τεχνικές μηχανικής μάθησης. Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες βασίζεται σε διαφορετικές θεωρητικές αρχές και επιδιώκει διαφορετικό ισοζύγιο μεταξύ ρεαλισμού και ελεγχόμενης αναπαραγωγικότητας.

Η εξέλιξη αυτή αντανακλά την ανάγκη της επιστημονικής κοινότητας να χρησιμοποιεί εργαλεία ικανά να περιγράψουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά του οχήματος και του οδηγού, ιδιαίτερα σε εποχές όπου η πολυπλοκότητα του συστήματος μετάδοσης ισχύος και η μεταβλητότητα της κυκλοφορίας έχουν αυξηθεί σημαντικά.

Παρά το γεγονός ότι οι τέσσερις αυτές μεθοδολογίες διαφέρουν ως προς την προσέγγιση, όλες εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό: την αποτύπωση ενός αντιπροσωπευτικού προφίλ ταχύτητας-χρόνου, που να μπορεί να εφαρμοστεί σε εργαστηριακό δυναμόμετρο ή σε ενεργειακές προσομοιώσεις, με τρόπο αξιόπιστο, συγκρίσιμο και τεχνικά τεκμηριωμένο. Κάθε κύκλος που παράγεται με αυτές τις μεθόδους πρέπει να ισορροπεί ανάμεσα στη ρεαλιστικότητα και στην ανάγκη σταθεροποίησης των μετρήσεων, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για επιστημονική έρευνα όσο και για τεχνική αξιολόγηση συστημάτων οχήματος.

Η θεωρητική θεμελίωση των μεθόδων αυτών στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη στατιστική ανάλυση χρονοσειρών, στη θεωρία πιθανοτήτων και στην εξαγωγή χαρακτηριστικών (*feature extraction*). Παράλληλα η σύγχρονη βιβλιογραφία δείχνει ότι με την αύξηση του όγκου δεδομένων και της υπολογιστικής ισχύος, οι πιο πρόσφατες τεχνικές -ιδίως εκείνες που βασίζονται σε μηχανική μάθηση- αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπουν τη μοντελοποίηση πολύπλοκων οδηγικών μοτίβων και τη δημιουργία κύκλων υψηλής αντιπροσωπευτικότητας και προσαρμοστικότητας.<sup>34</sup>

#### **2.4.2. Μέθοδοι *Microtrips* – Θεωρητικό υπόβαθρο, διαδικασία και εφαρμογές**

Οι μέθοδοι *microtrips* αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες και ιστορικά σημαντικές τεχνικές για την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης από πραγματικά δεδομένα. Η βασική τους φιλοσοφία στηρίζεται στη διάσπαση της συνολικής οδήγησης σε μικρά, ανεξάρτητα τμήματα, τα οποία αντιστοιχούν σε διαδρομές μεταξύ δύο πλήρων στάσεων του οχήματος. Κάθε *microtrip* περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως μεταβατικές φάσεις (επιτάχυνση-επιβράδυνση), σταθερές ταχύτητες, διάρκεια και επίπεδο δυναμικότητας, επιτρέποντας μια αρκετά λεπτομερή αποτύπωση της πραγματικής οδήγησης.

---

<sup>34</sup> 'Evaluation of driving cycle representativeness'.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε εκτενώς σε ερευνητικά προγράμματα, συμπεριλαμβανομένων έργων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του Joint Research Centre, γιατί παρέχει ένα ισορροπημένο πλαίσιο μεταξύ απλότητας υλοποίησης και ικανότητας αναπαράστασης πραγματικών οδηγικών συνθηκών.

Η φιλοσοφία της στηρίζεται στην υπόθεση ότι η οδηγική συμπεριφορά μπορεί να θεωρηθεί ως ακολουθία από τμήματα με σχετικά σταθερά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να συντεθούν εκ νέου ώστε να δημιουργηθεί ένας συνολικός αντιπροσωπευτικός κύκλος.<sup>35</sup>

#### **2.4.2.1. Αρχή λειτουργίας και μαθηματική θεμελίωση**

Ο ορισμός ενός microtrip βασίζεται στη χρονοσειρά ταχύτητας: ένα νέο microtrip ξεκινά όταν η ταχύτητα μηδενίζεται και ολοκληρώνεται με την επόμενη πλήρη στάση. Κάθε τέτοιο τμήμα αναπαριστά ένα μικρό δείγμα της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς, το οποίο μπορεί να περιγραφεί με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά – όπως μέση και μέγιστη ταχύτητα, ποσοστά επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, διάρκεια και συχνότητα μεταβατικών φάσεων.

Η θεωρητική ισχύς της μεθόδου προκύπτει από την ικανότητα της να διατηρεί τις στατιστικές ιδιότητες της πραγματικής οδήγησης. Αν τα microtrips ταξινομηθούν κατάλληλα και επιλέγουν αντιπροσωπευτικά δείγματα, τότε η σύνθεσή τους αναπαράγει με υψηλό βαθμό ακρίβειας το πραγματικό driving pattern.

#### **2.4.2.2. Διαδικασία ανάλυσης και σύνθεσης κύκλου**

Η δημιουργία ενός κύκλου οδήγησης με την μέθοδο microtrips περιλαμβάνει συνήθως τέσσερα στάδια.

##### **1. Προεπεξεργασία και καθαρισμός δεδομένων**

Τα πραγματικά δεδομένα περιλαμβάνουν συχνά θόρυβο, σφάλματα από OBD ή GPS, ακραίες τιμές ή περιόδους ακινησίας που δεν αφορούν οδήγηση. Πραγματοποιείται επομένως φιλτράρισμα, διόρθωση χρονικών ασυνεχειών και απομάκρυνση μη σχετικών τμημάτων. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι τα microtrips θα αποτυπώνουν πραγματικούς οδηγικούς χειρισμούς και όχι τεχνικά artifacts.

##### **2. Διαχωρισμός της χρονοσειράς σε microtrips**

Αφού καθαριστεί το dataset, εντοπίζονται οι πλήρεις στάσεις και ορίζονται τα επιμέρους microtrips. Κάθε ένα από αυτά αποτελεί ξεχωριστή μονάδα ανάλυσης, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν και να οργανωθούν σε πίνακες περιγραφικών μεταβλητών.

##### **3. Στατιστική ταξινόμηση microtrips**

Τα microtrips αναλύονται ως προς τα χαρακτηριστικά τους και ταξινομούνται σε ομάδες με παρόμοια δυναμικότητα ή οδηγική συμπεριφορά. Η ταξινόμηση αυτή δεν αποτελεί ακόμη clustering, αλλά μια βασική μορφή ομαδοποίησης που βοηθά στην αναγνώριση των κυρίαρχων μοτίβων οδήγησης. Η διαδικασία αυτή είναι θεμελιώδης, διότι επιτρέπει την επιλογή αντιπροσωπευτικών microtrips που αναπαράγουν τις κατανομές ταχύτητας και επιτάχυνσης της πραγματικής διαδρομής.

---

<sup>35</sup> ‘Construction of real-world driving cycles using microtrips’, 2016.

#### 4. Επιλογή και σύνθεση αντιπροσωπευτικών microtips

Το τελικό στάδιο είναι η δημιουργία του κύκλου οδήγησης μέσω συνένωσης microtrips που έχουν επιλογή ως αντιπροσωπευτικά του συνολικού dataset. Η επιλογή μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια:

- Διατήρηση της κατανομής ταχυτήτων
- Διατήρηση της μέσης ταχύτητας και της μέσης επιτάχυνσης
- Τήρηση συνολικής διάρκειας αντίστοιχης με τυπικό κύκλο
- Αναπαραγωγή των συχνοτήτων μεταβατικών φάσεων

Το αποτέλεσμα είναι ένας κύκλος που αποτελείται από πραγματικά, όχι συνθετικά οδηγικά τμήματα.

##### 2.4.2.3. Πλεονεκτήματα της προσέγγισης microtrips

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή ρεαλιστικότητα, καθώς κάθε τμήμα του κύκλου αντικατοπτρίζει πραγματική οδηγική συμπεριφορά. Η μέθοδος είναι απλή στην εφαρμογή της, απαιτεί σχετικά περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά ακόμη και σε μέτριας έκτασης datasets. Παράλληλα, προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και πρακτικότητας, αφού διατηρεί τις βασικές στατιστικές ιδιότητες της οδήγησης με τρόπο εύκολα ερμηνεύσιμο.

Ο επιπλέον βαθμός ελέγχου που παρέχει -π.χ. επιλογή microtrips με συγκεκριμένη δυναμικότητα- καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου ο ερευνητής επιθυμεί να δημιουργήσει κύκλους που να αναπαριστούν συγκεκριμένες συνθήκες ή περιβάλλοντα (αστικό, επαρχιακό, μεικτό).

##### 2.4.2.4. Περιορισμοί προκλήσεις και εφαρμογές στη διεθνή βιβλιογραφία

Ο κύριος περιορισμός της μεθόδου είναι ότι το τελικό driving pattern εξαρτάται άμεσα από το dataset. Αν το σύνολο δεδομένων είναι περιορισμένο, μη αντιπροσωπευτικό ή αν το δείγμα οδήγησης προέρχεται από έναν μόνο οδηγό, τότε το παραγόμενο driving cycle ενδέχεται να μην αναπαριστά επαρκώς το ευρύτερο πληθυσμιακό σύνολο. Επιπλέον, επειδή η σύνθεση γίνεται με πραγματικά segments, ο ερευνητής δεν μπορεί εύκολα να τροποποιήσει στοιχεία όπως η επιταχυντικότητα ή η διάρκεια με τρόπο που υπερβαίνει τα παρατηρούμενα δεδομένα.

Ορισμένες μελέτες επισημαίνουν επίσης ότι η μέθοδος microtrips έχει περιορισμένη δυνατότητα προσομοίωσης ειδικών σεναρίων, όπως η ακραία συμφόρηση ή η συνεχής υψηλή ταχύτητα, εκτός αν υπάρχουν επαρκή δείγματα στα συλλεγμένα δεδομένα.

Οι μέθοδοι microtrips έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε έργα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, σε έρευνες για την ανάπτυξη τοπικών κύκλων (π.χ. Κίνα, Ινδία, Βόρεια Ευρώπη) και σε πλήθος πανεπιστημιακών μελετών. Η επιτυχία τους οφείλεται κυρίως στην απλότητα, τη ρεαλιστικότητα και την προσαρμοστικότητά τους. Η μέθοδος αυτή αποτελεί επίσης το πρώτο βήμα σε πιο σύνθετες τεχνικές, όπως το clustering ή τα Markov models, που στηρίζονται σε παρόμοια λογική διαχωρισμού τμημάτων της οδήγησης.<sup>36</sup>

---

<sup>36</sup> 'Construction of real-world driving cycles using microtrips', 2016.

### **2.4.3. Αλυσίδες Markov στη παραγωγή κύκλων οδήγησης: Θεωρία και εφαρμογές**

Οι αλυσίδες Markov χρησιμοποιούνται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία για τη δημιουργία κύκλων οδήγησης όταν στόχος είναι η παραγωγή μιας χρονοσειράς ταχύτητας-χρόνου που να διατηρεί τις στατιστικές ιδιότητες της πραγματικής οδήγησης, χωρίς να περιορίζεται στη χρήση ολόκληρων “segments” όπως συμβαίνει στις μεθόδους microtrips. Η βασική ιδέα στηρίζεται στη θεωρία πιθανοτήτων και πιο συγκεκριμένα στη μοντελοποίηση της εξέλιξης της ταχύτητας ως στοχαστικής διαδικασίας, όπου η μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη περιγράφεται από ένα σύνολο πιθανοτήτων μετάβασης.<sup>37</sup>

#### **2.4.3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο: η στοχαστική φύση της οδήγησης**

Η οδήγηση μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδοχή καταστάσεων, όπου κάθε κατάσταση αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο επίπεδο ταχύτητας ή επιτάχυνσης. Οι αλυσίδες Markov επιτρέπουν να μοντελοποιηθεί αυτή η εξέλιξη υποθέτοντας ότι η μελλοντική κατάσταση εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα και όχι από το πλήρες ιστορικό της διαδρομής. Μολονότι αυτή η υπόθεση απλοποιεί την πραγματικότητα, έχει αποδειχθεί αρκετά ισχυρή για τη δημιουργία ρεαλιστικών κύκλων.

Η θεμελιώδης ιδέα είναι ότι ο χώρος καταστάσεων (ταχύτητες, ή ταχύτητα-επιτάχυνση σε πιο σύνθετα συστήματα) χωρίζεται σε διακριτά επίπεδα. Από τα πραγματικά δεδομένα υπολογίζονται οι πιθανοί ρυθμοί μετάβασης από μια κατάσταση στην επόμενη, σχηματίζοντας έναν πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης. Με βάση αυτόν τον πίνακα, μπορεί να παραχθεί μια νέα ακολουθία καταστάσεων που δεν προέρχεται απευθείας από πραγματική διαδρομή, αλλά αποτελεί συνθετική χρονοσειρά με στατιστικά χαρακτηριστικά όμοια με την πραγματική.

#### **2.4.3.2. Διαδικασία δημιουργίας κύκλου με αλυσίδες Markov**

Η μέθοδος περιλαμβάνει συνήθως τέσσερα στάδια.

##### **1. Ορισμός του χώρου καταστάσεων**

Η ταχύτητα διαχωρίζεται σε διακριτές τιμές ή εύρη, για παράδειγμα ανά 1 km/h ή ανά 5 km/h, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και τον διαθέσιμο όγκο δεδομένων. Σε πιο προχωρημένες προσεγγίσεις, η κατάσταση μπορεί να οριστεί ως συνδυασμός ταχύτητας και επιτάχυνσης, επιτρέποντας πιο σύνθετη αποτύπωση της οδηγικής δυναμικής. Ο ορισμός του χώρου καταστάσεων αποτελεί κρίσιμο βήμα, καθώς η απόλυτη λεπτομέρεια μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή πίνακα πιθανοτήτων, ενώ υπερβολικά χονδρικός διαχωρισμός ενδέχεται να απωλέσει σημαντικές λεπτομέρειες.

##### **2. Υπολογισμός του πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης**

Από τα πραγματικά δεδομένα εξάγονται οι συχνότητες μετάβασης από μια κατάσταση σε μια άλλη. Οι συχνότητες αυτές κανονικοποιούνται ώστε να σχηματίζουν πίνακα πιθανοτήτων, ο οποίος εκφράζει σύντομα το οδηγικό μοτίβο: πιθανότητες επιτάχυνσης, διατήρησης ταχύτητας, επιβράδυνσης και στάσεων. Ο πίνακας αυτός αποτελεί το “μοντέλο” της οδηγικής συμπεριφοράς.

##### **3. Παραγωγή συνθετικού κύκλου οδήγησης**

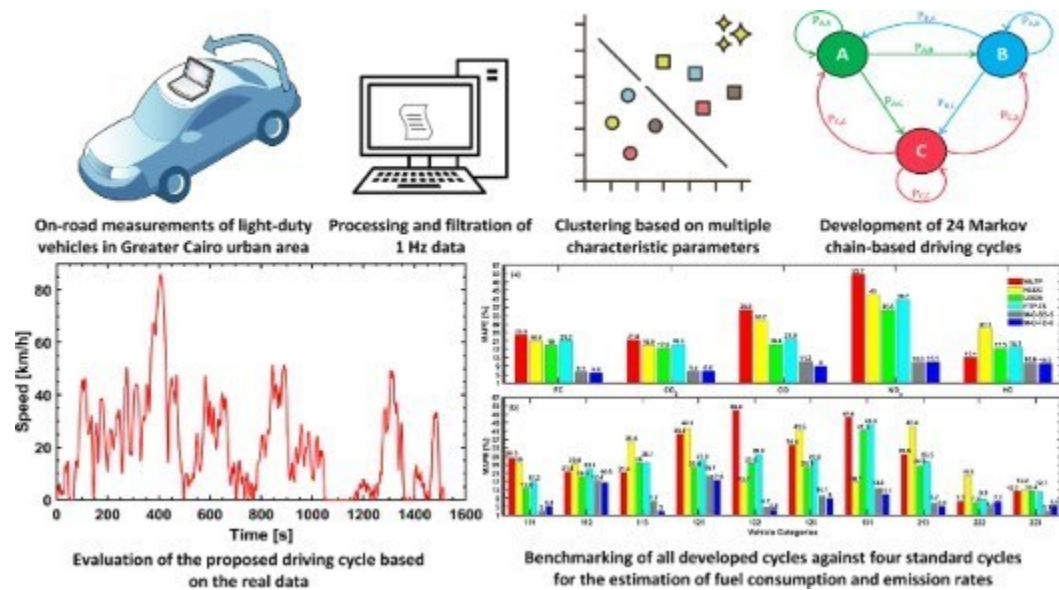
---

<sup>37</sup> ‘Synthesis of driving cycles using Markov chains’.

Με αφετηρία μια αρχική κατάσταση (συνήθως στάση), το μοντέλο χρησιμοποιεί τυχαίες επιλογές βασισμένες στις πιθανότητες μετάβασης ώστε να παράγει μια νέα χρονοσειρά. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει ότι το τελικό προφίλ ταχύτητας θα διατηρεί τη στατιστική δομή της πραγματικής οδήγησης, αλλά δεν θα είναι απλή επανάληψη υπαρχόντων δεδομένων.

#### 4. Εξασφάλιση ρεαλιστικών περιορισμών

Η διαδικασία παραγωγής πρέπει να συνοδεύεται από ελέγχους ώστε να αποφεύγονται μη ρεαλιστικές αλληλουχίες, όπως απότομες μεταβάσεις ταχύτητας που δεν μπορούν να επιτευχθούν από πραγματικό όχημα, ή συνεχείς καταστάσεις μέγιστης επιτάχυνσης. Σε αρκετές εφαρμογές, το μοντέλο Markov εμπλουτίζεται με όρια επιτάχυνσης, περιορισμούς απόδοσης κινητήρα και μηχανικής πέδησης.



Εικόνα 3: Μοντελοποίηση κύκλου οδήγησης με αλυσίδες Markov

##### 2.4.3.3. Πλεονεκτήματα της προσέγγισης Markov

Το κύριο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα παραγωγής εντελώς νέου κύκλου, που δεν αποτελεί απλή αντιγραφή πραγματικών “segments”, αλλά συνθετική χρονοσειρά. Αυτό επιτρέπει την αύξηση της διάρκειας, την προσαρμογή σε ειδικές απαιτήσεις και την παραγωγή πολλών διαφορετικών κύκλων από το ίδιο dataset. Επειδή η μέθοδος στηρίζεται σε πιθανοθεωρητικό μοντέλο, μπορεί να αναπαράγει την ουσία της οδηγικής συμπεριφορά, ακόμη και όταν δεν υπάρχουν τόσα πολλά microtrips ή όταν η οδήγηση είναι πολύ σύνθετη.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι η μέθοδος μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να δημιουργεί κύκλους για διαφορετικούς τύπους οδικού δικτύου, απλώς αλλάζοντας τον πίνακα πιθανοτήτων ή χρησιμοποιώντας διαφορετικά datasets.

##### 2.4.3.4. Περιορισμοί και τεχνικές προκλήσεις

Η βασικής υπόθεση της μεθόδου -ότι η μελλοντική κατάσταση εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα- δεν αντανάκλα πλήρως την πραγματική οδήγηση, όπου η συμπεριφορά του οδηγού έχει συχνά “μνήμη”. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προφίλ που, ενώ είναι στατιστικά συμβατά, δεν αναπαριστούν ορισμένες ακολουθίες υψηλής σημασίας (π.χ. συνεχόμενες προσπεράσεις ή μεγάλα κατηφορικά τμήματα)

Επιπλέον, η μέθοδος μπορεί να δημιουργήσει μη ρεαλιστικές μεταβολές ταχύτητας αν δεν εφαρμοστούν περιορισμοί επιτάχυνσης. Η σταθερότητα του πίνακα πιθανοτήτων απαιτεί μεγάλο dataset, όσο μικρότερο είναι το δείγμα, τόσο υψηλότερος ο κίνδυνος να δημιουργηθεί μη αντιπροσωπευτικός ή μη ομαλός πίνακας.

Παρά τους περιορισμούς, τα μοντέλα Markov παραμένουν εξαιρετικά ισχυρά εργαλεία, ιδιαίτερα για την παραγωγή προσομοιωτικών κύκλων σε μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης, όπου απαιτείται μεγάλου μήκους χρονοσειρά με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά.

#### **2.4.3.5. Εφαρμογές στη διεθνή βιβλιογραφία**

Οι αλυσίδες Markov έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλήθος μελετών για την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης τόσο σε αστικά δίκτυα όσο και σε ημιαστικά και αυτοκινητόδρομους. Ερευνητικά προγράμματα στην Ευρώπη, στην Κίνα και στις ΗΠΑ αξιοποίησαν μοντέλα Markov για την παραγωγή κύκλων μεγάλης διάρκειας, τη μοντελοποίηση stochastically-driven emissions και την εξαγωγή προφίλ για HEV/EV προσομοιώσεις.

Η ευελιξία της μεθόδου και η δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπρόσθετων περιορισμών καθιστούν τις αλυσίδες Markov ένα από τα πιο δημοφιλή εργαλεία για σύνθετες προσομοιώσεις και συνθέσεις κύκλων οδήγησης.<sup>38</sup>

#### **2.4.4. Μέθοδοι clustering στη δημιουργία driving cycles: στατιστική θεμελίωση και πρακτική εφαρμογή**

Οι μέθοδοι ομαδοποίησης (clustering) αποτελούν μια από τις πλέον σύγχρονες και ευέλικτες προσεγγίσεις στη δημιουργία κύκλων οδήγησης. Σε αντίθεση με τις microtrip-based μεθόδους, οι οποίες περιορίζονται στη χρήση πραγματικών αποσπασμάτων οδήγησης, το clustering επιτρέπει την πολυδιάστατη ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων και την αναγνώριση δομικών μοτίβων που χαρακτηρίζουν την οδηγική συμπεριφορά. Η λογική της προσέγγισης βασίζεται στην αναζήτηση ομάδων σημείων δεδομένων με παρόμοια χαρακτηριστικά, επιτρέποντας τη στατιστική ανακατασκευή ενός κύκλου που αποτυπώνει ρεαλιστικά την πολυπλοκότητα της πραγματικής οδήγησης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, το clustering έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αστικών, υπεραστικών και μικτών κύκλων οδήγησης, την ανάλυση ενεργειακής κατανάλωσης ηλεκτρικών οχημάτων, και την ανάπτυξη τοπικών κύκλων σε περιοχές με έντονη κυκλοφοριακή μεταβλητότητα. Η προσέγγιση αυτή ευνοεί περιβάλλοντα όπου η διαθέσιμη ποσότητα δεδομένων είναι μεγάλη και παρουσιάζει σημαντική ετερογένεια.<sup>39</sup>

##### **2.4.4.1. Θεωρητική βάση των μεθόδων ομαδοποίησης**

Το clustering είναι μια μέθοδος μη-εποπτευόμενης μάθησης (unsupervised learning) που αποσκοπεί στην εύρεση ομάδων μέσα σε ένα dataset, βάσει της ομοιότητας μεταξύ των παρατηρήσεων. Στο πλαίσιο driving cycles, κάθε παρατήρηση αντιπροσωπεύει ένα μικρό τμήμα οδήγησης, είτε αυτό είναι ένα microtrip είτε ένας επιμέρους χρονικός ορίζοντας σταθερού μήκους (sliding window), και περιγράφεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών που αποτυπώνουν την οδηγική συμπεριφορά.

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τη μέση ταχύτητα, τη μέγιστη ταχύτητα, την τυπική απόκλιση της ταχύτητας, την επιταχυντικότητα, το ποσοστό στάσεων, την κατανάλωση ενέργειας σε υβριδικά οχήματα, ή ακόμη και σύνθετα

<sup>38</sup> 'Synthesis of driving cycles using Markov chains'.

<sup>39</sup> 'Driving cycle construction using clustering techniques'.

στατιστικά μετρικά όπως power demand ή variability coefficients. Η χρήση τέτοιων πολυδιάστατων χαρακτηριστικών επιτρέπει στις clustering algorithms να εντοπίσουν μοτίβα που δεν είναι εμφανή με απλή ανάλυση χρόνου-ταχύτητας.

#### **2.4.4.2. Διαδικασία εφαρμογής clustering για ανάπτυξη κύκλου οδήγησης**

##### **1. Επιλογή και εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature extraction)**

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού συνόλου μεταβλητών που περιγράφουν πλήρως τη συμπεριφορά κάθε segment. Η επιλογή των χαρακτηριστικών είναι κρίσιμη, διότι επηρεάζει τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων και, κατά συνέπεια, τη διαμόρφωση των clusters.

##### **2. Επιλογή αλγορίθμου clustering**

Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι, με συνηθέστερους τους k-means, fuzzy c-means, hierarchical clustering και DBSCAN. Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν ως προς τον τρόπο που ορίζουν την ομοιότητα μεταξύ σημείων και τον τρόπο σχηματισμού των ομάδων.

Για παράδειγμα, το k-means επιβάλλει σφαιρική δομή στα clusters και απαιτεί εκ των προτέρων τον αριθμό των ομάδων, ενώ το DBSCAN εντοπίζει πυκνότητες δεδομένων χωρίς ανάγκη για προκαθορισμένο αριθμό clusters, καθιστώντας το χρήσιμο για datasets υψηλής ποικιλίας.

##### **3. Καθορισμός αριθμού clusters**

Η επιλογή του αριθμού των ομάδων δεν είναι τυχαία αλλά βασίζεται σε μετρικές όπως το Silhouette Index ή το Davies-Bouldin score. Η σωστή επιλογή clusters εξασφαλίζει ότι ο τελικός κύκλος θα περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά segments όλων των τύπων οδηγικής συμπεριφοράς.

