

# Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

της Έλενας Μαντούκα, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

## «Κυκλοφοριακά Πρότυπα Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης για Προσωποποιημένες Συστάσεις Οδήγησης»

### Εισαγωγή

Το αστικό δίκτυο μεταφορών έχει αλλάξει δραστικά τα τελευταία χρόνια λόγω των ποικίλων εναλλακτικών μετακίνησης που προσφέρονται στους μετακινούμενους, οι οποίες μαζί με τις καινοτομίες στον τομέα των Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) ανατρέπουν τις πολιτικές διαχείρισης της κυκλοφορίας και του δικτύου. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής καλούνται να επανεξετάσουν τα ισχύοντα μέτρα και τις στρατηγικές διαχείρισης του δικτύου ώστε να λάβουν υπόψη τις απαιτήσεις για αυτοματοποίηση και συνεργατικότητα των σύγχρονων υπηρεσιών μετακίνησης, αλλά και τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για πράσινες και βιώσιμες λύσεις κινητικότητας. Ακόμα και σε αυτό το πολύπλοκο και διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, ο οδηγός βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, η κατανόηση της λήψης αποφάσεων κατά την οδήγηση, καθώς και η διερεύνηση των συνηθειών οδήγησης που υιοθετούν οι οδηγοί παραμένει ενεργό πεδίο έρευνας.

Η επικίνδυνη οδήγηση έχει συνδεθεί με αυξημένο ρίσκο και γι' αυτό η βελτίωση της συμπεριφοράς οδήγησης θεωρείται κρίσιμη για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Επιπλέον, προηγούμενες έρευνες έχουν υπονοήσει ότι η βελτίωση της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης μπορεί να επιφέρει και βελτίωση των συνθηκών κυκλοφορίας. Παρόλα αυτά όμως, δεν έχουν παρασχεθεί στοιχεία που να μπορούν να υποστηρίξουν αυτή την πεποίθηση και οι συνέπειες της προσαρμογής της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης σε επίπεδο δικτύου εξακολουθούν να παραμένουν ασαφείς.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα δύο βασικά κίνητρα για την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής υπήρξαν τα ακόλουθα: 1) η ανάγκη σχεδιασμού ενός συστήματος υποβοήθησης του οδηγού που θα αντιμετωπίζει τον ίδιο ως μονάδα και θα προσαρμόζεται στις προσωπικές ανάγκες και προτιμήσεις του και 2) η ανάγκη εκτίμησης του πραγματικού αντικτύπου της εφαρμογής ενός συστήματος παροχής εξατομικευμένων συστάσεων οδήγησης στις διάφορες πτυχές του οδικού δικτύου.

### Στόχοι της διατριβής και ερευνητικά ερωτήματα

Ο κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι να σχεδιάσει ένα εξατομικευμένο σύστημα συστάσεων οδήγησης το οποίο βασίζεται σε αλγόριθμους βαθιάς ενισχυτικής μάθησης και στοχεύει στη βελτίωση της συμπεριφοράς οδήγησης μέσω

του μετριάσμου της επιθετικότητας και άλλων μη ασφαλών συνηθειών οδήγησης. Στη συνέχεια, αξιολογούνται οι επιπτώσεις του ελέγχου της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης όσον αφορά την απόδοση του δικτύου και την οδική ασφάλεια, καθώς και τα επίπεδα επιβλαβών εκπομπών, προσαρμόζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους των κυκλοφοριακών μοντέλων σε ένα ευρύ σενάριο προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Αυτός ο στόχος της διδακτορικής διατριβής μπορεί να αποδομηθεί σε τρεις επιμέρους στόχους:

1. Αξιοποίηση δεδομένων πραγματικής οδήγησης που συλλέγονται από αισθητήρες κινητών τηλεφώνων για την κατανόηση της συμπεριφοράς οδήγησης
2. Ανάπτυξη ενός πλαισίου παροχής συστάσεων για βελτιωμένη οδήγηση συμβατό με τις αρχές της θεωρίας της κυκλοφοριακής ροής
3. Αξιολόγηση της επιρροής του συστήματος στην κυκλοφορία, την ασφάλεια και τις εκπομπές.

Η έννοια της ανάλυσης της συμπεριφοράς οδήγησης δεν είναι καινούργια και για αυτό το λόγο διεξήχθη μια εκτενής ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας με στόχο αφενός να εντοπιστούν τα κενά της έρευνας και αφετέρου να επισημανθούν οι προκλήσεις και οι περιορισμοί που προκύπτουν όταν αξιοποιούνται δεδομένα που προέρχονται από το πλήθος. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είχε ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση των ακόλουθων ερευνητικών ερωτημάτων:

1. Ποια είναι τα κύρια προφίλ οδήγησης που καλύπτουν το ευρύ φάσμα της συμπεριφοράς οδήγησης και πώς μπορούν να εντοπιστούν μέσω της αξιοποίησης δεδομένων που συλλέγονται μέσω έξυπνων κινητών τηλεφώνων;
2. Μπορεί η συνολική συμπεριφορά οδήγησης των οδηγών να κατηγοριοποιηθεί σε ομάδες που θα εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά οδήγησης, και αν ναι, σε ποιο βαθμό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αυτές οι συμπεριφορές;
3. Θα μπορούσαν οι τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) να αξιοποιηθούν στα πλαίσια ενός συστήματος παραγωγής συστάσεων στους οδηγούς και να εξασφαλίσουν τον απαιτούμενο βαθμό εξατομίκευσης των ενεργειών οδήγησης που προτείνονται σε κάθε χρήστη;
4. Ποιος είναι ο πιο κατάλληλος αλγόριθμος Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning) που μπορεί να υποστηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων του ατόμου;
5. Υπάρχει σύνδεση μεταξύ της ενίσχυσης της ευαισθητοποίησης του ατόμου και της καθολικής βελτίωσης του δικτύου; Σε ποιο βαθμό μπορεί η βελτίωση της συμπεριφοράς οδήγησης να επηρεάσει τις συνθήκες του δικτύου;
6. Τι είδους επιπτώσεις θα είχε η διαχείριση της ατομικής συμπεριφοράς στην οδήγηση και την ασφάλεια;

7. Πώς επηρεάζονται οι εκπομπές από τον έλεγχο της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης; Υπάρχει σημαντική αλλαγή στις περιβαλλοντικές συνθήκες όταν οι οδηγοί βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους;

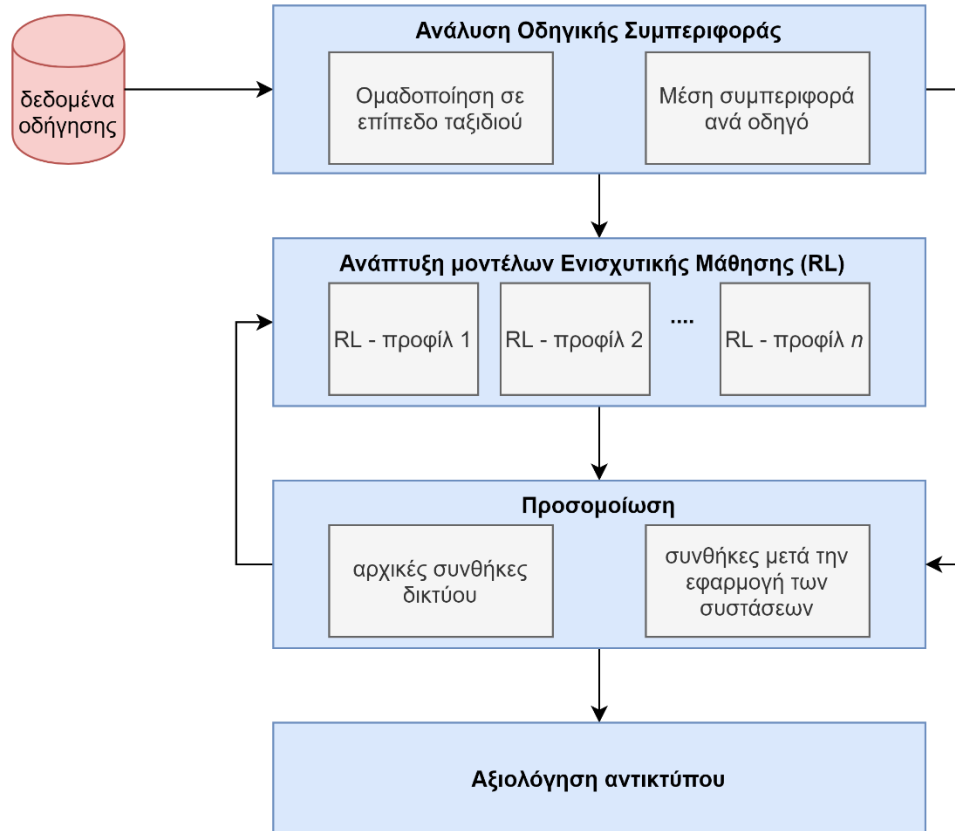
### Μεθοδολογική προσέγγιση

Το μεθοδολογικό πλαίσιο για την παροχή συστάσεων οδήγησης, που προτείνεται στο πλαίσιο αυτής της διατριβής, είναι βασικά ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τους οδηγούς που στοχεύει στο μετριασμό της επιθετικότητας και της ανάληψης ρίσκου. Η οδήγηση είναι μια πολύπλοκη εργασία, δεδομένου ότι απαιτεί από τον οδηγό να λάβει τόσο στρατηγικές όσο και δυναμικές αποφάσεις καθώς και να προσαρμόσει τη συμπεριφορά του στις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Σε αντίθεση με τα ήδη αναπτυγμένα συστήματα υποβοήθησης του οδηγού (Advanced Driving Assistance Systems – ADAS), το προτεινόμενο σύστημα έχει τα ακόλουθα τρία καινοτόμα χαρακτηριστικά:

- Είναι εξατομικευμένο, που σημαίνει ότι προτείνει τις καλύτερες ενέργειες οδήγησης σε κάθε άτομο λαμβάνοντας υπόψη τις προσωπικές απαιτήσεις και προτιμήσεις οδήγησης.
- Έχει αυτο-γνώση (self-awareness), που σημαίνει ότι το σύστημα λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη συμπεριφορά κάθε μεμονωμένου οδηγού προκειμένου να προτείνει τις καταλληλότερες συστάσεις οδήγησης.
- Είναι αυτόνομο, που σημαίνει ότι δεν απαιτεί καμία εξωγενή πληροφορία από το δίκτυο ή την κυκλοφορία. Οι συστάσεις οδήγησης στοχεύουν στη βελτίωση της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης στον πυρήνα της, δηλαδή στις αποφάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.

Η ανάπτυξη του συστήματος συστάσεων βασίζεται σε έναν αλγόριθμο Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης ο οποίος είναι ικανός να παράγει τη βέλτιστη μεταβολή της συμπεριφοράς για κάθε οδηγό δεδομένου του τρόπου με τον οποίο οδήγησε στην τελευταία διαδρομή του.

Προκειμένου να απαντηθούν τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν και να επιτευχθεί ο πρωταρχικός στόχος της διατριβής, προτείνεται ένα περιεκτικό μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο βασίζεται σε ένα μείγμα αλγορίθμων μάθησης χωρίς επίβλεψη και βαθιάς ενισχυτικής μάθησης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



**Σχήμα I. Μεθοδολογικό πλαίσιο**

Ξεκινώντας από πρωτογενείς μετρήσεις θέσης, επιτάχυνσης και ταχύτητας, όπως αυτές συλλέχθηκαν μέσω των αισθητήρων των έξυπνων κινητών τηλεφώνων χρησιμοποιώντας την εφαρμογή τηλεματικής της Oseven ([www.oseven.io](http://www.oseven.io)) προσδιορίστηκαν παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά κατά την οδήγηση, τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα. Στη συνέχεια, αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται σε ένα πλαίσιο μάθησης χωρίς επίβλεψη για τον εντοπισμό προφίλ οδήγησης που μπορούν να περιγράψουν τη συνολική συμπεριφορά οδήγησης κάθε οδηγού (E1, E2). Η συμπεριφορά οδήγησης ορίζεται σε δύο επίπεδα:

- σε επίπεδο διαδρομής, το οποίο αντιστοιχεί στον τρόπο με τον οποίο ο οδηγός οδήγησε σε μια συγκεκριμένη διαδρομή, και
- σε επίπεδο χρήστη, το οποίο αντιστοιχεί στη συνολική συμπεριφορά οδήγησης ενός συγκεκριμένου οδηγού σε όλα τα ταξίδια του (αποτύπωμα οδήγησης).