##### **4. Επιλογή αντιπροσωπευτικών segments από κάθε cluster**

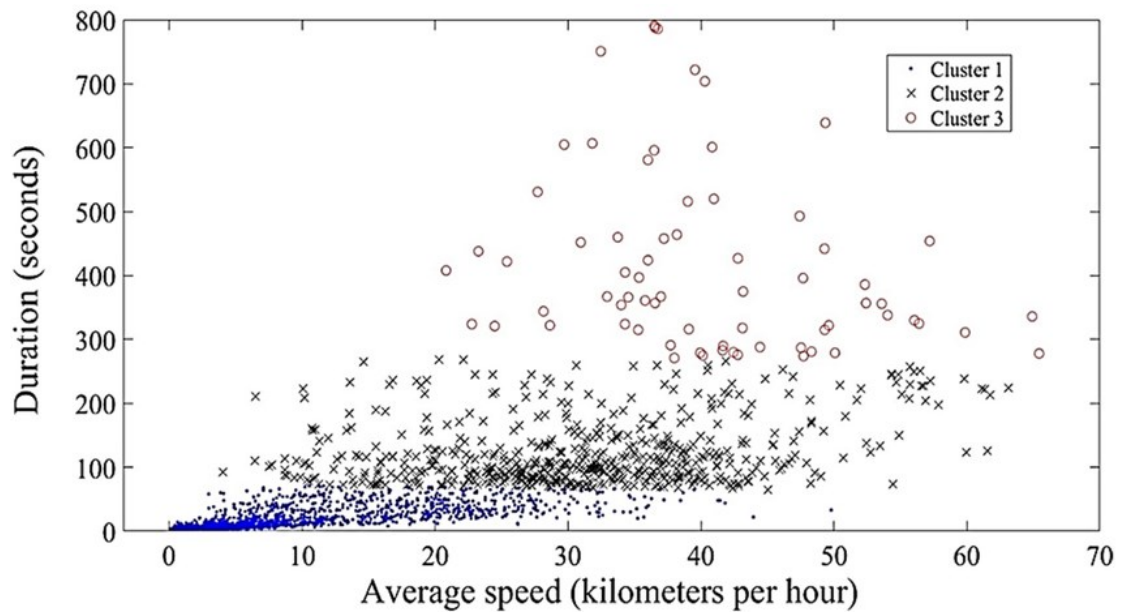
Από κάθε ομάδα επιλέγεται ένα ή περισσότερα segments που βρίσκονται κοντά στο κέντρο (centroid). Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη δημιουργία ενός οδήγησης που να αναπαριστά το “μέσο” προφίλ ταχύτητας του cluster. Σε πιο περίπλοκες προσεγγίσεις, ο ερευνητής μπορεί να χρησιμοποιήσει weighted sampling ώστε η αναλογία των segments να αντικατοπτρίζει την πραγματική συχνότητα εμφάνισής τους στο dataset.

##### **5. Σύνθεση του τελικού κύκλου οδήγησης**

Αφού επιλεγούν τα segments, αυτά συνδυάζονται σε ένα ενιαίο προφίλ ταχύτητας-χρόνου. Το αποτέλεσμα είναι ένας κύκλος που περιέχει τις βασικές μορφές οδήγησης που παρατηρούνται στη πραγματικότητα, σε αναλογίες ανάλογες με την συχνότητά τους.<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> ‘Driving cycle construction using clustering techniques’.



Γράφημα 7: Ομαδοποίηση χαρακτηριστικών οδήγησης με μεθόδους clustering.

#### 2.4.4.3. Πλεονεκτήματα της προσέγγισης clustering

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την ανάλυση μεγάλων, πολύπλοκων datasets χωρίς να απαιτείται απλή γραμμική διάσπαση σε segments όπως στους microtrips. Η πολυδιάστατη φύση των χαρακτηριστικών επιτρέπει τον εντοπισμό μοτίβων που δεν είναι ορατά με απλή ανάλυση χρόνου-ταχύτητας.

Η μέθοδος παρέχει επίσης υψηλό βαθμό ελέγχου: ο ερευνητής μπορεί να καθορίσει αν επιθυμεί να δώσει έμφαση στην επιταχυντικότητα, στην ενεργειακή κατανάλωση, στη μεταβατική συμπεριφορά ή στη μέση ταχύτητα. Έτσι μπορούν να παραχθούν κύκλοι οδήγησης προσαρμοσμένοι σε συγκεκριμένους στόχους, όπως οι μελέτες για ηλεκτρικά οχήματα όπου η κατανάλωση εξαρτάται ιδιαίτερα από τη δυναμικότητα του προφίλ.

Σε περιπτώσεις τοπικών κύκλων οδήγησης, το clustering επιτρέπει τη δημιουργία κύκλων που αποτυπώνουν πλήρως τις ιδιαιτερότητες μιας συγκεκριμένης περιοχής, όπως μεγάλες διακυμάνσεις κλίσης, εποχικές μεταβολές ή μοναδικά μοτίβα συμφόρησης- στοιχεία που συναντώνται έντονα σε περιοχές όπως η Θάσος.

#### 2.4.4.4. Περιορισμοί και τεχνικές προκλήσεις

Παρά τα πλεονεκτήματα, η μέθοδος παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες. Η επιλογή χαρακτηριστικών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα: εάν οι μεταβλητές δεν καλύπτουν επαρκώς τη δυναμική της οδήγησης, τα clusters ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύουν πραγματικά μοτίβα. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος υπερπροσαρμογής (“overfitting”), όπου το clustering αναπαριστά υπερβολικά ειδικά πρότυπα ενός περιορισμένου συνόλου δεδομένων.

Επιπλέον, οι περισσότεροι αλγόριθμοι clustering δεν λαμβάνουν υπόψη τους τους χρονικούς συσχετισμούς μεταξύ των segments, με αποτέλεσμα η τελική σύνθεση του κύκλου οδήγησης να απαιτεί προσεκτική τοποθέτηση των επιλεγμένων τμημάτων ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή μετάβαση.

#### **2.4.4.5. Εφαρμογές στην διεθνή βιβλιογραφία**

Σύγχρονες μελέτες σε Ευρώπη, Ασία και Αμερική έχουν χρησιμοποιήσει clustering για την ανάπτυξη κύκλων υψηλής αντιπροσωπευτικότητας, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου η οδήγηση παρουσιάζει υψηλή ποικιλία. Οι CNG-H2 ειδικές μελέτες, οι αναλύσεις για ηλεκτρικά οχήματα και οι προσομοιώσεις σε HEVs βασίζονται συχνά σε clustering μεθοδολογίες, λόγω της δυνατότητας τους να αποτυπώνουν τόσο τη μεταβατική όσο και τη σταθερή συμπεριφορά.

Η μέθοδος αποτελεί επίσης θεμέλιο για πιο σύνθετες τεχνικές που θα παρουσιαστούν στο επόμενο υποκεφάλαιο, όπου συνδυάζεται με machine learning για την αναγνώριση πολύπλοκων μοτίβων μέσα στα δεδομένα.

#### **2.4.5. Μέθοδοι Μηχανικής Μάθησης στη δημιουργία κύκλων οδήγησης – Θεωρία, εφαρμογές και προοπτικές**

Η εξέλιξη των μεθόδων δημιουργίας κύκλων οδήγησης έχει οδηγήσει, τα τελευταία χρόνια, στη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML), οι οποίες επιτρέπουν την αναγνώριση και μοντελοποίηση πολύπλοκων οδηγικών μοτίβων που συχνά δεν είναι δυνατόν να αποτυπωθούν με κλασικές στατιστικές μεθόδους, όπως microtrips ή αλυσίδες Markov. Η χρήση ML προσεγγίσεων έχει αυξηθεί σημαντικά καθώς τα διαθέσιμα σύνολα δεδομένων μεγαλώνουν, οι αισθητήρες καταγραφής δεδομένων πληθαίνουν, και τα οχήματα εξελίσσονται σε συστήματα συνεχούς συλλογής δεδομένων οδήγησης.<sup>41</sup>

Οι ML μέθοδοι επιτρέπουν τη διερεύνηση μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ μεταβλητών όπως η ταχύτητα, η επιτάχυνση, το φορτίο κινητήρα και η ενεργειακή απαίτηση, χωρίς την ανάγκη αυστηρών εκ των προτέρων υποθέσεων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθοδολογίες, οι οποίες στηρίζονται σε συγκεκριμένη μαθηματική διατύπωση, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης «εκπαιδεύονται» απευθείας πάνω στα δεδομένα και προσαρμόζονται στη δομή τους, επιτρέποντας την αναπαράσταση σύνθετων και ετερογενών συμπεριφορών.

#### **2.4.5.1. Βασικές κατηγορίες ML τεχνικών στην δημιουργία κύκλων οδήγησης**

##### **1. Supervised learning για πρόβλεψη οδηγικής συμπεριφοράς**

Οι εποπτευόμενες μέθοδοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται κυρίως για την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του οχήματος, όπως της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης, με βάση την τρέχουσα κατάσταση και το πρόσφατο ιστορικό οδήγησης. Τέτοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν αλγόριθμους όπως Random Forests, Gradient Boosting Machines και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στη σύνθεση συνθετικών κύκλων οδήγησης.

Η παραγόμενη χρονοσειρά προκύπτει από επαναληπτική πρόβλεψη της επόμενης χρονικής στιγμής, με αποτέλεσμα έναν κύκλο που ενσωματώνει τις βασικές στατιστικές ιδιότητες του αρχικού dataset, χωρίς να αντιγράφει συγκεκριμένες πραγματικές διαδρομές.

##### **2. Unsupervised learning για αναγνώριση μοτίβων (pattern discovery)**

Οι μη εποπτευόμενες τεχνικές μηχανικής μάθησης στοχεύουν στην αποκάλυψη της υποκείμενης δομής των δεδομένων χωρίς τη χρήση ετικετών εξόδου. Μέθοδοι όπως οι autoencoders και τα self-organizing maps (SOMs) έχουν χρησιμοποιηθεί

---

<sup>41</sup> ‘Evaluation of driving cycle representativeness’.

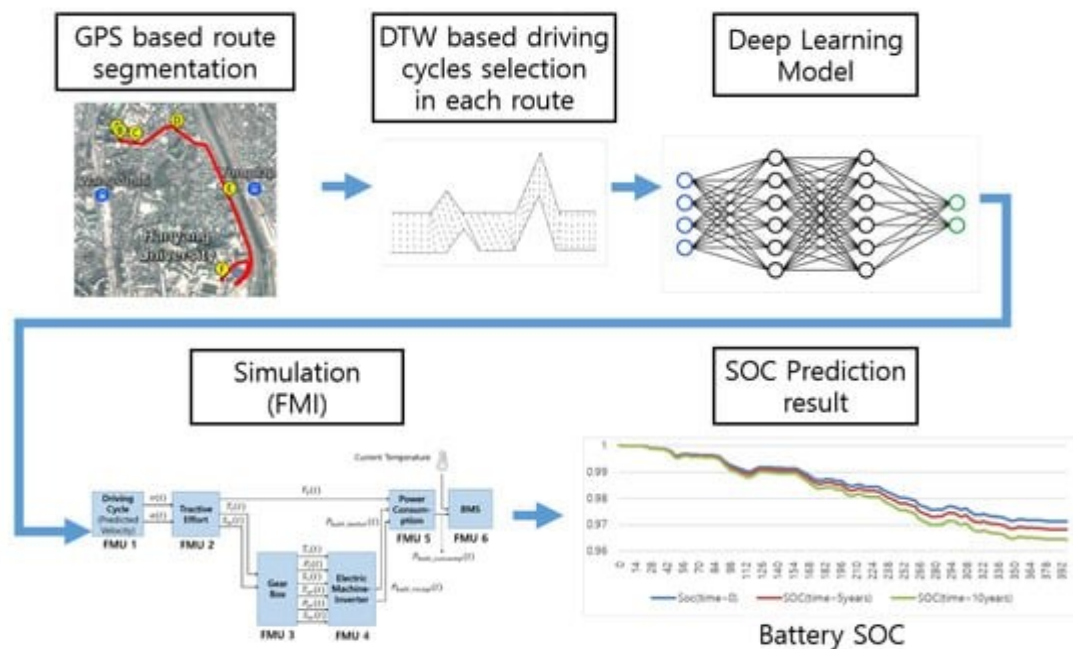
για τη μείωση διαστάσεων και την εξαγωγή λανθανόντων χαρακτηριστικών που περιγράφουν τη δυναμική της οδήγησης.

Η κωδικοποίηση των δεδομένων σε έναν χαμηλότερης διάστασης χώρο επιτρέπει την ανακατασκευή ενός κύκλου οδήγησης που διατηρεί τα βασικά πρότυπα ταχύτητας και επιτάχυνσης. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με clustering, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη αναπαράσταση της πολυμορφίας της οδηγικής συμπεριφοράς.

### 3. Generative models και συνθετική παραγωγή κύκλων

Οι πλέον πρόσφατες και ερευνητικά ενεργές προσεγγίσεις βασίζονται σε γενετικά μοντέλα, όπως τα Variational Autoencoders (VAEs) και τα Generative Adversarial Networks (GANs). Τα μοντέλα αυτά έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν πλήρως νέες χρονοσειρές ταχύτητας-χρόνου, οι οποίες ακολουθούν τις στατιστικές κατανομές των πραγματικών δεδομένων, χωρίς να αποτελούν απλή ανασύνθεση υπαρχόντων τμημάτων.

Ιδιαίτερα τα GANs έχουν δείξει αυξημένη ικανότητα στην αναπαραγωγή μεταβατικών φάσεων και στη διατήρηση της δυναμικότητας της οδήγησης καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλός βαθμός ρεαλισμού, όπως μελέτες ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών.<sup>42</sup>



Γράφημα 8: Εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης στη δημιουργία κύκλων οδήγησης.

#### 2.4.5.2. Πλεονεκτήματα των ML-based προσεγγίσεων

Το βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων μηχανικής μάθησης είναι η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων και ετερογενών συνόλων δεδομένων, καθώς και η ικανότητα τους να συλλαμβάνουν πολύπλοκες, μη γραμμικές συσχετίσεις. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία κύκλων οδήγησης υψηλής αντιπροσωπευτικότητας, ακόμη και σε

<sup>42</sup> 'Evaluation of driving cycle representativeness'.

περιβάλλοντα με έντονη μεταβλητότητα κυκλοφορίας ή διαφοροποιημένες οδηγικές συμπεριφορές.

Επιπλέον, οι ML μέθοδοι προσφέρουν ευελιξία στη δημιουργία κύκλων προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η ανάλυση ηλεκτρικών οχημάτων, η αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας σε υβριδικά συστήματα ή η εκτίμηση της φθοράς συσσωρευτών. Η δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών εκδοχών κύκλων από το ίδιο σύνολο δεδομένων καθιστά τις τεχνικές αυτές ιδιαίτερα χρήσιμες σε αναλύσεις ευαισθησίας.

#### **2.4.5.3. Περιορισμοί και επιστημονικές προκλήσεις**

Παρά τις δυνατότητές τους, οι προσεγγίσεις μέσω ML παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις. Η ποιότητα του τελικού κύκλου εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων εκπαίδευσης. Σε περιπτώσεις περιορισμένων datasets, τα μοντέλα ενδέχεται να οδηγηθούν σε υπερπροσαρμογή ή να παράγουν μη ρεαλιστικά προφίλ ταχύτητας.

Επιπλέον, πολλά μοντέλα μηχανικής μάθησης λειτουργούν ως “μαύρα κουτιά”, καθιστώντας δύσκολη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τον φυσικό έλεγχο των παραγόμενων προφίλ. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία τονίζει την ανάγκη επιβολής φυσικών περιορισμών (όρια επιτάχυνσης, επιβράδυνσης και ισχύος) κατά τη διαδικασία παραγωγής κύκλων οδήγησης.

#### **2.4.5.4. Εφαρμογές και μελλοντικές κατευθύνσεις**

Σύγχρονες μελέτες στην Ευρώπη, την Ασία και τη Βόρεια Αμερική καταδεικνύουν ότι οι ML-based μέθοδοι, μπορούν να επιτύχουν υψηλό βαθμό αντιπροσωπευτικότητας, ιδίως σε εφαρμογές που αφορούν ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Ο συνδυασμός τεχνικών clustering με νευρωνικά δίκτυα ή γενετικά μοντέλα θεωρείται μια από τις πλέον υποσχόμενες κατευθύνσεις για την ανάπτυξη μελλοντικών κύκλων οδήγησης.

Η εξέλιξη προς προσαρμοστικούς και δυναμικούς κύκλους οδήγησης, οι οποίοι μεταβάλλονται ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες ή την εποχικότητα, αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας και συνδέεται άμεσα με την χρήση προηγμένων τεχνικών μηχανικής μάθησης.<sup>43</sup>

### **3. Πειραματική διαδικασία και συλλογή δεδομένων**

#### **3.1. Περιγραφή οχήματος και τεχνικά χαρακτηριστικά**

Για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε επιβατικό όχημα Peugeot 307, έτους κυκλοφορίας 2007, εξοπλισμένο με πετρελαιοκινητήρα κυβισμού 1560 cm<sup>3</sup> και ονομαστικής ισχύος 109 hp. Το όχημα διαθέτει χειροκίνητο κιβώτιο ταχυτήτων πέντε σχέσεων και πληροί τις προδιαγραφές εκπομπών Euro 4, σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο που ίσχυε κατά την περίοδο έγκρισής του.<sup>44</sup>

Η επιλογή ενός οχήματος αυτής της γενιάς είναι λειτουργική για μελέτες πραγματικής οδήγησης, επειδή αφενός αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα επιβατικού στόλου που συναντάται ακόμη στην Ελλάδα, αφετέρου συνδυάζει τεχνολογία κινητήρα και ελέγχου που επιτρέπει αξιόπιστη καταγραφή λειτουργικών παραμέτρων μέσω της

<sup>43</sup> ‘Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions’.

<sup>44</sup> Peugeot, ‘Peugeot 307 Technical Specifications (2007 Diesel Models)’.

τυποποιημένης διαγνωστικής διεπαφής (OBD). Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, το όχημα χρησιμοποιείται ως φορέας συλλογής πραγματικών δεδομένων μετακίνησης στο νησί της Θάσου, άρα τα τεχνικά του χαρακτηριστικά τεκμηριώνουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο παράγεται ο τοπικός κύκλος οδήγησης και υποστηρίζουν τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μελέτες πραγματικής οδήγησης.

Η αναφορά στα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά (καύσιμο, κυβισμός, ισχύς, μετάδοση και επίπεδο Euro) είναι απαραίτητη, διότι επηρεάζουν έμμεσα την οδηγική συμπεριφορά (π.χ. επιλογές σχέσης μετάδοσης, απόκριση σε επιταχύνσεις, λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες) και, κατ' επέκταση, τη μορφή της χρονοσειράς ταχύτητας-χρόνου που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του κύκλου. Για τον λόγο αυτό, η τεκμηρίωση του οχήματος αποτελεί το πρώτο και αναγκαίο βήμα πριν από την περιγραφή του εξοπλισμού μέτρησης και των συνθηκών καταγραφής.



*Εικόνα 4: Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων.*

### **3.2. Εξοπλισμός μέτρησης και διαδικασία συλλογής δεδομένων**

Η συλλογή των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω της τυποποιημένης διαγνωστικής διεπαφής OBD-II (On-Board Diagnostics), η οποία παρέχει πρόσβαση σε βασικές παραμέτρους λειτουργίας του οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Το πρότυπο OBD-II έχει καθιερωθεί διεθνώς ως βασικό εργαλείο παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα και των συστημάτων ελέγχου εκπομπών, επιτρέποντας την ανάκτηση δεδομένων που είναι κρίσιμα για μελέτες πραγματικής οδήγησης και ανάπτυξη κύκλων οδήγησης.<sup>45</sup>

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε διαγνωστική συσκευή Konhwei KW903 OBD-II, η οποία συνδέθηκε απευθείας στη θύρα OBD του οχήματος και επικοινωνούσε ασύρματα μέσω Bluetooth με κινητή συσκευή. Η επιλογή της συγκεκριμένης συσκευής βασίστηκε στην συμβατότητα της με το πρότυπο OBD-II, στην επαρκή σταθερότητα

---

<sup>45</sup> SAE International, *OBD-II Scan Tool Requirements and Specifications (SAE J1979)*.

επικοινωνίας κατά τη διάρκεια της οδήγησης και στη δυνατότητα συνεχούς καταγραφής δεδομένων χωρίς παρεμβολές στη λειτουργία του οχήματος.

Η καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής Torque Pro, η οποία επιτρέπει την ανάγνωση και καταγραφή παραμέτρων OBD σε μορφή χρονοσειρών και την εξαγωγή τους σε αρχεία CSV. Η χρήση εφαρμογής καταγραφής σε κινητή συσκευή επιλέχθηκε ως πρακτική και ευρέως διαδεδομένη λύση για real-world μετρήσεις, ιδίως σε μελέτες πεδίου όπου δεν απαιτείται εργαστηριακός εξοπλισμός υψηλής πολυπλοκότητας. Η μορφή CSV επιτρέπει την άμεση επεξεργασία των δεδομένων σε περιβάλλον υπολογιστικών φύλλων ή λογισμικό ανάλυσης δεδομένων, χωρίς ανάγκη μετατροπών που θα μπορούσαν να εισαγάγουν σφάλματα.<sup>46</sup>

Η συχνότητα δειγματοληψίας της καταγραφής ήταν περίπου 1 Hz, τιμή που θεωρείται επαρκής για την αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης της ταχύτητας και των βασικών μεταβατικών φάσεων της οδήγησης, όπως επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις και στάσεις. Στη διεθνή βιβλιογραφία, συχνότητες της τάξης του 1 Hz χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες ανάπτυξης κύκλων και αξιολόγησης πραγματικής οδήγησης, καθώς προσφέρουν ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ χρονικής ανάλυσης και όγκου δεδομένων.

Οι βασικές παράμετροι που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία περιλαμβάνουν την ταχύτητα του οχήματος και τον χρονικό προσδιορισμό (timestamp) κάθε μέτρησης, οι οποίες αποτελούν τον πυρήνα της ανάλυσης για τη δημιουργία κύκλων οδήγησης. Παράλληλα, καταγράφηκαν και επιπλέον λειτουργικές μεταβλητές του κινητήρα μέσω OBD, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά για τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων και την ανίχνευση μη ρεαλιστικών τιμών ή ασυνεχειών. Μεταβλητές που δεν κρίθηκαν απαραίτητες για τη σύνθεση των κύκλων οδήγησης δεν ενσωματώθηκαν στην κύρια ανάλυση, ώστε να διατηρηθεί η μεθοδολογική σαφήνεια και η εστίαση στα κρίσιμα οδηγικά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία συλλογής των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χωρίς παρεμβάσεις στην φυσική ροή της οδήγησης, με στόχο την αποτύπωση ρεαλιστικών συνθηκών μετακίνησης. Ο οδηγικός τρόπος διατηρήθηκε φυσικός και σύμφωνος με τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες, χωρίς προσπάθεια προσαρμογής της οδήγησης σε συγκεκριμένο πρότυπο, στοιχείο που ενισχύει την αντιπροσωπευτικότητα των καταγεγραμμένων δεδομένων.<sup>47</sup>

---

<sup>46</sup> Ian Hawkins, 'Torque Pro (OBD 2 & Car) User Guide'.

<sup>47</sup> Elm Electronics, *ELM327 OBD-II Adapter Datasheet and User Manual*.



Εικόνα 5: Συσκευή OBD-II που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δεδομένων

### 3.3. Περιγραφή διαδρομής και συνθήκες οδήγησης

Η πειραματική διαδρομή της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε με γνώμονα την αντιπροσωπευτικότητα των καθημερινών μετακινήσεων στο νησί της Θάσου, ιδιαίτερα κατά την τουριστική περίοδο αιχμής. Η βασική χάραξη της διαδρομής εκτείνεται από το κεντρικό λιμάνι και την πρωτεύουσα του νησιού έως την παραλία της Χρυσής Αμμουδιάς, έναν από τους πλέον δημοφιλείς και πολυσύχναστους τουριστικούς προορισμούς. Η συγκεκριμένη διαδρομή συνδυάζει διαφορετικά είδη οδικού περιβάλλοντος και, ως εκ τούτου, παρουσιάζει έντονη μεταβολή στα χαρακτηριστικά της οδήγησης.

Το αρχικό τμήμα της διαδρομής περιλαμβάνει σύντομη κίνηση εντός του κέντρου της κωμόπολης, όπου επικρατούν συνθήκες αστικής οδήγησης με χαμηλές ταχύτητες, συχνές στάσεις και αυξημένη κυκλοφοριακή αλληλεπίδραση. Η παρουσία μεγάλου αριθμού οχημάτων, πεζών και τουριστικών δραστηριοτήτων οδηγεί σε έντονη μεταβατικότητα, με συνεχείς επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Το τμήμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μελέτη πραγματικής οδήγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα τη μορφή της χρονοσειράς ταχύτητας-χρόνου και τη συχνότητα των στάσεων, στοιχεία που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση ενός αντιπροσωπευτικού κύκλου οδήγησης.