Για τον προσδιορισμό των διάφορων προφίλ οδήγησης που διέπουν τη συμπεριφορά οδήγησης σε κάθε διαδρομή, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης k-means σε δύο διακριτά επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο εντοπίζεται η επιθετικότητα κατά την οδήγηση, ενώ στο δεύτερο επίπεδο προσδιορίζονται επιπρόσθετα άλλες μη ασφαλείς συμπεριφορές οδήγησης, όπως η οδήγηση πάνω από το όριο ταχύτητας (ανάληψη ρίσκου) και η απόσπαση προσοχής. Αποτέλεσμα

αυτής της διαδικασίας είναι η αντιστοίχιση κάθε εκτελεσθείσας διαδρομής με ένα συγκεκριμένο προφίλ οδήγησης (E1). Στη συνέχεια, υπολογίζοντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά όλων των διαδρομών κάθε οδηγού, προσδιορίζεται η μέση συμπεριφορά του καθενός (E2).

Από τη στιγμή που θα οριστεί η μέση συμπεριφορά των οδηγών, οι τελευταίοι χωρίζονται σε ομάδες με τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε ομάδα να ανήκουν οδηγοί με κοινά χαρακτηριστικά οδήγησης. Έπειτα, σχεδιάζεται το σύστημα παροχής συστάσεων οδήγησης το οποίο ενσωματώνει έναν αλγόριθμο Ενισχυτικής Μάθησης που έχει ως στόχο να «μάθει» τη βέλτιστη πολιτική και να προτείνει την κατάλληλη δράση που οδηγεί στην καλύτερη δυνατή συμπεριφορά οδήγησης (E3). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η δράση που προτείνεται αφορά στην προσαρμογή των κινηματικών χαρακτηριστικών του οχήματος δηλαδή της ταχύτητας και της επιτάχυνσης τα οποία εκτείνονται σε ένα συνεχές εύρος τιμών. Για αυτό το λόγο, η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου ενισχυτικής μάθησης θα πρέπει να ικανοποιεί την ανάγκη διαχείρισης δράσεων που λαμβάνουν συνεχείς τιμές (E4). Έτσι, επιλέγεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου που ακολουθεί την προσέγγιση "actor-critic" και συγκεκριμένα αναπτύσσεται ο αλγόριθμος Deep Deterministic Policy Gradient, ο οποίος ενσωματώνει δύο βαθιά νευρωνικά δίκτυα, οι υπερπαραμέτροι και η δομή των οποίων προκύπτουν μετά από συγκριτική αξιολόγηση των πιθανών συνδυασμών. Ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας ακολουθίες διαδρομών οδήγησης του ίδιου οδηγού ως είσοδο, ενώ η έξοδος του αλγορίθμου, δηλαδή η προτεινόμενη ενέργεια, είναι η βέλτιστη αλλαγή στην επιτάχυνση κάθε οδηγού, δεδομένου του τρόπου με τον οποίο οδήγησε στην προηγούμενη διαδρομή του.

Η δομή του συστήματος είναι τέτοια ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση με λογικές μικροσκοπικής προτυποποίησης και ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής. Σε αντιστοίχιση με τα ευρέως διαδεδομένα πρότυπα ακολουθούντος οχήματος (car following models), ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί ως μια συνάρτηση εκτίμησης και πρόβλεψης της επιτάχυνσης με την οποία το όχημα πρέπει να κινηθεί.

Το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την αξιολόγηση της επιρροής που θα έχει η βελτίωση της ατομικής συμπεριφοράς τόσο στο σύνολο της κυκλοφορίας, όσο και στην οδική ασφάλεια και το περιβάλλον (E5, E6, E7). Για το σκοπό αυτό ορίστηκε ένα σενάριο προσομοίωσης που αφορά στην πρωινή ώρα αιχμής αξιοποιώντας το οδικό δίκτυο της Αθήνας. Για την εκτίμηση της επιρροής ακολουθήθηκε μια προσέγγιση «πριν και μετά», όπου στις αρχικές συνθήκες του δικτύου η κυκλοφορία απαρτίζεται από οχήματα που κινούνται με βάση τα χαρακτηριστικά των προφίλ οδήγησης που ορίστηκαν στο πρώτο βήμα της μεθοδολογίας ενώ στο δεύτερο γύρο προσομοίωσης τα οχήματα κινούνται με βάση τις συστάσεις που παρήγαγε το μοντέλο ενισχυτικής μάθησης για κάθε οδηγό.

## Δεδομένα οδήγησης

Για τις ανάγκες της εν λόγω έρευνας αξιοποιήθηκαν δεδομένα πραγματικής οδήγησης που συλλέχθηκαν μέσω μιας εφαρμογής τηλεματικής που αναπτύσσεται από την Oseven telematics. Η βάση δεδομένων περιλάμβανε 153.953 διαδρομές που πραγματοποιήθηκαν από 696 μοναδικούς οδηγούς από το Δεκέμβριο 2017 έως τον Αύγουστο 2019. Οι διαδρομές πραγματοποιήθηκαν στο οδικό δίκτυο της Ελλάδας, όμως η πλειοψηφία αυτών αφορά σε διαδρομές εντός του νομού Αττικής. Για κάθε διαδρομή, ήταν διαθέσιμες μια πληθώρα παραμέτρων που περιλαμβάνουν στατιστικά της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, μετρήσεις ταχύτητας και δείκτες απόσπασης της προσοχής όπως η διάρκεια χρήσης του κινητού τηλεφώνου κατά την οδήγηση. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη διατριβή παρουσιάζονται στον Πίνακα I.

**Πίνακας I. Παράμετροι οδήγησης ανά διαδρομή**

Όνομα μεταβλητής	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
<b>harsh_acc_per_min</b>	Μέσος αριθμός απότομων επιταχύνσεων ανά λεπτό	συμβάντα/λεπτό
<b>acc_avg</b>	Μέση επιτάχυνση	m/s <sup>2</sup>
<b>acc_std</b>	Τυπική απόκλιση επιτάχυνσης	m/s <sup>2</sup>
<b>acc_q90</b>	90% της επιτάχυνσης	m/s <sup>2</sup>
<b>acc_max</b>	Μέγιστη επιτάχυνση	m/s <sup>2</sup>
<b>harsh_brk_per_min</b>	Μέσος αριθμός απότομων επιβραδύνσεων ανά λεπτό	συμβάντα/λεπτό
<b>dec_avg</b>	Μέση επιβράδυνση	m/s <sup>2</sup>
<b>dec_std</b>	Τυπική απόκλιση επιβράδυνσης	m/s <sup>2</sup>
<b>dec_q90</b>	90% της επιβράδυνσης	m/s <sup>2</sup>
<b>dec_max</b>	Μέγιστη επιβράδυνση	m/s <sup>2</sup>
<b>speed_max</b>	Μέγιστη ταχύτητα	km/h
<b>mbu</b>	Ποσοστό χρόνου οδήγησης με χρήση κινητού	%
<b>speeding_percentage</b>	Ποσοστό χρόνου οδήγησης με ταχύτητα πάνω από το όριο	%

Όλα τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν, δόθηκαν από την Oseven σε πλήρως ανώνυμη μορφή. Ο Πίνακας II παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε.

**Πίνακας II. Βασικά χαρακτηριστικά του δείγματος της διατριβής**

	Σύνολο	Ασφαλείς διαδρομές	Μη ασφαλείς διαδρομές
<b>Αριθμός διαδρομών</b>	153.953	66.566	87.387
<b>Αριθμός οδηγών</b>	696	197	499
<b>Μέσος αριθμός διαδρομών ανά οδηγό</b>		221	
<b>Ελάχιστος αριθμός διαδρομών ανά οδηγό</b>		16	
<b>Μέσος όρος χιλιομέτρων οδήγησης ανά οδηγό</b>		2.510 km	

## Ανάλυση συμπεριφοράς οδήγησης

Για την επίτευξη του πρώτου στόχου της διδακτορικής διατριβής, ο οποίος είναι η αναγνώριση της συμπεριφοράς οδήγησης από δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες των έξυπνων κινητών τηλεφώνων και συλλέγονται απευθείας από το πλήθος, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος ομαδοποίησης k-means σε δύο διακριτά επίπεδα.

Στο πρώτο επίπεδο της ομαδοποίησης, ο αριθμός των συστάδων ορίστηκε  $k=2$  κι ο πίνακας αποστάσεων εκτιμήθηκε με βάση την Ευκλείδεια απόσταση. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το επίπεδο της ομαδοποίησης περιγράφουν τον αριθμό των απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, καθώς και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης. Τα σχετικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα III.

**Πίνακας III. Αποτελέσματα πρώτου επιπέδου ομαδοποίησης**

	Απότομες επιταχύνσεις ανά λεπτό	Απότομες επιβραδύνσεις ανά λεπτό	Μέση επιτάχυνση	Τυπική απόκλιση επιτάχυνσης	Μέγιστη επιτάχυνση	Μέση επιβράδυνση	Τυπική απόκλιση επιβράδυνσης	Μέγιστη επιβράδυνση	Αριθμός διαδρομών
<b>Επιθετικές διαδρομές</b>	0,150	0,2081	1,748	1,525	3,847	-1,968	1,843	-4,547	71.263
<b>Μη επιθετικές διαδρομές</b>	0,028	0,051	1,137	1,052	2,503	-1,282	1,286	-2,926	82.690

Σύμφωνα με τα κέντρα των ομάδων, οι διαδρομές μπορούν να διακριθούν σε επιθετικές και μη-επιθετικές, μιας και οι διαδρομές που ανήκουν στην πρώτη ομάδα χαρακτηρίζονται από επιθετικότητα κατά την οδήγηση όπως προκύπτει από τις μεγάλες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, αλλά και το μεγαλύτερο αριθμό απότομων συμβάντων συγκριτικά με τις διαδρομές της δεύτερης ομάδας.

Το δεύτερο επίπεδο ομαδοποίησης k-means εφαρμόστηκε ξεχωριστά στις δύο ομάδες που προέκυψαν από το πρώτο επίπεδο ομαδοποίησης χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους οδήγησης: το ποσοστό οδήγησης με χρήση κινητού και το ποσοστό οδήγησης με ταχύτητα πάνω από το όριο ταχύτητας. Τα αποτελέσματα αυτού του δεύτερου επιπέδου ομαδοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα IV.

**Πίνακας IV. Αποτελέσματα δεύτερου επιπέδου ομαδοποίησης**

	Ποσοστό οδήγησης με χρήση κινητού τηλεφώνου	Ποσοστό οδήγησης με ταχύτητα πάνω από το όριο	Αριθμός διαδρομών
<b>Επιθετικές διαδρομές</b>			
<b>Απόσπαση προσοχής</b>	0,511	0,062	4.505 (2,9%)
<b>Επιθετικότητα</b>	0,019	0,032	54.394 (35,3%)
<b>Ανάληψη ρίσκου</b>	0,023	0,269	12.364 (8%)

Μη-επιθετικές διαδρομές			
Ανάληψη ρίσκου	0,021	0,306	12.494 (8,1%)
Τυπική οδήγηση	0,014	0,029	66.566 (43,2%)
Απόσπαση προσοχής	0,514	0,057	3.630 (2,4%)

Στο δεύτερο στάδιο της ομαδοποίησης προκύπτουν πιο εμπλουτισμένα προφίλ οδήγησης. Συγκεκριμένα, αναγνωρίζεται η απόσπαση προσοχής κατά την οδήγηση από τις αυξημένες τιμές του ποσοστού χρήσης του κινητού τηλεφώνου και η ανάληψη ρίσκου από το μεγάλο ποσοστό χρόνου οδήγησης με ταχύτητα πάνω από το επιτρεπόμενο όριο. Οι διαδρομές που δε χαρακτηρίζονται από καμία από αυτές τις μη ασφαλείς συμπεριφορές αναφέρονται ως «επιθετικές» στην περίπτωση που στο πρώτο στάδιο χαρακτηρίστηκαν από επιθετικότητα και «τυπικές» στην περίπτωση που είχαν αρχικώς χαρακτηριστεί ως μη-επιθετικές διαδρομές.

Έτσι προκύπτουν έξι προφίλ οδήγησης που διέπουν τον τρόπο που μπορεί να οδηγήσει ένας οδηγός σε κάποια συγκεκριμένη διαδρομή του. Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η συνολική συμπεριφορά των οδηγών, υπολογίζεται η μέση συμπεριφορά κάθε χρήστη εφαρμόζοντας έναν απλό κανόνα. Για κάθε μεμονωμένο οδηγό υπολογίζεται ο μέσος όρος των διαδρομών του, εφόσον η κάθε διαδρομή έχει συνδεθεί με ένα από τα έξι προφίλ οδήγησης αφού πρώτα τα τελευταία ταξινομήθηκαν με βάση την ασφάλεια κατά την οδήγηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα II.



**Σχήμα II. Κατηγοριοποίηση προφίλ οδήγησης για τον υπολογισμό της μέσης συμπεριφοράς οδήγησης**

Πιο συγκεκριμένα, τα τέσσερα προφίλ οδήγησης που χαρακτηρίζονται από μη ασφαλή συμπεριφορά οδήγησης τοποθετήθηκαν στην κατηγορία 3, ενώ διαδρομές με επιθετική συμπεριφορά οδήγησης τοποθετήθηκαν στην κατηγορία 2 και τέλος, όσες διαδρομές ανήκουν στο τυπικό προφίλ οδήγησης αποτελούν την κατηγορία 1. Για κάθε μεμονωμένο οδηγό, υπολογίζεται ένας μέσος όρος των προφίλ όλων των διαδρομών του, και στην περίπτωση που ο μέσος όρος είναι μικρότερος από 1,5 συνεπάγεται μέτριο/τυπικό οδηγό όταν είναι μεγαλύτερος από 1,5 αναφέρεται σε απερίσκεπτους οδηγούς:

- μέσοι/τυπικοί οδηγοί: μέσος όρος διαδρομών  $\leq 1,5$
- απερίσκεπτοι οδηγοί: μέσος όρος διαδρομών  $> 1,5$



Εφαρμόζοντας αυτό τον κανόνα οι οδηγοί χωρίζονται σε δύο ομάδες, για κάθε μία από τις οποίες θα αναπτυχθεί διαφορετική έκδοση του αλγορίθμου παροχής συστάσεων οδήγησης με τρόπο ώστε ο αλγόριθμος να προσαρμόζεται στις προτιμήσεις οδήγησης του κάθε χρήστη. Με βάση τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, μέσος όρος ταξιδιών μικρότερος από 1,5 δείχνει ότι τουλάχιστον το 60% των ταξιδιών που εκτελεί ένας οδηγός χαρακτηρίζεται από "μέτρια" συμπεριφορά οδήγησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού του αποτυπώματος οδήγησης είναι ιδιαίτερα αυστηρή ως προς τον χαρακτηρισμό ενός οδηγού ως «τυπικού – ασφαλή» οδηγού προκειμένου να αποφευχθεί η πρόταση αλλαγών στη συμπεριφορά που ο ίδιος ο οδηγός είναι αδύνατο να ακολουθήσει καθώς θα είναι μακριά από τη δική του μέση συμπεριφορά.

### **Ενισχυτική Μάθηση: έννοιες, βασικές αρχές και ανάπτυξη προτύπου**

Για την ανάπτυξη του Αυτογνωστικού Βοηθού Συστάσεων Οδήγησης (Self-Aware Driving Recommendation Assistant – SADRA) ακολουθήθηκε μία δομημένη διαδικασία. Αρχικά, η συνολική βάση δεδομένων χωρίστηκε στα δύο με βάση το μέσο προφίλ οδήγησης κάθε οδηγού. Συγκεκριμένα, η πρώτη βάση δεδομένων περιλαμβάνει τις διαδρομές όλων των οδηγών που ανήκουν στο «τυπικό/ασφαλές» προφίλ, ενώ η δεύτερη τις διαδρομές των οδηγών με μη ασφαλή μέση συμπεριφορά οδήγησης. Στο εξής, για συντομία, το μοντέλο Ενισχυτικής Μάθησης που αντιστοιχεί στους τυπικούς οδηγούς θα αναφέρεται ως SADRA – I, ενώ αυτό που αντιστοιχεί στους περισσότερο ριψοκίνδυνους οδηγούς ως SADRA – II.

Κάθε δομή Ενισχυτικής Μάθησης αποτελείται από τρία βασικά συστατικά: τις καταστάσεις ( $s$ ) του συστήματος, τις πιθανές δράσεις ( $a$ ) και τις ανταμοιβές ( $r$ ). Σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή, ο κάθε πράκτορας παρατηρεί την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντός του και πραγματοποιεί την κατάλληλη ενέργεια από το σύνολο των πιθανών ενεργειών. Στη συνέχεια, ο πράκτορας λαμβάνει μια επιβράβευση, η οποία αντιστοιχεί στο κατά πόσο ήταν πετυχημένη ή αποτυχημένη η ενέργεια, σύμφωνα πάντα με τη συγκεκριμένη κατάσταση.

Στην παρούσα διατριβή, η κατάσταση του περιβάλλοντος ορίζεται μέσω ενός διανύσματος πέντε μεταβλητών που περιγράφουν τη συμπεριφορά οδήγησης του οδηγού κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού και περιλαμβάνουν τη μέση επιτάχυνση του ταξιδιού ( $a_{avg}$ ), την επιτάχυνση που δεν ξεπέρασε ο οδηγός στο 90% του ταξιδιού ( $a_{90}$ ), τη μέση επιβράδυνση ( $d_{avg}$ ), την επιβράδυνση που δεν ξεπέρασε ο οδηγός στο 90% του ταξιδιού ( $d_{90}$ ) και το ποσοστό του ταξιδιού που ο οδηγός οδηγούσε με ταχύτητα πάνω από το επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας (*speeding*):

$$\mathbf{s} = \{a_{avg}, a_{90}, d_{avg}, d_{90}, speeding\}$$

Το παρόν σύστημα παροχής συστάσεων στοχεύει στο να βελτιώσει τη συμπεριφορά οδήγησης του κάθε χρήστη, ανεξάρτητα από τις εκάστοτε επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Γενικά, η επιλογή ταχύτητας κίνησης δεν είναι ανεξάρτητη από τη γεωμετρία της οδού που κινείται το όχημα και τις κυκλοφοριακές συνθήκες, όπως και η απόφαση για επιβράδυνση, η οποία εξαρτάται συνήθως από τη συμπεριφορά του προπορευόμενου οχήματος και τη σηματοδότηση. Συνεπώς, η παράμετρος που περιγράφει τη συμπεριφορά οδήγησης ενός οδηγού είναι η επιτάχυνση και εξαρτάται αποκλειστικά από την αντίληψή του και την προτίμησή του ανάμεσα σε ομαλή και απότομη επιτάχυνση. Πράγματι, και στην πρόσφατη βιβλιογραφία, η συμπεριφορά οδήγησης ενός οδηγού περιγράφεται συνήθως από το προφίλ επιτάχυνσής του.

Σε αυτή τη λογική, οι ενέργειες που προτείνονται από το σύστημα στον εκάστοτε οδηγό ανήκουν σε ένα συνεχές διάστημα τιμών και αφορούν στη μεταβολή (σε σχέση με την πιο πρόσφατη διαδρομή του) στη μέση επιτάχυνση και στην επιτάχυνση που δεν πρέπει ο οδηγός να ξεπερνά στο 90% των περιπτώσεων, π.χ. όταν πραγματοποιεί προσπέραση, εκτός και αν βρεθεί σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

$$\mathbf{a} = \{da_{avg}, da_{90}\}$$

Στο εξής και για συντομία, η επιτάχυνση που δεν πρέπει ο οδηγός να ξεπεράσει στο 90% του ταξιδιού του θα αναφέρεται ως «μέγιστη επιτάχυνση».

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του πλαισίου Ενισχυτικής Μάθησης είναι η συνάρτηση ανταμοιβής. Ο στόχος της είναι διττός: να αξιολογεί τόσο την παρούσα κατάσταση, όσο και τη μετάβαση μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, αξιολογεί τη συμπεριφορά οδήγησης σε κάθε διαδρομή, αλλά και τη μεταβολή της ανάμεσα σε διαδοχικές διαδρομές του ίδιου οδηγού. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύχθηκε μια ειδική συνάρτηση αξιολόγησης της συμπεριφοράς οδήγησης. Για κάθε διαδρομή υπολογίζεται ένα σκορ με βάση την απόκλιση της από το κέντρο της συστάδας του τυπικού προφίλ οδήγησης. Για τον υπολογισμό της απόκλισης χρησιμοποιήθηκε η απόσταση Mahalanobis. Η αξιολόγηση κάθε ταξιδιού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$trip\ score_i = e^{-driving\ profile_i * \frac{M(i, moderate\ profile)}{Q_{75}(M)}}$$

όπου με  $i$  συμβολίζεται μια συγκεκριμένη διαδρομή,  $M$  είναι η απόσταση Mahalanobis και  $Q_{75}(M)$  είναι η τιμή που δεν ξεπερνά το 75% των αποστάσεων Mahalanobis.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ανταμοιβή που αντιστοιχεί στη μετάβαση από τη μία διαδρομή στην άλλη, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$r = \text{trip score}_{i+1} \left( 1 + \frac{\text{trip score}_{i+1} - \text{trip score}_i}{100} \right)$$

Τελικά, αφού υπολογίστηκαν όλες οι απαραίτητες μεταβλητές για την ανάπτυξη του μοντέλου Ενισχυτικής Μάθησης (μοντέλο ή ελεγκτής ή πράκτορας RL), η βάση δεδομένων οργανώθηκε ως εξής:

*(κατάσταση, δράση, ανταμοιβή, επόμενη κατάσταση)*

Για κάθε μοναδικό οδηγό στο σύνολο δεδομένων, οι διαδρομές του ταξινομήθηκαν σε αύξουσα σειρά σύμφωνα με την ημερομηνία έναρξης κάθε διαδρομής. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου ήταν πλειάδες (tuples) διαδοχικών διαδρομών ενός συγκεκριμένου οδηγού μαζί με την αντίστοιχη ενέργεια και ανταμοιβή της μετάβασης από την πρώτη διαδρομή στην επόμενη. Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε ξεχωριστό οδηγό στο σύνολο δεδομένων, η πρώτη διαδρομή του χρησιμοποιήθηκε μόνο ως "κατάσταση", ενώ η τελευταία διαδρομή του χρησιμοποιήθηκε μόνο ως "επόμενη κατάσταση". Μετά από αυτή τη διαδικασία προετοιμασίας δεδομένων, κατασκευάστηκαν 33.440 μοναδικά δείγματα δεδομένων για την εκπαίδευση του SADRA I και 119.817 μοναδικά δείγματα δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία εκπαίδευσης του SADRA II.