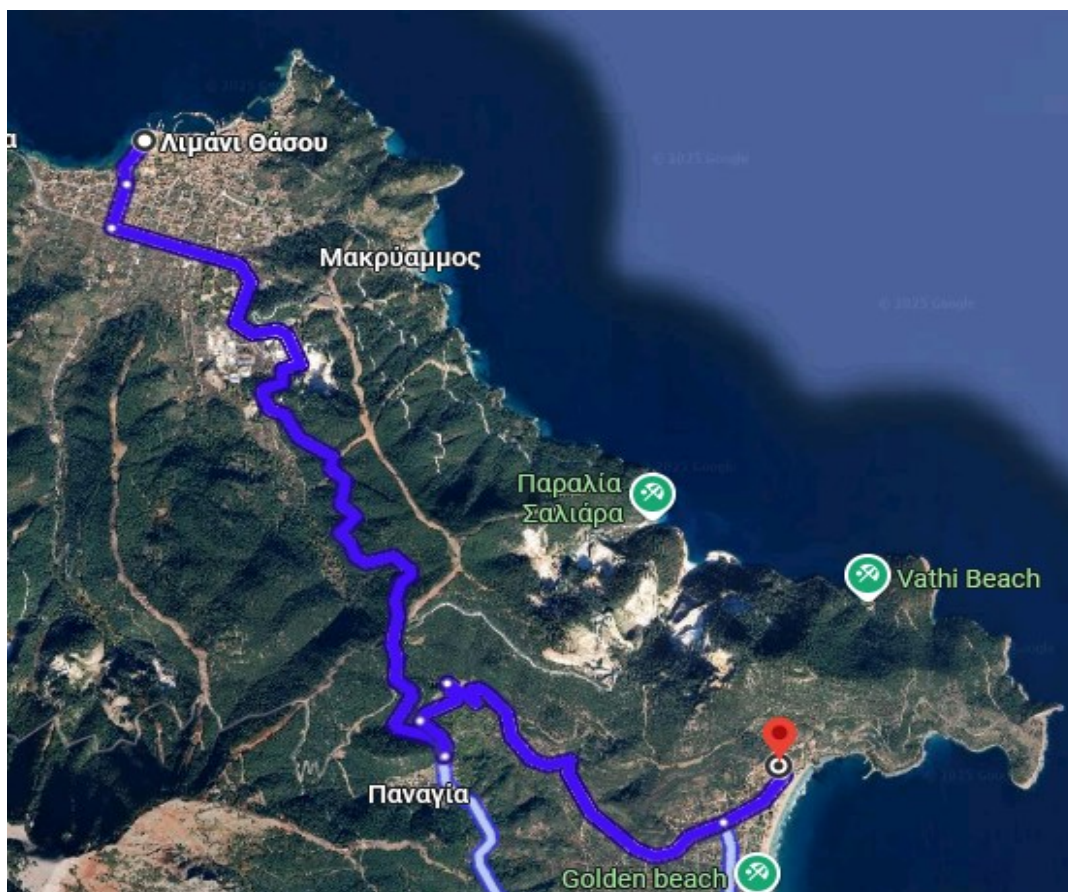
Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκαν ορισμένες διαφοροποιήσεις στη χάραξη του αστικού τμήματος της διαδρομής. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται σε προσωρινές κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, όπως κλείσιμο δρόμων και εκτροπές της κυκλοφορίας από την τροχαία, λόγω αυξημένου φόρτου κατά την τουριστική περίοδο. Οι αποκλίσεις αυτές δεν θεωρήθηκαν σφάλμα της πειραματικής διαδικασίας, αλλά ενσωματώθηκαν στην ανάλυση ως στοιχείο που αντανάκλα τη ρεαλιστική μεταβλητότητα της οδήγησης σε περιόδους αιχμής. Η ενσωμάτωση τέτοιων διαφοροποιήσεων είναι σύμφωνη με τη φιλοσοφία των real-world driving μελετών, όπου στόχος δεν είναι η αυστηρή επαναληψιμότητα της διαδρομής, αλλά η αποτύπωση της πραγματικής κυκλοφοριακής συμπεριφοράς.

Το κύριο τμήμα της διαδρομής πραγματοποιείται μέσω του περιφερειακού δρόμου του νησιού, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερα διαστήματα σταθερής κίνησης και σαφώς μειωμένη συχνότητα έως εξάλειψη στάσεων έως τον τελικό προορισμό. Το οδικό αυτό περιβάλλον προσεγγίζει συνθήκες επαρχιακής οδήγησης και διαφοροποιείται σημαντικά από το αστικό τμήμα, τόσο ως προς την δυναμικότητα της οδήγησης όσο και ως προς την κατανομή ταχυτήτων. Ο συνδυασμός

των δύο αυτών τμημάτων καθιστά τη διαδρομή μικτή, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης με αυξημένο βαθμό αντιπροσωπευτικότητας για το σύνολο των μετακινήσεων στο νησί.

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 10 έως 25 Αυγούστου, περίοδο που συμπίπτει με τη μέγιστη τουριστική δραστηριότητα στην Θάσο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σχεδόν σε καθημερινή βάση, γεγονός που εξασφαλίζει επαρκή κάλυψη διαφορετικών ημερών και κυκλοφοριακών συνθηκών. Τις περισσότερες ημέρες πραγματοποιήθηκαν δύο διακριτές καταγραφές. Η πρώτη περίπου στις 12:00 μ.μ., χρονική ζώνη που αντιστοιχεί στη άφιξη μεγάλου αριθμού επισκεπτών στο νησί και χαρακτηρίζεται από αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Η δεύτερη πραγματοποιήθηκε περίπου στις 10:00 μ.μ., χρονική περίοδος κατά την οποία παρατηρείται επιστροφή των επισκεπτών προς την πρωτεύουσα του νησιού, με αισθητά μειωμένο κυκλοφοριακό φόρτο.

Η επιλογή δύο διαφορετικών χρονικών ζωνών επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφοριακής έντασης στα χαρακτηριστικά της οδήγησης και στη μορφή του παραγόμενου κύκλου. Η σύγκριση μεταξύ συνθηκών αυξημένης και μειωμένης κίνησης αποτελεί βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας, καθώς αναδεικνύει τη μεταβολή της οδηγικής συμπεριφοράς λόγω εποχικότητας και κυκλοφοριακής πίεσης, φαινόμενα που έχουν αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα σημαντικά στη διεθνή βιβλιογραφία real-world driving.



Εικόνα 6: Διαδρομή συλλογής δεδομένων.

### 3.4. Προεπεξεργασία και καθαρισμός ακατέργαστων δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω της διαγνωστικής διεπαφής OBD και της εφαρμογής καταγραφής αποτελούν ακατέργαστες χρονοσειρές, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο έγκυρες πληροφορίες οδήγησης όσο και τιμές που δεν είναι κατάλληλες για άμεση ανάλυση. Για τον λόγο αυτό, πριν από την δημιουργία των κύκλων οδήγησης, εφαρμόστηκε διαδικασία προεπεξεργασίας και καθαρισμού των δεδομένων, με στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας, της συνέπειας και της συγκρισιμότητας των χρονοσειρών.

Η προεπεξεργασία αποτελεί κρίσιμο στάδιο σε μελέτες πραγματικής οδήγησης, καθώς τα δεδομένα πεδίου επηρεάζονται συχνά από θόρυβο μέτρησης, απώλειες επικοινωνίας, ασυνεχή χρονικά βήματα και καταστάσεις ακινησίας που δεν σχετίζονται άμεσα με τη δυναμική της οδήγησης. Η εφαρμογή συστηματικών κριτηρίων καθαρισμού είναι απαραίτητη ώστε ο τελικό κύκλος να αντικατοπτρίζει ρεαλιστική οδηγική συμπεριφορά και όχι τεχνικές ιδιαιτερότητες της διαδικασίας καταγραφής.

Αρχικά τα αρχεία CSV εισήχθησαν σε περιβάλλον υπολογιστικών φύλλων, όπου πραγματοποιήθηκε έλεγχος της δομής των δεδομένων και της ορθότητας των τύπων μεταβλητών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη στήλη της ταχύτητας του οχήματος, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είχε αποθηκευτεί ως κείμενο και μετατράπηκε και αριθμητική μορφή ώστε να καταστεί δυνατή η ποσοτική ανάλυση. Παράλληλα, ελέγχθηκε η χρονική ακολουθία των μετρήσεων, ώστε να διασφαλιστεί η ομοιομορφία της δειγματοληψίας και η απουσία μη ρεαλιστικών χρονικών ασυνεχειών.

Στη συνέχεια, απομακρύνθηκαν τιμές που δεν αντιστοιχούν σε φυσική οδήγηση, όπως αρνητικές τιμές ταχύτητας ή μεμονωμένες ακραίες τιμές που προέκυψαν από σφάλματα επικοινωνίας της διαγνωστικής συσκευής. Η διαδικασία αυτή δεν επηρέασε τη συνολική μορφή των χρονοσειρών, αλλά συνέβαλε στη σταθεροποίηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των δεδομένων.

|    | A                        | B           | C           | D           | E                 | F                 | G               | H              | I                              | J                           | K     | L     | M                             | N                 | O   |
|----|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------------------|-----|
| 1  | Device Time              | Longitude   | Latitude    | Altitude    | Speed (OBD)(km/h) | Speed (GPS)(km/h) | Engine RPM(rpm) | Engine Load(%) | Engine Coolant Temperature(°C) | Fuel flow rate(hour[gal/hr] | G[s]  | G[s]  | Acceleration Sensor(Total)[g] | Trip Distance(km) |     |
| 2  | 10-Aug-2025 12:26:35.557 | 24.70254272 | 40.77930121 | 43.59921387 | 0.0               |                   | 811.5           | 42.75          | 82                             | 0.4                         | 2     | 8.93  | 0.66                          | -0.05             | 2.4 |
| 3  | 10-Aug-2025 12:26:36.569 | 24.70254307 | 40.77930141 | 43.69451904 | 0.0               |                   | 814.5           | 43.92          | 82                             | 0.4                         | 1.29  | 9.45  | 0.72                          | -0.02             | 2.4 |
| 4  | 10-Aug-2025 12:26:37.715 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 978.25          | 44.31          | 82                             | 0.4                         | 0.78  | 9.92  | -1.15                         | 0                 | 2.4 |
| 5  | 10-Aug-2025 12:26:38.713 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 803.5           | 45.49          | 82                             | 0.46                        | 1.28  | 9.43  | 0.27                          | -0.01             | 2.4 |
| 6  | 10-Aug-2025 12:26:39.599 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 817.5           | 43.92          | 82                             | 0.41                        | 1.5   | 9.43  | 0.53                          | 0                 | 2.4 |
| 7  | 10-Aug-2025 12:26:40.679 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 816.5           | 46.67          | 82                             | 0.41                        | 1.55  | 9.43  | 0.72                          | -0.02             | 2.4 |
| 8  | 10-Aug-2025 12:26:41.805 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 807.5           | 45.1           | 82                             | 0.42                        | 1.47  | 9.42  | 0.73                          | -0.02             | 2.4 |
| 9  | 10-Aug-2025 12:26:42.940 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 818.5           | 44.71          | 82                             | 0.41                        | 1.49  | 9.35  | 0.56                          | -0.02             | 2.4 |
| 10 | 10-Aug-2025 12:26:43.888 | 24.70254311 | 40.77930136 | 43.69342041 | 0.0               |                   | 857.25          | 41.18          | 82                             | 0.41                        | 1.57  | 9.18  | 0.86                          | -0.04             | 2.4 |
| 11 | 10-Aug-2025 12:26:44.878 | 24.70253823 | 40.77930543 | 44.01843262 | 0 1.84            |                   | 962.25          | 41.57          | 82                             | 0.47                        | 1.46  | 9.34  | 1.22                          | 0                 | 2.4 |
| 12 | 10-Aug-2025 12:26:46.042 | 24.70253227 | 40.77931027 | 44.01385498 | 3 3.24            |                   | 1096.25         | 60.39          | 82                             | 0.57                        | 0.84  | 9.63  | -0.69                         | 0.01              | 2.4 |
| 13 | 10-Aug-2025 12:26:46.996 | 24.70251475 | 40.7793189  | 44.04595947 | 9 7.81            |                   | 935.5           | 71.76          | 82                             | 0.74                        | -0.5  | 9.31  | 0.55                          | 0.01              | 2.4 |
| 14 | 10-Aug-2025 12:26:47.917 | 24.70247898 | 40.77932357 | 44.0690918  | 12 11.81          |                   | 1261            | 54.51          | 82                             | 0.89                        | -0.08 | 9.91  | 1.61                          | 0.03              | 2.4 |
| 15 | 10-Aug-2025 12:26:48.975 | 24.70243683 | 40.77931503 | 44.12640381 | 14 13.9           |                   | 1557.75         | 47.45          | 82                             | 0.93                        | -0.66 | 9.53  | 0.9                           | -0.03             | 2.4 |
| 16 | 10-Aug-2025 12:26:50.003 | 24.70239342 | 40.77929223 | 44.0447998  | 17 16.78          |                   | 1842.5          | 38.04          | 82                             | 1.06                        | 1.3   | 9.48  | 0.11                          | -0.02             | 2.4 |
| 17 | 10-Aug-2025 12:26:51.101 | 24.70234987 | 40.77926036 | 43.99755859 | 20 19.19          |                   | 2154            | 41.57          | 83                             | 1.14                        | 1.44  | 9.09  | 0.24                          | -0.02             | 2.4 |
| 18 | 10-Aug-2025 12:26:52.071 | 24.70230184 | 40.77922318 | 44.13824463 | 21 21.49          |                   | 2359.25         | 38.04          | 83                             | 1.27                        | 1.15  | 9.04  | 1.05                          | -0.06             | 2.4 |
| 19 | 10-Aug-2025 12:26:52.985 | 24.70225045 | 40.77918353 | 44.12939453 | 23 23.04          |                   | 2541            | 35.29          | 83                             | 1.51                        | 0.93  | 9.83  | 0.17                          | 0                 | 2.4 |
| 20 | 10-Aug-2025 12:26:54.189 | 24.702196   | 40.77914186 | 44.1071167  | 24 23.87          |                   | 1835.5          | 9.41           | 83                             | 1.49                        | 1.64  | 10.01 | 0.05                          | 0.03              | 2.4 |
| 21 | 10-Aug-2025 12:26:55.243 | 24.70214151 | 40.77910035 | 44.06384277 | 22 22.93          |                   | 1183.5          | 14.12          | 83                             | 0.43                        | 1.11  | 9.67  | 0.84                          | -0.01             | 2.4 |
| 22 | 10-Aug-2025 12:26:56.348 | 24.70209011 | 40.77906229 | 44.05126953 | 21 21.42          |                   | 1254            | 16.86          | 83                             | 0.56                        | 1.1   | 9.75  | 0.39                          | 0                 | 2.4 |
| 23 | 10-Aug-2025 12:26:57.406 | 24.70204044 | 40.77902646 | 44.00408936 | 20 20.45          |                   | 1203.5          | 19.22          | 83                             | 0.54                        | 1.99  | 9     | 0.92                          | -0.07             | 2.4 |
| 24 | 10-Aug-2025 12:26:58.583 | 24.70199237 | 40.77899288 | 44.01019287 | 19 19.76          |                   | 1107.25         | 23.53          | 83                             | 0.52                        | 0.89  | 9.37  | 1.55                          | -0.03             | 2.4 |
| 25 | 10-Aug-2025 12:26:59.548 | 24.70194718 | 40.77896077 | 43.98280498 | 18 18.54          |                   | 863             | 42.35          | 83                             | 0.39                        | 1.14  | 9.69  | 2.38                          | 0.01              | 2.4 |
| 26 | 10-Aug-2025 12:27:00.465 | 24.7019076  | 40.77893145 | 43.98291016 | 14 15.91          |                   | 816.5           | 48.24          | 83                             | 0.41                        | 0.54  | 9.7   | 1.34                          | 0                 | 2.4 |
| 27 | 10-Aug-2025 12:27:01.671 | 24.70187905 | 40.77890555 | 44.22247314 | 12 12.42          |                   | 998             | 58.43          | 84                             | 0.45                        | 0.28  | 9.66  | 0.02                          | -0.03             | 2.4 |
| 28 | 10-Aug-2025 12:27:02.544 | 24.70186287 | 40.77887863 | 44.10693359 | 15 12.78          |                   | 896.75          | 99.61          | 84                             | 0.62                        | -0.45 | 9.93  | 1.02                          | -0.02             | 2.4 |
| 29 | 10-Aug-2025 12:27:03.454 | 24.70185999 | 40.77883999 | 44.15690176 | 18 15.55          |                   | 1016            | 64.71          | 84                             | 1.09                        | -2.31 | 11.01 | -0.42                         | 0.21              | 2.4 |
| 30 | 10-Aug-2025 12:27:04.688 | 24.70187372 | 40.77879777 | 44.35626221 | 20 18.29          |                   | 1165.75         | 66.67          | 84                             | 0.79                        | 1.05  | 9.64  | 0.49                          | 0                 | 2.4 |
| 31 | 10-Aug-2025 12:27:05.612 | 24.70190153 | 40.77875336 | 44.2901001  | 22 21.02          |                   | 1297.75         | 49.41          | 84                             | 0.94                        | 2.65  | 10.17 | -0.78                         | 0.07              | 2.4 |
| 32 | 10-Aug-2025 12:27:06.709 | 24.70191399 | 40.77870378 | 44.34631348 | 23 22.18          |                   | 1341.25         | 29.41          | 84                             | 0.79                        | -1.29 | 12.39 | 1.18                          | -0.06             | 2.4 |
| 33 | 10-Aug-2025 12:27:07.838 | 24.7020025  | 40.77866984 | 44.27008057 | 22 22.86          |                   | 1354.25         | 34.12          | 84                             | 0.65                        | 1.62  | 8.78  | 0.04                          | 0.06              | 2.5 |
| 34 | 10-Aug-2025 12:27:08.718 | 24.7020025  | 40.77866984 | 44.27008057 | 23 22.86          |                   | 1343.25         | 8.63           | 84                             | 0.68                        | 1.67  | 10.78 | -1.51                         | -0.08             | 2.5 |
| 35 | 10-Aug-2025 12:27:09.698 | 24.70203995 | 40.77855817 | 44.33093965 | 20 22.32          |                   | 861             | 43.14          | 84                             | 0.4                         | 1.71  | 9.46  | 1                             | -0.03             | 2.5 |

Εικόνα 7: Δείγμα ακατέργαστου αρχείου CSV μετά την εισαγωγή του στο Excel.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη διαχείριση των περιόδων ακινησίας. Οι ακατέργαστες χρονοσειρές περιλαμβάνουν εκτεταμένα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το όχημα παραμένει πλήρως σταματημένο, είτε λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης είτε λόγω στάθμευσης. Αν και οι στάσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της πραγματικής

οδήγησης, η αδιάκριτη ενσωμάτωσή τους μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητή αύξηση της συνολικής διάρκειας του κύκλου και σε υποεκτίμηση της δυναμικότητας της οδήγησης. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε επιλεκτική διαχείριση των στάσεων, με στόχο τη διατήρηση της ρεαλιστικής κατανομής του χωρίς να αλλοιώνεται η ενεργειακή και κινηματική εικόνα της διαδρομής.

Στο πλαίσιο αυτό εφαρμόστηκε λογική rolling-selection (roll/keep), σύμφωνα με την οποία οι συνεχόμενες περιόδους πλήρους ακινησίας εξετάστηκαν ως προς τη διάρκειά τους και τη συνάφειά τους με την συνολική οδηγική συμπεριφορά. Στάσεις που κρίθηκαν ότι δεν προσθέτουν πληροφορία στη δυναμική του κύκλου -όπως παρατεταμένη ακινησία λόγω στάθμευσης- δεν ενσωματώθηκαν πλήρως στον τελικό κύκλο, ενώ διατηρήθηκαν οι στάσεις που συνδέονται άμεσα με την κυκλοφοριακή ροή και την αστική οδήγηση. Η επιλογή αυτή συνάδει με πρακτικές που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία ανάπτυξης κύκλων οδήγησης από πραγματικά δεδομένα, όπου η διαχείριση των στάσεων προσαρμόζεται στον στόχο της μελέτης.

Μετά τον καθαρισμό και τη διαχείριση των στάσεων, οι χρονοσειρές ελέγχθηκαν ως προς την συνοχή τους, τόσο οπτικά όσο και στατιστικά. Εξετάστηκαν βασικά μεγέθη, όπως η κατανομή ταχυτήτων, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα, καθώς και η συχνότητα επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, ώστε να διαπιστωθεί ότι τα επεξεργασμένα δεδομένα παραμένουν αντιπροσωπευτικά της αρχικής οδήγησης. Το τελικό σύνολο δεδομένων που προέκυψε από τη διαδικασία αυτή αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη και αξιολόγηση των τοπικών κύκλων οδήγησης που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

|    | A                        | B                 | C                 | D               | E                 | F         | G      | H    | I     | J       | K    |
|----|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------|--------|------|-------|---------|------|
| 1  | Device Time              | Speed (OBD)(km/h) | Speed (GPS)(km/h) | Engine RPM(rpm) | Trip Distance(km) | DT        | Time_s | dt_s | V_kmh | roll_ok | keep |
| 2  | 10-Aug-2025 12:26:35.557 | 0                 | 0                 | 811,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 0      | 0,00 | 0     | 0       | 0    |
| 3  | 10-Aug-2025 12:26:36.569 | 0                 | 0                 | 814,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 1,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 4  | 10-Aug-2025 12:26:37.715 | 0                 | 0                 | 978,25          | 2,4               | 10/8/2025 | 2,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 5  | 10-Aug-2025 12:26:38.713 | 0                 | 0                 | 803,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 3,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 6  | 10-Aug-2025 12:26:39.599 | 0                 | 0                 | 817,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 4,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 7  | 10-Aug-2025 12:26:40.679 | 0                 | 0                 | 816,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 5,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 8  | 10-Aug-2025 12:26:41.805 | 0                 | 0                 | 807,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 6,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 9  | 10-Aug-2025 12:26:42.940 | 0                 | 0                 | 818,5           | 2,4               | 10/8/2025 | 7,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 10 | 10-Aug-2025 12:26:43.888 | 0                 | 0                 | 857,25          | 2,4               | 10/8/2025 | 8,0    | 1,00 | 0     |         | 0    |
| 11 | 10-Aug-2025 12:26:44.878 | 0                 | 1,84              | 962,25          | 2,4               | 10/8/2025 | 9,0    | 1,00 | 1,84  | 0       | 0    |
| 12 | 10-Aug-2025 12:26:46.042 | 3                 | 3,24              | 1096,25         | 2,4               | 10/8/2025 | 11,0   | 2,00 | 3,24  | 0       | 0    |
| 13 | 10-Aug-2025 12:26:46.996 | 9                 | 7,81              | 935,5           | 2,41              | 10/8/2025 | 11,0   | 0,00 | 7,81  | 0       | 0    |
| 14 | 10-Aug-2025 12:26:47.917 | 12                | 11,81             | 1261            | 2,41              | 10/8/2025 | 12,0   | 1,00 | 11,81 | 0       | 0    |
| 15 | 10-Aug-2025 12:26:48.975 | 14                | 13,90             | 1557,75         | 2,41              | 10/8/2025 | 13,0   | 1,00 | 13,90 | 0       | 0    |
| 16 | 10-Aug-2025 12:26:50.003 | 17                | 16,78             | 1842,5          | 2,42              | 10/8/2025 | 15,0   | 2,00 | 16,78 | 0       | 0    |
| 17 | 10-Aug-2025 12:26:51.101 | 20                | 19,19             | 2154            | 2,42              | 10/8/2025 | 16,0   | 1,00 | 19,19 | 0       | 0    |
| 18 | 10-Aug-2025 12:26:52.071 | 21                | 21,49             | 2359,25         | 2,42              | 10/8/2025 | 17,0   | 1,00 | 21,49 | 0       | 0    |
| 19 | 10-Aug-2025 12:26:52.985 | 23                | 23,04             | 2541            | 2,43              | 10/8/2025 | 17,0   | 0,00 | 23,04 | 0       | 0    |
| 20 | 10-Aug-2025 12:26:54.189 | 24                | 23,87             | 1835,5          | 2,44              | 10/8/2025 | 19,0   | 2,00 | 23,87 | 0       | 0    |
| 21 | 10-Aug-2025 12:26:55.243 | 22                | 22,93             | 1183,5          | 2,44              | 10/8/2025 | 20,0   | 1,00 | 22,93 | 0       | 0    |
| 22 | 10-Aug-2025 12:26:56.348 | 21                | 21,42             | 1254            | 2,44              | 10/8/2025 | 21,0   | 1,00 | 21,42 | 1       | 1    |
| 23 | 10-Aug-2025 12:26:57.406 | 20                | 20,45             | 1203,5          | 2,45              | 10/8/2025 | 22,0   | 1,00 | 20,45 | 1       | 1    |
| 24 | 10-Aug-2025 12:26:58.583 | 19                | 19,76             | 1107,25         | 2,45              | 10/8/2025 | 23,0   | 1,00 | 19,76 | 1       | 1    |
| 25 | 10-Aug-2025 12:26:59.548 | 18                | 18,54             | 863             | 2,46              | 10/8/2025 | 24,0   | 1,00 | 18,54 | 1       | 1    |
| 26 | 10-Aug-2025 12:27:00.465 | 14                | 15,91             | 816,5           | 2,46              | 10/8/2025 | 25,0   | 1,00 | 15,91 | 1       | 1    |
| 27 | 10-Aug-2025 12:27:01.671 | 12                | 12,42             | 998             | 2,47              | 10/8/2025 | 26,0   | 1,00 | 12,42 | 1       | 1    |
| 28 | 10-Aug-2025 12:27:02.544 | 15                | 12,78             | 898,75          | 2,47              | 10/8/2025 | 27,0   | 1,00 | 12,78 | 1       | 1    |
| 29 | 10-Aug-2025 12:27:03.454 | 18                | 15,55             | 1016            | 2,47              | 10/8/2025 | 28,0   | 1,00 | 15,55 | 1       | 1    |
| 30 | 10-Aug-2025 12:27:04.688 | 20                | 18,29             | 1165,75         | 2,48              | 10/8/2025 | 29,0   | 1,00 | 18,29 | 1       | 1    |
| 31 | 10-Aug-2025 12:27:05.612 | 22                | 21,02             | 1297,75         | 2,48              | 10/8/2025 | 30,0   | 1,00 | 21,02 | 1       | 1    |
| 32 | 10-Aug-2025 12:27:06.709 | 23                | 22,18             | 1341,25         | 2,49              | 10/8/2025 | 31,0   | 1,00 | 22,18 | 1       | 1    |
| 33 | 10-Aug-2025 12:27:07.838 | 22                | 22,86             | 1354,25         | 2,5               | 10/8/2025 | 32,0   | 1,00 | 22,86 | 1       | 1    |
| 34 | 10-Aug-2025 12:27:08.718 | 23                | 22,86             | 1343,25         | 2,5               | 10/8/2025 | 33,0   | 1,00 | 22,86 | 1       | 1    |
| 35 | 10-Aug-2025 12:27:09.698 | 20                | 22,32             | 861             | 2,51              | 10/8/2025 | 34,0   | 1,00 | 22,32 | 1       | 1    |
| 36 | 10-Aug-2025 12:27:10.806 | 18                | 18,04             | 1223,25         | 2,51              | 10/8/2025 | 35,0   | 1,00 | 18,04 | 1       | 1    |
| 37 | 10-Aug-2025 12:27:11.732 | 21                | 18,04             | 1225,25         | 2,52              | 10/8/2025 | 36,0   | 1,00 | 18,04 | 1       | 1    |
| 38 | 10-Aug-2025 12:27:12.774 | 23                | 21,35             | 1359,25         | 2,52              | 10/8/2025 | 37,0   | 1,00 | 21,35 | 1       | 1    |
| 39 | 10-Aug-2025 12:27:14.007 | 24                | 23,94             | 1428,75         | 2,53              | 10/8/2025 | 39,0   | 2,00 | 23,94 | 1       | 1    |
| 40 | 10-Aug-2025 12:27:14.997 | 24                | 24,44             | 1462,5          | 2,53              | 10/8/2025 | 39,0   | 0,00 | 24,44 | 1       | 1    |
| 41 | 10-Aug-2025 12:27:16.062 | 24                | 23,87             | 975,25          | 2,54              | 10/8/2025 | 41,0   | 2,00 | 23,87 | 1       | 1    |

Εικόνα 8: Δείγμα αρχείου μετά την επεξεργασία και την εφαρμογή της λογικής roll/keep.

### **3.5. Πηγές σφάλματος και περιορισμοί της πειραματικής διαδικασίας**

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας βασίζεται σε δεδομένα πραγματικής οδήγησης που συλλέχθηκαν σε συνθήκες πεδίου. Παρότι η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτύπωση ρεαλιστικών οδηγικών χαρακτηριστικών, συνοδεύεται αναπόφευκτα από πηγές αβεβαιότητας και περιορισμούς, οι οποίοι οφείλουν να αναγνωριστούν και να τεκμηριωθούν, ώστε να διασφαλιστεί η επιστημονική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Μια βασική πηγή αβεβαιότητας σχετίζεται με τη φύση των δεδομένων OBD-II. Οι τιμές που παρέχονται μέσω της διαγνωστικής διεπαφής προέρχονται από τους αισθητήρες και τις εσωτερικές στρατηγικές του συστήματος ελέγχου του οχήματος και δεν αποτελούν άμεσες μετρήσεις εργαστηριακού επιπέδου. Η ακρίβεια και η χρονική απόκριση ορισμένων παραμέτρων ενδέχεται να επηρεάζονται από τον τρόπο με τον οποίο ο κατασκευαστής υλοποιεί την επικοινωνία OBD, γεγονός που αποτελεί αναγνωρισμένο περιορισμό σε μελέτες πραγματικής οδήγησης.

Επιπλέον ο χρήση ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth μεταξύ της συσκευής OBD και της κινητής συσκευής εισάγει πιθανότητα απώλειας ή ασυνέχειας δεδομένων, ιδίως σε περιβάλλοντα με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή στιγμιαία αποσύνδεση. Αν και τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται σποραδικά, αντιμετωπίστηκαν μέσω της διαδικασίας καθαρισμού των δεδομένων, χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά η συνολική μορφή των χρονοσειρών.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη συχνότητα δειγματοληψίας των δεδομένων. Η καταγραφή με ρυθμό περίπου 1 Hz θεωρείται επαρκής για την ανάλυση κύκλων οδήγησης και χρησιμοποιείται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, δεν επιτρέπει την πλήρη αποτύπωση πολύ ταχέων μεταβατικών φαινομένων, όπως απότομες αλλαγές φορτίου σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Ο περιορισμός αυτός λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και δεν αναιρεί τη χρησιμότητα των δεδομένων για την σύνθεση κύκλων οδήγησης.

Η μεταβλητότητα της διαδρομής αποτελεί επίσης σημαντική πηγή αβεβαιότητας. Οι προσωρινές εκτροπές κυκλοφορίας και οι μικρές διαφοροποιήσεις στη χάραξη της αστικής διαδρομής, λόγω κυκλοφοριακών ρυθμίσεων κατά την τουριστική περίοδο, δεν επιτρέπουν απόλυτη γεωμετρική επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Ωστόσο, η μεταβλητότητα αυτή θεωρείται χαρακτηριστικό της πραγματικής οδήγησης και όχι σφάλμα της πειραματικής διαδικασίας, καθώς αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες μετακίνησης σε περιόδους αυξημένης κυκλοφορίας.

Περιορισμός προκύπτει επίσης από το γεγονός ότι τα δεδομένα συλλέχθηκαν με ένα μόνο όχημα και έναν οδηγό. Η οδηγική συμπεριφορά επηρεάζεται από ατομικούς παράγοντες, όπως το οδηγικό στυλ και η εμπειρία, οι οποίοι δεν μπορούν να γενικευθούν πλήρως στον συνολικό πληθυσμό οδηγών. Παρά τον περιορισμό αυτό, η επιλογή σταθερού οχήματος και οδηγού μειώνει τη μεταβλητότητα που δεν σχετίζεται με τις κυκλοφοριακές συνθήκες, επιτρέποντας καθαρότερη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών χρονικών ζωνών και επιπέδων φόρτου.

Τέλος η διαχείριση των περιόδων ακινησίας κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων εισάγει μεθοδολογική επιλογή, οι οποία επηρεάζει τη συνολική διάρκεια και τη δυναμικότητα του παραγόμενου κύκλου. Παρότι η επιλεκτική διατήρηση ή αφαίρεση παρατεταμένων στάσεων βασίζεται σε πρακτικές που συναντώνται στη διεθνή

βιβλιογραφία, η επιλογή αυτή επηρεάζει τα τελικά στατιστικά χαρακτηριστικά και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση με άλλους κύκλους οδήγησης.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δεν αναιρούν τη χρησιμότητα και την εγκυρότητα της πειραματικής διαδικασίας, αλλά οριοθετούν το πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα. Η ρητή αναγνώρισή τους ενισχύει τη διαφάνεια της μεθοδολογίας και επιτρέπει τη σαφέστερη αξιολόγηση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

## **4. Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα**

### **4.1. Δομή ανάλυσης και μετρικές αξιολόγησης**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων πραγματικής οδήγησης που συλλέχθηκαν στη Θάσο. Η ανάλυση βασίζεται στο τελικό σύνολο δεδομένων που προέκυψε μετά την προεπεξεργασία και τον καθαρισμό που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 και στοχεύει στην ποσοτική αποτύπωση των βασικών χαρακτηριστικών της οδήγησης, καθώς και στη διερεύνηση των διαφορών που προκύπτουν υπό διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων οργανώνεται με τρόπο που επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση από την περιγραφική στατιστική ανάλυση των δεδομένων προς τη σύνθεση και αξιολόγηση των κύκλων οδήγησης. Αρχικά εξετάζονται βασικά κινηματικά μεγέθη, όπως η ταχύτητα και η χρονική κατανομή της κίνησης, τα οποία αποτελούν τον πυρήνα κάθε κύκλου οδήγησης. Στη συνέχεια αναλύονται παράμετροι που σχετίζονται με τη δυναμική της οδήγησης, όπως οι επιταχύνσεις, οι επιβραδύνσεις και οι περίοδοι ακινησίας, ώστε να αποτυπωθεί πληρέστερα η συμπεριφορά του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες.<sup>48</sup>

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών χρονικών ζωνών καταγραφής, και συγκεκριμένα μεταξύ μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες αυξημένης κυκλοφορίας (μεσημεριανές ώρες) και μετρήσεων σε συνθήκες μειωμένου κυκλοφοριακού φόρτου (βραδινές ώρες). Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κυκλοφοριακής συμφόρησης στα χαρακτηριστικά της οδήγησης και αποτελεί βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη και αξιολόγηση τοπικών κύκλων οδήγησης.

Η επιλογή των μετρικών αξιολόγησης βασίζεται σε καθιερωμένες πρακτικές της διεθνούς βιβλιογραφίας για την ανάλυση κύκλων και δεδομένων πραγματικής οδήγησης, διασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μελέτες. Οι μετρικές αυτές περιλαμβάνουν τόσο απλά στατιστικά μεγέθη όσο και δείκτες που σχετίζονται με τη δομή και τη δυναμική της οδήγησης, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.<sup>49</sup>

### **4.2. Περιγραφική στατιστική χαρακτηριστικών οδήγησης**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφική στατιστική ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών οδήγησης που προέκυψαν από τα δεδομένα πραγματικής μετακίνησης στην Θάσο. Η ανάλυση αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο αξιολόγησης των

---

<sup>48</sup> Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*.

<sup>49</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

δεδομένων και στοχεύει στην ποσοτική αποτύπωση της γενικής εικόνας της οδήγησης, πριν από τη σύνθεση και τη σύγκριση των κύκλων οδήγησης.

Η περιγραφική στατιστική χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες κύκλων οδήγησης, καθώς επιτρέπει την κατανόηση της δομής των δεδομένων μέσω βασικών μετρικών, όπως η μέση ταχύτητα, η μέγιστη ταχύτητα, ο συνολικός χρόνος κίνησης και η κατανομή των περιόδων ακινησίας. Τα μεγέθη αυτά παρέχουν άμεση εικόνα της έντασης και της ρευστότητας της κυκλοφορίας, καθώς και της διαφοροποίησης της οδήγησης μεταξύ διαφορετικών συνθηκών.<sup>50</sup>

#### **4.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά ταχύτητας**

Η ταχύτητα του οχήματος αποτελεί τη βασική κινηματική μεταβλητή για την ανάλυση και την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης, καθώς καθορίζει άμεσα τη χρονική εξέλιξη της κίνησης και επηρεάζει τόσο τη ρευστότητα της κυκλοφορίας όσο και τη δυναμικότητα της οδήγησης<sup>51</sup>. Για τον λόγο αυτό, στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της ταχύτητας που προέκυψαν από τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης στη Θάσο.

Στον πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται η μέση και η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος για τις δυο εξεταζόμενες χρονικές ζώνες, καθώς και για το σύνολο των μετρήσεων. Παρατηρείται ότι η μέση ταχύτητα κατά τις μεσημεριανές ώρες ανέρχεται σε 37,6 km/h, τιμή που αντανakλά τις συνθήκες αυξημένης κυκλοφοριακής συμφόρησης, ιδιαίτερα στο αστικό τμήμα της διαδρομής. Αντίθετα, κατά τις βραδινές ώρες, η μέση ταχύτητα αυξάνεται σε 42,6 km/h, γεγονός που υποδηλώνει σαφώς πιο ελεύθερη ροή της κυκλοφορίας και μειωμένη συχνότητα στάσεων.

Η ίδια τάση παρατηρείται και στη μέγιστη ταχύτητα, η οποία αυξάνεται από 66,78 km/h το μεσημέρι σε 73,73 km/h το βράδυ. Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται κυρίως με τις συνθήκες κίνησης στον περιφερειακό δρόμο του νησιού, όπου κατά τις ώρες μειωμένης κυκλοφορίας, επιτρέπεται η ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Η χαμηλότερη μέγιστη ταχύτητα κατά τις μεσημεριανές ώρες υποδηλώνει περιορισμούς στη ροή της κυκλοφορίας, είτε λόγω αυξημένου αριθμού οχημάτων είτε λόγω συχνότερων παρεμβάσεων της τροχαίας.

Για το σύνολο των δεδομένων, η μέση ταχύτητα προκύπτει ίση με 40,97 km/h, ενώ η μέγιστη ταχύτητα ανέρχεται σε 60,07 km/h, τιμές που αποτυπώνουν τη συνολική εικόνα της μικτής οδήγησης στη συγκεκριμένη διαδρομή. Οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός του εύρους που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία για μικτούς κύκλους οδήγησης που περιλαμβάνουν συνδυασμό αστικού και επαρχιακού οδικού δικτύου, γεγονός που ενισχύει την αντιπροσωπευτικότητα των καταγεγραμμένων δεδομένων.

Η σύγκριση μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών μετρήσεων καταδεικνύει με σαφήνεια την επίδραση της κυκλοφοριακής συμφόρησης στα χαρακτηριστικά της ταχύτητας. Η μείωση της μέσης και της μέγιστης ταχύτητας κατά τις ώρες αιχμής αποτελεί αναμενόμενο αποτέλεσμα σε συνθήκες αυξημένης τουριστικής δραστηριότητας και επιβεβαιώνει την ανάγκη διαχωρισμένης ανάλυσης των δεδομένων ανά χρονική ζώνη. Τα ευρήματα αυτά αποτελούν κρίσιμη βάση για τη σύνθεση και αξιολόγηση των τοπικών κύκλων οδήγησης που παρουσιάζονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

---

<sup>50</sup> Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*.

<sup>51</sup> 'On-road driving behavior analysis'.

| Περίοδος | Μέση ταχύτητα (km/h) | Μέγιστη ταχύτητα (km/h) |
|----------|----------------------|-------------------------|
| Μεσημέρι | 37,6                 | 66,78                   |
| Βράδυ    | 42,6                 | 73,73                   |
| Συνολικά | 40,97                | 60,07                   |

Πίνακας 2: Μέση και μέγιστη ταχύτητα διαδρομής ανά περίοδο και συνολικά.

#### 4.2.2. Χρονική κατανομή κίνησης και στάσεων

Η χρονική κατανομή της κίνησης και των περιόδων ακινησίας αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της οδηγικής συμπεριφοράς και επηρεάζει σημαντικά τη μορφή και τη δυναμικότητα ενός κύκλου οδήγησης. Η ανάλυση της χρονικής κατανομής επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ ρευστής και διακοπτόμενης οδήγησης, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τη σύγκριση με θεσμοθετημένους κύκλους οδήγησης και για την ερμηνεία διαφορών μεταξύ περιόδων αυξημένης και μειωμένης κυκλοφορίας.<sup>52</sup>

Για τον λόγο αυτό, στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο συνολικός χρόνος διαδρομής και ο χρόνος κατά τον οποίο το όχημα βρισκόταν σε κατάσταση στάσης, για τις διαφορετικές χρονικές ζώνες καταγραφής.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται ο συνολικός χρόνος διαδρομής και ο αντίστοιχος χρόνος στάσης για τις μεσημεριανές και βραδινές μετρήσεις, καθώς και για το σύνολο των δεδομένων. Παρατηρείται ότι κατά τις μεσημεριανές ώρες ο συνολικός χρόνος διαδρομής ανέρχεται σε 1161,5 s, ενώ ο μέσος χρόνος στάσης περιορίζεται σε 20 s, που αντιστοιχεί σε 0,18% του συνολικού χρόνου. Αντίθετα, κατά τις βραδινές ώρες, ο συνολικός χρόνος μειώνεται σε 945,55 s, με μέσο χρόνο στάσης μόλις 6 s, δηλαδή 0,007% του συνολικού χρόνου.

Η σημαντική μείωση τόσο του συνολικού χρόνου διαδρομής όσο και του χρόνου στάσης κατά τις βραδινές ώρες συνδέεται άμεσα με τις συνθήκες μειωμένης κυκλοφορίας και την απουσία συμφόρησης στο αστικό τμήμα της διαδρομής. Για το σύνολο των μετρήσεων, ο μέσος συνολικός χρόνος διαδρομής προκύπτει ίσος με 987,5 s, ενώ ο συνολικός μέσος χρόνος στάσης ανέρχεται σε 8 s, αντιστοιχώντας σε μόλις 0,01% του συνολικού χρόνου.

Οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές του χρόνου στάσης ερμηνεύονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου της Θάσου. Η απουσία φωτεινών σηματοδοτών και η περιορισμένη παρουσία υποχρεωτικών στάσεων οδηγούν σε οδήγηση με ελάχιστες πλήρεις ακινησίες, ιδιαίτερα στο επαρχιακό και περιφερειακό τμήμα της διαδρομής. Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθοδολογίας roll/keep κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων συνέβαλε στην αφαίρεση παρατεταμένων περιόδων μη δυναμικής ακινησίας, όπως στάσεις λόγω στάθμευσης διατηρώντας μόνο τις σύντομες στάσεις που συνδέονται άμεσα με την κυκλοφοριακή ροή.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η οδήγηση στη συγκεκριμένη διαδρομή χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό συνεχούς κίνησης, στοιχείο που διαφοροποιεί τον τοπικό χαρακτήρα της οδήγησης στην Θάσο από τυπικά αστικά περιβάλλοντα με έντονη παρουσία φωτεινών σηματοδοτών. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σύνθεση των κύκλων οδήγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια,

<sup>52</sup> 'On-road driving behavior analysis'.

τη μεταβατικότητα και τη δυναμική του τελικού κύκλου που θα αναπτυχθεί στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης.

| Περίοδος   | Συνολικός χρόνος διαδρομής (s) | Χρόνος στάσης (s/%) |
|------------|--------------------------------|---------------------|
| Μεσημέρι   | 1161,5                         | 20/0,018%           |
| Βράδυ      | 945,5                          | 6/0,007%            |
| Μέσος όρος | 987,5                          | 8/0,01%             |

Πίνακας 3: Συνολικός χρόνος διαδρομής και χρόνος στάσης σε κάθε περίοδο.

#### 4.2.3. Κατανομή ταχυτήτων

Η κατανομή των τιμών της ταχύτητας παρέχει λεπτομερέστερη εικόνα της οδηγικής συμπεριφοράς σε σύγκριση με τις απλές μέσες τιμές, καθώς επιτρέπει την ανάλυση του χρόνου που το όχημα κινείται σε διαφορετικά εύρη ταχυτήτων. Συνήθως, οι χαμηλές ταχύτητες συνδέονται με αστική οδήγηση και αυξημένη συμφόρηση, ενώ οι υψηλότερες ταχύτητες αντιστοιχούν σε πιο ελεύθερη ροή στον περιφερειακό δρόμο. Η σύγκριση των κατανομών μεταξύ διαφορετικών χρονικών ζωνών επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική αποτύπωση της επίδρασης της κυκλοφοριακής φόρτισης στη δομή της οδήγησης.<sup>53</sup>

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάστηκε η ποσοστιαία κατανομή του χρόνου οδήγησης σε τέσσερις χαρακτηριστικές ζώνες ταχύτητας: 0-10 km/h, 10-30 km/h, 30-50 km/h και >50 km/h, για τις μεσημεριανές και βραδινές μετρήσεις.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή του χρόνου οδήγησης ανά εύρος ταχύτητας. Παρατηρείται ότι κατά τις μεσημεριανές ώρες το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου οδήγησης (47,62%) αντιστοιχεί στο εύρος 10-30 km/h. Οι χαμηλές ταχύτητες 0-10 km/h καταλαμβάνουν 11,75% του συνολικού χρόνου, γεγονός που συνδέεται με αυξημένη κυκλοφοριακή επιβάρυνση στο αστικό τμήμα της διαδρομής, χωρίς όμως εκτεταμένες πλήρεις στάσεις.

Αντίθετα, κατά τις βραδινές ώρες παρατηρείται σαφής μετατόπιση της κατανομής προς υψηλότερες ταχύτητες. Το εύρος 30-50 km/h καταλαμβάνει το 56,51% του συνολικού χρόνου, ενώ το ποσοστό χρόνου σε ταχύτητες άνω των 50 km/h αυξάνεται σημαντικά, φθάνοντας το 30,8% έναντι 17,52% κατά τις μεσημεριανές ώρες. Τα ποσοστά στις χαμηλές ζώνες ταχύτητας μειώνονται αισθητά, με το εύρος 0-10 km/h να περιορίζεται μόλις στο 2,65%, γεγονός που αντανάκλα τις συνθήκες μειωμένης κυκλοφορίας και πιο ομαλής ροής.

Για το σύνολο των δεδομένων, η κατανομή επιβεβαιώνει τον μικτό χαρακτήρα της διαδρομής με το εύρος 30-50 km/h να κυριαρχεί (50,94%), ενώ ταχύτητες άνω των 50 km/h καταλαμβάνουν 22,48% του συνολικού χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η οδήγηση στη συγκεκριμένη διαδρομή δεν περιορίζεται σε αυστηρά αστικό περιβάλλον, αλλά περιλαμβάνει εκτεταμένα τμήματα με χαρακτηριστικά επαρχιακής οδού.

Η σύγκριση μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών μετρήσεων αναδεικνύει με σαφήνεια την επίδραση της κυκλοφοριακής φόρτισης στη δομή της οδήγησης. Κατά τις ώρες

<sup>53</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

αυξημένης κυκλοφορίας παρατηρείται μετατόπιση της κατανομής προς χαμηλότερες ταχύτητες, ενώ σε συνθήκες μειωμένης κίνησης αυξάνεται σημαντικά το ποσοστό του χρόνου σε υψηλότερες ταχύτητες. Η παρατήρηση αυτή είναι κρίσιμη για τη σύνθεση των τοπικών κύκλων οδήγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη διάρκεια όσο και τη δυναμική του κύκλου.

| Άθροισμα από dt_s | Ετικέτες στήλης |          |                 |
|-------------------|-----------------|----------|-----------------|
| Ετικέτες γραμμής  | Βράδυ           | Μεσημέρι | Γενικό Άθροισμα |
| >50               | 30,80%          | 17,52%   | 22,48%          |
| 0-10              | 2,65%           | 11,75%   | 8,35%           |
| 10-30             | 10,04%          | 23,11%   | 18,23%          |
| 30-50             | 56,51%          | 47,62%   | 50,94%          |
| Γενικό Άθροισμα   | 100,00%         | 100,00%  | 100,00%         |

Πίνακας 4: Κατανομή ταχυτήτων

### 4.3. Ανάλυση δυναμικών χαρακτηριστικών οδήγησης

Η ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών της οδήγησης συμπληρώνει την περιγραφική στατιστική της ταχύτητας και επιτρέπει την πληρέστερη κατανόηση της μεταβατικότητας της κίνησης. Παράμετροι όπως η επιτάχυνση και η επιβράδυνση αποτυπώνουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα στον χρόνο και σχετίζονται άμεσα με την ένταση της οδήγησης, την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων. Για τον λόγο αυτό, τα δυναμικά χαρακτηριστικά αποτελούν βασικό κριτήριο αξιολόγησης και σύγκρισης κύκλων οδήγησης στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι βασικές μετρικές που περιγράφουν τη δυναμική της οδήγησης για τις μεσημεριανές και βραδινές μετρήσεις, καθώς και για το σύνολο των δεδομένων, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφοριακής φόρτισης στη μεταβατικότητα της κίνησης.

#### 4.3.1. Χαρακτηριστικά επιτάχυνσης και επιβράδυνσης

Η ανάλυση της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης παρέχει ουσιαστική πληροφόρηση για τη δυναμικότητα και τη μεταβατικότητα της οδήγησης, καθώς αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα του οχήματος στον χρόνο. Σε συνθήκες πραγματικής οδήγησης, οι παράμετροι αυτές επηρεάζονται άμεσα από την κυκλοφοριακή φόρτιση, τη γεωμετρία του οδικού δικτύου και το οδηγικό προφίλ.<sup>54</sup>

Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα οι μέσες τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, καθώς και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις, για τις μεσημεριανές και βραδινές μετρήσεις. Κατά τις μεσημεριανές ώρες, η μέση θετική επιτάχυνση ανέρχεται σε  $0,5 \text{ m/s}^2$ , ενώ η μέση επιβράδυνση (σε απόλυτη τιμή σε  $0,53 \text{ m/s}^2$ ). Οι τιμές αυτές συνοδεύονται από σχετικά υψηλότερες τυπικές αποκλίσεις ( $0,19 \text{ m/s}^2$  για την

<sup>54</sup> Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*.

επιτάχυνση και 0,21 m/s<sup>2</sup> για την επιβράδυνση), γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη διακύμανση στη δυναμική της οδήγησης.