Οι ελεγκτές RL αναπτύχθηκαν με βάση τον αλγόριθμο Deep Deterministic Policy Gradient algorithm (DDPG), ο οποίος εφαρμόζει μια προσέγγιση "actor-critic" δηλαδή «ενέργειας και αξιολόγησης» για την εκμάθηση μιας πολιτικής και την παραγωγή των βέλτιστων ενεργειών. Έτσι, για κάθε ελεγκτή αναπτύσσονται δύο νευρωνικά δίκτυα που αντιπροσωπεύουν τη δράση (actor -  $\mu$ ) και την αξιολόγηση (critic -  $Q$ ) αντίστοιχα. Τα νευρωνικά δίκτυα τόσο για το υποσύνολο των ασφαλών όσο και για το υποσύνολο των μη ασφαλών οδηγών εκπαιδεύτηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία του παρακάτω αλγορίθμου.

---

### **DDPG Algorithm implementation**

---

**Initialize** critic  $Q(s, a | \theta^Q)$  and actor  $\mu(s | \theta^\mu)$  networks using rewards as Q-values

Set the above as initial target networks ( $Q'$  and  $\mu'$ )

Split the sample into  $M$  minibatches

**for** minibatch=1,  $M$  **do**

Set  $y_i = r_i + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu'(s_{i+1} | \theta^{\mu'})) | \theta^{Q'}$

Update critic by minimizing the loss:  $L = \frac{1}{N} \sum_i (y_i - Q(s_i, a_i | \theta^Q))^2$

Update the actor policy using the sampled policy gradient:

$$\nabla_{\theta, \mu} J \approx \frac{1}{N} \sum_t [\nabla_a Q(s, a | \theta^Q) |_{s=s_t, a=\mu(s_t)} \nabla_{\theta, \mu} \mu(s | \theta^\mu) |_{s=s_t}]$$

Update the target networks:

$$\theta^{Q'} \leftarrow \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^{Q'}$$

$$\theta^{\mu'} \leftarrow \tau \theta^\mu + (1 - \tau) \theta^{\mu'}$$

**end for**

---

Η τελική δομή των δικτύων καθώς και οι τιμές των υπερπαραμέτρων προέκυψαν μετά από αξιολόγηση των πιθανών συνδυασμών. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί δομών και παραμετροποίησης των δικτύων, σε ένα εύρος λογικών τιμών, προκειμένου να εντοπιστεί ο βέλτιστος. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη είναι: αριθμός κρυφών στρωμάτων (*Number of hidden layers*), αριθμός νευρώνων (*Number of neurons per layer*) και ενεργοποίηση κάθε στρώματος (*Activation*), συνάρτηση βελτιστοποίησης (*Optimizer*) και ρυθμός μάθησης (*Learning rate*), μέγεθος δέσμης (*Batch size*) και αριθμός εποχών εκπαίδευσης (*Epochs*), όπως φαίνεται στον Πίνακα V.

**Πίνακας V. Υπερπαραμέτροι των δικτύων “critic” και “actor” για τα μοντέλα SADRA I και II**

<b>Hyperparameters</b>	<b>Critic network</b>	<b>Actor network</b>
SADRA I – ασφαλείς οδηγοί		
<i>Number of hidden layers</i>	6	3
<i>Number of neurons per layer</i>	(64,32,16,16,32,64,1)	(128,64,32,2)
<i>Epochs</i>	200(initial network:110)	200(initial network:110)
<i>Batch size</i>	150(initial network:150)	150(initial network:150)
<i>Activation</i>	ReLU	ReLU
<i>Optimizer</i>	Adam	Adam
<i>Learning rate</i>	0,001	0,0001
SADRA II – μη-ασφαλείς οδηγοί		
<i>Number of hidden layers</i>	6	3
<i>Number of neurons per layer</i>	(32,16,8,8,16,32,1)	(128,64,32,2)
<i>Epochs</i>	170(initial network:170)	210(initial network:210)
<i>Batch size</i>	250(initial network:250)	250(initial network:100)
<i>Activation</i>	ReLU	ReLU
<i>Optimizer</i>	Adam	Adam
<i>Learning rate</i>	0,0001	0,0001

## Σενάριο προσομοίωσης

Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της υιοθέτησης συστάσεων οδήγησης από όλους τους οδηγούς, στην κυκλοφορία, την οδική ασφάλεια και τις εκπομπές πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο ενός σεναρίου μικροσκοπικής προσομοίωσης (*microscopic simulation*) σε επίπεδο δικτύου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης SUMO και το προεπιλεγμένο κυκλοφοριακό μοντέλο του Krauss, το οποίο είναι ένα μικροσκοπικό και συνεχές στο χώρο μοντέλο που βασίζεται στην ασφαλή ταχύτητα που σημαίνει ότι ο οδηγός του ακολουθούντος οχήματος υιοθετεί μια ασφαλή ταχύτητα που του επιτρέπει να προσαρμοστεί στην επιβράδυνση του προπορευόμενου οχήματος.

Η μελέτη περίπτωσης για τα πειράματα προσομοίωσης είναι το οδικό δίκτυο του δακτυλίου της Αθήνας, το οποίο αποτελείται από 1.293 κόμβους και 2.572 συνδέσμους. Το συνολικό μήκος του δικτύου είναι 348 χιλιόμετρα. Βάσει της βαθμονόμησης η οποία πραγματοποιήθηκε, στο δίκτυο κινούνται κατά την ώρα αιχμής 86.054 οχήματα. Από τους μετρητές προκύπτουν 1.393.634 μετρήσεις (97,47%

των συνολικών μετρήσεων που εξήχθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun) και τιμή GEH κάτω από 5 ( $GEH < 5$ ) για το 95,26%.

Δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σχεδιάστηκαν που αντιστοιχούν στη ζήτηση του οδικού δικτύου της Αθήνας κατά την πρωινή ώρα αιχμής (8:00 - 9:00 π.μ.). Αρχικά, προσομοιώνονται οι αρχικές συνθήκες του δικτύου προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση της κυκλοφορίας όταν τα οχήματα κινούνται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που διέπουν τα έξι προφίλ οδήγησης που προσδιορίστηκαν. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε 10 επαναλήψεις με δέκα διαφορετικούς αριθμούς εκκίνησης. Η στοχαστικότητα αποτελεί σημαντική πτυχή της αναπαραγωγής της πραγματικότητας σε ένα σενάριο προσομοίωσης, καθώς προσθέτει τυχαιότητα στις κατανομές των διαφορετικών πτυχών της προσομοίωσης (π.χ. κατανομές διαδρομών, κατανομές τύπων οχημάτων).

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν συστάσεις οδήγησης για κάθε εξυπηρετούμενο όχημα με βάση τον τρόπο με τον οποίο κάθε όχημα πραγματοποίησε τη διαδρομή του στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Οι συστάσεις παρήχθησαν από τους αντίστοιχους ελεγκτές RL χρησιμοποιώντας ως είσοδο την κατάσταση της διαδρομής (μέση επιτάχυνση, 90% εκατοστημόριο επιτάχυνσης, μέση επιβράδυνση, 90% εκατοστημόριο επιβράδυνσης, ποσοστό επιτάχυνσης) και ως έξοδο τη βέλτιστη μεταβολή της μέγιστης επιτάχυνσης. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι παρόλο που οι ελεγκτές RL που αναπτύχθηκαν παράγουν ένα δισδιάστατο διάνυσμα που περιλαμβάνει μεταβολές τόσο στη μέση όσο και στη μέγιστη επιτάχυνση, στο πλαίσιο της προσομοίωσης αξιοποιήθηκε μόνο η μέγιστη επιτάχυνση, καθώς το μοντέλο Krauss λαμβάνει υπόψη μόνο τις μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης.

Τέλος, ένα δεύτερο σενάριο προσομοίωσης εκτελέστηκε, όπου τα οχήματα που είχαν εξυπηρετηθεί προηγουμένως ακολουθούν τις προτεινόμενες συστάσεις, δηλαδή μια εναλλαγή της μέγιστης επιτάχυνσής τους, ενώ η υπόλοιπη κυκλοφορία ακολουθεί την κατανομή μεταξύ των έξι προφίλ οδήγησης.

Η συμπεριφορά που συνεπάγεται κάθε προφίλ οδήγησης προσομοιώθηκε μέσω της προσαρμογής του αντίστοιχου κυκλοφοριακού μοντέλου. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ακολουθούστος οχήματος Krauss το οποίο μπορεί να παραμετροποιηθεί από έναν αριθμό παραμέτρων: τη μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος (accel), τη μέγιστη επιβράδυνση του οχήματος (decel), τη μέγιστη ταχύτητα του οχήματος (maxSpeed), τη μέγιστη φυσικά δυνατή επιβράδυνση του οχήματος (emergencyDecel) και τον αναμενόμενο πολλαπλασιαστή για τα όρια ταχύτητας της λωρίδας (speedFactor). Αρχικά, η τρέχουσα (αρχική) κατάσταση της οδικής κυκλοφορίας προσομοιώνεται στο SUMO χρησιμοποιώντας τα έξι

καθορισμένα προφίλ οδήγησης, οι παράμετροι των οποίων εισήχθησαν στο μοντέλο Krauss για διαφορετικούς τύπους οχημάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα VI.

**Πίνακας VI. Παραμετροποίηση του μοντέλου ακολουθούτος οχήματος για κάθε τύπο οχήματος**

Τύποι οχήματος (προφίλ οδήγησης)	Παράμετροι μοντέλου ακολουθούτος οχήματος				
	accel (m/s <sup>2</sup> )	decel (m/s <sup>2</sup> )	emergencyDecel (m/s <sup>2</sup> )	maxSpeed (km/h)	speedFactor (mean, min, max)
<b>Τυπική οδήγηση</b>	2,519	-2,942	-5,909	64,51	(0,029, 0, 0,168)
<b>Επιθετική</b>	3,817	-4,483	-18,083	66,93	(0,033, 0, 0,151)
<b>Ανάληψη ρίσκου</b>	2,392	-2,824	-5,328	100,28	(0,306, 0,1627, 0,96)
<b>Απόσπαση προσοχής</b>	2,601	-2,990	-5,112	67,38	(0,057, 0, 0,631)
<b>Επιθετική με ανάληψη ρίσκου</b>	3,944	-4,825	-25,884	100,8	(0,269, 0,147, 0,907)
<b>Επιθετική με απόσπαση προσοχής</b>	3,939	-4,553	-10,845	71,99	(0,062, 0, 0,744)

Για την αρχική κατάσταση του δικτύου, οι έξι διαφορετικοί τύποι οχημάτων δημιουργήθηκαν σε ένα αρχείο διαδρομών (route file), με την αντίστοιχη παραμετροποίηση του μοντέλου ακολουθούτος οχήματος. Σε μία ώρα προσομοίωσης για την πρωινή αιχμή, περίπου το 58% της συνολικής ζήτησης εισήχθη στο δίκτυο και το 28% των οχημάτων ολοκλήρωσε τη διαδρομή του μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια, για κάθε όχημα που έφτασε στον προορισμό του εκτιμήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι για κάθε διαδρομή:

- μέση επιτάχυνση
- 90% εκατοστημόριο επιτάχυνσης
- μέση επιβράδυνση
- 90% εκατοστημόριο επιβράδυνσης
- ποσοστό επιτάχυνσης

Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στους ελεγκτές RL, οι οποίοι προτείνουν τη βέλτιστη ενέργεια για κάθε διαδρομή. Για την εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια ακριβώς οχήματα, τα οποία ακολουθούν τις ίδιες ακριβώς διαδρομές στο ίδιο οδικό δίκτυο, προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της παροχής προσωποποιημένων συστάσεων. Οι συστάσεις για αλλαγή της μέγιστης επιτάχυνσης εισήχθησαν ως τροποποίηση της αντίστοιχης παραμέτρου του μοντέλου ακολουθούτος οχήματος. Η υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης επέτρεψε την πρακτική εφαρμογή της διαδικασίας εφαρμογής των συστάσεων με άμεσο έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Και σε αυτή την περίπτωση, του δεύτερου σεναρίου της προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκαν 10 επαναλήψεις με τις ίδιες τιμές εκκίνησης όπως και προηγουμένως, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα ευρήματα έδειξαν ότι σε μία ώρα προσομοίωσης εξυπηρετήθηκε κατά μέσο όρο το 57% της ζήτησης, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό των οχημάτων που ολοκλήρωσαν τη διαδρομή τους μειώθηκε κατά 1% σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες.