Αντίθετα, κατά τις βραδινές ώρες, η μέση επιτάχυνση μειώνεται σε 0,42 m/s<sup>2</sup>, ενώ η μέση επιβράδυνση περιορίζεται σε 0,51 m/s<sup>2</sup>. Παράλληλα, οι τυπικές αποκλίσεις μειώνονται αισθητά (0,04 m/s<sup>2</sup> τόσο για την επιτάχυνση όσο και για την επιβράδυνση), στοιχείο που υποδηλώνει πιο ομοιόμορφη και ομαλή οδηγική συμπεριφορά. Η μείωση τόσο των μέσων τιμών όσο και της διασποράς των επιταχύνσεων κατά τις βραδινές ώρες είναι ενδεικτική συνθηκών μειωμένης κυκλοφοριακής φόρτισης και περιορισμένων αναγκών για απότομες μεταβολές της ταχύτητας.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο χρονικών ζωνών καταδεικνύει ότι οι μεσημεριανές μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη δυναμικότητα και μεταβατικότητα, αποτέλεσμα της αυξημένης κυκλοφοριακής συμφόρησης και της συχνότερης αλληλεπίδρασης με άλλα οχήματα στο αστικό τμήμα της διαδρομής. Αντίθετα, οι βραδινές μετρήσεις παρουσιάζουν πιο ήπια και σταθερή δυναμική, στοιχείο που συνάδει με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ταχύτητας και της χρονικής κατανομής κίνησης.<sup>55</sup>

Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη σύνθεση των κύκλων οδήγησης, καθώς οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις επηρεάζουν άμεσα τη μεταβατικότητα του κύκλου και, κατ'επέκταση, την αξιολόγηση κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών. Η διαφοροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών συνθηκών επιβεβαιώνει την ανάγκη διακριτής ανάλυσης των δεδομένων ανά χρονική ζώνη στο επόμενο στάδιο της εργασίας.

| Phase    | Μέση θετική επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> ) | Τυπική απόκλιση επιτάχυνσης | Μέση αρνητική επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> ) | Τυπική απόκλιση επιβράδυνσης |
|----------|--------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|
| Μεσημέρι | 0,50                                       | 0,19                        | -0,53                                        | 0,21                         |
| Βράδυ    | 0,42                                       | 0,04                        | -0,51                                        | 0,04                         |

Πίνακας 5: Μέσες τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και αποκλίσεις.

#### 4.3.2. Μεταβατικότητα της οδήγησης

Η μεταβατικότητα της οδήγησης εκφράζει τον βαθμό στον οποίο η κίνηση χαρακτηρίζεται από συχνές μεταβολές της ταχύτητας, δηλαδή από εναλλαγές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Σε πραγματικές συνθήκες, η μεταβατικότητα επηρεάζεται από τη γεωμετρία της διαδρομής (π.χ. διαδοχικές στροφές και μικρά ευθύγραμμα τμήματα), καθώς και από την κυκλοφοριακή φόρτιση, καθώς οι διακυμάνσεις στη ροή επιβάλλουν συχνότερες προσαρμογές της ταχύτητας. Για τον λόγο αυτό, η ποσοτικοποίηση της αποτελεί βασικό στοιχείο αξιολόγησης κύκλων οδήγησης, ιδιαίτερα όταν στόχος είναι η ανάπτυξη τοπικών κύκλων που αντανακλούν τις πραγματικές συνθήκες μετακίνησης.<sup>56</sup>

Στην παρούσα εργασία η μεταβατικότητα αξιολογήθηκε μέσω του δείκτη Transient\_%, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του συνολικού χρόνου κατά το οποίο η οδήγηση

<sup>55</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

<sup>56</sup> 'On-road driving behavior analysis'.

ταξινομείται ως μεταβατική, με βάση κατώφλι 0,27 για τον χαρακτηρισμό της μεταβατικής κατάστασης (δηλαδή χρονικά διαστήματα όπου η δυναμική μεταβολή της ταχύτητας υπερβαίνει το καθορισμένο όριο). Στον πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη για τις μεσημεριανές και βραδινές μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κατά τις μεσημεριανές ώρες το ποσοστό μεταβατικής οδήγησης ανέρχεται σε 28%, ενώ κατά τις βραδινές ώρες αυξάνεται σε 44%. Η αύξηση αυτή υποδηλώνει ότι, παρά τη μειωμένη κυκλοφοριακή φόρτιση το βράδυ, η οδήγηση παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό δυναμικών μεταβολών. Το εύρημα αυτό ερμηνεύεται με βάση τα χαρακτηριστικά της διαδρομής που μελετήθηκε, η οποία περιλαμβάνει μικρά ευθύγραμμα τμήματα, πολλές στροφές και κατ' επέκταση συχνές εναλλαγές ρυθμού, καθώς και επεισόδια εντονότερων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων. Σε συνθήκες χαμηλότερης κυκλοφορίας, ο οδηγός έχει μεγαλύτερη δυνατότητα να αναπτύξει ταχύτητα και να επιβραδύνει δυναμικά πριν από στροφές ή μεταβολές της γεωμετρίας, οδηγώντας σε αύξηση του ποσοστού χρόνου που ταξινομείται ως μεταβατικός.

Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τα αποτελέσματα της κατανομής ταχυτήτων (αυξημένο ποσοστό χρόνου σε υψηλότερες ταχύτητες το βράδυ) και συμπληρώνει την εικόνα που προέκυψε από τα χαρακτηριστικά επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Συνεπώς, ενώ οι μέσες τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης εμφανίζονται ελαφρώς χαμηλότερες το βράδυ, η οδήγηση χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη χρονική έκταση μεταβατικών επεισοδίων, στοιχείο που αναδεικνύει ότι η μεταβατικότητα δεν εξαρτάται μόνο από τη μέση ένταση των μεταβολών, αλλά και από τη συχνότητα και την χρονική διάρκεια των επεισοδίων αυτών.

Τα αποτελέσματα της μεταβατικότητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμα για τη σύνθεση των κύκλων οδήγησης, καθώς επηρεάζουν τη δυναμική του τελικού κύκλου και, σε εφαρμογές προσομοίωσης, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση κατανάλωσης και εκπομπών. Η σημαντική διαφορά του δείκτη μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών συνθηκών υποστηρίζει την ανάγκη διακριτής αξιολόγησης των δύο χρονικών ζωνών στο επόμενο στάδιο της εργασίας.

| Phase    | Transient_ % |
|----------|--------------|
| Μεσημέρι | 28%          |
| Βράδυ    | 44%          |

Πίνακας 6: Δείκτης Transient μεταβατικότητας οδήγησης.

#### 4.3.3. Σύγκριση δυναμικών χαρακτηριστικών ανά χρονική ζώνη

Η σύγκριση των δυναμικών χαρακτηριστικών της οδήγησης μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών μετρήσεων επιτρέπει τη συνολική αξιολόγηση της επίδρασης της κυκλοφοριακής φόρτισης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διαδρομής στη μεταβατικότητα της κίνησης. Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης αναδεικνύουν σαφείς διαφοροποιήσεις όχι μόνο ως προς την ένταση των επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, αλλά και ως προς τη χρονική έκταση των μεταβατικών επεισοδίων.<sup>57</sup>

Κατά τις μεσημεριανές ώρες, η οδήγηση χαρακτηρίζεται από υψηλότερες μέσες τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, καθώς και από αυξημένη διασπορά των δυναμικών

<sup>57</sup> 'On-road driving behavior analysis'.

μεγεθών. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει μεγαλύτερη ανομοιογένεια στη δυναμική της κίνησης, η οποία συνδέεται άμεσα με τις συνθήκες αυξημένης κυκλοφοριακής συμφόρησης στο αστικό τμήμα της διαδρομής. Η ανάγκη συχνών προσαρμογών της ταχύτητας λόγω αλληλεπίδρασης με άλλα οχήματα οδηγεί σε πιο απότομες, αλλά χρονικά περιορισμένες, μεταβολές της ταχύτητας.

Αντίθετα κατά τις βραδινές ώρες, παρατηρείται μείωση των μέσων τιμών επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και ταυτόχρονα σημαντική μείωση της διακύμανσής τους, γεγονός που υποδηλώνει πιο ομοιόμορφη και προβλέψιμη δυναμική οδήγηση. Παρά την ηπιότερη ένταση των μεταβολών, ο δείκτης μεταβατικότητας (Transient\_%) εμφανίζεται σημαντικά αυξημένος, υποδεικνύοντας ότι η οδήγηση περιλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου σε μεταβατικές καταστάσεις.

Η φαινομενική αυτή αντίθεση ερμηνεύεται από τον συνδυασμό χαμηλότερης κυκλοφοριακής φόρτισης και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διαδρομής, όπως οι διαδοχικές στροφές και τα μικρά ευθύγραμμα τμήματα. Σε συνθήκες ελεύθερης ροής, ο οδηγός έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει ταχύτητα και να προσαρμόσει δυναμικά τον ρυθμό κίνησης πριν από στροφές ή μεταβολές της γεωμετρίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της χρονικής διάρκειας των μεταβατικών επεισοδίων, χωρίς απαραίτητα αύξηση της έντασής τους.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η δυναμικότητα της οδήγησης δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μια μόνο μετρική. Οι μεσημεριανές μετρήσεις χαρακτηρίζονται από εντονότερες αλλά πιο ανομοιόμορφες μεταβολές της ταχύτητας, ενώ, οι βραδινές μετρήσεις από ηπιότερες αλλά χρονικά εκτενέστερες μεταβατικές φάσεις. Η διαφοροποίηση αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις στη σύνθεση των κύκλων οδήγησης, καθώς επηρεάζει τόσο τη μορφή της χρονοσειράς ταχύτητας-χρόνου όσο και τη συνολική μεταβατικότητα του τελικού κύκλου.<sup>58</sup>

Η ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών επιβεβαιώνει τη σημασία του διαχωρισμού των δεδομένων ανά χρονική ζώνη και παρέχει κρίσιμη πληροφορία για το επόμενο στάδιο της εργασίας, όπου τα αποτελέσματα αυτά θα αξιοποιηθούν για τη σύνθεση και την αξιολόγηση των τοπικών κύκλων οδήγησης.

#### **4.4. Χρονικό πλαίσιο συλλογής δεδομένων και επίδραση τουριστικής αιχμής**

Τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο συλλέχθηκαν κατά την περίοδο Αυγούστου, η οποία αντιστοιχεί στη φάση τουριστικής αιχμής για το νησί της Θάσου. Κατά την περίοδο αυτή παρατηρείται σημαντική αύξηση της κυκλοφοριακής φόρτισης, ιδιαίτερα στις κύριες οδικές αρτηρίες και στις διαδρομές που συνδέουν το λιμάνι με τουριστικούς προορισμούς και παραλιακές περιοχές.

Η αυξημένη τουριστική δραστηριότητα επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά της οδήγησης, οδηγώντας σε χαμηλότερες μέσες ταχύτητες, αυξημένη μεταβλητότητα της ταχύτητας και περιορισμένη δυνατότητα διατήρησης σταθερής ροής, σε σύγκριση με περιόδους χαμηλής κυκλοφοριακής ζήτησης. Οι επιδράσεις αυτές είναι ιδιαίτερα έντονες στις μεσημεριανές ώρες, όπου η συνύπαρξη αφίξεων, αναχωρήσεων και τοπικών μετακινήσεων ενισχύει τη συμφόρηση.

Κατά συνέπεια, τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια αντικατοπτρίζουν ρεαλιστικά συνθήκες αυξημένης κυκλοφορίας, οι οποίες αποτελούν

---

<sup>58</sup> *Real-world vehicle emissions and driving cycles.*

χαρακτηριστικό στοιχείο της λειτουργίας του οδικού δικτύου της Θάσου κατά τη θερινή περίοδο. Η επισήμανση αυτή είναι κρίσιμη για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία ανάπτυξης και αξιολόγησης του τοπικού κύκλου οδήγησης που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

#### **4.5. Σύνοψη και ερμηνεία αποτελεσμάτων**

Στο παρόν υποκεφάλαιο συνοψίζονται και ερμηνεύονται τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης των πραγματικών δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη το χρονικό πλαίσιο συλλογής τους και τις συνθήκες αυξημένης κυκλοφορίας που επικρατούν κατά την τουριστική περίοδο αιχμής. Η σύνθεση των αποτελεσμάτων βασίζεται στη συνδυαστική εξέταση των κινηματικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της οδήγησης, όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, και αποσκοπεί στη διαμόρφωση μιας συνεκτικής εικόνας της οδικής συμπεριφοράς υπό διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες.<sup>5960</sup>

Η ανάλυση της ταχύτητας ανέδειξε σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών μετρήσεων. Οι χαμηλότερες μέσες και μέγιστες ταχύτητες κατά τις ώρες αυξημένης κυκλοφορίας υποδηλώνουν περιορισμένη ροή και μεγαλύτερη επίδραση του αστικού τμήματος της διαδρομής, ενώ οι υψηλότερες τιμές κατά τις βραδινές ώρες αντανakλούν συνθήκες ελεύθερης ροής και αυξημένη αξιοποίηση του περιφερειακού οδικού δικτύου. Η διαφοροποίηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η χρονική ζώνη αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει τη συνολική μορφή της οδήγησης.

Η εξέταση της χρονικής κατανομής κίνησης και στάσεων έδειξε ότι η οδήγηση στη συγκεκριμένη διαδρομή χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλό ποσοστό συνεχούς κίνησης. Η περιορισμένη παρουσία πλήρων στάσεων συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου της Θάσου, όπως η απουσία φωτεινών σηματοδοτών, και ενισχύεται από τη μεθοδολογική επιλογή αφαίρεση παρατεταμένων μη δυναμικών στάσεων κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων. Το εύρημα αυτό διαφοροποιεί ουσιαστικά την τοπική οδήγηση από τυπικά αστικά περιβάλλοντα και επηρεάζει καθοριστικά τη δομή των παραγόμενων κύκλων οδήγησης.

Η κατανομή των ταχυτήτων ανέδειξε τον μικτό χαρακτήρα της διαδρομής, με κυριαρχία μεσαίων ταχυτήτων και σημαντική συμμετοχή υψηλότερων ταχυτήτων, ιδιαίτερα κατά τις βραδινές ώρες. Η μετατόπιση της κατανομής προς υψηλότερα εύρη ταχύτητας σε συνθήκες μειωμένης κυκλοφορίας υπογραμμίζει της επίδραση της κυκλοφοριακής φόρτισης στη λειτουργία του οδικού δικτύου και επιβεβαιώνει τη διαφοροποίηση της οδικής συμπεριφοράς ανά χρονική ζώνη.

Η ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών συμπλήρωσε την εικόνα της κινηματικής συμπεριφοράς, αποκαλύπτοντας ότι οι μεσημεριανές μετρήσεις χαρακτηρίζονται από εντονότερες και πιο ανομοιόμορφες μεταβολές της ταχύτητας, ενώ οι βραδινές μετρήσεις από ηπιότερες αλλά χρονικά εκτενέστερες μεταβατικές φάσεις. Ο δείκτης μεταβατικότητας κατέδειξε ότι, παρά τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης το βράδυ, η οδήγηση παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό μεταβατικών επεισοδίων, γεγονός που συνδέεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διαδρομής και τη δυνατότητα ανάπτυξης ταχύτητας σε συνθήκες ελεύθερης ροής.<sup>61</sup>

<sup>59</sup> ‘Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions’.

<sup>60</sup> ‘On-road driving behavior analysis’.

<sup>61</sup> *Real-world vehicle emissions and driving cycles*.

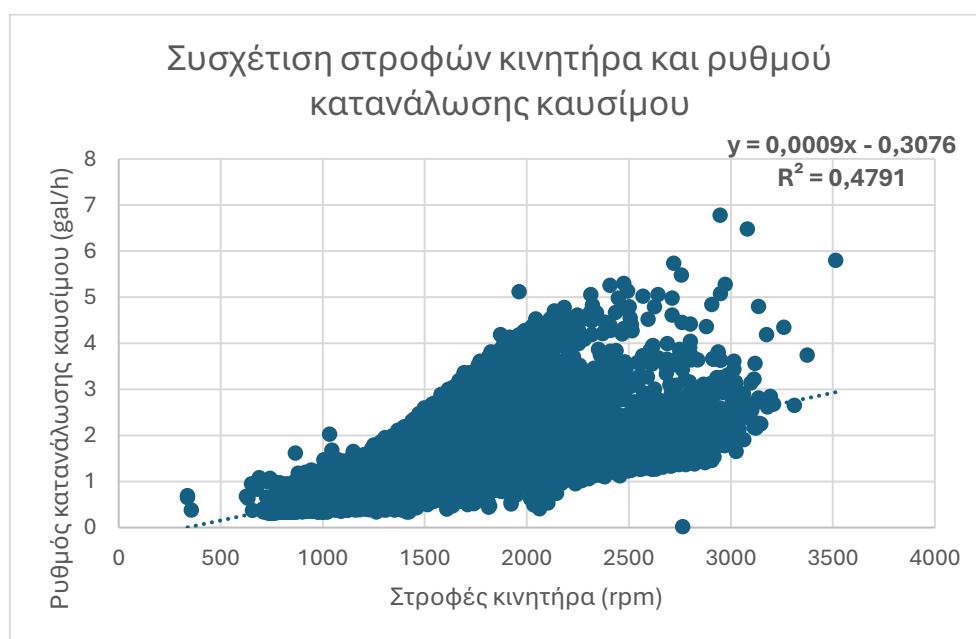
Τελικά, τα αποτελέσματα του κεφαλαίου που αναλύθηκε καταδεικνύουν ότι η οδηγική συμπεριφορά στη μελετώμενη διαδρομή επηρεάζεται τόσο από τη κυκλοφοριακή φόρτιση όσο και από τη γεωμετρία του οδικού δικτύου. Η σαφής διαφοροποίηση μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών συνθηκών δικαιολογεί την ανεξάρτητη αξιολόγηση των δεδομένων ανά χρονική ζώνη και παρέχει ισχυρή βάση για τη σύνθεση τοπικών κύκλων οδήγησης που αντανακλούν ρεαλιστικά τις συνθήκες μετακίνησης στο νησί της Θάσου.

#### 4.6. Συσχέτιση φορτίου κινητήρα, στροφών και κατανάλωσης καυσίμου

Εκτός από τα κινηματικά χαρακτηριστικά της οδήγησης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα και της κατανάλωσης καυσίμου. Στο πλαίσιο αυτό αναλύθηκαν δεδομένα που καταγράφηκαν μέσω της συσκευής OBD-II και περιλαμβάνουν το ποσοστό φορτίου κινητήρα (Engine Load), τις στροφές λειτουργίας (Engine RPM) και τον ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου (Fuel Flow Rate).<sup>62,63</sup>

Τα δεδομένα καταγράφηκαν με χρονική ανάλυση 1 s, γεγονός που επιτρέπει την αποτύπωση της στιγμιαίας λειτουργίας του κινητήρα σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Η κατανάλωση εκφράζεται σε μονάδες gal/hr, οι οποίες αντιστοιχούν στον όγκο καυσίμου που καταναλώνεται ανά ώρα λειτουργίας.

Αρχικά εξετάστηκε η σχέση μεταξύ των στροφών των κινητήρα και της κατανάλωσης καυσίμου. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε διάγραμμα διασποράς, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές του Fuel Flow Rate ως προς τις στροφές κινητήρα.



Γράφημα 9: Συσχέτιση στροφών κινητήρα και ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου

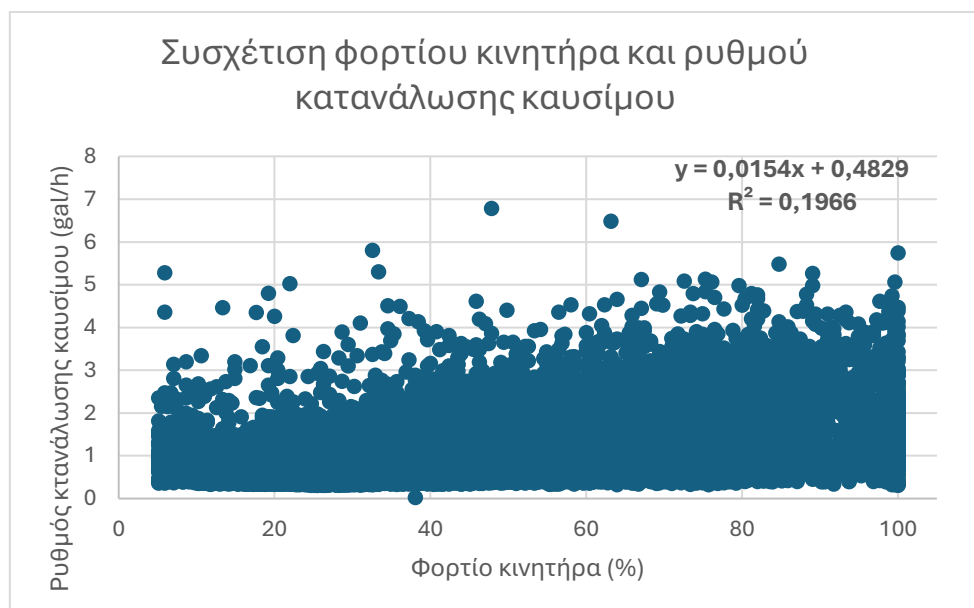
Από το διάγραμμα προκύπτει σαφής θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών, οι οποίες επιβεβαιώνεται και από τη γραμμική παλινδρόμηση των δεδομένων. Η εξίσωση της ευθείας προσαρμογής είναι της μορφής:  $y = 0,0009x - 0,3076$  με συντελεστή

<sup>62</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

<sup>63</sup> Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*.

προσδιορισμού  $R^2 = 0,4791$ . Η τιμή αυτή υποδηλώνει μέτριο βαθμό συσχέτισης, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς η κατανάλωση καυσίμου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις στροφές του κινητήρα αλλά και από το φορτίο, τις συνθήκες οδήγησης και τη ζήτηση ισχύος. Παρατηρείται ότι σε χαμηλές στροφές κινητήρα η κατανάλωση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ενώ με την αύξηση των στροφών εμφανίζεται γενική αύξηση της κατανάλωσης, συνοδευόμενη από αυξημένη διασπορά τιμών. Η διασπορά αυτή αντανακλά τη μεταβλητότητα της λειτουργίας του κινητήρα σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η σχέση μεταξύ του φορτίου κινητήρα και της κατανάλωσης καυσίμου.



Γράφημα 10: Συσχέτιση φορτίου κινητήρα και ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου

Η ανάλυση δείχνει ότι υπάρχει θετική αλλά ασθενέστερη συσχέτιση μεταξύ φορτίου κινητήρα και κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με την αντίστοιχη των στροφών. Η γραμμική προσαρμογή δίνεται από την σχέση:  $y = 0,0154x + 0,4829$  με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,1966$  γεγονός που υποδηλώνει χαμηλό βαθμό συσχέτισης.

Η σχετικά χαμηλή τιμή του  $R^2$  υποδεικνύει ότι το φορτίο κινητήρα από μόνο του δεν επαρκεί για την πλήρη περιγραφή της κατανάλωσης καυσίμου. Η κατανάλωση επηρεάζεται από συνδυασμό παραμέτρων, όπως οι στροφές του κινητήρα, οι μεταβολές ταχύτητας, και οι συνθήκες οδήγησης.

Συνολικά, η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων δείχνει ότι οι στροφές του κινητήρα παρουσιάζουν ισχυρότερη συσχέτιση με την κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με το φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα στη διαμόρφωση της κατανάλωσης σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης.

Η ανάλυση αυτή επιβεβαιώνει ότι η κατανάλωση καυσίμου αποτελεί πολυπαραγοντικό μέγεθος και δε μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μια μόνο μεταβλητή, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση δεδομένων πραγματικής οδήγησης για την κατανόηση της λειτουργίας των οχημάτων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε σε αυτό το κεφάλαιο δεν χρησιμοποιήθηκε άμεσα στην διαδικασία του κύκλου οδήγησης, αλλά παρέχουν συμπληρωματική

πληροφορία για τη λειτουργία του κινητήρα σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης και συμβάλλουν στην ευρύτερη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του οχήματος.

## **5. Ανάπτυξη και αξιολόγηση κύκλων οδήγησης**

### **5.1. Στόχοι και φιλοσοφία ανάπτυξης τοπικών κύκλων οδήγησης**

Η ανάπτυξη κύκλων οδήγησης αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των οχημάτων, καθώς συμπυκνώνει σε μια χρονοσειρά ταχύτητας-χρόνου τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο κύριος στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη ενός τοπικού κύκλου οδήγησης που να αντανακλά με ρεαλιστικό τρόπο τις συνθήκες μετακίνησης στο νησί της Θάσου, αξιοποιώντας τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ανάγκη ανάπτυξη τοπικών κύκλων προκύπτει από το γεγονός ότι οι θεσμοθετημένοι κύκλοι οδήγησης έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι γενικοί και συγκρίσιμοι σε διεθνές επίπεδο, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων περιοχών. Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι κύκλοι όπως ο NEDC ο WLTP δεν αποτυπώνουν επαρκώς τα χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης σε τοπικό επίπεδο, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με έντονη γεωμετρική ή κυκλοφοριακή ιδιαιτερότητα. Ως αποτέλεσμα, η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις μεταξύ εργαστηριακών και πραγματικών συνθηκών λειτουργίας.<sup>64</sup>

Η φιλοσοφία ανάπτυξης των κύκλων οδήγησης στην εργασία αυτή βασίζεται στην έννοια της αντιπροσωπευτικότητας, η οποία αποτελεί βασικό κριτήριο στη διεθνή βιβλιογραφία ανάπτυξης κύκλων. Ένας αντιπροσωπευτικός κύκλος οδήγησης οφείλει να διατηρεί τα βασικά στατιστικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των αρχικών δεδομένων, όπως η μέση ταχύτητα, η κατανομή ταχυτήτων, η χρονική κατανομή κίνησης και η μεταβατικότητα της οδήγησης. Στόχος δεν είναι η αναπαραγωγή κάθε επιμέρους διαδρομής, αλλά η συμπύκνωση της οδηγικής συμπεριφοράς σε μια τυπική, αλλά ρεαλιστική μορφή.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διακριτή αξιολόγηση των χρονικών ζωνών. Όπως έχει αναδειχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, η κυκλοφοριακή φόρτιση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαφοροποίησης της οδηγικής συμπεριφοράς και επηρεάζει τόσο τα κινηματικά όσο και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της οδήγησης. Τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν την παρατήρηση αυτή, γεγονός που καθιστά σκόπιμη τη διερεύνηση τόσο διακριτών όσο και συνολικών κύκλων οδήγησης.

Συνοψίζοντας, οι στόχοι του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη τοπικών κύκλων οδήγησης που να αποτυπώνουν με ρεαλιστικό τρόπο τις συνθήκες μετακίνησης στη Θάσο, η διασφάλιση της συνέπειας μεταξύ των χαρακτηριστικών των κύκλων και των αρχικών δεδομένων πραγματικής οδήγησης και η αξιολόγηση καταλληλότητάς τους μέσω σύγκρισης με θεσμοθετημένους κύκλους οδήγησης. Το πλαίσιο αυτό καθοδηγεί τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στα επόμενα υποκεφάλαια.

### **5.2. Επιλογή μεθοδολογίας σύνθεση κύκλων οδήγησης**

Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για τη σύνθεση κύκλων οδήγησης αποτελεί κρίσιμο στάδιο, καθώς επηρεάζει άμεσα τον βαθμό αντιπροσωπευτικότητας του τελικού κύκλου και τη δυνατότητα σύγκρισής του με άλλα πρότυπα. Όπως αναλύθηκε

<sup>64</sup> 'Evaluation of driving cycle representativeness'.

στο κεφάλαιο 2.4, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξη κύκλων οδήγησης από δεδομένα πραγματικής οδήγησης, οι οποίες κυμαίνονται από απλές στατιστικές μεθόδους έως πιο σύνθετες τεχνικές στοχαστικής μοντελοποίησης και μηχανικής μάθησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας, η επιλογή της μεθοδολογίας καθοδηγήθηκε από τη φύση και τον όγκο των διαθέσιμων δεδομένων, τον στόχο ανάπτυξης τοπικών και ερμηνεύσιμων κύκλων οδήγησης, καθώς και την ανάγκη διατήρησης άμεσης σύνδεσης μεταξύ των στατιστικών χαρακτηριστικών των αρχικών δεδομένων και του τελικού κύκλου.

### **5.2.1. Επισκόπηση διαθέσιμων μεθόδων και κριτήρια επιλογής**

Οι μέθοδοι ανάπτυξης κύκλων οδήγησης από πραγματικά δεδομένα μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Μέθοδοι βασισμένοι σε μικρές διαδρομές (microtrips)
- Στοχαστικές προσεγγίσεις, όπως αλυσίδες Markov
- Μέθοδοι στατιστικής ομαδοποίησης ή μηχανικής μάθησης

Οι μέθοδοι microtrips βασίζονται στη διάσπαση των αρχικών δεδομένων σε μικρότερα τμήματα, τα οποία αντιστοιχούν συνήθως σε διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων ή σε προκαθορισμένα χρονικά παράθυρα. Ο τελικός κύκλος προκύπτει από την επιλογή και αλληλουχία αντιπροσωπευτικών μικροδιαδρομών, με στόχο τη διατήρηση βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών, όπως μέση ταχύτητα, η κατανομή ταχυτήτων και η μεταβατικότητα.<sup>65</sup>

Αντίθετα, οι στοχαστικές μέθοδοι, όπως οι αλυσίδες Markov, μοντελοποιούν την εξέλιξη της ταχύτητας ως στοχαστική διαδικασία και επιτρέπουν τη δημιουργία συνθετικών κύκλων με παρόμοια στατιστική συμπεριφορά με τα αρχικά δεδομένα. Παρότι οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να παράγουν κύκλους με καλή στατιστική προσαρμογή, συχνά στερούνται άμεσης φυσικής ερμηνείας και ενδέχεται να οδηγήσουν σε προφίλ ταχύτητας που δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές διαδρομές.<sup>66</sup>

Οι πιο σύγχρονες προσεγγίσεις που βασίζονται σε τεχνικές ομαδοποίησης ή μηχανικής μάθησης, επιτρέπουν την ανίχνευση προτύπων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων και την αυτόματη σύνθεση κύκλων. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων και αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, ενώ η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι λιγότερο διαφανής.<sup>67</sup>

### **5.2.2. Τεκμηρίωση επιλογής μεθόδου microtrips**

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε προσέγγιση βασισμένη σε μικροδιαδρομές (microtrips) για τη σύνθεση των τοπικών κύκλων οδήγησης. Η επιλογή αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι η μέθοδος επιτρέπει τη διατήρηση της φυσικής δομής της οδήγησης, καθώς ο τελικός κύκλος αποτελείται από πραγματικά τμήματα διαδρομών που έχουν πράγματι καταγραφεί.

Η μέθοδος microtrips θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές όπου ο στόχος είναι η ανάπτυξη κύκλων με υψηλό βαθμό ρεαλισμού και άμεση σύνδεση με τα αρχικά δεδομένα. Επιπλέον, επιτρέπει τον έλεγχο και τη ρύθμιση της διάρκειας του τελικού

<sup>65</sup> 'Construction of real-world driving cycles using microtrips', 2016.

<sup>66</sup> 'Synthesis of driving cycles using Markov chains'.

<sup>67</sup> 'Driving cycle construction using clustering techniques'.

κύκλου, καθώς και την προσαρμογή του ώστε να αναπαράγει βασικά στατιστικά και δυναμικά χαρακτηριστικά που αναδείχθηκαν στο κεφάλαιο 4.

Στην περίπτωση της Θάσου, όπου η οδήγηση χαρακτηρίζεται από μικρά ευθύγραμμα τμήματα, διαδοχικές στροφές και περιορισμένη παρουσία πλήρων στάσεων, η χρήση μικροδιαδρομών καθιστά δυνατή τη διατήρηση της μεταβατικότητας και την δυναμικής που παρατηρείται στα πραγματικά δεδομένα, χωρίς την ανάγκη σύνθετης στοχαστικής μοντελοποίησης.<sup>68</sup>

### **5.2.3. Μετρικές ελέγχου και στόχοι προσαρμογής**

Η αξιολόγηση της καταλληλότητας του παραγόμενου κύκλου οδήγησης πραγματοποιείται μέσω σύγκρισης βασικών μετρικών μεταξύ του κύκλου και των αρχικών δεδομένων. Οι κύριες μετρικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τη μέση και τη μέγιστη ταχύτητα, την κατανομή ταχυτήτων, τη χρονική κατανομή κίνησης και στάσεων, καθώς και δείκτες μεταβατικότητας, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.

Ο στόχος της διαδικασίας σύνθεσης δεν είναι η απόλυτη ταύτιση όλων των μεγεθών, αλλά η συνολική στατιστική και δυναμική συνέπεια μεταξύ του κύκλου και των πραγματικών δεδομένων. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με τη διεθνή βιβλιογραφία ανάπτυξης driving cycles και επιτρέπει τη δημιουργία κύκλων που είναι τόσο αντιπροσωπευτικοί όσο και πρακτικά αξιοποιήσιμοι σε εφαρμογές προσομοίωσης και αξιολόγησης.<sup>69</sup>

## **5.3. Ανάπτυξη τοπικού κύκλου οδήγησης Θάσου**

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία ανάπτυξης του τοπικού κύκλου οδήγησης για την Θάσο, βασισμένη στη μεθοδολογία microtrips που τεκμηριώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαδικασία ακολουθεί διακριτά βήματα, από την διάσπαση των αρχικών δεδομένων έως την σύνθεση και τον έλεγχο του τελικού κύκλου, με στόχο τη διατήρηση της στατιστικής και δυναμικής συνέπειας με τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης.

Στην συγκεκριμένη εργασία παρότι τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε μεσημεριανές και βραδινές διαδρομές για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, έγινε σύνθεση ενός ενιαίου κύκλου οδήγησης.

### **5.3.1. Διάσπαση δεδομένων σε μικροδιαδρομές (microtrips)**

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης του τοπικού κύκλου οδήγησης περιλαμβάνει τη διάσπαση των αρχικών χρονοσειρών ταχύτητας-χρόνου σε επιμέρους μικροδιαδρομές (microtrips). Η έννοια των microtrips χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία ανάπτυξης κύκλων οδήγησης και αναφέρεται σε φυσικά, συνεχόμενα τμήματα οδήγησης που διατηρούν τη δυναμική συνοχή της κίνησης και μπορούν να συντεθούν εκ νέου για τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού κύκλου.<sup>70</sup>

Στην εργασία αυτή, η διάσπαση της διαδρομής πραγματοποιήθηκε βάσει πραγματικών στάσεων του οχήματος, ώστε τα όρια των microtrips να αντανakλούν φυσικές μεταβάσεις της οδήγησης και όχι τεχνητά χρονικά διαστήματα. Ως στάση ορίστηκε κάθε χρονικό διάστημα κατά το οποίο η ταχύτητα του οχήματος ήταν μικρότερη από 1 km/h

<sup>68</sup> 'Construction of real-world driving cycles using microtrips', 2016.

<sup>69</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

<sup>70</sup> Construction of real-world driving cycles using microtrips, 2016.

Η επιλογή του συγκεκριμένου κατωφλιού ταχύτητας και διάρκειας αποσκοπεί στον αξιόπιστο εντοπισμό πραγματικών καταστάσεων ακινησίας, αποφεύγοντας τον χαρακτηρισμό πολύ χαμηλών ταχυτήτων ή στιγμιαίων επιβραδύνσεων ως στάσεων. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι οι μικροδιαδρομές αντιστοιχούν σε ουσιαστικά τμήματα κίνησης και διατηρούν τη φυσική εξέλιξη της οδηγικής συμπεριφοράς.

Σημαντικό στοιχείο της μεθοδολογίας αποτελεί το γεγονός ότι τα τεχνικά όρια που προέκυψαν από τη διαδικασία προεπεξεργασίας των δεδομένων και την εφαρμογή της λογικής roll/keep δεν θεωρήθηκαν όρια microtrips. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι η διάσπαση σε μικροδιαδρομές βασίζεται αποκλειστικά σε πραγματικές οδηγικές καταστάσεις και όχι σε τεχνικές παρεμβάσεις που εφαρμόστηκαν για τον καθαρισμό και την εξομάλυνση των δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η τεχνητή αλλοίωση της δομής της οδήγησης και διατηρείται η φυσική συνέχεια των καταγεγραμμένων διαδρομών.

[illegible]

64

### 5.3.2. Χαρακτηρισμός και ανάλυση μικροδιαδρομών

Μετά τη διάσπαση των αρχικών δεδομένων σε μικροδιαδρομές, πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός και η ανάλυσή τους με στόχο την κατανόηση της δομής της οδήγησης και τη διαμόρφωση της βάσης για τη σύνθεση του τελικού κύκλου. Η ανάλυση των microtrips επικεντρώθηκε σε χρονικά χαρακτηριστικά, χωρίς την εφαρμογή πρόσθετων κινηματικών ή δυναμικών κριτηρίων επιλογής.<sup>7172</sup>

Συγκεκριμένα, τα microtrips χαρακτηρίστηκαν βάσει της διάρκειάς τους, με την εφαρμογή ελάχιστη διάρκειας 10 δευτερολέπτων, προκειμένου να διασφαλιστεί η στατιστική αξιοπιστία των επιμέρους τμημάτων οδήγησης. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στον αποκλεισμό εξαιρετικά σύντομων τμημάτων, τα οποία δεν αποτυπώνουν επαρκώς τη δυναμική της κίνησης και ενδέχεται να επηρεάσουν δυσανάλογα τη διαδικασία σύνθεσης του κύκλου.

Στην συγκεκριμένη μελέτη δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα κριτήρια, όπως η μέση ταχύτητα, η μέγιστη ταχύτητα ή δείκτες μεταβατικότητας, για την επιλογή ή ομαδοποίηση των microtrips. Όλες οι μικροδιαδρομές που πληρούσαν το κριτήριο της ελάχιστης διάρκειας αντιμετωπίστηκαν ισοδύναμα, ανεξαρτήτως των επιμέρους κινηματικών ή δυναμικών χαρακτηριστικών τους. Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή υποκειμενικών βαρών ή φίλτρων, τα οποία θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τη φυσική κατανομή της οδήγησης.

Η ανάλυση επικεντρώθηκε στον αριθμό των microtrips και στη χρονική κατανομή τους ανά διαδρομή και χρονική φάση (μεσημέρι, βράδυ). Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η ποιοτική αποτίμηση της δομής της οδήγησης, όπως αυτή προκύπτει από την αλληλουχία φυσικών τμημάτων κίνησης, χωρίς την επιβολή τεχνητής κατηγοριοποίησης. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαδικασία σύνθεσης, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα microtrips μπορούν να αλληλουχηθούν ώστε να αναπαραχθεί ρεαλιστικά η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας.

Η επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης συνάδει με τον στόχο της εργασίας για ανάπτυξη τοπικών κύκλων με υψηλό βαθμό ρεαλισμού, όπου η στατιστική αντιπροσωπευτικότητα προκύπτει από την συνολική δομή των δεδομένων και όχι από επιλεκτική ενίσχυση συγκεκριμένων οδηγικών καταστάσεων.

### 5.3.3. Διαδικασία σύνθεσης τελικού κύκλου οδήγησης

Η ανάπτυξη του τοπικού κύκλου οδήγησης βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα οδήγησης τα οποία επεξεργάστηκαν και οργανώθηκαν σε διαδοχικά στάδια, με στόχο τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού προφίλ ταχύτητας-χρόνου. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον υπολογιστικών φύλλων (Microsoft Excel) και περιλάμβανε τη συγκέντρωση των καθαρών δεδομένων, τη δημιουργία βιβλιοθήκης microtrips και την τελική σύνθεση του κύκλου.<sup>73</sup>

Αρχικά συγκεντρώθηκαν τα καθαρισμένα δεδομένα ταχύτητας από όλες τις διαθέσιμες διαδρομές σε αρχείο excel, στο οποίο περιλαμβάνονται οι βασικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της οδήγησης, όπως η καθαρή ταχύτητα (Vclean), το χρονικό βήμα (dt\_s) και η κατηγοριοποίηση της ταχύτητας και διακριτά εύρη (SpeedBin). Παράλληλα, η στήλη Phase χρησιμοποιήθηκε για τον διαχωρισμό των

<sup>71</sup> 'Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions'.

<sup>72</sup> 'On-road driving behavior analysis'.

<sup>73</sup> *Construction of real-world driving cycles using microtrips*, 2016.

δεδομένων σε μεσημεριανές και βραδινές διαδρομές, επιτρέποντας την ενιαία αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων δεδομένων για τη δημιουργία του τελικού κύκλου.

|    | A        | B       | C    | D        | E | F | G | H | I |
|----|----------|---------|------|----------|---|---|---|---|---|
| 1  | Phase    | V_clean | dt_s | SpeedBin |   |   |   |   |   |
| 2  | Μεσημέρι | 21,42   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 3  | Μεσημέρι | 20,45   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 4  | Μεσημέρι | 19,76   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 5  | Μεσημέρι | 18,54   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 6  | Μεσημέρι | 15,91   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 7  | Μεσημέρι | 12,42   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 8  | Μεσημέρι | 12,78   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 9  | Μεσημέρι | 15,55   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 10 | Μεσημέρι | 18,29   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 11 | Μεσημέρι | 21,02   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 12 | Μεσημέρι | 22,18   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 13 | Μεσημέρι | 22,86   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 14 | Μεσημέρι | 22,86   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 15 | Μεσημέρι | 22,32   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 16 | Μεσημέρι | 18,04   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 17 | Μεσημέρι | 18,04   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 18 | Μεσημέρι | 21,35   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 19 | Μεσημέρι | 23,94   | 2    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 20 | Μεσημέρι | 24,44   | 0    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 21 | Μεσημέρι | 23,87   | 2    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 22 | Μεσημέρι | 21,31   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 23 | Μεσημέρι | 17,93   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 24 | Μεσημέρι | 17,46   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 25 | Μεσημέρι | 20,56   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 26 | Μεσημέρι | 24,16   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 27 | Μεσημέρι | 26,93   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 28 | Μεσημέρι | 27,68   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 29 | Μεσημέρι | 28,55   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 30 | Μεσημέρι | 29,41   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 31 | Μεσημέρι | 30,28   | 1    | 30-50    |   |   |   |   |   |
| 32 | Μεσημέρι | 30,78   | 1    | 30-50    |   |   |   |   |   |
| 33 | Μεσημέρι | 27,36   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 34 | Μεσημέρι | 26,35   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |
| 35 | Μεσημέρι | 26,35   | 1    | 10-30    |   |   |   |   |   |

Εικόνα 10: Δεδομένα ταχύτητας και κατηγοριοποίηση

Με βάση τα δεδομένα αυτά δημιουργήθηκε συγκεντρωτικός πίνακας κατανομής ταχυτήτων σε φύλλο “Speed\_dist”, όπου υπολογίστηκε το ποσοστό του συνολικού χρόνου που αντιστοιχεί σε κάθε εύρος ταχύτητας. Η κατανομή αυτή χρησιμοποιήθηκε ως βασικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της αντιπροσωπευτικότητας του τελικού κύκλου.

| Άθροισμα από dt_s | Ετικέτες στήλης |          |                 |
|-------------------|-----------------|----------|-----------------|
| Ετικέτες γραμμής  | Βράδυ           | Μεσημέρι | Γενικό Άθροισμα |
| >50               | 30,80%          | 17,52%   | 22,48%          |
| 0-10              | 2,65%           | 11,75%   | 8,35%           |
| 10-30             | 10,04%          | 23,11%   | 18,23%          |
| 30-50             | 56,51%          | 47,62%   | 50,94%          |
| Γενικό Άθροισμα   | 100,00%         | 100,00%  | 100,00%         |

Πίνακας 7: Πίνακας κατανομής ταχυτήτων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δημιουργία της βιβλιοθήκης microtrips. Τα microtrips ορίστηκαν ως τα τμήματα της διαδρομής μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων του οχήματος, όπου ως στάση θεωρήθηκε ταχύτητα μικρότερη από 1 km/h για χρονική διάρκεια τουλάχιστον τριών δευτερολέπτων. Για κάθε microtrip υπολογίστηκαν βασικά χαρακτηριστικά, όπως η διάρκεια, η μέση ταχύτητα και η απόσταση που διανύθηκε.

Για τη διευκόλυνση την σύνθεσης του κύκλου, τα Microtrips μεγάλης διάρκειας τεμαχίστηκαν σε επιμέρους τμήματα (segments) με μέγιστη διάρκεια 100

δευτερολέπτων. Ο αριθμός των επιμέρους τμημάτων καταγράφηκε στη στήλη *n\_segments*, ενώ η διάρκεια κάθε τμήματος αποτυπώθηκε στην στήλη *segment\_duration*. Επιπλέον σε κάθε *microtrip* αποδόθηκε ένας χαρακτηριστικός αριθμός (*microtrip\_global\_id*) με σκοπό την αναγνώριση του κάθε ενός όταν χρειάζεται. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε μεγαλύτερη ευελιξία στη σύνθεση του κύκλου και αποφυγή υπεραντιπροσώπησης ιδιαίτερα μεγάλων τμημάτων οδήγησης.

|    | A                          | B               | C                   | D                        | E                    | F                 | G                           |
|----|----------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1  | <i>microtrip_global_id</i> | <i>route_id</i> | <i>duration (s)</i> | <i>mean_speed (km/h)</i> | <i>distance (km)</i> | <i>n_segments</i> | <i>segment_duration (s)</i> |
| 2  | 1                          | 10/8 Μεσημέρι   | 69                  | 22,04                    | 0,38                 | 1                 | 69                          |
| 3  | 2                          | 10/8 Μεσημέρι   | 27                  | 11,05                    | 0,08                 | 1                 | 27                          |
| 4  | 3                          | 10/8 Μεσημέρι   | 39                  | 22,02                    | 0,21                 | 1                 | 39                          |
| 5  | 4                          | 10/8 Μεσημέρι   | 33                  | 20,87                    | 0,2                  | 1                 | 33                          |
| 6  | 5                          | 10/8 Μεσημέρι   | 942                 | 43,58                    | 11,61                | 10                | 100                         |
| 7  | 6                          | 11/8 Μεσημέρι   | 84                  | 16,66                    | 0,46                 | 1                 | 84                          |
| 8  | 7                          | 11/8 Μεσημέρι   | 61                  | 26,22                    | 0,41                 | 1                 | 61                          |
| 9  | 8                          | 11/8 Μεσημέρι   | 137                 | 56,43                    | 0,9                  | 1                 | 137                         |
| 10 | 9                          | 11/8 Μεσημέρι   | 857                 | 48,56                    | 10,37                | 9                 | 100                         |
| 11 | 10                         | 13/8 Βράδυ      | 855                 | 46,2                     | 11,31                | 9                 | 100                         |
| 12 | 11                         | 13/8 Βράδυ      | 40                  | 29,3                     | 0,34                 | 1                 | 40                          |
| 13 | 12                         | 13/8 Μεσημέρι   | 141                 | 22,37                    | 0,75                 | 1                 | 141                         |
| 14 | 13                         | 13/8 Μεσημέρι   | 135                 | 24,55                    | 0,89                 | 1                 | 135                         |
| 15 | 14                         | 13/8 Μεσημέρι   | 27                  | 16,77                    | 0,12                 | 1                 | 27                          |
| 16 | 15                         | 13/8 Μεσημέρι   | 1113                | 28,43                    | 11,72                | 12                | 100                         |
| 17 | 16                         | 14/8 Μεσημέρι   | 84                  | 16,97                    | 0,42                 | 1                 | 84                          |
| 18 | 17                         | 14/8 Μεσημέρι   | 63                  | 24,83                    | 0,44                 | 1                 | 63                          |
| 19 | 18                         | 14/8 Μεσημέρι   | 1079                | 37,01                    | 11,57                | 11                | 100                         |
| 20 | 19                         | 15/8 Βράδυ      | 973                 | 38,8                     | 11,15                | 10                | 100                         |
| 21 | 20                         | 16/8 Βράδυ      | 373                 | 44,35                    | 4,48                 | 4                 | 100                         |
| 22 | 21                         | 16/8 Βράδυ      | 559                 | 43,93                    | 6,14                 | 6                 | 100                         |
| 23 | 22                         | 16/8 Μεσημέρι   | 43                  | 6,79                     | 0,1                  | 1                 | 43                          |
| 24 | 23                         | 16/8 Μεσημέρι   | 190                 | 23,95                    | 1,13                 | 1                 | 190                         |
| 25 | 24                         | 16/8 Μεσημέρι   | 869                 | 44,53                    | 10,1                 | 9                 | 100                         |
| 26 | 25                         | 17/8 Βράδυ      | 482                 | 40,04                    | 5,33                 | 5                 | 100                         |
| 27 | 26                         | 17/8 Μεσημέρι   | 64                  | 15,55                    | 0,24                 | 1                 | 64                          |
| 28 | 27                         | 17/8 Μεσημέρι   | 71                  | 23,18                    | 0,41                 | 1                 | 71                          |
| 29 | 28                         | 17/8 Μεσημέρι   | 987                 | 41,92                    | 11,16                | 10                | 100                         |
| 30 | 29                         | 18/8 Βράδυ      | 399                 | 41,83                    | 4,71                 | 4                 | 100                         |
| 31 | 30                         | 18/8 Βράδυ      | 546                 | 44,97                    | 6,39                 | 6                 | 100                         |
| 32 | 31                         | 18/8 Μεσημέρι   | 890                 | 45,13                    | 10,5                 | 9                 | 100                         |
| 33 | 32                         | 19/8 Μεσημέρι   | 603                 | 44,56                    | 6,89                 | 7                 | 100                         |
| 34 | 33                         | 22/8 Βράδυ      | 10                  | 7,2                      | 0,8                  | 1                 | 10                          |
| 35 | 34                         | 22/8 Βράδυ      | 968                 | 42,7                     | 10,04                | 10                | 100                         |

Εικόνα 11: Διάσπαση *microtrips* σε τμήματα

Στο επόμενο στάδιο δημιουργήθηκε αρχείο *excel* στο οποίο οργανώθηκαν τα διαθέσιμα *microtrips* και προετοιμάστηκε η διαδικασία επιλογής τους. Στο φύλλο αυτό αποδόθηκε σε κάθε *microtrip* μια τυχαία τιμή μέσω της συνάρτησης *RAND ()*, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την τυχαία ταξινόμηση της βιβλιοθήκης. Η χρήση της τυχαίας ταξινόμησης επέτρεψε την επιλογή *microtrip* χωρίς προκαθορισμένη σειρά, διατηρώντας τη στοχαστική φύση της πραγματικής οδήγησης.

Μετά την ταξινόμηση των *microtrips*, πραγματοποιήθηκε η επιλογή τους σε άλλο φύλλο, όπου επιλέχθηκαν διαδοχικά τμήματα οδήγησης μέχρι η συνολική διάρκεια του κύκλου να προσεγγίσει τον επιθυμητό στόχο των περίπου 1100 δευτερολέπτων. Η τελική επιλογή περιλάμβανε 11 *microtrips*, τα οποία συνδυάστηκαν ώστε να προκύψει ένας κύκλος συνολικής διάρκειας 1090 δευτερολέπτων.

Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη δημιουργία ενός ενιαίου χρονικού προφίλ ταχύτητας-χρόνου, το οποίο αποτελεί τη βάση για την τελική μορφή του τοπικού κύκλου οδήγησης.