## Αξιολόγηση επιπτώσεων

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του προτεινόμενου συστήματος πραγματοποιείται μέσω μιας προσέγγισης "πριν και μετά" όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, και για τα δύο σενάρια προσομοίωσης εκτιμήθηκαν οι βασικοί δείκτες απόδοσης της κυκλοφορίας, της ασφάλειας και των περιβαλλοντικών συνθηκών και αξιολογήθηκαν συγκριτικά, ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι συνολικές επιπτώσεις της υιοθέτησης εξατομικευμένων συστάσεων που βελτιώνουν τη συμπεριφορά οδήγησης κάθε ατόμου. Οι βασικοί δείκτες απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για κάθε πτυχή του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα VII.

**Πίνακας VII. Βασικοί δείκτες απόδοσης για τις διάφορες πτυχές του δικτύου**

<b>Κυκλοφορία</b>	<b>Ασφάλεια</b>	<b>Περιβάλλον</b>
Εξυπηρετούμενη ζήτηση	Συνολικές πιθανές εμπλοκές	Συνολικές εκπομπές ανά τύπο ρύπου (CO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> )
Μακροσκοπικό θεμελιώδες διάγραμμα κυκλοφορίας	Συνολικές μετόπισθεν εμπλοκές	Εκπομπές ανά όχημα
	Πιθανές εμπλοκές ανά όχημα	

Η εκτίμηση των βασικών δεικτών απόδοσης που αφορούν στην κυκλοφορία έγινε με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία περιλάμβαναν τον αριθμό των εισαγόμενων και εξυπηρετούμενων οχημάτων, καθώς και πληροφορίες για τα τρία θεμελιώδη στοιχεία της θεωρίας της κυκλοφοριακής ροής (ροή, ταχύτητα και πυκνότητα). Αντί να χρησιμοποιηθούν συγκεντρωτικές μετρήσεις των θεμελιωδών μεταβλητών, κατασκευάστηκαν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα (Macroscopic Fundamental Diagrams – MFDs) και εξήχθησαν σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τις διαφορές στις επιδόσεις του δικτύου πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος συστάσεων. Η εκτίμηση των επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων βασίζεται στο μοντέλο εκπομπών που είναι ήδη ενσωματωμένο στο SUMO, το μοντέλο PHEMlight. Το PHEMlight είναι μια απλουστευμένη έκδοση του PHEM (Passenger car and Heavy-duty Emission Model), ενός πλήρους μοντέλου εκπομπών οχημάτων που έχει αναπτυχθεί στην Ευρώπη από το 1999 και βασίζεται σε εκτεταμένες μετρήσεις εκπομπών σε οχήματα όπως επιβατικά αυτοκίνητα, ελαφρά οχήματα και αστικά λεωφορεία. Η εκτίμηση των εμπλοκών που αποτελούν δείκτη οδικής ασφάλειας βασίζεται στο εργαλείο SSAM, το οποίο υπολογίζει υποκατάστατα μέτρα ασφάλειας για κάθε εμπλοκή που εντοπίζεται στα δεδομένα τροχιάς, και στη συνέχεια υπολογίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή, μέγιστη τιμή κ.λπ.) κάθε υποκατάστατου μέτρου (surrogate measure).

### Αποτελέσματα: Συστάσεις οδήγησης

Οι δύο εκδόσεις του εκπαιδευμένου αλγορίθμου DDPG χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συστάσεων οδήγησης για δύο κατηγορίες οδηγών: τυπικοί οδηγοί που

παρουσιάζουν μέτρια-ασφαλή συμπεριφορά (SADRA I) και μη-ασφαλείς οδηγοί που εναλλάσσουν τη συμπεριφορά τους μεταξύ διαφόρων ανασφαλών συνηθειών οδήγησης (SADRA II). Οι συστάσεις έχουν τη μορφή αλλαγών στον τρόπο οδήγησης που αναφέρονται στις βέλτιστες ενέργειες οδήγησης που μπορεί να υιοθετήσει ο συγκεκριμένος οδηγός προκειμένου να βελτιώσει την οδήγησή του με βάση την τρέχουσα συμπεριφορά του.

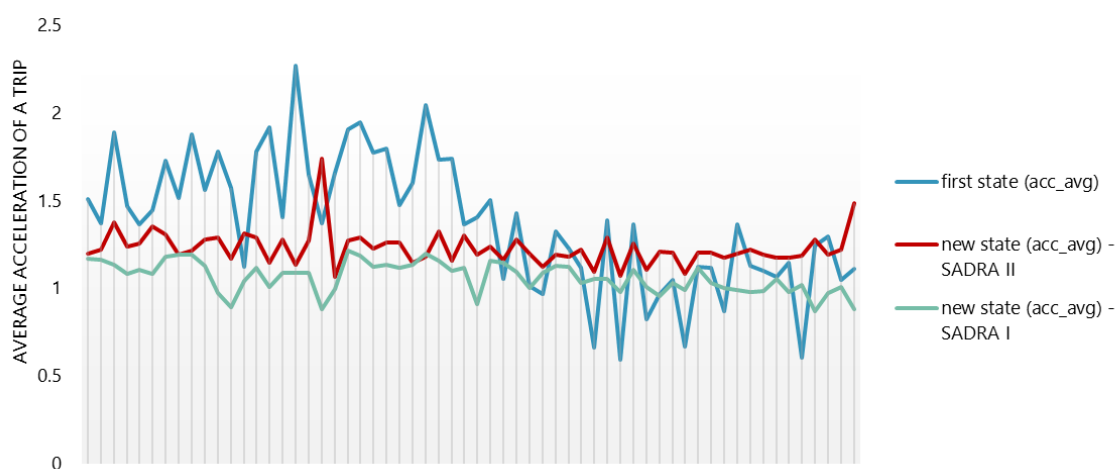
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο ελεγκτών αποκάλυψε ότι και οι δύο έχουν εκπαιδευτεί να παράγουν συστάσεις που φέρνουν τους οδηγούς πιο κοντά στη μέση ασφαλή συμπεριφορά ενός τυπικού οδηγού, ο οποίος έχει μέση επιτάχυνση ίση με  $1,137 \text{ m/s}^2$  και μέγιστη επιτάχυνση ίση με  $2,503 \text{ m/s}^2$ . Με βάση τα ενδεικτικά παραδείγματα του παρακάτω πίνακα (Πίνακας VIII), η μέση συνιστώμενη μέση επιτάχυνση εκτιμήθηκε σε  $1,145 \text{ m/s}^2$ , ενώ η μέση τιμή των προτεινόμενων μέγιστων επιταχύνσεων ήταν  $2,507 \text{ m/s}^2$  αντίστοιχα. Επομένως, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η καθολική εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος συστάσεων θα οδηγούσε στην εναρμόνιση των προφίλ επιτάχυνσης για ολόκληρο το στόλο οχημάτων.



Πίνακας VIII. Παραδείγματα εισόδου και εξόδου RL και των παραγόμενων συστάσεων

Προφίλ και βαθμολόγηση		RL εισόδος				RL εξόδος		Σύσταση οδήγησης	
Σκορ	Μέση επιτάχυνση	Μέση επιβράδυνση	Επιτάχυνση Q90	Επιβράδυνση Q90	Ποσοστό οδήγησης πάνω από το όριο	ενέργεια_1 (Q90)	ενέργεια_2 (μέση)	νέα επιτάχυνση Q90	νέα μέση επιτάχυνση
Επιθετικότητα με απόσταση προσοχής	9	1.512	-1.58	3.600	-3.72	0.0090	↓ -0.99	2.610	1.197
Επιθετικότητα με απόσταση προσοχής	2	1.888	-1.86	3.336	-3.95	0.0660	↓ -0.29	3.046	1.377
Επιθετικότητα με ανάληψη ρίσκου	6	1.779	-1.63	3.432	-3.82	0.3235	↓ -0.65	2.778	1.288
Επιθετικότητα με ανάληψη ρίσκου	2	1.574	-1.73	3.480	-4.20	0.5693	↓ -0.96	2.519	1.171
Επιθετική οδήγηση	2	1.905	-1.68	3.600	-3.18	0.0000	↓ -0.77	2.834	1.275
Επιθετική οδήγηση	17	1.948	-2.57	3.768	-5.69	0.0822	↓ -1.10	2.669	1.289
Επιθετική οδήγηση	10	1.774	-2.17	4.368	-4.08	0.0000	↓ -1.69	2.676	1.230
Απόσταση προσοχής	2	1.405	-1.33	4.104	-2.88	0.0133	↓ -1.38	2.727	1.193
Απόσταση προσοχής	24	1.504	-1.52	3.324	-3.36	0.0000	↓ -0.64	2.679	1.236
Απόσταση προσοχής	35	1.054	-1.08	2.489	-2.67	0.0000	↑ 0.06	2.548	1.166
Τυπική οδήγηση	73	1.386	-1.59	2.760	-3.28	0.0226	↓ -0.46	2.299	1.055
Τυπική οδήγηση	58	0.592	-0.92	1.560	-2.81	0.0294	↑ 0.56	2.123	0.980
Τυπική οδήγηση	86	1.366	-1.43	2.880	-3.36	0.0000	↓ -0.45	2.426	1.106
Τυπική οδήγηση	90	0.826	-1.03	1.984	-2.43	0.0000	↑ 0.26	2.240	1.006
Τυπική οδήγηση	67	0.967	-1.43	2.040	-3.67	0.0674	↑ 0.05	2.091	0.954
Τυπική οδήγηση	78	1.047	-1.23	2.070	-2.33	0.0000	↑ 0.21	2.284	1.030
Τυπική οδήγηση	77	0.666	-0.69	1.440	-1.68	0.0367	↑ 0.76	2.195	0.989
Τυπική οδήγηση	94	1.124	-1.24	2.568	-2.64	0.0000	↓ -0.06	2.511	1.118
Τυπική οδήγηση	58	0.871	-1.24	1.920	-3.56	0.1667	↑ 0.27	2.187	1.003
Ανάληψη ρίσκου	52	1.367	-1.36	3.093	-3.06	0.2392	↓ -0.49	2.602	1.196
Ανάληψη ρίσκου	33	1.098	-1.43	2.280	-3.24	0.2857	↑ 0.32	2.600	1.192

Το Σχήμα III παρουσιάζει ενδεικτικά παραδείγματα των συστάσεων που παράγονται από τους δύο ελεγκτές με δεδομένη την ίδια είσοδο (πρώτη κατάσταση). Τα ευρήματα έδειξαν ότι, παρόλο που οι συστάσεις του ελεγκτή που αφορά στους μη ασφαλείς οδηγούς (SADRA II) οδηγούν σε σημαντικά χαμηλότερες μέσες επιταχύνσεις για την επόμενη διαδρομή (επόμενη κατάσταση) σε σύγκριση με την προηγούμενη διαδρομή (αρχική κατάσταση), διατηρούν σημαντική απόσταση προς τα πάνω σε σχέση με τις αντίστοιχες συστάσεις που παράγονται από τον ελεγκτή των τυπικών οδηγών (SADRA I). Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δύο ελεγκτές οδηγούν σε ομαλότερο προφίλ επιτάχυνσης για το σύνολο των οχημάτων που απαρτίζουν την κυκλοφορία.