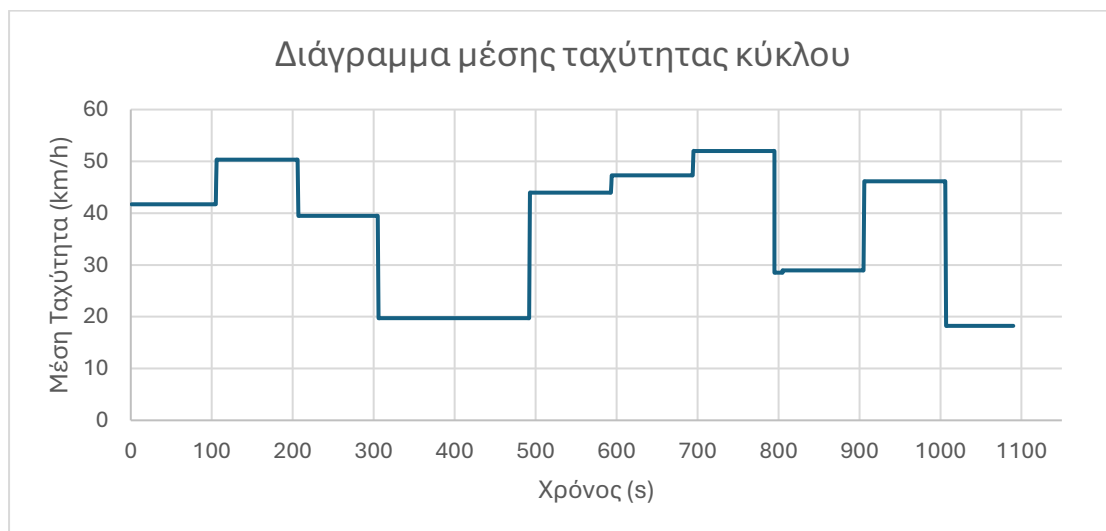
|    | A                   | B                   | C             | D            | E                | F             | G        | H | I |
|----|---------------------|---------------------|---------------|--------------|------------------|---------------|----------|---|---|
| 1  | parent_microtrip_id | microtrip_global_id | route_id      | duration (s) | mean_speed (kmh) | distance (km) | rand     |   |   |
| 2  | 18                  | 59                  | 14/8 Μεσημέρι | 100          | 37,01            | 1,03          | 0,248689 |   |   |
| 3  | 31                  | 126                 | 18/8 Μεσημέρι | 100          | 45,13            | 1,25          | 0,363561 |   |   |
| 4  | 19                  | 73                  | 15/8 Βράδυ    | 100          | 38,8             | 1,08          | 0,301203 |   |   |
| 5  | 23                  | 86                  | 16/8 Μεσημέρι | 190          | 23,95            | 1,26          | 0,203667 |   |   |
| 6  | 21                  | 81                  | 16/8 Βράδυ    | 100          | 43,93            | 1,22          | 0,679303 |   |   |
| 7  | 5                   | 5                   | 10/8 Μεσημέρι | 100          | 43,58            | 1,21          | 0,163239 |   |   |
| 8  | 9                   | 20                  | 11/8 Μεσημέρι | 100          | 48,56            | 1,35          | 0,039139 |   |   |
| 9  | 15                  | 51                  | 13/8 Μεσημέρι | 13           | 28,43            | 0,10          | 0,928252 |   |   |
| 10 | 15                  | 49                  | 13/8 Μεσημέρι | 100          | 28,43            | 0,79          | 0,843051 |   |   |
| 11 | 32                  | 132                 | 19/8 Μεσημέρι | 100          | 44,56            | 1,24          | 0,188719 |   |   |
| 12 | 15                  | 42                  | 13/8 Μεσημέρι | 100          | 28,43            | 0,79          | 0,543955 |   |   |
| 13 | 29                  | 114                 | 18/8 Βράδυ    | 100          | 41,83            | 1,16          | 0,484281 |   |   |
| 14 | 34                  | 143                 | 22/8 Βράδυ    | 100          | 42,07            | 1,17          | 0,8638   |   |   |
| 15 | 19                  | 69                  | 15/8 Βράδυ    | 100          | 38,8             | 1,08          | 0,899481 |   |   |
| 16 | 7                   | 16                  | 11/8 Μεσημέρι | 61           | 26,22            | 0,44          | 0,437511 |   |   |
| 17 | 32                  | 136                 | 19/8 Μεσημέρι | 100          | 44,56            | 1,24          | 0,502072 |   |   |
| 18 | 26                  | 101                 | 17/8 Μεσημέρι | 64           | 15,55            | 0,28          | 0,509099 |   |   |
| 19 | 18                  | 60                  | 14/8 Μεσημέρι | 100          | 37,01            | 1,03          | 0,041806 |   |   |
| 20 | 32                  | 134                 | 19/8 Μεσημέρι | 100          | 44,56            | 1,24          | 0,934194 |   |   |
| 21 | 30                  | 122                 | 18/8 Βράδυ    | 46           | 44,97            | 0,57          | 0,246687 |   |   |
| 22 | 27                  | 102                 | 17/8 Μεσημέρι | 71           | 23,18            | 0,46          | 0,687468 |   |   |
| 23 | 18                  | 63                  | 14/8 Μεσημέρι | 100          | 37,01            | 1,03          | 0,503265 |   |   |
| 24 | 10                  | 33                  | 13/8 Βράδυ    | 100          | 46,2             | 1,28          | 0,604537 |   |   |
| 25 | 22                  | 85                  | 16/8 Μεσημέρι | 43           | 6,79             | 0,08          | 0,008899 |   |   |
| 26 | 10                  | 35                  | 13/8 Βράδυ    | 55           | 46,2             | 0,71          | 0,517846 |   |   |
| 27 | 31                  | 125                 | 18/8 Μεσημέρι | 100          | 45,13            | 1,25          | 0,794705 |   |   |
| 28 | 19                  | 67                  | 15/8 Βράδυ    | 100          | 38,8             | 1,08          | 0,357785 |   |   |
| 29 | 24                  | 95                  | 16/8 Μεσημέρι | 69           | 44,53            | 0,85          | 0,940468 |   |   |
| 30 | 18                  | 54                  | 14/8 Μεσημέρι | 100          | 37,01            | 1,03          | 0,220461 |   |   |
| 31 | 28                  | 103                 | 17/8 Μεσημέρι | 100          | 41,92            | 1,16          | 0,131428 |   |   |
| 32 | 29                  | 115                 | 18/8 Βράδυ    | 100          | 41,83            | 1,16          | 0,118606 |   |   |
| 33 | 31                  | 131                 | 18/8 Μεσημέρι | 90           | 45,13            | 1,13          | 0,985936 |   |   |
| 34 | 12                  | 37                  | 13/8 Μεσημέρι | 141          | 22,37            | 0,88          | 0,457457 |   |   |
| 35 | 24                  | 90                  | 16/8 Μεσημέρι | 100          | 44,53            | 1,24          | 0,29927  |   |   |

Εικόνα 12: Ανάθεση τυχαίας τιμής στα microtrips

#### 5.3.4. Τελική σύνθεση και αξιολόγηση του τελικού κύκλου οδήγησης

Μετά την επιλογή των τυχαίων microtrips πραγματοποιήθηκε η τελική σύνθεση του κύκλου οδήγησης, μέσω της διαδοχικής σύνδεσης των επιμέρους τμημάτων οδήγησης.

Για την αρχική διερεύνηση της δομής του κύκλου οδήγησης χρησιμοποιήθηκε διάγραμμα βασισμένο στη μέση ταχύτητα κάθε microtrip σε συνάρτηση με τον χρόνο. Το διάγραμμα αυτό παρέχει μια συνοπτική εικόνα της αλληλουχίας των επιμέρους τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση του κύκλου.



Γράφημα 11: Προφίλ μέσης ταχύτητας κύκλου

Ωστόσο, η συγκεκριμένη αναπαράσταση δεν αποτυπώνει τη δυναμική συμπεριφορά της οδήγησης, καθώς βασίζεται σε μέσες τιμές και δεν περιλαμβάνει τις στιγμιαίες μεταβολές ταχύτητας.

Για τον λόγο αυτό, ο τελικός κύκλος κατασκευάστηκε με χρήση των πραγματικών χρονοσειρών ταχύτητας των επιλεγμένων microtrips, ώστε να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική οδηγική συμπεριφορά.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστικό φύλλο όπου τα επιλεγμένα microtrips τοποθετήθηκαν σε κοινό χρονικό άξονα με τις μετρήσεις ταχύτητας και δημιουργήθηκε η τελική χρονοσειρά ταχύτητας.

Η σύνδεση των microtrips πραγματοποιήθηκε με τρόπο ώστε να διατηρείται η συνέχεια της ταχύτητας μεταξύ διαδοχικών τμημάτων, αποφεύγοντας τμήματα που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τον ρεαλιστικό χαρακτήρα του κύκλου.

Επιπλέον παρ' όλο που η επιλογή των microtrip ήταν τυχαία, για την ρεαλιστική αποτύπωση της οδήγησης έγινε προσαρμογή του κύκλου ώστε να γίνεται εκκίνηση και τερματισμός με μηδενική ταχύτητα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένα ενιαίο προφίλ οδήγησης το οποίο αναπαριστά τη χρονική εξέλιξη της ταχύτητας κατά τη διάρκεια του κύκλου.



Γράφημα 12: Τελικό προφίλ ταχύτητας χρόνου

Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει τη μεταβολή της ταχύτητας κατά τη διάρκεια του κύκλου και επιτρέπει την οπτική αξιολόγηση της δυναμικής της οδήγησης.

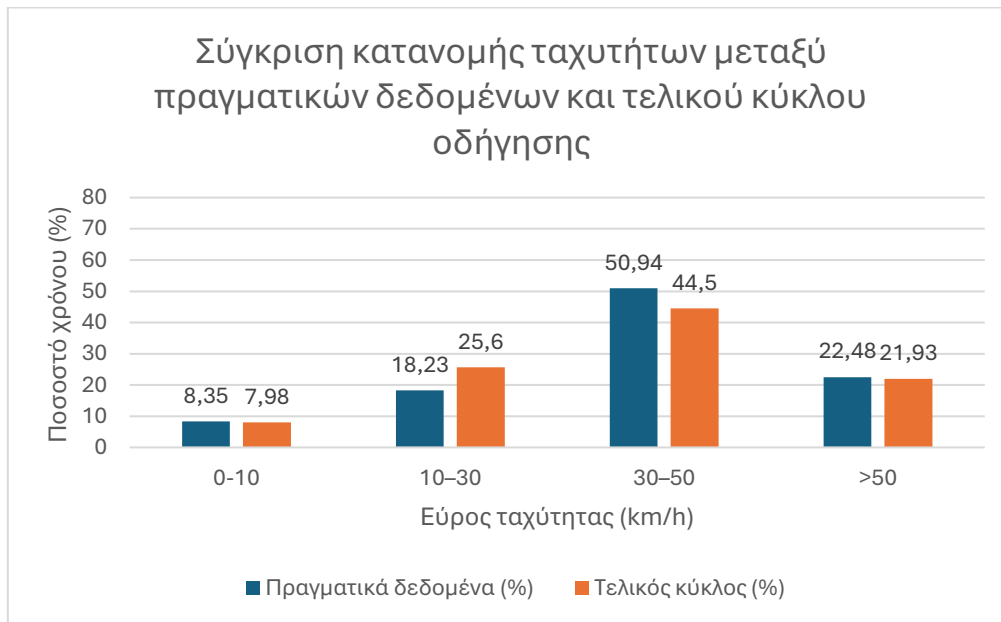
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ποσοτική αξιολόγηση των δεδομένων του κύκλου μέσω της σύγκρισης των ποσοστών κάθε εύρους μεταξύ των συνολικών πραγματικών δεδομένων και του τελικού κύκλου. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε συγκεντρωτικός πίνακας στον οποίο καταγράφεται το ποσοστό του συνολικού χρόνου που αντιστοιχεί σε κάθε εύρος ταχύτητας τόσο για τα πραγματικά δεδομένα όσο και για τον τελικό κύκλο.

| Εύρος ταχύτητας (km/h) | Πραγματικά δεδομένα (%) | Τελικός κύκλος (%) |
|------------------------|-------------------------|--------------------|
| 0-10                   | 8,35                    | 7,98               |
| 10-30                  | 18,23                   | 25,60              |

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 30–50 | 50,94 | 44,50 |
| >50   | 22,48 | 21,93 |

Πίνακας 8: Ποσοστό χρόνου σε κάθε εύρος ταχύτητας

Για την καλύτερη οπτική απεικόνιση της σύγκρισης δημιουργήθηκε επιπλέον διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται η αντιστοίχιση της κατανομής ταχυτήτων μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και του παραγόμενου κύκλου.



Γράφημα 13: Σύγκριση κατανομής ταχυτήτων μεταξύ πραγματικών δεδομένων και τελικού κύκλου

Η σύγκριση αυτή αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης της αντιπροσωπευτικότητας του κύκλου, καθώς επιβεβαιώνει ότι η χρονική κατανομή των ταχυτήτων στον τελικό κύκλο προσεγγίζει την αντίστοιχη κατανομή που παρατηρείται στα πραγματικά δεδομένα οδήγησης.

Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε ένας ενιαίος τοπικός κύκλος οδήγησης διάρκειας 1003 δευτερολέπτων, ο οποίος διατηρεί τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης στη μελετώμενη διαδρομή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση.

### 5.3.5. Έλεγχος αντιπροσωπευτικότητας τελικού κύκλου οδήγησης

Μετά την σύνθεση του τελικού κύκλου οδήγησης πραγματοποιήθηκε ένας ακόμη έλεγχος της αντιπροσωπευτικότητάς του με στόχο τη διασφάλιση ότι ο παραγόμενος κύκλος αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης στη μελετώμενη διαδρομή. Ο έλεγχος αυτός αποτελεί κρίσιμο στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης κύκλων οδήγησης, καθώς επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της καταλληλότητας του κύκλου πριν από την χρήση του σε συγκριτικές ή προσομοιωτικές εφαρμογές.

Η αντιπροσωπευτικότητα του κύκλου αξιολογήθηκε μέσω σύγκρισης βασικών κινηματικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών μεταξύ του τελικού κύκλου και των αρχικών δεδομένων πραγματικής οδήγησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποτυπώνουν τη συνολική εικόνα της κίνησης και τη γενική μορφή της οδηγικής συμπεριφοράς, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η σύγκριση βασικών μεγεθών μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και του τελικού κύκλου οδήγησης. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται η μέση ταχύτητα, το ποσοστό χρόνου ακινησίας και ένας ποιοτικός δείκτης μεταβατικότητας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέση ταχύτητα του τελικού κύκλου ανέρχεται σε 42,3 km/h, έναντι 39,51 km/h των πραγματικών δεδομένων. Η απόκλιση αυτή κρίνεται αναμενόμενη, καθώς ο τελικός κύκλος αποτελεί συμπυκνωμένη αναπαράσταση της οδήγησης και δεν περιλαμβάνει το σύνολο των στιγμιαίων ταχυτήτων που καταγράφηκαν στα πρωτογενή δεδομένα.

| Μέγεθος              | Πραγματικά δεδομένα | Τελικός κύκλος                 |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| Μέση ταχύτητα (km/h) | 39,51               | 42,3                           |
| Idle time(%)         | 1,47                | 4,25                           |
| Transient (%)        | 35%                 | Εντός εύρους πραγματικών τιμών |

Πίνακας 9: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων και τελικού κύκλου

Το ποσοστό χρόνου ακινησίας παραμένει χαμηλό και στον τελικό κύκλο (4,25%), σε συμφωνία με τη φύση της μελετώμενης διαδρομής και την περιορισμένη παρουσία πλήρων στάσεων στο οδικό δίκτυο της Θάσου. Η ελαφρά αύξηση του ποσοστού idle σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα (1,47%) αποδίδεται στη διαδικασία σύνθεσης και εξομάλυνσης του κύκλου, χωρίς ωστόσο να αλλοιώνει τον συνολικό χαρακτήρα της οδήγησης.

Όσον αφορά τη μεταβατικότητα της οδήγησης, αν και δεν πραγματοποιήθηκε άμεσος υπολογισμός του δείκτη μεταβατικότητας για τον τελικό κύκλο, η τυχαία επιλογή microtrips από τις πραγματικές διαδρομές διασφαλίζει ότι το επίπεδο μεταβατικότητας του κύκλου παραμένει συγκρίσιμο με εκείνο των πρωτογενών δεδομένων. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι ο τελικός κύκλος δεν εμφανίζει μη ρεαλιστικά εξομαλυσμένη συμπεριφορά, αλλά διατηρεί τη δυναμική εναλλαγή επιτάχυνσης και επιβράδυνσης που χαρακτηρίζει την πραγματική οδήγηση στη συγκεκριμένη διαδρομή.

Μέχρι το σημείο αυτό, ο έλεγχος αντιπροσωπευτικότητας δείχνει ότι ο τελικός κύκλος οδήγησης αποτελεί ρεαλιστική και λειτουργικά συνεπή αναπαράσταση των πραγματικών δεδομένων, διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της κίνησης σε επίπεδο συνολικής συμπεριφοράς.

Η αντιπροσωπευτικότητα του τελικού κύκλου αξιολογήθηκε περαιτέρω μέσω της σύγκρισης της κατανομής ταχυτήτων, καθώς η κατανομή αυτή αποτελεί θεμελιώδες δομικό χαρακτηριστικό της οδηγικής συμπεριφοράς και αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται χρονικά η κίνηση σε διαφορετικά εύρη ταχύτητας.

Από το διάγραμμα 10 παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις κυριαρχεί το εύρος 30-50 km/h, γεγονός που επιβεβαιώνει τον μικτό χαρακτήρα της διαδρομής και τη σημαντική συμμετοχή επαρχιακού τύπου οδήγησης. Στον τελικό κύκλο, το ποσοστό χρόνου στο εύρος αυτό εμφανίζεται μειωμένο (44,5%) σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα (50,94%), στοιχείο που συνδέεται με τη διαδικασία συμπύκνωσης των microtrips και τη στόχευση στη δημιουργία ενός ομαλού και συνεκτικού προφίλ ταχύτητας.

Αντίστοιχη απόκλιση ποσοστών παρατηρείται και στα υπόλοιπα εύρη ταχυτήτων σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα. Η διαφοροποίηση αυτή ερμηνεύεται ως

αποτέλεσμα τόσο της περιορισμένης παρουσίας πλήρων στάσεων στη μελετώμενη διαδρομή όσο και της επιλογής microtrips με βάση τη διάρκεια και όχι με βάση επιμέρους κινηματικά κριτήρια. Παρά τη διαφορά αυτή, η παρουσία χαμηλών ταχυτήτων στον τελικό κύκλο διατηρείται, εξασφαλίζοντας ότι η αστική συνιστώσα της διαδρομής εξακολουθεί να εκπροσωπείται.

Συνολικά, η σύγκριση της κατανομής ταχυτήτων δείχνει ότι ο τελικός κύκλος αναπαράγει με ικανοποιητικό τρόπο τη δομή της οδήγησης στη μελετώμενη διαδρομή, με αναμενόμενες αποκλίσεις που απορρέουν από τη διαδικασία συμπίκνωσης και τις μεθοδολογικές επιλογές σύνθεσης. Οι αποκλίσεις αυτές κρίνονται αποδεκτές στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς δεν αλλοιώνουν τον συνολικό χαρακτήρα της οδήγησης και δεν εισάγουν μη ρεαλιστικές καταστάσεις κίνησης.

Καταληκτικά, ο έλεγχος αντιπροσωπευτικότητας καταδεικνύει ότι ο τελικός κύκλος οδήγησης αποτελεί ρεαλιστική, συνεκτική και λειτουργικά αξιοποιήσιμη αναπαράσταση των πραγματικών δεδομένων οδήγησης στην Θάσο. Ο κύκλος μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία για συγκριτική αξιολόγηση με θεσμοθετημένους κύκλους.

## **5.4. Αξιολόγηση και ερμηνεία τελικού κύκλου οδήγησης**

### **5.4.1. Συνολική αξιολόγηση χαρακτηριστικών του τελικού κύκλου**

Ο τελικός τοπικός κύκλος οδήγησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αποτελεί συμπυκνωμένη αναπαράσταση της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς στη μελετώμενη διαδρομή της Θάσου. Η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του κύκλου βασίζεται στη συνδυαστική εξέταση των κινηματικών και λειτουργικών μεγεθών που προέκυψαν από τη διαδικασία σύνθεσης και ελέγχου αντιπροσωπευτικότητας, με στόχο την εκτίμηση της καταλληλότητάς του για περεταίρω ανάλυση και σύγκριση.

Σε επίπεδο κινηματικών χαρακτηριστικών, ο κύκλος παρουσιάζει μέση ταχύτητα χαμηλότερη από εκείνη των πραγματικών δεδομένων, γεγονός που ερμηνεύεται ως φυσική συνέπεια της διαδικασίας συμπίκνωσης και της επιλογής πεπερασμένης διάρκειας. Παρά τη διαφοροποίηση αυτή, η τιμή της μέσης ταχύτητας παραμένει εντός του εύρους που χαρακτηρίζει τη μελετώμενη διαδρομή και διατηρεί τη συνολική εικόνα μικτής οδήγησης που προέκυψε από την ανάλυση των πραγματικών δεδομένων. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι ο κύκλος αποτυπώνει με ρεαλιστικό τρόπο τη μέση ένταση της κίνησης, χωρίς να επηρεάζεται δυσανάλογα από ακραία στιγμιαία επεισόδια.

Το ποσοστό χρόνου ακινησίας στον τελικό κύκλο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, σε συμφωνία με τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου της Θάσου και την απουσία φωτεινών σηματοδοτών στη μελετώμενη διαδρομή. Η ελαφρά αύξηση του ποσοστού idle σε σχέση με τα πρωτογενή δεδομένα αποδίδεται στη διαδικασία σύνθεσης και εξομάλυνσης των μεταβάσεων μεταξύ microtrips και δεν αλλοιώνει τον συνολικό χαρακτήρα της οδήγησης. Αντίθετα, συμβάλλει στη δημιουργία ενός λειτουργικά συνεκτικού κύκλου, κατάλληλου για εφαρμογές προσομοίωσης.

Η κατανομή ταχυτήτων του τελικού κύκλου επιβεβαιώνει τον μικτό χαρακτήρα της διαδρομής, με κυρίαρχη συμμετοχή μεσαίων ταχυτήτων και περιορισμένη παρουσία χαμηλών ταχυτήτων. Με αυτό τον τρόπο, ο κύκλος αναπαράγει τη δομή της οδήγησης σε επίπεδο τμημάτων κίνησης και όχι μεμονωμένων αιχμών, γεγονός που ενισχύει τη σταθερότητα και την ερμηνευσιμότητά του.

Όσον αφορά τα δυναμικά χαρακτηριστικά, ο τελικός κύκλος διατηρεί τη μεταβατικότητα της πραγματικής οδήγησης σε ποιοτικό επίπεδο, όπως αυτή αποτυπώθηκε στα πρωτογενή δεδομένα. Αν και δεν υπολογίστηκε άμεσα δείκτης μεταβατικότητας για τον κύκλο, η τυχαία επιλογή microtrips από το σύνολο των πραγματικών διαδρομών διασφαλίζει ότι η εναλλαγή επιτάχυνσης και επιβράδυνσης παραμένει ρεαλιστική και συγκρίσιμη με εκείνη της πραγματικής οδήγησης. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιοπιστία του κύκλου σε εφαρμογές που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές.

Συνολικά, η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του τελικού κύκλου δείχνει ότι αυτός αποτελεί ρεαλιστική, συνεκτική και αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της οδηγικής συμπεριφοράς στη μελετώμενη διαδρομή. Παρά τις αναμενόμενες αποκλίσεις που απορρέουν από τη διαδικασία συμπύκνωσης, ο κύκλος διατηρεί τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία για συγκριτική αξιολόγηση και περαιτέρω ανάλυση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

#### **5.4.2. Σχέση του τελικού κύκλου με τις χρονικές ζώνες οδήγησης**

Η ανάπτυξη του τελικού τοπικού κύκλου οδήγησης βασίστηκε στο σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων πραγματικής οδήγησης, τα οποία περιλάμβαναν μετακινήσεις τόσο κατά τις μεσημεριανές όσο και κατά τις βραδινές ώρες. Παρότι δεν αναπτύχθηκαν διακριτοί κύκλοι ανά χρονική ζώνη, η σχέση του τελικού κύκλου με τις διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας που χαρακτηρίζουν τις δύο περιόδους μπορεί να αξιολογηθεί μέσω ποιοτικής συσχέτισης με τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4.

Η ανάλυση των πραγματικών δεδομένων έδειξε ότι οι μεσημεριανές μετακινήσεις χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες μέσες ταχύτητες, αυξημένη παρουσία χαμηλών ταχυτήτων και μεγαλύτερη διακύμανση στα δυναμικά χαρακτηριστικά, ως αποτέλεσμα της αυξημένης κυκλοφοριακής φόρτισης. Αντίθετα, οι βραδινές μετακινήσεις παρουσίασαν υψηλότερες μέσες ταχύτητες και μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου σε μεταβατικές καταστάσεις, γεγονός που συνδέεται με συνθήκες ελεύθερης ροής και τη γεωμετρία της διαδρομής.

Ο τελικός κύκλος ενσωματώνει στοιχεία και από τις δύο αυτές χρονικές ζώνες χωρίς να ευνοεί αποκλειστικά καμία από τις δύο. Η παρουσία εκτεταμένων τμημάτων με μεσαίες ταχύτητες και συνεχόμενη ροή αντανακλά κυρίως τα χαρακτηριστικά της βραδινής οδήγησης, ενώ η διατήρηση χαμηλότερων ταχυτήτων και περιορισμένων περιόδων ακινησίας διασφαλίζει ότι εκπροσωπείται και η αστική συνιστώσα που παρατηρείται κατά τις μεσημεριανές ώρες. Με τον τρόπο αυτό, ο κύκλος λειτουργεί ως συνθετική αναπαράσταση της συνολικής οδηγικής συμπεριφοράς στη μελετώμενη διαδρομή.