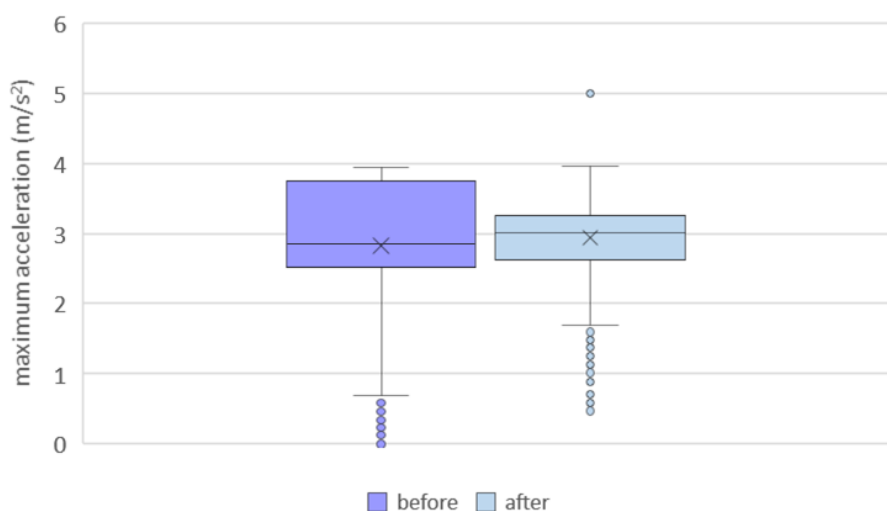
**Σχήμα III. Σύγκριση της μέσης επιτάχυνσης για τη νέα κατάσταση όπως προέκυψε από το SADRA I (κόκκινο) και SADRA II (πράσινο) με βάση την αρχική κατάσταση (μπλε).**

### **Αποτελέσματα: Προσομοίωση και αξιολόγηση επιπτώσεων**

Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος συστάσεων και, κατά συνέπεια, της υιοθέτησης μιας βελτιωμένης συμπεριφοράς οδήγησης από όλους τους οδηγούς έχει μεγάλη σημασία, τόσο για τους ερευνητές, όσο και για τους επαγγελματίες και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητα της βελτίωσης της ατομικής συμπεριφοράς οδήγησης. Η αξιολόγηση του συστήματος συστάσεων πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένων βασικών δεικτών επιδόσεων που αντιστοιχούν σε τρεις τομείς ενδιαφέροντος: κυκλοφορία, ασφάλεια και εκπομπές. Κάθε ένα από τα σενάρια προσομοίωσης έγινε σε 10 επαναλήψεις για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Συνολικά, ο ελεγκτής SADRA I χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή συστάσεων για το 43% των οχημάτων, ενώ τα υπόλοιπα οχήματα ακολούθησαν τις συστάσεις που παρήγαγε το SADRA II.

Όλες οι επαναλήψεις του ίδιου σεναρίου προσομοίωσης παρουσιάζουν αντίστοιχα αποτελέσματα σχετικά με τα εξυπηρετούμενα οχήματα, τα οποία μειώνονται ελαφρώς μετά την εφαρμογή του συστήματος συστάσεων. Κατά μέσο όρο,

εξυπηρετήθηκαν 2,9% λιγότερα οχήματα με βάση τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου της προσομοίωσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου υποθέσεων t-test έδειξαν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των εξυπηρετούμενων οχημάτων πριν και μετά τις συστάσεις σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η εφαρμογή του συστήματος εξατομικευμένων συστάσεων είχε σημαντική επιρροή στη μέγιστη επιτάχυνση των οχημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα IV. Όταν όλα τα οχήματα ακολούθησαν τις προτάσεις που παρήγαγαν οι δύο ελεγκτές RL, η μέση τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης αυξήθηκε ελάχιστα από 2,83 m/s<sup>2</sup> σε 2,96 m/s<sup>2</sup>, κυρίως επειδή η πλειονότητα των οχημάτων που αρχικώς είχαν μια πολύ μικρή μέγιστη επιτάχυνση, η οποία ήταν πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη επιτάχυνση της "μέτριας/τυπικής" συμπεριφοράς, τους προτάθηκε να αυξήσουν ελαφρώς την επιτάχυνσή τους. Ωστόσο, η μείωση του εύρους των τιμών της επιτάχυνσης είναι εμφανής μετά τις συστάσεις, γεγονός που υποδηλώνει την εναρμόνιση των προφίλ επιτάχυνσης όλων των οχημάτων στην προσομοίωση. Τέλος, η μέγιστη τιμή των παρατηρούμενων μέγιστων επιταχύνσεων παρέμεινε στο ίδιο επίπεδο των 3,94 m/s<sup>2</sup> μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος.

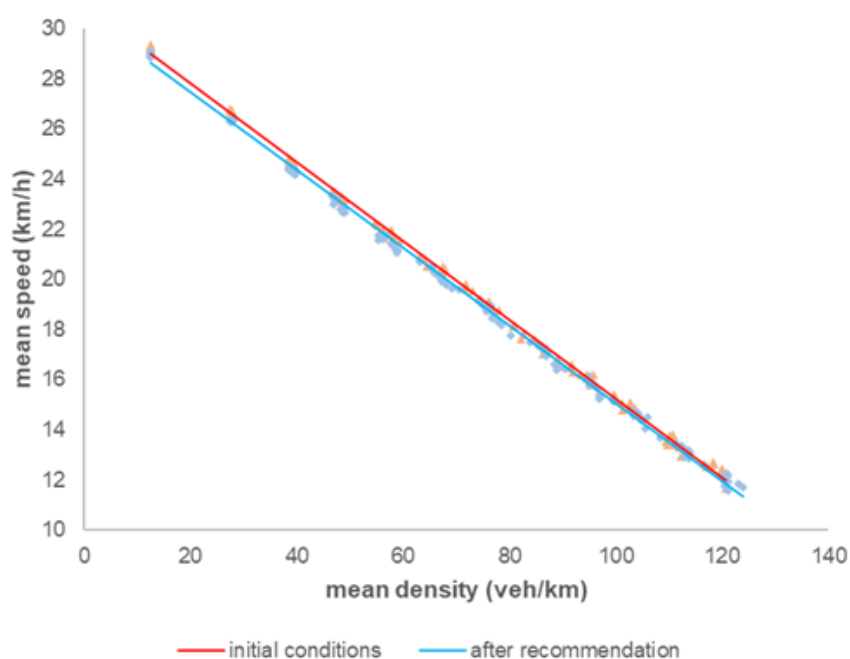


**Σχήμα IV. Boxplot των τιμών της μέγιστης επιτάχυνσης πριν και μετά τις συστάσεις**

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο μέγεθος της μέσης ταχύτητας είναι ελάχιστες, καθώς και στις δύο περιπτώσεις τα οχήματα υιοθετούν μέση ταχύτητα περίπου 25 km/h, ενώ η μέγιστη μέση ταχύτητα που παρατηρείται είναι περίπου 55 km/h.

Οι μεταβολές της ταχύτητας των οχημάτων είχαν ως αποτέλεσμα μεταβολές των ιδιοτήτων των υπόλοιπων κυκλοφοριακών μεγεθών, δηλαδή της ροής και της πυκνότητας. Προκειμένου να αποδοθεί μια λεπτομερής γραφική απεικόνιση των σχέσεων αυτών των μεγεθών για τις αρχικές συνθήκες καθώς και για τις συνθήκες που προέκυψαν μετά τις συστάσεις, υπολογίστηκαν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα. Και τα τρία θεμελιώδη διαγράμματα (Σχήματα V - VII) δείχνουν τις σχέσεις μεταξύ των της ροής κυκλοφορίας, δηλαδή της μέσης ροής οχημάτων, της

μέσης πυκνότητας και της μέσης ταχύτητας, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με βάση τις συγκεντρωτικές μετρήσεις όλων των συνδέσμων και για τις 10 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υιοθέτηση των προτάσεων οδήγησης, αν και οδηγεί σε ασφαλέστερη και λιγότερο επιθετική συμπεριφορά οδήγησης για κάθε άτομο, δε βελτιώνει την απόδοση του οδικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η αυτό-βελτίωση είναι εμφανής από τις χαμηλότερες μέσες τιμές πυκνότητας, οι οποίες υποδηλώνουν ότι τα οχήματα διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις από τα προπορευόμενα οχήματα. Επιπλέον, παρατηρούνται χαμηλότερες ταχύτητες μετά την προσαρμογή των επιταχύνσεων, με τη διαφορά από τις αρχικές συνθήκες να είναι πιο σημαντική στην περίπτωση κορεσμένης ροής του δικτύου (Σχήμα V).

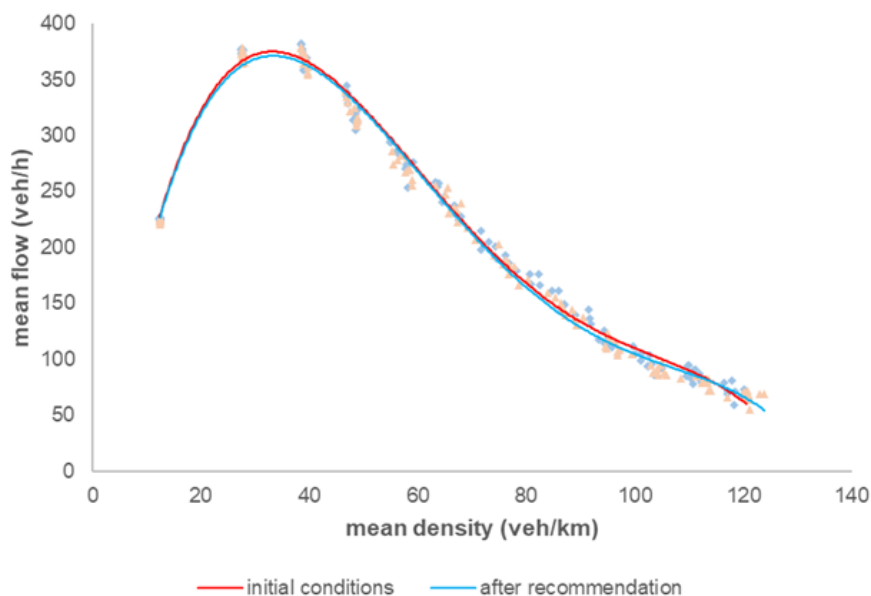


**Σχήμα V. Θεμελιώδες διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας πριν (κόκκινο) και μετά (μπλε) τις συστάσεις**

Η ασφάλεια οδήγησης σε ατομικό επίπεδο αυξάνεται, αλλά οι επιπτώσεις στις συνθήκες κυκλοφορίας δεν είναι εξίσου θετικές. Τα οχήματα που κινούνται με χαμηλότερες ταχύτητες και με μικρότερη πυκνότητα επιδεινώνουν τις συνθήκες κυκλοφοριακής ροής, καθώς εξυπηρετούνται λιγότερα οχήματα ανά μονάδα χρόνου σε σύγκριση με τις αρχικές συνθήκες. Ωστόσο, αυτή η μείωση της μέσης ροής μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή εάν αξιολογηθεί σε συνδυασμό με τις θετικές επιπτώσεις στην οδική ασφάλεια. Ωστόσο, με βάση τα ευρήματα της παρούσας έρευνας, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η βελτίωση της προσωπικής συμπεριφοράς οδήγησης συνδέεται με σημαντική βελτίωση των συνθηκών κυκλοφορίας και, ως εκ τούτου, η επιβολή μέτρων που βελτιώνουν τον τρόπο οδήγησης σε προσωπικό επίπεδο, όπως η αύξηση της αυτογνωσίας σε σχέση

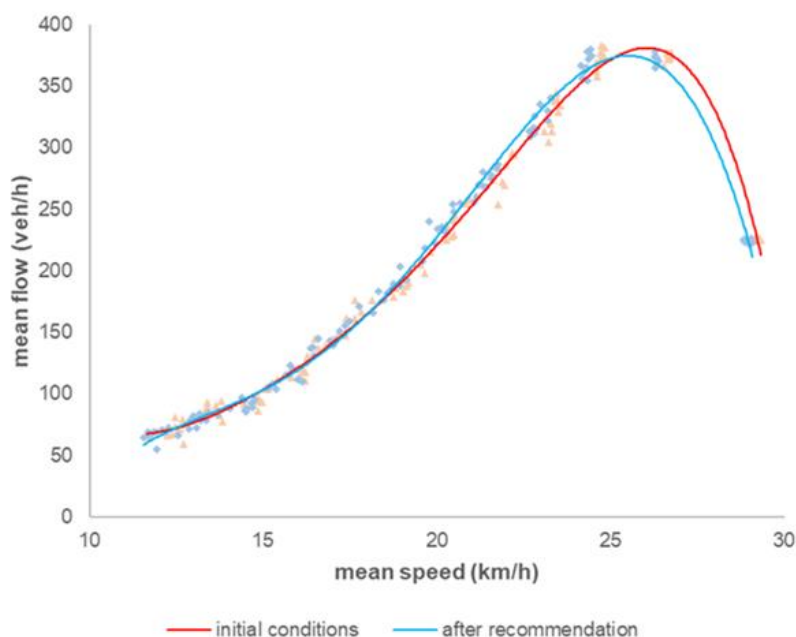
με την ατομική οδηγική ασφάλεια και τις συνέπειές της, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως βασικό μέτρο για τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Το θεμελιώδες διάγραμμα ροής-πυκνότητας απεικονίζει μια ομοιομορφία μεταξύ των αρχικών και των τελικών συνθηκών, αν και παρατηρούνται ορισμένες μικρές διαφορές όσον αφορά την απόλυτη τιμή της ροής κορεσμού (Σχήμα VI). Συγκεκριμένα, για την τιμή της κρίσιμης πυκνότητας, η οποία εκτιμήθηκε 33,1 veh/km, οι τιμές της κυκλοφοριακής ροής είναι 360 veh/h και 358 veh/h για τις αρχικές συνθήκες και μετά τις συστάσεις αντίστοιχα.



**Σχήμα VI. Θεμελιώδες διάγραμμα ροής-πυκνότητας πριν (κόκκινο) και μετά (μπλε) τις συστάσεις**

Το θεμελιώδες διάγραμμα ταχύτητας-ροής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας στην οποία εμφανίζεται η βέλτιστη ροή. Για τις αρχικές συνθήκες του οδικού δικτύου, η βέλτιστη ροή εμφανίζεται όταν τα οχήματα κινούνται με 26,1 km/h, ενώ η αντίστοιχη ταχύτητα μετά την εφαρμογή των συστάσεων μειώνεται κατά 3,4% με την απόλυτη τιμή της να εκτιμάται στα 25,2 km/h (Σχήμα VII).



**Σχήμα VII. Θεμελιώδες διάγραμμα ροής-ταχύτητας πριν (κόκκινο) και μετά (μπλε) τις συστάσεις**

Εκτός από την απόδοση του δικτύου, ένας άλλος βασικός δείκτης απόδοσης είναι η οδική ασφάλεια. Η αξιολόγηση των παραγόμενων συστάσεων όσον αφορά την ασφάλεια πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό του αριθμού των εμπλοκών που σημειώθηκαν μεταξύ των οχημάτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στον Πίνακα ΙΧ παρουσιάζεται ο αριθμός των εμπλοκών που παρατηρήθηκαν για το σύνολο της κυκλοφορίας πριν και μετά τις συστάσεις. Υπάρχουν τρεις τύποι εμπλοκών που μπορούν να εντοπιστούν από τις τροχιές των οχημάτων, οι οποίοι είναι οι διασταυρώσεις οχημάτων (crossings), οι μετόπισθεν εμπλοκές (rear-ends) και οι αλλαγές λωρίδας (lane changes). Εδώ, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μετόπισθεν εμπλοκές, δεδομένου ότι οι προτεινόμενες συστάσεις επηρεάζουν μόνο τη συμπεριφορά του κάθε οδηγού σε σχέση με τον τρόπο που προσαρμόζει την οδήγησή του με βάση το προπορευόμενο όχημα (car-following behavior).

**Πίνακας ΙΧ. Δείκτες απόδοσης ασφάλειας για το δίκτυο της Αθήνας πριν και μετά τις συστάσεις**

	<b>Αρχικές συνθήκες</b>	<b>Μετά τις συστάσεις [% μεταβολή]</b>
<b>Οχήματα που εξυπηρετήθηκαν</b> (σε μία ώρα προσομοίωσης)	23.990 (27,88% της ζήτησης)	23.302 (27,08% της ζήτησης)
<b>Συνολικός αριθμός εμπλοκών</b>	2,86 εμπλοκές/όχημα	2,75 εμπλοκές/όχημα [-4,2%]
<b>Μετόπισθεν εμπλοκές</b>	2,01 μετόπισθεν εμπλοκές/όχημα	1,90 μετόπισθεν εμπλοκές/όχημα [-5,5%]

Παρατηρήθηκε μείωση κατά 4,2% του συνολικού αριθμού των εμπλοκών όταν τα οχήματα ακολουθούσαν τις αντίστοιχες συστάσεις οδήγησης, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης των μετόπισθεν εμπλοκών είναι 5,5%. Αν και τα ποσοστά αυτά μπορεί να μην φαίνονται πολύ υψηλά, ο απόλυτος αριθμός συγκρούσεων που υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή των συστάσεων μειώνεται σημαντικά κατά περίπου 6.000 συγκρούσεις για τη μία ώρα προσομοίωσης. Οι μετόπισθεν εμπλοκές

αποτελούν περίπου το 33% του συνολικού αριθμού εμπλοκών, γεγονός που υποδηλώνει ότι κάθε οδηγός εμπλέκεται σε όλα τα διαφορετικά είδη εμπλοκών κατά τη διάρκεια της οδήγησης.

Τέλος, παρέχονται ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα σχετικά με τις επιδράσεις του προτεινόμενου συστήματος συστάσεων στις εκπομπές ρύπων. Ο σχετικός δείκτης απόδοσης είναι το επίπεδο εκπομπών για όλα τα διαφορετικά είδη ατμοσφαιρικών ρύπων, δηλαδή διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), σωματιδιακή ύλη (PM<sub>x</sub>) και οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Παρατηρείται σημαντική μείωση σε όλες τις κατηγορίες εκπομπών σε σύγκριση με τις αρχικές συνθήκες του δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα Χ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξομάλυνση του προφίλ επιτάχυνσης για το σύνολο της κυκλοφορίας οδήγησε σε ελαφρώς μειωμένες εκπομπές ανά όχημα. Συγκεκριμένα, η μείωση σε όλες τις κατηγορίες εκπομπών εκτιμάται ως εξής: 2,5% για το CO<sub>2</sub>, 0,3% για το CO, 1,3% για τα PM<sub>x</sub> και 3,3% για τα NO<sub>x</sub>. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι το προτεινόμενο σύστημα συστάσεων είχε θετική επίδραση στις εκπομπές παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος παραγωγής των συστάσεων δεν είχε εκπαιδευτεί προς αυτή την κατεύθυνση.

**Πίνακας Χ. Μεταβολές στις εκπομπές αερίων πριν και μετά τις συστάσεις**

<b>Emissions</b>	<b>Αρχικές συνθήκες</b>	<b>Μετά τις συστάσεις [% μεταβολή]</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,704 kg/όχημα	0,686 kg/ όχημα [-2.5%]
<b>CO</b>	0,027 kg/ όχημα	0,026 kg/ όχημα [-0.3%]
<b>PM<sub>x</sub></b>	0,0133 g/ όχημα	0,0131 g/ όχημα [-1.3%]
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,296 g/ όχημα	0,287 g/ όχημα [-3.3%]

## **Συμπεράσματα και συνεισφορά διατριβής**

Τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία:

- Μια προσέγγιση ομαδοποίησης δύο επιπέδων μπορεί να προσφέρει σημαντική γνώση σχετικά με τα χαρακτηριστικά που διέπουν την επιθετικότητα κατά τη διάρκεια της οδήγησης και μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω για τη διάκριση ασφαλών και μη ασφαλών προτύπων οδήγησης.
- Έξι διακριτά προφίλ οδήγησης είναι σε θέση να περιγράψουν τη συνολική συμπεριφορά οδήγησης που υιοθετεί κάποιος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες οδηγών σύμφωνα με τη μέση συμπεριφορά του κάθε οδηγού που προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο οδηγούσε σε όλες τις διαδρομές του. Στην πρώτη κατηγορία οι οδηγοί οδηγούν συνήθως με τυπικό τρόπο, ενώ στη δεύτερη κατηγορία οι οδηγοί εκτελούν έναν αριθμό μη ασφαλών ενεργειών οδήγησης ή οδηγούν με επιθετικό τρόπο στην πλειονότητα των ταξιδιών τους.

- Η προσέγγιση Actor-critic από την οικογένεια των αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύρεση της καλύτερης δυνατής ενέργειας οδήγησης για κάθε οδηγό με δεδομένο τον τρόπο που οδήγησε στην προηγούμενη διαδρομή του.
- Όταν ένας ελεγκτής παρέχει συστάσεις οδήγησης σε έναν στόλο οχημάτων, το προφίλ επιτάχυνσης ολόκληρου του στόλου εναρμονίζεται σε μια τιμή που είναι αρκετά κοντά στη συμπεριφορά, και συγκεκριμένα στην επιλογή επιτάχυνσης, ενός τυπικού - ασφαλούς οδηγού.
- Η εφαρμογή ενός συστήματος εξατομικευμένων συστάσεων στο οδικό δίκτυο μιας πόλης δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στις συνθήκες κυκλοφορίας.
- Όταν κάθε οδηγός βελτιώνει τη δική του συμπεριφορά, η οδική ασφάλεια στο δίκτυο ενισχύεται. Συγκεκριμένα, οι κρίσιμες εμπλοκές μεταξύ οχημάτων μειώνονται σημαντικά μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος.
- Η στάθμη των εκπομπών για όλα τα διαφορετικά είδη ατμοσφαιρικών ρύπων μειώνεται, γεγονός που δείχνει ότι η εναρμόνιση των επιταχύνσεων για το σύνολο της κυκλοφορίας μπορεί να έχει σημαντική θετική επιρροή στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιδείνωση της κυκλοφορίας μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή εάν ληφθεί υπόψη η αντιστάθμιση μέσω των πλεονεκτημάτων από την υιοθέτηση ομαλότερης συμπεριφοράς οδήγησης στην οδική ασφάλεια και τις εκπομπές ρύπων. Για το σκοπό αυτό, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι ερευνητές δεν θα πρέπει να παραμελούν τις πραγματικές επιπτώσεις σε όλες τις διαστάσεις του δικτύου όταν σχεδιάζουν στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας και εφαρμόζουν ήπιες και σκληρές πολιτικές (soft and hard policy measures).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συνεισφέρει σημαντικά σε πέντε τομείς:

1. Κάνει χρήση ενός καινοτόμου συνόλου δεδομένων πραγματικής οδήγησης. Ένας σημαντικά μεγάλος όγκος δεδομένων με υψηλή χρονική ανάλυση από πραγματική οδήγηση ήταν διαθέσιμος, εμπλουτισμένος με ποικίλους παράγοντες που περιγράφουν τη συμπεριφορά οδήγησης, το περιβάλλον και άλλα εξωτερικά χαρακτηριστικά για κάθε διαδρομή.
2. Προτείνει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την εξαγωγή προφίλ οδήγησης απευθείας από τα δεδομένα, τα οποία περιγράφουν όλο το φάσμα της συμπεριφοράς οδήγησης. Για το σκοπό αυτό, ακολουθείται μια προσέγγιση με βάση τα δεδομένα (data driven approach) για την ομαδοποίηση των κρίσιμων προφίλ οδήγησης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, αξιοποιώντας την ομαδοποίηση k-means ως το καταλληλότερο εργαλείο.
3. Αναπτύσσει έναν αλγόριθμο ενισχυτικής μάθησης για την επίλυση ενός πραγματικού προβλήματος, αυτού της υποβοήθησης της οδήγησης. Ένας αλγόριθμος Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο εργαλείο για την εκμάθηση της βέλτιστης πολιτικής και την πρόταση της κατάλληλης ενέργειας που οδηγεί στην καλύτερη δυνατή συμπεριφορά οδήγησης για κάθε μεμονωμένο οδηγό.
4. Προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία είναι ικανή να αναγνωρίζει τις ατομικές προτιμήσεις οδήγησης και να παράγει εξατομικευμένες ενέργειες οδήγησης σε



κάθε οδηγό. Συγκεκριμένα, υλοποιείται ένα περιεκτικό μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο ενσωματώνει εργαλεία και μεθόδους που πρώτα αναγνωρίζουν τη συμπεριφορά οδήγησης κάθε χρήστη, στη συνέχεια αντιστοιχίζουν κάθε χρήστη στην κατάλληλη έκδοση του μοντέλου RL με βάση τη συνολική συμπεριφορά του και τέλος παράγουν εξατομικευμένες ενέργειες οδήγησης που μετριάζουν την επιθετικότητα και την επικινδυνότητα της οδήγησης.

5. Αξιολογεί τις επιπτώσεις μεγάλης κλίμακας από την εφαρμογή ενός εξατομικευμένου συστήματος συστάσεων οδήγησης σε τρεις τομείς ενδιαφέροντος του δικτύου με τη χρήση συγκεκριμένων δεικτών απόδοσης (KPIs), και συγκεκριμένα στην κυκλοφορία, την ασφάλεια και τις εκπομπές ρύπων. Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του προτεινόμενου συστήματος συστάσεων πραγματοποιείται με τη χρήση ενός ρεαλιστικού σεναρίου προσομοίωσης που αφορά το οδικό δίκτυο της Αθήνας και με την εφαρμογή μιας μεθοδολογίας «πριν και μετά» για τη σύγκριση των τιμών των KPIs πριν και μετά την εφαρμογή των συστάσεων οδήγησης.

### **Περιορισμοί έρευνας, επιπτώσεις και μελλοντική έρευνα**

Όπως κάθε άλλη προσέγγιση που βασίζεται σε δεδομένα, έτσι και αυτή η έρευνα στηρίχθηκε σε ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά τη δημιουργία και την προσαρμογή του προς έρευνα προβλήματος. Πρώτον, ορισμένοι περιορισμοί προέκυψαν από την ανάγκη να ταιριάξουν τα αποτελέσματα του μοντέλου RL με τους περιορισμούς της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, μία από τις δύο συνιστώσες της συνιστώμενης δράσης, η μέση επιτάχυνση κάθε οδηγού, δεν μπορούσε να εισαχθεί στο μοντέλο μικρο-προσομοίωσης, μιας και αυτό λαμβάνει ως παράμετρο μόνο την ικανότητα επιτάχυνσης των οχημάτων, και επομένως μόνο η μέγιστη επιτάχυνση υιοθετείται εντός της προσομοίωσης. Παρόλα αυτά, λόγω της φύσης του φαινομένου της οδήγησης, όλες οι παράμετροι που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ένας οδηγός επιλέγει να οδηγήσει κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους και, ως εκ τούτου, η παραμέληση της μέσης επιτάχυνσης δεν αναμενόταν να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πέρα από τον τρόπο με τον οποίο οδηγός ακολουθεί το προπορευόμενο όχημα, ο ίδιος κατά τη διάρκεια των ταξιδιών του λαμβάνει ενέργειες σχετικά με την αλλαγή λωρίδας, την παραχώρηση προτεραιότητας και άλλες αποφάσεις που αφορούν στην αλληλεπίδραση με άλλους χρήστες της οδού. Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα η έμφαση δόθηκε ρητά στη συμπεριφορά που σχετίζεται με το προπορευόμενο όχημα, καθώς ο απώτερος στόχος ήταν η δημιουργία ενός συστήματος με επίκεντρο τον χρήστη, το οποίο εξετάζει μόνο τον οδηγό και δεν απαιτεί καμία εξωτερική πληροφορία από το οδικό δίκτυο προκειμένου να εκπαιδευτεί και να εφαρμοστεί. Έτσι, οι προτεινόμενες ενέργειες αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο ο οδηγός κινείται στο δρόμο, δηλαδή στον τρόπο που επιλέγει να πατήσει το πεντάλ επιτάχυνσης, ο οποίος εξαρτάται μόνο από τις προσωπικές προτιμήσεις και αντιλήψεις του οδηγού. Η αγνόηση των πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ως

περιορισμός του συστήματος που αναπτύχθηκε, δεδομένου ότι η μετατροπή του σε ένα σύστημα με επίγνωση του περιβάλλοντος θα έδινε άλλες προοπτικές, τόσο στο ίδιο το σύστημα, όσο και στις δυνατότητες χρήσης του ως εργαλείο διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Μια προέκταση του παραπάνω περιορισμού είναι το γεγονός ότι, εφόσον το σύστημα αγνοεί την κατάσταση του περιβάλλοντος, δεν μπορεί να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο. Με άλλα λόγια, η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν είναι σε θέση να παράγει συστάσεις σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Αντ' αυτού, αναπτύσσεται ένα σύστημα που δε λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο το οποίο προτείνει αλλαγές στη συμπεριφορά οδήγησης σε μια ακολουθία ταξιδιών για κάθε οδηγό. Η ενσωμάτωση εξωτερικών πληροφοριών στο σύστημα θα επέτρεπε, τουλάχιστον εννοιολογικά, την παροχή συστάσεων οδήγησης σε πραγματικό χρόνο.

Τέλος, ένας άλλος περιορισμός, ο οποίος ισχύει για όλες τις προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα, είναι η γενίκευση και η δυνατότητα μεταφοράς του μοντέλου που αναπτύχθηκε και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι σαφές εάν το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου είναι αντιπροσωπευτικό του συνολικού πληθυσμού και επιπλέον εάν τα χαρακτηριστικά του είναι παρόμοια με εκείνα ενός διαφορετικού πληθυσμού. Στην παρούσα εργασία, για την ανάπτυξη των μοντέλων RL χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεδομένων οδήγησης μεγάλης κλίμακας, το οποίο περιλαμβάνει διαδρομές που πραγματοποιούνται από μεγάλο αριθμό οδηγών, ωστόσο δεν μπορεί να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα μπορούν να γενικευτούν και να μεταφερθούν χωρικά σε άλλο οδικό δίκτυο.

Εκτός από τους περιορισμούς που περιγράφονται παραπάνω, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής μπορούν να έχουν σημαντική επιρροή σε διάφορες πτυχές τόσο της έρευνας (R), της τεχνολογίας (T) όσο και της χάραξης πολιτικής (P). Η μελλοντική έρευνα μπορεί να ωφεληθεί και να εξελιχθεί σημαντικά εξετάζοντας περαιτέρω τα συμπεράσματα που εξάγονται σε σχέση με τα ακόλουθα σημεία:

- (R) Η επιθετικότητα δεν αποτελεί απαραίτητα μια μη ασφαλή συνήθεια οδήγησης και μπορεί να ανιχνευθεί, είτε ως μεμονωμένη συμπεριφορά είτε σε συνδυασμό με άλλες μη ασφαλείς συμπεριφορές.
- (R) Οι αλγόριθμοι ενισχυτικής μάθησης μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα του πραγματικού κόσμου και συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος DDPG μπορεί να μάθει πώς να λαμβάνει αποφάσεις όπως ο άνθρωπος σε πολύπλοκα και υψηλών διαστάσεων περιβάλλοντα.
- (R & T) Τα αναγνωρισμένα προφίλ οδήγησης μπορούν να παρέχουν σημαντική γνώση για την ανάπτυξη μοντέλων αυτόνομης οδήγησης που θα προσομοιάζει την ανθρώπινη οδήγηση.

Όσον αφορά στην τεχνολογία, το προτεινόμενο σύστημα συστάσεων μπορεί να ενσωματωθεί σε ήδη αναπτυγμένα λογισμικά, όπως εφαρμογές τηλεματικής και συστήματα ADAS μετατρέποντάς τα σε πιο φιλικά προς το χρήστη και να προσφέρει έναν πιο εξατομικευμένο τρόπο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων κατά την οδήγηση. Επιπλέον, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής για τον επανασχεδιασμό των μέτρων ήπιας πολιτικής και τον επαναπροσδιορισμό του ρόλου των οδηγών στις τρέχουσες στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε ότι η βελτίωση της συμπεριφοράς οδήγησης σε ατομικό επίπεδο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην οδική ασφάλεια και τις εκπομπές ρύπων, αλλά όχι αξιοσημείωτες επιπτώσεις στις συνθήκες κυκλοφορίας.

Τέλος, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι τα ευρήματα αυτής της εργασίας προσφέρουν σημαντικές κατευθύνσεις για τη μελλοντική έρευνα. Παρόλο που η παρούσα έρευνα συνεισφέρει σημαντικά στην ανάλυση της συμπεριφοράς οδήγησης, υπάρχουν ακόμη περιθώρια στη διερεύνηση της δυναμικής της και, συνεπώς, θα πρέπει να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα που θα περιλαμβάνει εμπλουτισμένα σύνολα δεδομένων οδήγησης με πρόσθετες συμπεριφορές κατά την οδήγηση (π.χ. εργασίες που προκαλούν απόσπαση της προσοχής εκτός από τη χρήση κινητού). Επιπλέον, η εξειδικευμένη διερεύνηση της δυναμικής εξέλιξης της συμπεριφοράς οδήγησης είναι επίσης πολύ σημαντική για να δοθούν απαντήσεις στο ερώτημα αν και πόσο γρήγορα μεταβάλλονται τα προφίλ οδήγησης με την πάροδο του χρόνου για κάθε οδηγό. Μια άλλη κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά στο σύστημα συστάσεων, και αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι παραγόμενες συστάσεις θα πρέπει να μεταβιβάζονται στον οδηγό ώστε να γίνονται κατανοητές και στη συνέχεια να γίνονται αποδεκτές από αυτόν. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των απαιτούμενων προδιαγραφών που θα επιτρέψουν τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει μέρος της μελλοντικής έρευνας. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο σημαντικότερος μελλοντικός ερευνητικός στόχος θα ήταν η τροποποίηση του προτεινόμενου συστήματος κατά τρόπο ώστε να αποκτήσει επίγνωση του περιβάλλοντος, δηλαδή το σύστημα να μπορεί να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον στο οποίο ο πράκτορας λαμβάνει αποφάσεις, και να έχει πλήρη εικόνα της δυναμικής και των μεταβολών του. Με αυτόν τον τρόπο, το προτεινόμενο σύστημα θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο και επιπλέον θα μπορούσε να λειτουργήσει ως εργαλείο διαχείρισης της κυκλοφορίας, το οποίο χρησιμοποιεί τη συμπεριφορά των οδηγών ως βασική δύναμη ενίσχυσης της αποδοτικότητας της κυκλοφορίας.