Η επιλογή ανάπτυξης ενιαίου κύκλου, αντί διακριτών κύκλων ανά χρονική ζώνη κρίνεται σκόπιμη στο πλαίσιο της εργασίας, καθώς στόχος δεν ήταν η αναπαραγωγή συγκεκριμένων σεναρίων κυκλοφορίας, αλλά η αποτύπωση της μέσης και τυπικής συμπεριφοράς της οδήγησης στην Θάσο. Επιπλέον, στην πράξη οι διαφορετικές χρονικές ζώνες συνυπάρχουν στη συνολική χρήση του οδικού δικτύου, γεγονός που καθιστά τον ενιαίο κύκλο πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικής έκθεσης του οχήματος σε συνθήκες οδήγησης.

Συνεπώς, ο τελικός κύκλος μπορεί να θεωρηθεί ότι ενσωματώνει, σε ποιοτικό επίπεδο, τα κύρια χαρακτηριστικά τόσο της μεσημεριανής όσο και της βραδινής οδήγησης, χωρίς να απαιτείται η ανάπτυξη ξεχωριστών κύκλων. Η προσέγγιση αυτή διατηρεί τη

μεθοδολογική απλότητα και ενισχύει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων, στοιχείο που αποτελεί βασικό πλεονέκτημα για εφαρμογές αξιολόγησης και συγκριτικής ανάλυσης.

### **5.4.3. Περιορισμοί και παραδοχές της προσέγγισης**

Παρά το γεγονός ότι ο τελικός τοπικός κύκλος οδήγησης που αναπτύχθηκε παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό αντιπροσωπευτικότητας, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς και παραδοχές, οι οποίοι οφείλουν να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Βασική παραδοχή της προσέγγισης αποτελεί η επιλογή ανάπτυξης ενιαίου κύκλου οδήγησης, ο οποίος συντίθεται από δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές χρονικές ζώνες κυκλοφορίας. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στην αποτύπωση της συνολικής και τυπικής οδηγικής συμπεριφοράς στην μελετώμενη διαδρομή, ωστόσο δεν επιτρέπει την αναλυτική αναπαράσταση ειδικών σεναρίων κυκλοφορίας, όπως συνθήκες έντονης συμφόρησης ή αποκλειστικά ελεύθερης ροής. Ως εκ τούτου, ο κύκλος δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως αναπαράσταση συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, αλλά ως συνθετικής εικόνα της μέσης οδηγικής συμπεριφοράς.

Ένας επιπλέον περιορισμός σχετίζεται με τη μεθοδολογία σύνθεσης σε επίπεδο microtrips, όπου η ανάλυση και η επιλογή βασίστηκαν κυρίως σε χρονικά χαρακτηριστικά και όχι σε λεπτομερείς κινηματικούς ή δυναμικούς δείκτες. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη διαφάνεια και τη φυσική ερμηνευσιμότητα της διαδικασίας, ωστόσο ενδέχεται να περιορίζει την ακρίβεια με την οποία αναπαράγονται σπάνια ή ακραία οδηγικά επεισόδια, όπως πολύ έντονες επιταχύνσεις ή υψηλές στιγμιαίες ταχύτητες.

Επιπλέον, η επιλογή αξιολόγησης της κατανομής ταχυτήτων και της μεταβατικότητας σε συνολικό ή ποιοτικό επίπεδο, και όχι μέσω πλήρους ποσοτικής αντιστοίχισης όλων των δεικτών, συνιστά συνειδητή παραδοχή της παρούσας εργασίας. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην ανάγκη διατήρησης ισορροπίας μεταξύ ακρίβειας και πρακτικής εφαρμοσιμότητας, αλλά συνεπάγεται ότι μικρές αποκλίσεις σε επιμέρους μετρικές θεωρούνται αποδεκτές, εφόσον δεν αλλοιώνουν τον συνολικό χαρακτήρα της οδήγησης.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα πραγματικής οδήγησης προέρχονται από συγκεκριμένη διαδρομή και χρονική περίοδο, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε άλλες περιοχές ή διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Παρά τον περιορισμό αυτό, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παραμένει γενικεύσιμη και μπορεί να εφαρμοστεί, με κατάλληλη προσαρμογή, σε άλλα οδικά περιβάλλοντα ή γεωγραφικές περιοχές.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί και παραδοχές δεν αναιρούν την εγκυρότητα του τελικού κύκλου οδήγησης, αλλά προσδιορίζουν το πλαίσιο εφαρμογής και ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Η σαφής αναγνώρισή τους ενισχύει τη μεθοδολογική διαφάνεια της εργασίας και παρέχει σαφή κατεύθυνση για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις.

## **5.5. Σύγκριση του τοπικού κύκλου οδήγησης με ευρωπαϊκούς θεσμοθετημένους κύκλους**

Η σύγκριση του τοπικού κύκλου οδήγησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία με θεσμοθετημένους κύκλους αποτελεί ουσιώδες στάδιο αξιολόγησης, καθώς επιτρέπει την αποτίμηση του βαθμού στον οποίο οι τυποποιημένες διαδικασίες δοκιμών αποτυπώνουν τις πραγματικές συνθήκες οδήγησης στη μελετώμενη περιοχή.

Στο πλαίσιο αυτό, η σύγκριση επικεντρώνεται κυρίως στον κύκλο WLTP, ο οποίος αποτελεί το ισχύον ευρωπαϊκό πρότυπο, ενώ γίνονται και σύντομες αναφορές σε παλαιότερους κύκλους, όπως ο NEDC, για λόγους πληρότητας.

Η σύγκριση πραγματοποιείται σε ποιοτικό και δομικό επίπεδο, με βάση τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας, της μεταβατικότητας και της χρονικής κατανομής της οδήγησης, χωρίς να αποσκοπεί σε άμεση αναπαραγωγή των θεσμοθετημένων κύκλων ή σε εξαγωγή κανονιστικών συμπερασμάτων.

#### **5.5.1. Σύγκριση με τον κύκλο WLTP**

Ο κύκλος WLTP έχει σχεδιαστεί ώστε να αποτελεί βελτιωμένη αναπαράσταση της πραγματικής οδήγησης σε σχέση με τον προκάτοχό του, ενσωματώνοντας μεγαλύτερη διάρκεια, υψηλότερες ταχύτητες και αυξημένη μεταβατικότητα. Παρά τα βελτιωμένα αυτά χαρακτηριστικά, ο κύκλος παραμένει γενικευμένος, καθώς έχει ως στόχο την εφαρμογή του σε ευρύ φάσμα οχημάτων και γεωγραφικών περιοχών.

Σε σύγκριση με τον κύκλο WLTP, ο τοπικός κύκλος οδήγησης της Θάσου παρουσιάζει σαφείς διαφοροποιήσεις που απορρέουν από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μελετώμενης διαδρομής. Συγκεκριμένα, ο τοπικός κύκλος χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες μέσες ταχύτητες, περιορισμένη παρουσία πολύ υψηλών ταχυτήτων και χαμηλό ποσοστό χρόνου ακινησίας, στοιχεία που αντανakλούν την απουσία αυτοκινητοδρόμων και φωτεινών σηματοδοτών στο οδικό δίκτυο της περιοχής. Αντίθετα, ο WLTP περιλαμβάνει τμήματα που αντιστοιχούν σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας και μεγαλύτερης δυναμικής, οι οποίες δεν εμφανίζονται με την ίδια συχνότητα στη συγκεκριμένη διαδρομή.<sup>74</sup>

Επιπλέον, ο τοπικός κύκλος παρουσιάζει μεταβατικότητα που προκύπτει κυρίως από τη γεωμετρία της διαδρομής (στροφές, μικρά ευθύγραμμα τμήματα) και λιγότερο από έντονες μεταβολές ταχύτητας λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι, παρότι ο WLTP βελτιώνει σημαντικά τη ρεαλιστικότητα σε σχέση με παλαιότερα πρότυπα, εξακολουθεί να μην αποτυπώνει πλήρως τις συνθήκες οδήγησης σε νησιώτικα ή επαρχιακά περιβάλλοντα με ιδιαίτερη γεωμετρία.<sup>75</sup>

#### **5.5.2. Σχόλια σε σχέση με τον κύκλο NEDC**

Ο κύκλος NEDC, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για μεγάλο χρονικό διάστημα στην ευρωπαϊκή νομοθεσία, χαρακτηρίζεται από χαμηλή μεταβατικότητα, περιορισμένο εύρος ταχυτήτων και εκτεταμένες φάσεις σταθερής ταχύτητας. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν οδηγήσει σε ευρέως τεκμηριωμένες αποκλίσεις μεταξύ εργαστηριακών και πραγματικών συνθηκών οδήγησης.

Σε σύγκριση με τον NEDC, ο τοπικός κύκλος οδήγησης της Θάσου εμφανίζει σαφώς πιο ρεαλιστική δομή, με συνεχείς μεταβολές της ταχύτητας και περιορισμένη παρουσία τεχνητών φάσεων σταθερής κίνησης. Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της χρήσης δεδομένων πραγματικής οδήγησης για την ανάπτυξη κύκλων που αντανakλούν καλύτερα την πραγματική λειτουργία του οχήματος, ακόμη και σε περιβάλλοντα χαμηλής κυκλοφοριακής συμφόρησης.<sup>76</sup>

<sup>74</sup> UNECE, *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*.

<sup>75</sup> 'Comparison of WLTP and real-world emissions'.

<sup>76</sup> International Council on Clean Transportation, *From NEDC to WLTP: effect on emissions*.

### 5.5.3. Συνολική αποτίμηση της σύγκρισης

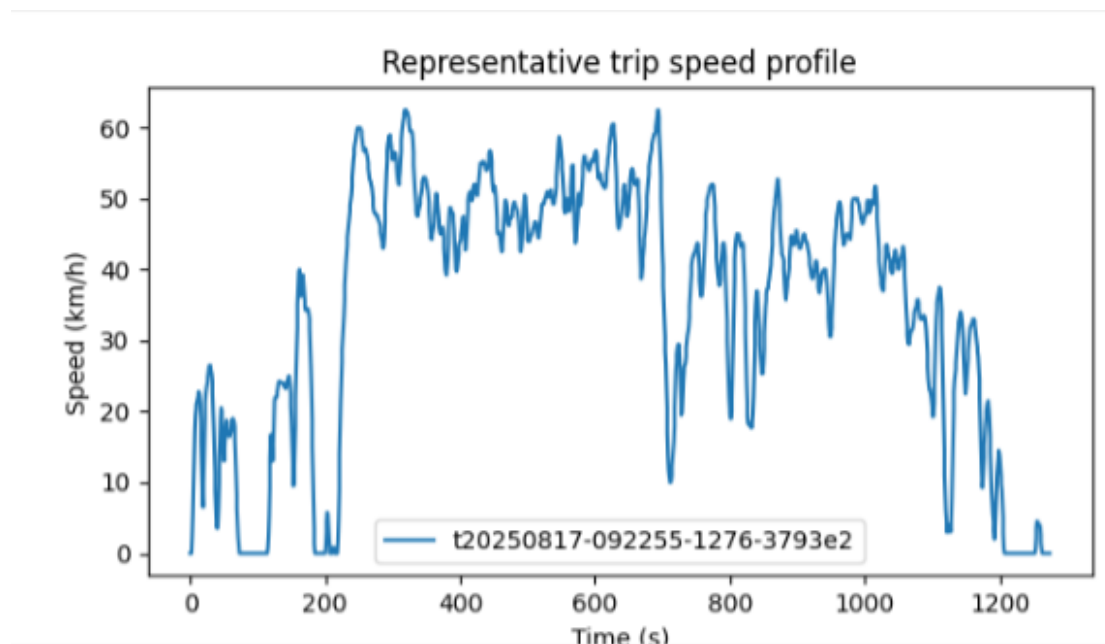
Η σύγκριση του τοπικού κύκλου οδήγησης με θεσμοθετημένους κύκλος καταδεικνύει ότι, παρά τις βελτιώσεις που έχουν εισαχθεί στα σύγχρονα πρότυπα, οι γενικευμένοι κύκλοι αδυνατούν να αποτυπώσουν πλήρως τις ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων γεωγραφικών και κυκλοφοριακών περιβαλλόντων. Ο τοπικός κύκλος της Θάσου αντανakλά με μεγαλύτερη ακρίβεια τη δομή και τη δυναμική της πραγματικής οδήγησης στη μελετώμενη διαδρομή, χωρίς να εισάγει μη ρεαλιστικά χαρακτηριστικά.

Η παρατήρηση αυτή δεν υποδηλώνει ανεπάρκεια των θεσμοθετημένων κύκλων, αλλά αναδεικνύει τον συμπληρωματικό ρόλο των τοπικών κύκλων οδήγησης. Ενώ οι τυποποιημένοι κύκλοι είναι απαραίτητοι για την συγκρισιμότητα και κανονιστική αξιολόγηση, οι τοπικοί κύκλοι μπορούν να προσφέρουν πολύτιμη πληροφόρηση για εφαρμογές που απαιτούν αυξημένο βαθμό ρεαλισμού, όπως η ανάλυση κατανάλωσης και εκπομπών σε συγκεκριμένες περιοχές.

### 5.6. Σύγκριση με εναλλακτική προσέγγιση αντιπροσωπευτικής διαδρομής

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάπτυξη του κύκλου οδήγησης βασίστηκε στη μέθοδο σύνθεσης microtrips, με στόχο τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού προφίλ οδήγησης μέσω συνδυασμού επιμέρους τμημάτων πραγματικών διαδρομών. Παράλληλα, εξετάστηκε και μια εναλλακτική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία επιλέγεται μια και μοναδική διαδρομή από το σύνολο των καταγεγραμμένων δεδομένων ως η πλέον αντιπροσωπευτική.

Η επιλογή της αντιπροσωπευτικής διαδρομής πραγματοποιήθηκε με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού του οποίου τα αποτελέσματα δόθηκαν από τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας, στο οποίο εφαρμόζεται σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών κάθε διαδρομής, όπως η μέση και η μέγιστη ταχύτητα, το ποσοστό στάσης και την διάρκεια διαδρομής. Η διαδρομή με την μεγαλύτερη ομοιότητα με τους γενικούς μέσους όρους επιλέχθηκε ως η πλέον αντιπροσωπευτική και χρησιμοποιείται αυτούσια ως προφίλ οδήγησης.



Γράφημα 14: Αντιπροσωπευτική διαδρομή βάσει εναλλακτικής μεθόδου επιλογής

Η προσέγγιση της αντιπροσωπευτικής διαδρομής παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι βασίζεται αποκλειστικά σε πραγματικά δεδομένα, διατηρώντας πλήρως τη φυσική συνέχεια και τη δυναμική της οδήγησης, χωρίς να απαιτείται σύνθεση επιμέρους τμημάτων. Ωστόσο, περιορίζεται από το γεγονός ότι αντιστοιχεί σε μία μόνο καταγραφή, η οποία ενδέχεται να μην αποτυπώνει πλήρως τη συνολική μεταβλητότητα των συνθηκών οδήγησης.

Αντίθετα, η μέθοδος σύνθεσης κύκλου μέσω microtrips, η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, επιτρέπει τον συνδυασμό δεδομένων από πολλαπλές διαδρομές, οδηγώντας σε ένα πιο γενικευμένο και στατιστικά αντιπροσωπευτικό προφίλ. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο της διάρκειας και των χαρακτηριστικών του κύκλου, με τίμημα την εισαγωγή ενός βαθμού τεχνητής σύνθεσης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων, διαπιστώνεται ότι και οι δύο αποδίδουν ρεαλιστικά προφίλ οδήγησης, ωστόσο εξυπηρετούν διαφορετικούς στόχους. Η αντιπροσωπευτική διαδρομή παρέχει μια άμεση και πλήρως φυσική απεικόνιση της οδήγησης, ενώ ο συνθετικός κύκλος μέσω microtrips επιτρέπει τη δημιουργία ενός πιο ελεγχόμενου προφίλ, κατάλληλου για συγκριτικές και αναλυτικές εφαρμογές.

Συνολικά, οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να θεωρηθούν συμπληρωματικές, καθώς η πρώτη δίνει έμφαση στη ρεαλιστική αποτύπωση μίας συγκεκριμένης διαδρομής, ενώ η δεύτερη στη γενίκευση της οδηγικής συμπεριφοράς βάσει συνδυασμού δεδομένων.

## **6. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

### **6.1. Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση τοπικού κύκλου οδήγησης βάσει πραγματικών δεδομένων μετακίνησης επιβατικού οχήματος στη Θάσο. Η εργασία συνδύασε θεωρητική ανάλυση, πειραματική συλλογή δεδομένων και μεθοδολογική ανάπτυξη κύκλου οδήγησης, με στόχο την αποτύπωση της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς σε ένα ιδιαίτερο νησιωτικό οδικό περιβάλλον.

Αρχικά, μέσω της ανάλυσης των πρωτογενών δεδομένων πραγματικής οδήγησης, διερευνήθηκαν τα βασικά κινηματικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της διαδρομής, καθώς και οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ μεσημεριανών και βραδινών χρονικών ζωνών. Η ανάλυση ανέδειξε ότι, παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις στη μέση ταχύτητα και στη δυναμική της κίνησης, η συνολική δομή της οδήγησης χαρακτηρίζεται από περιορισμένο ποσοστό στάσεων, συνεχή ροή και έντονη επίδραση της γεωμετρίας της διαδρομής.

Παράλληλα, η ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας του κινητήρα ανέδειξε τη σημαντική επίδραση των στροφών και του φορτίου κινητήρα στην κατανάλωση καυσίμου. Η συσχέτιση που προέκυψε μεταξύ των μεταβλητών επιβεβαιώνει ότι η κατανάλωση αποτελεί πολυπαραγοντικό μέγεθος, το οποίο εξαρτάται από τη δυναμική της οδήγησης και τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα σε πραγματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένας ενιαίος τοπικός κύκλος οδήγησης, αξιοποιώντας βιβλιοθήκη microtrips που προέκυψε από τα πραγματικά δεδομένα οδήγησης. Η

επιλογή ανάπτυξης ενιαίου κύκλου αποτέλεσε συνειδητή μεθοδολογική απόφαση, με στόχο την αποτύπωση της συνολικής και τυπικής οδηγικής συμπεριφοράς στη μελετώμενη περιοχή. Η διαδικασία σύνθεσης επέτρεψε τη δημιουργία ενός κύκλου με συνεκτική δομή, πεπερασμένη διάρκεια και χαρακτηριστικά συμβατά με τα πραγματικά δεδομένα.

Επισημαίνεται ότι ο τελικός τοπικός κύκλος οδήγησης βασίζεται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την τουριστική περίοδο αιχμής, γεγονός που επηρεάζει τη μέση ταχύτητα και τη δυναμική της κίνησης. Συνεπώς, ο παραγόμενος κύκλος αποτυπώνει ρεαλιστικά συνθήκες αυξημένης κυκλοφοριακής φόρτισης, οι οποίες χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του οδικού δικτύου της Θάσου κατά τους θερινούς μήνες.

Υπό το πρίσμα αυτό, ο κύκλος δεν αποσκοπεί στην αναπαραγωγή συνθηκών ελεύθερης ροής, αλλά στη ρεαλιστική αναπαράσταση της τυπικής οδηγικής συμπεριφοράς σε περίοδο έντονης χρήσης του οδικού δικτύου, στοιχείο που ενισχύει τη χρησιμότητά του για εφαρμογές αξιολόγησης και συγκριτικής ανάλυσης.

Ο έλεγχος αντιπροσωπευτικότητας έδειξε ότι ο τελικός κύκλος διατηρεί σε ικανοποιητικό βαθμό τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης, όπως η μέση ταχύτητα, το χαμηλό ποσοστό χρόνου ακινησίας και η δομή της κατανομής ταχυτήτων. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις κρίνονται αναμενόμενες και αποδεκτές, καθώς απορρέουν από τη διαδικασία συμπύκνωσης των δεδομένων και δεν αλλοιώνουν τον συνολικό χαρακτήρα της οδήγησης.

Η σύγκριση του τοπικού κύκλου με θεσμοθετημένους κύκλους οδήγησης, όπως ο WLTP, ανέδειξε τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν όταν εφαρμόζονται γενικευμένα πρότυπα σε ειδικά γεωγραφικά περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι οι τοπικοί κύκλοι οδήγησης μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά προς τα τυποποιημένα πρότυπα, προσφέροντας αυξημένο βαθμό ρεαλισμού σε εφαρμογές που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές.

Συνολικά η εργασία καταδεικνύει ότι η αξιοποίηση των δεδομένων πραγματικής οδήγησης και η ανάπτυξη τοπικών κύκλων μπορούν να συμβάλλουν ουσιαστικά στην κατανόηση και την ακριβέστερη αποτύπωση της λειτουργίας των οχημάτων σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα, όπως τα νησιώτικα οδικά δίκτυα.

## **6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Με βάση τα αποτελέσματα και τους περιορισμούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν ορισμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, οι οποίες θα μπορούσαν να επεκτείνουν και να ενισχύσουν τα συμπεράσματά της.

Μια πρώτη κατεύθυνση αφορά την ανάπτυξη διακριτών κύκλων οδήγησης ανά χρονική ζώνη ή ανά εποχιακή περίοδο, ώστε να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η επίδραση της κυκλοφοριακής φόρτισης και του τουρισμού στη δομή της οδήγησης. Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο εξειδικευμένους κύκλους, κατάλληλους για συγκεκριμένα σενάρια χρήσης.

Επιπλέον, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ενσωματώσει πιο προηγμένους δείκτες δυναμικής οδήγησης, όπως αναλυτικούς δείκτες μεταβατικότητας ή επιτάχυνσης, καθώς και μεθόδους αυτόματης ομαδοποίησης microtrips μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν δυνατή η περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας και της αναπαραστατικότητας των παραγόμενων κύκλων.

Μια ακόμη προοπτική αφορά τη σύνδεση του τοπικού κύκλου οδήγησης με μετρήσεις κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών, είτε μέσω πειραματικών μετρήσεων είτε μέσω προσομοιώσεων. Η προσέγγιση αυτή θα επέτρεπε την άμεση αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης της οδήγησης στη μελετώμενη περιοχή και τη σύγκριση με αποτελέσματα που προκύπτουν από θεσμοθετημένους κύκλους.

Τέλος, η εφαρμογή της ίδιας μεθοδολογίας σε άλλες γεωγραφικές περιοχές ή σε διαφορετικού τύπου οδικά δίκτυα θα μπορούσε να αναδείξει τον βαθμό γενικευσιμότητας της προσέγγισης και να συμβάλλει στη δημιουργία βάσης δεδομένων τοπικών κύκλων οδήγησης για διαφορετικά περιβάλλοντα.

## Βιβλιογραφία

- ‘Analysis of driving patterns and car usage for real-world emission estimation’. *Transportation Research Part D*, advance online publication, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.07.005>.
- André, Michel. ‘The Artemis European driving cycles for measuring car pollutant emissions’. *Science of the Total Environment*, advance online publication, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.070>.
- ‘Comparison of WLTP and real-world emissions’. *Environmental Science and Technology*, advance online publication, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04589>.
- Construction of real-world driving cycles using microtrips*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.012>.
- ‘Construction of real-world driving cycles using microtrips’. *Energy Conversion and Management*, advance online publication, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.012>.
- Delphi Technologies. *Worldwide Emission Standards: Passenger Cars and Light Duty Vehicles*. 2017.
- ‘Driving cycle construction using clustering techniques’. *Energy*, advance online publication, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.059>.
- Elm Electronics. *ELM327 OBD-II Adapter Datasheet and User Manual*. 2014. <https://www.elmelectronics.com>.
- European Commission. *Euro 7 Proposal*. 2022. <https://ec.europa.eu>.
- European Environment Agency. *Air Pollution Impacts in Europe*. 2022. <https://www.eea.europa.eu>.
- ‘Evaluation of driving cycle representativeness’. *Transportation Research Part D*, advance online publication, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.004>.
- Gillespie, Thomas. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1992.
- Ian Hawkins. ‘Torque Pro (OBD 2 & Car) User Guide’. 2020. <https://torque-bhp.com>.

- International Council on Clean Transportation. *From NEDC to WLTP: effect on emissions*. 2016. <https://theicct.org>.
- Montgomery, Douglas. *Introduction to Statistical Quality Control*. 2012.
- ‘On-road driving behavior analysis’. *Transportation Research Part F*, advance online publication, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.001>.
- Peugeot. ‘Peugeot 307 Technical Specifications (2007 Diesel Models)’. 2007.
- Real-world vehicle emissions and driving cycles*. 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3221>.
- Regulation (EU) 2016/427*. 2016. <https://eur-lex.europa.eu>.
- Regulation (EU) 2017/1151*. 2017. <https://eur-lex.europa.eu>.
- SAE International. *OBD-II Scan Tool Requirements and Specifications (SAE J1979)*. 2012.
- ‘Synthesis of driving cycles using Markov chains’. *Transportation Research Part D*, advance online publication, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.10.003>.
- UNECE. *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*. 2019.
- United States Environmental Protection Agency. *Dynamometer Drive Schedules (FTP-75)*. 2008. <https://www.epa.gov>.
- ‘Vehicle driving cycle analysis for fuel consumption and emissions’. *Applied Energy*, advance online publication, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.089>.
- World Health Organization. *WHO Global Air Quality Guidelines*. 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.